



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII – ARARUNA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL**

RODOLFO LUÍS BATISTA

**ESTUDO FÍSICO-MECÂNICO DE CONCRETO COM ADIÇÃO MINERAL DE
METACULIM**

ARARUNA – PB

2021

RODOLFO LUÍS BATISTA

**ESTUDO FÍSICO-MECÂNICO DE CONCRETO COM ADIÇÃO MINERAL DE
METACAULIM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Materiais de Construção.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Baracuy da Cunha Campos.

ARARUNA – PB

2021

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

B333e Batista, Rodolfo Luis.
Estudo físico-mecânico de concreto com adição mineral de metacaulim [manuscrito] / Rodolfo Luis Batista. - 2021.
57 p.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2021.
"Orientação : Prof. Dr. Daniel Baracuy da Cunha Campos, Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

1. Concreto. 2. Análise de estrutura. 3. Material de construção. I. Título

21. ed. CDD 624.183 4

RODOLFO LUÍS BATISTA

ESTUDO FÍSICO-MECÂNICO DE CONCRETO COM ADIÇÃO MINERAL DE
METACALIM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Estadual da
Paraíba, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Materiais de
Construção.

Aprovado em: 13/10/2021.

BANCA EXAMINADORA

Daniel Baracuy da Cunha Campos

Prof. Dr. Daniel Baracuy da Cunha Campos (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro

Prof. Dra. Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Leonardo Medeiros da Costa

Prof. Me. Leonardo Medeiros da Costa
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

A minha avó Ilzete, pelo cuidado, amor e
cainho, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por oportunidades que tive durante toda minha vida, obstáculos superados e bênçãos recebidas, e não menos importante, a oportunidade de agradecer a todas as pessoas citadas abaixo.

Aos meus avós, Ilzete e Zé Pachola, por quem fui criado e educado, para mim não são apenas avós, os considero como pais. Agradeço por todos os ensinamentos, o carinho, cuidado e amor que recebi durante, e dos quais tirei as principais virtudes para a formação do meu caráter. Essa conquista começou através de vocês.

A minha mãe, Maria do Socorro, pelo carinho, amor, dedicação, por me proporcionar todas as oportunidades e que nunca me deixou faltar nada. Saiba que não tenho palavras para descrever toda a gratidão que tenho por você. Ao seu Marido Cesário, que além de ser um bom padrasto para mim é um grande amigo, sempre me aconselha, desempenha o papel de um pai, e por isso sei que posso contar sempre.

Aos meus primos, Glauber e Laisianne, os quais tenho como irmãos. Obrigado por todo o carinho e amor de sempre, são exemplos de pessoas e saibam que são um espelho para mim. Serei eternamente grato a vocês.

Ao meu Tio Francisco, que sempre me tratou com grande carinho e se importou com minha educação. Obrigado por todo o amor que sempre recebi.

Aos meus Tios Salvan e em especial Maria de Lourdes, a qual chamo carinhosamente de “Titia”, é outra mãe que tenho e um exemplo de mulher, sempre preocupou-se com minha educação e nunca me deixou faltar nada, é o porto seguro da nossa família. Sou muito grato por todo o amor e carinho recebido.

A minha namorada, Letícia, que acredito ter vivido o curso tão intensamente quanto eu, pois sempre foi o meu suporte e porto seguro para desabafar e orientar em muitas de minhas tomadas de decisões. Obrigado por ter que aguentar todo o estresse e retribuir com atenção e carinho.

Aos meus avós paternos, Conceição e Manoel, e meu Tio Evandro, a quem sou muito grato, por todo o carinho e apoio para com a minha educação.

Ao meu pai, Antônio Marcos, por todo o carinho e amor, por ser esse exemplo de humildade, e por possuir o coração tão generoso para com os outros. Sinto orgulho ao ser comparado como ele.

A minha Madrinha Diana e prima Silvinha, pelo carinho e amor, que sempre me incentivaram para com os estudos, pelos puxões de orelha necessários, sempre me aconselharam para o bem.

Ao meu orientador, Daniel, a quem sou muito grato por me aceitar como orientando e por todo o apoio e empenho na pesquisa, sempre disponível para explicação de dúvidas, pelo conhecimento transmitido e sugestões que contribuíram para o êxito do trabalho. Aprendi muito com ele e o admiro como profissional.

Agradeço a todo o corpo docente da UEPB-Campus VIII, pelo ensinamento durante o período de graduação, em especial aos professores Leonardo Medeiros e Maria Adriana, que se disponibilizaram para compor a minha banca.

Aos técnicos, Divaldo e Kaká, por sempre estarem aptos a ajudar durante a realização dos ensaios para a pesquisa.

Aos amigos que fiz durante o período de graduação, em especial Diego, Emanuelle, Rayan, Remerson e Thaísa, obrigado por todos os momentos vividos, entre os alegres e tristes, momentos de estudo e descontração, não poderia escolher outras pessoas para compartilhar todas essas experiências. E prima Julianna, que residia na cidade de Araruna e cursava Odontologia, era a minha família longe de casa e a quem sou grato pela amizade, carinho e cuidado que sempre teve comigo.

Ao meu amigo e companheiro de curso, Jean Michel, fomos colegas de Ensino Fundamental e Médio, e ao iniciar a vida acadêmica no mesmo campus, fez com que nos aproximássemos ainda mais e se tornou um parceiro para todas as horas.

A todos os meus amigos de infância, os quais não posso citar, pois são muitos. Agradeço por todos os momentos vividos e por nossa amizade que permanece a mesma, desde tanto tempo que nem lembro mais. Enfim, agradeço a todos que contribuíram diretamente ou indiretamente nessa conquista e em toda a minha trajetória.

*“Eu vou chegar, pedir, agradecer
Pois a vitória de um homem
Às vezes se esconde
Num gesto forte que só ele pode ver”*

Marcelo Falcão

RESUMO

O ritmo frenético da construção civil e os curtos prazos para a conclusão das obras fazem com que muitas etapas construtivas sejam aceleradas, propiciando manifestações patológicas que o desempenho da estrutura ou a utilização, por parte de quem a habita. A introdução de adições minerais, como o Metacaulim no concreto, propicia o melhoramento de propriedades, como uma melhor durabilidade, aumento da resistência a flexão e compressão, resistência a sulfatos, melhor acabamento e redução de poros, assim, diminuindo a permeabilidade. O objetivo da pesquisa foi analisar o concreto com a substituição parcial do cimento por Metacaulim, nas porcentagens de 10%, 20% e 30%, comparando com o concreto de referência, objetivando melhores resultados quanto a resistência média à compressão, menor absorção de água e maior resistência a ação de carbonatação natural. Para a resistência a compressão, os valores obtidos foram de $24,36 \pm 1,06$ MPa, $27,86 \pm 0,47$ MPa, $30,30 \pm 0,55$ MPa e $28,48 \pm 0,52$ MPa, para o concreto de referência, e com a adição de Metacaulim de 10%, 20% e 30%, respectivamente. Na absorção de água os resultados obtidos foram de $1,187$ g/cm², $0,836$ g/cm², $0,824$ g/cm² e $0,472$ g/cm² para o concreto de referência, e com a adição de 10%, 20% e 30%, respectivamente. De acordo com os resultados obtidos, observou-se que com a introdução da adição de Metacaulim no concreto, em relação à resistência compressão, aumentou a mesma, e a absorção de água, reduziu, comparado ao concreto de referência. Quanto a profundidade de carbonatação medida, os resultados pouco variaram. Porém, percebeu-se que provavelmente, com um tempo de exposição maior, o Metacaulim proporcione uma maior defesa contra o processo de carbonatação.

Palavras-chave: Compressão. Resistência à compressão. Absorção. Carbonatação.

ABSTRACT

The frenetic pace of civil construction and the short deadlines for completion of the works mean that many construction steps are accelerated, providing pathological manifestations that the performance of the structure or use by those who inhabit it. The introduction of mineral additions, such as Metakaolin in concrete, provides the improvement of properties, like better durability, increased flexural and compressive strength, resistance to sulfates, better finish and pore reduction, thus decreasing permeability. The objective of the research was to analyze the concrete with the partial replacement of cement by Metakaolim, in the percentages of 10%, 20% and 30%, comparing with the reference concrete, aiming at better results in terms of medium resistance to compression, less water absorption and greater resistance to the action of natural carbonation. For compressive strength, the values obtained were 24.36 ± 1.06 MPa, 27.86 ± 0.47 MPa, 30.30 ± 0.55 MPa and 28.48 ± 0.52 MPa, for the reference concrete, and with the addition of Metakaolin of 10%, 20% and 30%, respectively. In water absorption, the results obtained were 1.187 g/cm², 0.836 g/cm², 0.824 g/cm² and 0.472 g/cm² for the reference concrete, and with the addition of 10%, 20% and 30%, respectively. According to the results obtained, it was observed that with the introduction of the addition of Metakaolin in the concrete, in relation to the compressive strength, it increased, and the water absorption, reduced, compared to the reference concrete. As for the measured carbonation depth, the results did not vary much. However, it was noticed that, probably, with a longer exposure time, Metakaolim provides a greater defense against the carbonation process.

Keywords: Compression. Compressive strength. Absorption. Carbonation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de etapas da pesquisa -----	17
Figura 2 - (a) Parte da frente do saco de Metacaulim utilizado na pesquisa, (b) Parte detrás com especificações do Metacaulim utilizado na pesquisa-----	19
Figura 3 - Gráfico Retido Acumulado (%) vs Abertura das Peneiras (mm), da Composição Granulométrica do Agregado Miúdo-----	27
Figura 4 - Gráfico Retido Acumulado (%) vs Abertura das Peneiras (mm), da Composição Granulométrica do Agregado Graúdo-----	29
Figura 5 - Gráfico para determinação da relação água/cimento em função da resistência requerida do concreto aos 28 dias de cura-----	30
Figura 6 - Gráfico da altura (cm) do abatimento em função da quantidade (%) de substituição do Metacaulim -----	33
Figura 7 - (a) Medição de abatimento do concreto para a mistura T-SP, (b) Medição de abatimento do concreto para a mistura T-MC ₂₀ , (c) Medição de abatimento do concreto para a mistura T-MC ₃₀ -----	33
Figura 8 - Corpos de prova no processo de cura do concreto -----	34
Figura 9 - (a) Corpo de prova posicionado na prensa para ser comprimido, (b) Corpo de prova rompido após o ensaio de compressão -----	34
Figura 10 - Gráfico Resistência a Compressão (MPa) vs Substituição em Metacaulim (%), para o tempo de cura de 7 e 28 dias -----	36
Figura 11 - (a) Amostras secas em estufa após 24 horas, (b) Aferição do peso da amostra seca após esfriar a temperatura ambiente, (c) Amostras posicionadas sobre uma lâmina de 5 mm de água, (d) Aferição da massa da amostra após absorver a água -----	37
Figura 12 - (a) Gráfico de barras da quantidade de água absorvida pelas amostras ao final do ensaio, para a idade de 7 dias de cura, (b) Gráfico de barras da quantidade de água absorvida pelas amostras ao final do ensaio, para a idade de 28 dias de cura-----	39
Figura 13 - (a) Gráfico da Absorção de água (g/cm ²) vs Tempo de ensaio (h), para o tempo de cura de 7 dias, (b) Gráfico da Absorção de água (g/cm ²) vs Tempo de ensaio (h), para o tempo de cura de 28 dias-----	40
Figura 14 - Altura de ascensão capilar das amostras -----	41
Figura 15 - Corpos de prova expostos ao ambiente externo-----	42
Figura 16 - (a) Corpos de prova antes da aplicação da solução de fenolftaleína 1%, (b) Corpos de prova após da aplicação da solução de fenolftaleína 1%-----	42

Figura 17 - Medição da Profundidade de Carbonatação para os corpos de prova ----- 43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resultados das resistências à compressão das amostras	49
Quadro 2 - Peso seco das amostras com idade de cura de 7 dias	49
Quadro 3 - Peso absorvido das amostras com idade de cura de 7 dias	49
Quadro 4 - Peso seco das amostras com idade de cura de 28 dias	50
Quadro 5 - Peso absorvido das amostras com idade de cura de 28 dias	50
Quadro 6 – Medições das profundidades de carbonatação das amostras.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características Químicas e Físicas do cimento CP II - E 32 RS -----	18
Tabela 2 - Valores Médios das Análises Físico-química do Metacaulim-----	18
Tabela 3 - Valores médios da análise química -----	18
Tabela 4 - Características dos materiais utilizados na confecção do traço -----	21
Tabela 5 - Quantitativo dos corpos de prova utilizados para o desenvolvimento da pesquisa	22
Tabela 6 - Quantitativos dos corpos de prova para a realização do ensaio de Compressão Simples-----	23
Tabela 7 - Quantitativos dos corpos de prova para a realização do ensaio de Absorção de Água -----	24
Tabela 8 - Quantitativos dos corpos de prova para a realização do ensaio de Profundidade de Carbonatação-----	25
Tabela 9 - Teor de umidade (%) das três amostras analisadas -----	26
Tabela 10 - Composição Granulométrica do Agregado Miúdo -----	26
Tabela 11 - Classificação da areia de acordo com o módulo de finura -----	27
Tabela 12 - Composição Granulométrica do Agregado Graúdo -----	28
Tabela 13 – Classificação do tipo de brita conforme o diâmetro -----	28
Tabela 14 - Consumo de água (l/m^3) -----	30
Tabela 15 - Volume compactado seco de agregado graúdo (m^3/m^3) -----	31
Tabela 16 - Traços do concreto em proporção de cimento -----	31
Tabela 17 - Resultados da altura (cm) do abatimento do tronco de cone-----	32
Tabela 18 - Resistência Média a Compressão das amostras analisadas-----	35
Tabela 19 - Resultados da absorção de água por capilaridade para os corpos de prova com tempo de cura de 7 dias e 28 dias-----	38
Tabela 20 - Altura de Ascensão Capilar dos Corpos de Prova-----	40
Tabela 21 - Profundidade de Carbonatação dos Corpos de Prova -----	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CP-SP	Corpo de Prova Simples
CP-MC₁₀	Corpo de Prova com Substituição de 10% em Metacaulim
CP-MC₂₀	Corpo de Prova com Substituição de 20% em Metacaulim
CP-MC₃₀	Corpo de Prova com Substituição de 30% em Metacaulim
f_{c,m}	Resistência Média à Compressão do Concreto
f_{ck}	Resistência à Compressão Característica do Concreto
f_{c,28}	Resistência à Compressão do Concreto estimada aos 28 dias
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
T-SP	Dosagem do Concreto sem Substituição em Metacaulim
T-MC₁₀	Dosagem do Concreto com Substituição de 10% em Metacaulim
T-MC₂₀	Dosagem do Concreto com Substituição de 20% em Metacaulim
T-MC₃₀	Dosagem do Concreto com Substituição de 30% em Metacaulim

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivo geral	11
1.2	Objetivos específicos	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Concreto	12
2.2	Aglomerante	12
<i>2.2.1</i>	<i>Cimento Portland</i>	13
2.3	Metacaulim	13
2.4	Agregados	14
2.5	Água de Amassamento	15
3	METODOLOGIA	17
3.1	Materiais Utilizados	17
<i>3.1.1</i>	<i>Cimento</i>	17
<i>3.1.2</i>	<i>Metacaulim</i>	18
<i>3.1.3</i>	<i>Agregados</i>	19
<i>3.1.4</i>	<i>Água de Amassamento</i>	19
3.2	Determinação do Teor de Umidade	19
3.3	Composição Granulométrica	20
3.4	Dosagem do Concreto	21
3.5	Moldagem dos Corpos de Prova	21
3.6	Abatimento do Tronco de cone (Slump test)	22
3.7	Ensaio de Resistência a Compressão Simples	23
3.8	Absorção de Água por Capilaridade	23
3.9	Profundidade de Carbonatação	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
4.1	Teor de Umidade	26

4.2	Determinação da Composição Granulométrica dos Agregados	26
4.3	Dosagem do Concreto	29
4.4	Abatimento do Tronco de Cone	31
4.5	Resistência à Compressão Simples	34
4.6	Absorção de água por Capilaridade.....	36
4.7	Determinação da Profundidade de Carbonatação.....	41
5	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	46
	ANEXO A – QUADROS COM RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS .	49

1 INTRODUÇÃO

Com um elevado ritmo de crescimento, a construção civil está diretamente ligada a economia e desenvolvimento nacional, sendo um dos principais setores mais produtivos do País, em que as empresas do ramo proporcionam uma grande quantidade de empregos e geração de renda (VIEIRA; NOGUEIRA, 2018).

Segundo Brisolara (2014), com o aumento da construção civil, aumenta-se a demanda e consigo impasses construtivos surgirão no processo de obra, dificultando o andamento e atrasando a conclusão da mesma, tendo como manifestações patológicas mais comuns, como rachadura e infiltrações.

A resistência mecânica do concreto está diretamente ligada a sua baixa porosidade interna, logo, se a porosidade é baixa ocorre o aumento da resistência no concreto, pois a ligação entre os agregados e a matriz estarão mais homogêneas, propiciando menos concentrações de tensões. (DE ASSIS, et al., 2007), sendo assim, com o aumento da porosidade na estrutura interna de concreto mais o mesmo estará sujeito a manifestações como a carbonatação e infiltrações, bem como a queda da resistência a compressão do concreto e diminuição da sua durabilidade.

Agregados miúdos e graúdos quando possuem formas irregulares e são empregados na fabricação do concreto acabam por prejudicar nas propriedades do mesmo, provocando o aparecimento de poros em sua estrutura interna. O concreto com elevada porosidade influencia negativamente, como a redução da resistência a compressão, e aumento da permeabilidade, sendo um fator preponderante para a ocorrência de infiltrações nas estruturas (Silva et al, 2020).

A não impermeabilização de peças estruturais é a principal causa de infiltrações, mas também o que pode causar infiltrações é a entrada de água da chuva devido à instalação inadequada de esquadrias. Além disso, a execução inadequada de vigas, pilares e lajes, rachaduras em tubulações aumentam a chance de ocorrência de infiltrações nas edificações. (COELHO, 2013)

De acordo com a ABNT NBR 15894-1 (2010), a utilização de adições minerais ou aditivos químicos, físicos ou físico-químicos nas misturas de concreto, como o Metacaulim nas misturas de concreto visa trazer vantagens como o aumento da resistência mecânica, da resistência ao ataque químico, melhor trabalhabilidade, diminuição da retração e infiltração. Levando-se em consideração estas propriedades citadas, este trabalho sugere a utilização do Metacaulim como adição mineral, que desempenham um papel no tampão capilar, permitindo a reposição da água dentro da microestrutura do material endurecido, o que dificulta a absorção

de água, proporciona um ganho de resistência mecânica e maior durabilidade quanto a ocorrência de processos físico-mecânicos.

1.1 Objetivo geral

Analisar as propriedades Físico-Mecânicas de amostras de concreto com substituição parcial do cimento por Metacaulim.

1.2 Objetivos específicos

- Definir os traços de concreto com a substituição do aglomerante (cimento) por diferentes porcentagens de Metacaulim;
- Caracterizar as amostras de concreto com e sem adição de Metacaulim, através do ensaio de resistência à compressão;
- Analisar as amostras de concreto com e sem adição de Metacaulim quanto ao ensaio de Absorção de Água por Capilaridade;
- Analisar o índice de carbonatação das amostras com e sem adição de Metacaulim, através do ensaio de profundidade de carbonatação com Fenolftaleína.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Concreto

O concreto é um material composto por uma mistura aglomerante (cimento), agregados miúdo e graúdo e água, podendo conter ou não adições minerais e ou aditivos físicos, químicos ou físico-químicos. Segundo Ambrozewicz (2012), os fatores que influenciam as propriedades do concreto são a qualidade dos materiais que o compõem, o processo de dosagem e fabricação do mesmo.

Peurifoy et al (2015), explica que para a satisfação tanto do construtor quanto o projetista, o concreto deve apresentar um número mínimo de variações quanto aos tipos de cimentos e agregados utilizados em sua produção, o concreto deve ser dosado, misturado e transportado de forma correta, para que venha a possuir um bom adensamento, facilitando a trabalhabilidade e evitando a segregação dos agregados, para que seja alcançado o acabamento apropriado.

2.2 Aglomerante

Segundo Ribeiro et al (2006), os aglomerantes são materiais que se misturados com água, formam uma pasta usada para fixar ou unir outros materiais na construção, como os agregados, originando às argamassas e concretos.

Existem vários termos que podem definir uma mistura de adesivos e materiais específicos, entre os mais famosos podemos citar:

- PASTA = MISTURA DE AGLOMERANTE + ÁGUA
- ARGAMASSA = PASTA + AGREGADO MÍUDO
- CONCRETO = ARGAMASSA + AGREGADO GRAÚDO

Os aglomerantes podem ser divididos em diferentes categorias de acordo com sua composição e mecanismo de endurecimento. Os aglomerantes, aglutinantes ou ligantes são materiais geralmente pulverulentos, que têm a finalidade de aglutinação de outros materiais (agregados), podendo ser hidráulicos, aéreos ou poliméricos. Os hidráulicos têm a característica de endurecer ao reagir apenas com a água e, após seu endurecimento, consegue resistência mecânica satisfatória quando submetido novamente à ação da água, como o cimento, já os aéreos endurecem pela ação química do CO₂ presente na atmosfera, sendo necessária a presença de água para a formação da pasta, e que após seu endurecimento não adquire resistência à água,

como por exemplo a adição de cal aérea para obtenção de plasticidade adicional na argamassa. Os Poliméricos são os aglomerantes que têm reação devido a polimerização de uma matriz, é o que ocorre na adição de polímero acrílico para otimizar a adesividade, por exemplo (PETRUCCI, 2007).

2.2.1 Cimento Portland

Segundo Gobbo (2009) o cimento Portland pode ser constituído apenas por clínquer e a substância que regule o tempo de pega, sendo o mesmo denominado de Cimento Portland Comum, porém, pode-se adicionar adições no processo de produção do cimento. O mesmo ainda relata que para escolher o tipo de cimento que será empregado na obra, deve-se conhecer as proporções do mesmo para que se obtenha a finalidade que deseja.

O cimento Portland é um pó fino com propriedades de ligação, coesão ou ligação que endurece sob a água. Uma vez endurecido, o cimento Portland não se decomporá mais, mesmo se for exposto à água novamente. Cimento Portland, misturado com água e outros materiais de construção, como areia, cascalho, pedra, resulta em concreto e argamassa sendo usados para construir edifícios, residências, barragens e pontes. (LACERDA,2005)

De acordo com a pesquisa de Neville (2016), a composição do cimento inclui principalmente quatro elementos, que são o silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcio (C_4AF), e em quantidades menores, como: óxido de magnésio (MgO), óxido de manganês (Mn_2O_3), dióxido de titânio (TiO_2), óxido de potássio (K_2O) e óxido de sódio (Na_2O). (NEVILLE, 2016)

2.3 Metacaulim

A palavra caulim vem do chinês "caulim", que significa montanha alta, e se refere à localização na montanha Raofu, no norte da China. O prefixo meta de origem grega é usado para indicar mudanças, que indicam o que aconteceu após o estado inicial. No caso do metacaulim, a alteração mencionada é a desidroxilação das moléculas de caulim a partir da calcinação (MEDINA, 2011).

O caulim é uma argila composta pelo argilomineral ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) ou argila com minerais do grupo caulinita que após o processamento se dividem em dois tipos, o caulim residual ou primário e caulim sedimentar ou secundário, o seu primeiro é formado por intemperismo nas rochas, como ocorre na maioria das jazidas de caulim de São Paulo, Minas

Gerais, Rio de Janeiro, Paraíba e Rio Grande do Norte, o seu segundo tipo foi transportado do local de origem e depositado em outro local sob a ação do vento e da água (SANTOS, 1992).

O metacaulim é um material pozolânico amorfo, geralmente proveniente de caulim calcinado e caulim entre 600°C e 850°C, principalmente silicato de alumínio hidratado ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). Após a calcinação, o composto perde os íons hidróxidos da estrutura e se transforma em metacaulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), que é composta por uma estrutura amorfa e possui maior finura (Munhoz et al., 2010).

Para a obtenção do Metacaulim, Da Rocha (2005) comentou que a produção é realizada em várias etapas, tais como: exploração do caulim, tratamento e eliminação de impurezas, secagem, calcinação, moagem e micronização. As propriedades e a qualidade do metacaulim são afetadas pelas condições de calcinação, como temperatura, equipamento e tempo (DA SILVA et al, 2013).

De acordo com Gardolinski et al (2003), o Metacaulim de reatividade alta é obtido a partir da calcinação de caulinita de alta pureza por meio de um processo controlado, em que sua constituição será basicamente por sílicato de alumínio hidratado.

Segundo Medina (2011), o material é classificado como pozolânico a partir da sua atividade pozolânica, representando as reações com o hidróxido de cálcio. Logo, a atividade pozolânica relaciona-se com a composição mineralógica.

O metacaulim é um material em sua maioria amorfo e na presença do cimento Portland forma compostos mais resistentes, tendo uma grande influência na eficiência do Metacaulim. O efeito pozolânico é maior caso o mesmo possua uma boa qualidade e as partículas sejam mais finas, fazendo com que ocorra a formação de hidrogarnetos, stratlingita, gelenita. (JOHN et al, 2004)

Devido ao uso crescente de Metacaulim em adições para produção concreto e produtos à base de cimento Portland, seu grau de industrialização continua aumentando, mantendo a homogeneidade e atendendo aos parâmetros e especificações exigidos. No Brasil, desde 2010, o metacaulim é regulamentado pela NBR 15894-1 - 2010: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta.

2.4 Agregados

Mehta e Monteiro (2014) classificam os agregados de acordo com o tamanho de partículas e qualidade específica, o termo agregado graúdo é utilizado para se referir a 85% das

partículas retidas da peneira nº 4, é definido pela NBR NM ISO-2395 que partículas menores que 4,75 mm são chamadas de agregados finos e ficam retidas na peneira inferior.

A terminologia dos agregados é definida de acordo com a norma da ABNT NBR 9935: 2011, esta norma define os termos relativos a agregados mais comumente empregados em concreto e argamassa. Segundo a mesma os agregados são classificados quanto à natureza, sendo eles:

- Origem natural ou agregado natural: agregado pétreo granular encontrado na natureza, que pode passar por processos de lavagem e britagem;
- Artificial ou industrializado: é o agregado que passa pelo processo industrial, em que ocorre alteração físico-química ou mineralógica para que seja empregado na construção civil;
- Reciclado: são os agregados oriundos da reciclagem de rejeitos demolidos da construção civil e que passam por um processo de recuperação, podendo também ser subprodutos de industrialização.

De acordo com a pesquisa de La Serna e Rezende (2007), agregados são materiais granulares sem forma e volume definidos, com características e tamanhos específicos, tais como: brita, argila e areia natural. Os mesmos ainda dividem os agregados em duas categorias: agregados naturais encontrados na natureza (cascalho, areia) e agregados artificiais produzidos por meio de determinados processos industriais (cascalho, argila expandida, escória de alto-forno e areia artificial).

Para o processo de fabricação de concreto de qualidade, os agregados têm de serem granulares, possuir um bom índice de dureza, além de que devem ser resistentes à abrasão, em que geralmente causada é pelo atrito. Caso os agregados sejam frágeis e muito absolventes o concreto irá se deteriorar de forma mais rápida (PEURIFOY et al, 2015).

2.5 Água de Amassamento

De acordo com a ABNT NBR 15900-1: 2009, as especificações e requisitos para a água ser usada na fabricação do concreto, como o valor do pH da água de amassamento usada para misturar cimento e agregado para formar o concreto não pode ser inferior a 5,0 (água ácida), a mesma não deve apresentar cheiro ou cor escura que indique a presença de matéria orgânica, e o teor de sulfato não pode exceder 2.000 mg/L.

As reações de hidratação do cimento provocam o endurecimento do concreto, permitindo ligações entre os componentes do concreto e proporcionando plasticidade na

mistura, a água representa 20% do volume do concreto. Caso a água utilizada apresente substâncias nocivas e considerando que a quantidade de água no concreto é muito grande, as substâncias nocivas na água ultrapassam o nível estipulado pela norma, logo resultará em uma alteração do tempo de pega, e conseqüentemente a redução da resistência mecânica do concreto (CIMENTO.ORG, 2010).

A água de amassamento é fundamental para a união dos elementos (aglomerante, agregados miúdo e graúdo) na mistura do concreto. Segundo Helene e Andrade (2010), a água utilizada na produção do concreto desencadeia as reações de hidratação do aglomerante (cimento), formando uma microestrutura com resistência mecânica e durável. O mesmo ainda afirma que deve ser utilizada a quantidade de água para que as reações ocorram de forma integral, visto que a água em excesso facilitaria a ação de agentes agressivos devido a ocorrência de fissuração e retração no concreto.

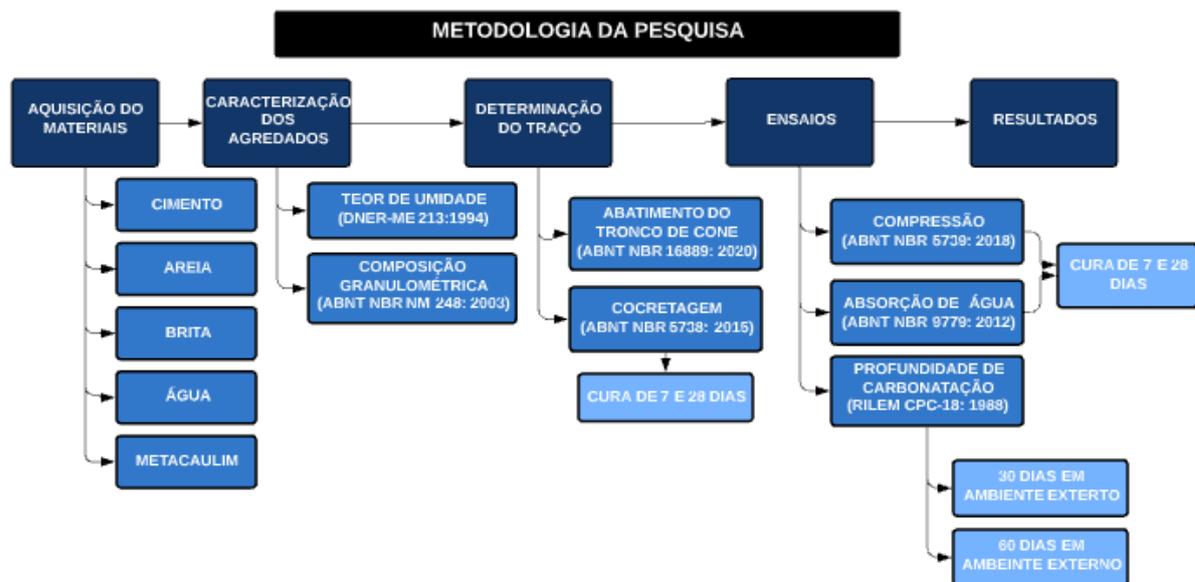
3 METODOLOGIA

Neste trabalho aplicou-se uma abordagem de estudo quantitativo e qualitativo, em que serão analisadas as características físicas e mecânicas das amostras de concreto sem e com a substituição parcial do Aglomerante (cimento) por Metacaulim, sendo caracterizada como uma pesquisa experimental e exploratória.

A pesquisa foi realizada nos Laboratórios de Materiais e de Estruturas da Universidade Estadual da Paraíba, no Campus VIII, localizado na cidade de Araruna-PB.

A Figura 1, representa o fluxograma das etapas de atividades e procedimentos para a realização da pesquisa.

Figura 1 - Fluxograma de etapas da pesquisa



Fonte: Autor (2021)

3.1 Materiais Utilizados

3.1.1 Cimento

O cimento usado para a produção do concreto foi o Cimento Portland CP II–E-32, foi adquirido no comércio local da Cidade de Araruna-PB. A Tabela 1, representa os valores

médios dos parâmetros físicos e químicos que indicam o índice de Qualidades do Cimento utilizado no desenvolvimento da pesquisa.

Tabela 1 - Características Químicas e Físicas do cimento CP II - E 32 RS

Composição Química	
Perda ao Fogo (%)	8,39 ± 0,11
RI (%)	1,92 ± 0,53
SO ₃ (%)	2,57 ± 0,06
CaO (%)	1,04 ± 0,34
MgO (%)	2,62 ± 0,11
Finura	
Massa Específica (g/cm ³)	3,03
Finura Blaine (cm ² /g)	4.534,51 ± 100,04
# 325 (%)	8,60 ± 0,71
# 200 (%)	1,20 ± 0,06

Fonte: Fabricante (2021).

3.1.2 Metacaulim

O Metacaulim de média reatividade utilizado como adição mineral na substituição parcial do cimento Portland, foi adquirido por meio da empresa Maia Macedo Impermeabilizantes Ltda, localizada na Cidade de João Pessoa-PB. As Tabelas 2 e 3 apresentam os valores médios das análises físico-químicas da adição mineral de Metacaulim.

Tabela 2 - Valores Médios das Análises Físico-química do Metacaulim

Retenção em peneira ASTM #200	1%
Finura Blaine	1.500 m ² /kg
Massa Específica	2.560kg/m ³
Massa Aparente	< 484 kg/m ³
Cor	Rosa
Índice de Atividade Pozolânica (mínimo) (Método Chappelle modificado - IPT)	750 mg Ca(OH) ₂ /g

Fonte: Fabricante (2021).

Tabela 3 - Valores médios da análise química

Porcentagem média por peso	Metacaulim
SiO ₂	58,50%
Al ₂ O ₃	32,60%
Fe ₂ O ₃ + TiO ₂	4,15%
Perda ao fogo (L.O.I.)	< 2%
Equivalente alcalino	< 0,25%

Fonte: Fabricante (2021).

A Figura 2, apresenta o saco de 20,00 kg de Metacaulim utilizado para o desenvolvimento da pesquisa.

Figura 2 - (a) Parte da frente do saco de Metacaulim utilizado na pesquisa, (b) Parte detrás com especificações do Metacaulim utilizado na pesquisa



Fonte: Autor (2021)

3.1.3 Agregados

Quanto aos agregados, foram utilizados a areia média e o agregado graúdo angular (pedra britada), ambos comercializados na cidade de Araruna – PB.

3.1.4 Água de Amassamento

A água de amassamento empregada na confecção do concreto foi obtida pelo próprio sistema de abastecimento do Campus VIII da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), como a mesma é potável, é adequada para o uso do concreto.

3.2 Determinação do Teor de Umidade

O teor de umidade foi determinado conforme as especificações da DNER – ME 213: 1994. O ensaio foi realizado em triplicata, em cada cadinho foi adicionado aproximadamente 10,00 g de areia e levados a estufa a 105 ± 5 °C, pelo tempo de 24 horas.

Inicialmente pesa-se as três amostras de areia úmida. Após as amostras serem submetidas a estufa, o conjunto é pesado novamente, obtendo a massa seca. Por fim, com diferença entre as massas determina-se a quantidade de água presente em cada amostra e para o valor do teor de umidade final, calcula-se a média das três das diferenças e o desvio padrão. A Equação 1 é utilizada para realizar o cálculo do teor de umidade presente na amostra.

$$h = \frac{m_{bu} - m_{bs}}{m_{bs} - m} \quad (1)$$

Em que,

h: teor de umidade (%);

m_{bu} : massa bruta úmida correspondente à massa do recipiente mais a amostra do material úmido (g);

m_{bs} : massa bruta seca correspondente à massa do recipiente mais a amostra do material seco (g);

m: massa do recipiente (g).

3.3 Composição Granulométrica

O ensaio de determinação da composição granulométrica foi realizado com base nas instruções da norma ABNT NBR NM 248:2003, em que inicialmente, as amostras são inseridas na estufa na temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24 horas. Ao fim do tempo, as porções são esfriadas a temperatura ambiente. As massas para a prática são de 1000g e 5000g, para os agregados miúdo e graúdo, respectivamente, com o agregado graúdo sendo lavado antes da secagem.

As peneiras utilizadas no ensaio de composição granulométrica para o agregado miúdo foram as de abertura (mm) 9,5; 6,3; 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3; e 0,15, já as peneiras utilizadas na determinação da composição granulométrica do agregado graúdo foram as de abertura (mm) 25; 19; 12,5; 9,5; 6,3; 4,8; 2,4; 1,2.

Após realizar o peneiramento e obter as frações dos agregados retidos em cada peneira, classificam-se os mesmos. Para o agregado miúdo, classifica-se o mesmo com relação ao módulo de finura, em que é obtido através do somatório das massas retidas acumuladas, exceto o fundo, divididas 100, de acordo com a Equação 2.

$$MF = \frac{\sum \% \text{MASSA RETIDA ACUMULADA}}{100} \quad (2)$$

Quanto ao agregado graúdo, classifica-se o mesmo quanto ao diâmetro máximo característico, em que o mesmo é obtido quando fração da malha da peneira é menor ou igual a 5%, da massa retida acumulada em porcentagem.

3.4 Dosagem do Concreto

A dosagem de concreto foi realizada de acordo com as diretrizes impostas pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP/ACI). Para a obtenção do traço, são necessárias características como módulo de finura e diâmetro máximo, para os agregados miúdos e graúdos, respectivamente, e as massas específicas, massas unitárias da areia, brita e cimento. Na Tabela 4, contém as massas específicas dos materiais utilizados para a produção do concreto.

Tabela 4 - Características dos materiais utilizados na confecção do traço

Massa específica do cimento (CP II -E)	3,06 kg/dm ³
Massa específica do Metacaulim	2,56 kg/dm ³
Massa específica da areia	2,63 kg/dm ³
Massa específica da brita	2,65 kg/dm ³

Fonte: Autor (2021)

A resistência estimada do concreto aos 28 dias de cura ($F_{c,28}$) foi calculada para uma resistência a compressão característica (F_{ck}) de 25 Mpa, logo, sendo a Classe C25.

3.5 Moldagem dos Corpos de Prova

A moldagem dos corpos de prova foi realizada de acordo com a ABNT NBR 5738:2015, com moldes cilíndricos de aço com base de 10 cm de diâmetro e altura de 20 cm.

Após realizada a dosagem dos materiais e o preparo da mistura, realiza-se a concretagem dos corpos-de-prova, os moldes são umedecidos internamente por um desmoldante líquido, para impedir a aderência do concreto com a face metálica e que o corpo-de-prova desenforme com facilidade.

O preenchimento dos moldes com concreto é feito em duas camadas, que com o auxílio de uma haste metálica, são desferidos 15 golpes, em cada camada, evitando que a mistura fique porosa e desuniforme. Após 24 horas de cura em laboratório, as amostras são desmoldadas e introduzidas em um tanque com água para o processo de cura do concreto, a fim de evitar o surgimento de fissuras, que são causadas pelo efeito de retração, conforme a ABNT NBR 5739: 2018.

Quanto a quantidade de amostras, foram confeccionados um total de 70 (setenta) corpos-de-prova, dos quais incluem as amostras de referência e as amostras com substituição parcial do cimento por Metacaulim. Os percentuais de substituição de Cimento por Metacaulim são de 10%, 20% e 30%. A Tabela 5, apresenta a quantidade de corpos de prova necessários para a realização de cada ensaio.

Tabela 5 - Quantitativo dos corpos de prova utilizados para o desenvolvimento da pesquisa

Quantitativo de corpos de prova			
Amostras	Compressão	Profundidade de Carbonatação	Absorção de Água
CP-SP	6	4	6
CP-MC ₁₀	6	6	6
CP-MC ₂₀	6	6	6
CP-MC ₃₀	6	6	6
Total		70	

Fonte: Autor (2021)

3.6 Abatimento do Tronco de cone (Slump test)

O abatimento em tronco de cone (Slump test) foi realizado para verificar a trabalhabilidade e consistência nos quatro tipos de misturas, sendo a simples, sem a substituição de Metacaulim e com substituição nas porcentagens de 10%, 20% e 30%. Para a prática, seguiu-se as instruções da ABNT NBR 16889: 2020.

Inicialmente o molde e a placa são umedecidos, em seguida, são compactadas três camadas com o auxílio de uma haste de socamento, realizando 25 golpes por camada, logo retira-se o molde, mede-se o quanto o tronco de concreto diminuiu em relação ao molde.

Na pesquisa, foi fixado um abatimento de tronco de cone de 40 mm a 60 mm para o concreto de referência.

3.7 Ensaio de Resistência a Compressão Simples

O ensaio de resistência a compressão para os corpos de prova cilíndricos é realizado de acordo com as instruções contidas na ABNT NBR 5739: 2018. Análise é feita em triplicata, para as idades de 7 e 28 dias de cura submersa em água, das amostras de referência (CP-SP) e com a substituição de Metacaulim (CP-MC₁₀, CP-MC₂₀ e CP-MC₃₀).

Antes dos corpos de prova serem colocados na posição de ensaio na prensa, as faces das amostras são limpas e secas, em seguida programa-se a máquina para o diâmetro adequado do cilindro, que é de 10,00 cm.

A Tabela 6 apresenta o quantitativo de corpos de provas analisados no ensaio de compressão.

Tabela 6 - Quantitativos dos corpos de prova para a realização do ensaio de Compressão Simples

Quantitativo do Ensaio de Compressão		
Amostras	Idade de 7 dias de cura	Idade de 28 dias de cura
CP-SP	3	3
CP-MC ₁₀	3	3
CP-MC ₂₀	3	3
CP-MC ₃₀	3	3
Total	12	12

Fonte: Autor (2021)

3.8 Absorção de Água por Capilaridade

O experimento de absorção de água realizou-se conforme a ABNT NBR 9779: 2012, em que a água é absorvida por capilaridade, do concreto endurecido. A princípio, os corpos de prova após a cura são inseridos na estufa e secos a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24 horas. Após retirados da estufa as amostras esfriam a temperatura ambiente. As massas secas dos corpos de prova são anotadas, e assim os mesmos são posicionados em uma bandeja sobre um suporte, em que a água esteja na marca de 5 mm a face inferior.

As massas são aferidas nos tempos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, após o início do ensaio. Feito isso, calcula-se a absorção de água em g/cm², em função da razão do ganho de peso devido a absorção e a área da superfície do corpo de prova.

O cálculo da absorção de água por capilaridade é feito por meio da Equação 3, em que a mesma é calculada pelo peso de água absorvida, dividido pela área de seção transversal do corpo de prova que está em contato com a água (g/cm²).

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (3)$$

Em que,

C = absorção de água por capilaridade (g/cm²);

A = massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado (g);

B = massa do corpo de prova, assim que este atingir a temperatura de 23 ± 2 °C (g);

S = área de seção transversal (cm²).

Ao fim do ensaio, os corpos de prova são submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral, resignado pela ABNT NBR 7222: 2011, para medir a altura de ascensão capilar da amostra, ou seja, a altura de distribuição de água no seu interior.

O ensaio foi realizado em triplicada, para as amostras com idade de 7 e 28 dias de cura. A Tabela 7 apresenta o número de corpos de prova necessários para o desenvolvimento da prática.

Tabela 7 - Quantitativos dos corpos de prova para a realização do ensaio de Absorção de Água

Quantitativo do Ensaio de Absorção de Água		
Amostras	Idade de 7 dias de cura	Idade de 28 dias de cura
CP-SP	3	3
CP-MC ₁₀	3	3
CP-MC ₂₀	3	3
CP-MC ₃₀	3	3
Total	12	12

Fonte: Autor (2021)

3.9 Profundidade de Carbonatação

Os procedimentos para realização do ensaio foram de acordo com a RILEM CPC-18 (1988). As amostras são rompidas através do ensaio de tração por compressão diametral,

conforme a ABNT NBR 7222: 2011, para assim, seguir a aplicação da solução de fenolftaleína 1% diluída em álcool etílico (P.A). O ensaio foi realizado em triplicata, com as amostras expostas ao ambiente externo, pelo tempo de 30 e 60 dias, após as mesmas passarem por um período de 28 dias de cura submersa em água. A Tabela 8 apresenta as quantidades de amostras utilizadas na execução do ensaio qualitativo.

Tabela 8 - Quantitativos dos corpos de prova para a realização do ensaio de Profundidade de Carbonatação

Quantitativo do Ensaio de Profundidade de Carbonatação		
Amostras	30 dias de exposição	60 dias de exposição
CP-SP	2	2
CP-MC ₁₀	3	3
CP-MC ₂₀	3	3
CP-MC ₃₀	3	3
Total	11	11

Fonte: Autor (2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Teor de Umidade

A determinação do teor de umidade, é de fundamental importância para a correção do fator a/c da dosagem de concreto. A Tabela 9, apresenta os resultados obtidos a partir do ensaio de determinação do teor de umidade.

Tabela 9 - Teor de umidade (%) das três amostras analisadas

Umidade do Agregado Miúdo			
Amostra	Peso da Areia Úmida (g)	Peso Areia Seca (g)	Umidade (%)
1	10,06	10,04	0,199%
2	10,05	9,95	1,005%
3	10,05	10,00	0,500%

Fonte: Autor (2021)

Como a prática foi realizada em triplicata, o teor de umidade da areia foi de $0,568 \pm 0,00407\%$, em que a mesma foi descontada da quantidade de água de amassamento para a produção da mistura.

4.2 Determinação da Composição Granulométrica dos Agregados

O peneiramento das amostras foi realizado manualmente, assim como o processo de quarteamento, para tomar as amostras mais homogêneas. As massas foram de 1000,00 g e 5000,00 g, para os agregados miúdo e graúdo, respectivamente. Logo, o material retido em cada fração das peneiras foi pesado e aferido.

A Tabela 10, apresenta os resultados da análise granulométrica do agregado miúdo.

Tabela 10 - Composição Granulométrica do Agregado Miúdo

Análise Granulométrico do Agregado Miúdo					
Peneira (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)	Passante (g)	Passante (%)
9,5	0,00	0,00	0,00%	1000,10	100,00
6,3	0,00	0,00	0,00	1000,10	100,00
4,8	0,00	0,00	0,00	1000,10	100,00
2,4	55,00	5,50	5,50	945,10	94,50
1,2	238,00	23,80	29,30	707,10	70,70
0,6	332,00	33,20	62,49	375,10	37,51
0,3	274,50	27,45	89,94	100,60	10,06
0,15	80,30	8,03	97,97	20,30	2,03
0	20,00	2,00	99,97	-	-

Fonte: Autor (2021)

A classificação do agregado miúdo foi feita conforme os valores apresentados na Tabela 11, em que a mesma apresenta a classificação em intervalos de valores do módulo de finura calculados.

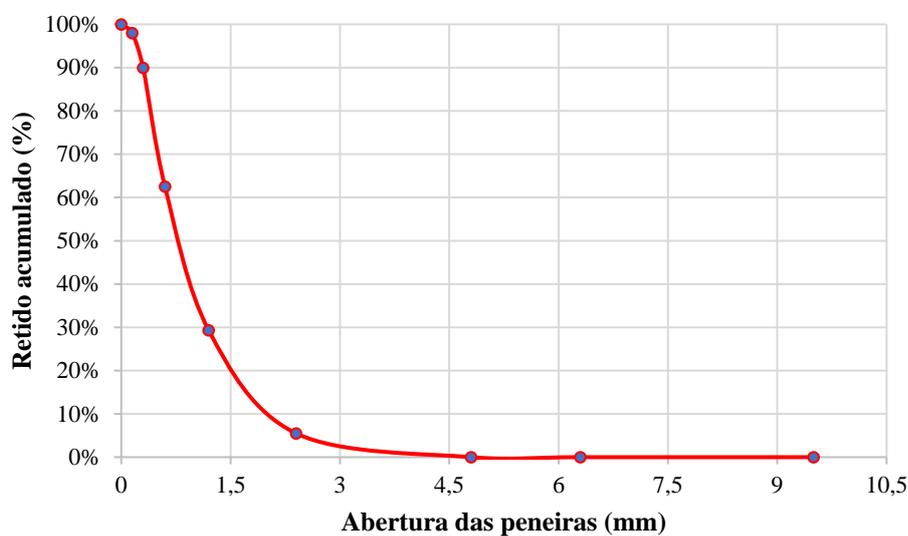
Tabela 11 - Classificação da areia de acordo com o módulo de finura

Tipo	Módulo de Finura (MF)
Grosso	$MF > 3,90$
Médio	$3,90 > MF > 2,40$
Fino	$MF < 2,40$

Fonte: Paulo Henrique Laporte Ambrozewicz (2012)

Para a areia, o módulo de finura possui o valor de 2,85, e de acordo com a Tabela 11, a mesma é classificada como areia média. A Figura 3 apresenta a curva granulométrica da areia obtida a partir do ensaio, dada pela porcentagem da massa retida acumulada em função da abertura das peneiras, em mm.

Figura 3 - Gráfico Retido Acumulado (%) vs Abertura das Peneiras (mm), da Composição Granulométrica do Agregado Miúdo



Fonte: Autor (2021)

Observando a Figura 3, com a curva granulométrica do agregado miúdo, percebe-se que a mesma não é uniforme, pois os grãos concentram-se em sua maioria nas aberturas (mm) de 0,3, 0,6 e 1,2, com porcentagens retidas (%) de aproximadamente 27,45%, 32,20% e 23,80%, respectivamente. De acordo com a ABNT NBR 7211: 2009, as mesmas estão dentro do limite

útil, sendo assim, esses agregados podem ser usados na construção civil para a produção do concreto.

A Tabela 12, apresenta os valores de amostras retidos e passantes em cada peneira para a composição granulométrica do agregado graúdo.

Tabela 12 - Composição Granulométrica do Agregado Graúdo

Análise Granulométrico do Agregado Graúdo					
Peneira (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante (g)	Passante (%)
25	0,00	0,00	0,00	5000,30	100,00
19	750,00	15,00	15,00	4250,30	85,00
12,5	3770,10	75,40	90,40	480,20	9,60
9,5	425,20	8,50	98,90	55,00	1,10
6,3	43,00	0,86	99,76	12,00	0,24
4,8	5,00	0,10	99,86	7,00	0,14
2,4	1,50	0,03	99,89	5,50	0,11
1,2	0,50	0,01	99,90	5,00	0,10
0	5,00	0,10	99,99	0,00	-
Total	5000,30	100,00	-	-	-

Fonte: Autor (2021)

Observando os resultados de material retido (%) em cada abertura de peneira (mm) na Tabela 12, o diâmetro máximo característico para a brita utilizada na pesquisa é de 25 mm.

A Tabela 13 apresenta a classificação do tipo de brita com relação ao valor de seu diâmetro.

Tabela 13 – Classificação do tipo de brita conforme o diâmetro

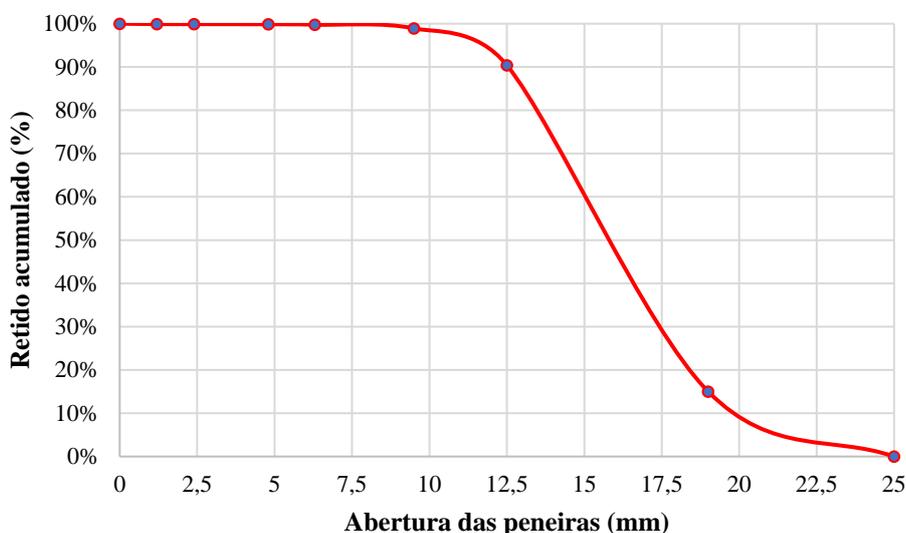
Tipo	Diâmetro (mm)
Brita 0	4,8 a 9,5
Brita 1	9,5 a 19
Brita 2	19 a 25
Brita 3	25 a 38
Brita 4	38 a 76

Fonte: Paulo Henrique Laporte Ambrozewicz (2012)

De acordo com a Tabela 13, observa-se que o agregado graúdo é classificado como brita 2, conforme os intervalos apresentados na Tabela 13, pois o diâmetro máximo característico é de 25 mm.

A Figura 4 apresenta a curva da composição granulométrica do agregado graúdo, dado pela porcentagem da massa retida acumulada em função da abertura das peneiras, em mm.

Figura 4 - Gráfico Retido Acumulado (%) vs Abertura das Peneiras (mm), da Composição Granulométrica do Agregado Graúdo



Fonte: Autor (2021)

Analisando-se o gráfico da Figura 4 da distribuição granulométrica do agregado graúdo, percebe-se que as maiores concentrações de massa retida acumulada (%) são nas peneiras de 12,5 mm e 19 mm, com aproximadamente 75,40% e 15%, respectivamente. Sendo assim, a curva granulométrica não apresenta uma distribuição uniforme, visto que a maior parte dos agregados ficam retidos nessas duas aberturas.

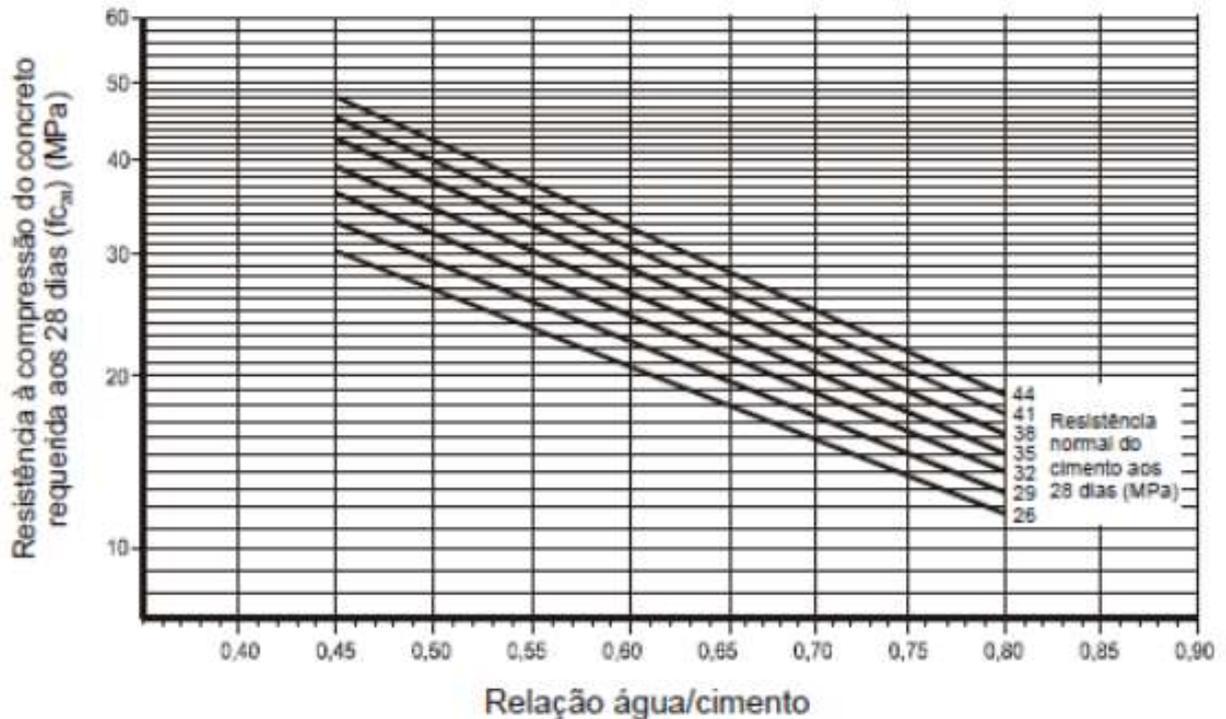
4.3 Dosagem do Concreto

Na dosagem do concreto, considerou-se, de acordo com a ABNT NBR 6118: 2018, como a classe de agressividade a Classe II, com agressividade moderada, com o tipo de ambiente Urbano e o risco de deterioração da estrutura pequeno.

O desvio padrão foi para a Condição A ($S_d=4,0$ MPa), em que é aplicável para as Classes C10 a C80 e o cimento e agregado medidos em massa e a água de amassamento em massa ou volume com um dispositivo dosador, e a quantidade de água corrigida em função da umidade da areia.

O $f_{c,28}$ foi de 31,6 MPa e com o auxílio da Curva de Abrams determinou-se a relação de água-cimento (a/c), sendo assim o valor obtido na curva foi de 0,50. A Figura 5 apresenta a Curva de Abrams com as retas em azul traçadas para o valor de 31,6 MPa do $f_{c,28}$ e de 0,50 de a/c.

Figura 5 - Gráfico para determinação da relação água/cimento em função da resistência requerida do concreto aos 28 dias de cura



Fonte: Publio Penna Firme Rodrigues (1998).

A determinação do consumo de água foi obtido com o auxílio da Tabela 14, em que a mesma apresenta o consumo de água em l/m^3 , analisando a mesma, e como o abatimento considerado foi de 40 mm a 60 mm, e como o diâmetro máximo do agregado graúdo de 25 mm, o consumo de água usado foi de $190 l/m^3$.

Tabela 14 - Consumo de água (l/m^3)

Abatimento (mm)	Diâmetro máximo do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Paulo Henrique Laporte Ambrozewicz (2012)

O consumo de areia foi obtido multiplicando o volume de areia por sua massa específica, como está representado na Tabela 15. Para o consumo cimento mediu-se por meio da razão entre o consumo de água e o fator água-cimento. Já o agregado graúdo consumido, foi

obtido pelo produto entre a massa unitária compactada o volume compactado seco de brita. A Tabela 15, apresenta os valores de volume compactado seco do agregado graúdo, em m^3/m^3 .

Tabela 15 - Volume compactado seco de agregado graúdo (m^3/m^3)

Módulo de Finura	Diâmetro máximo do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Paulo Henrique Laporte Ambrozewicz (2012)

Como o módulo de finura é de 2,85 e o diâmetro do agregado graúdo é de 25 mm, o volume compactado seco de agregado graúdo é de aproximadamente, $0,695 m^3/m^3$.

Como as quantidades de Metacaulim que foram introduzidas no traço por substituição parcial do cimento, são nas porcentagens de 10%, 20% e 30%. A Tabela 16, contém os traços unitários para cada mistura. A aquisição dos valores foi por meio da razão entre os consumos calculados pelo consumo de cimento.

Tabela 16 - Traços do concreto em proporção de cimento

Substituição de Metacaulim (%)	Traço em proporção de cimento
0	1 : 1,93 : 2,83 : 0,50
10	0,90 : 0,10 : 1,93 : 2,83 : 0,50
20	0,80 : 0,20 : 1,93 : 2,83 : 0,50
30	0,70 : 0,30 : 1,93 : 2,83 : 0,50

Fonte: Autor (2021)

4.4 Abatimento do Tronco de Cone

O ensaio de abatimento do Tronco de Cone foi realizado com o intuito de analisar a consistência das diferentes misturas do concreto fresco e comparar a misturas sem a adição

mineral de Metacaulim e com a substituição parcial do cimento pelo Metacaulim nas porcentagens de 10%, 20% e 30%.

Tabela 17 - Resultados da altura (cm) do abatimento do tronco de cone

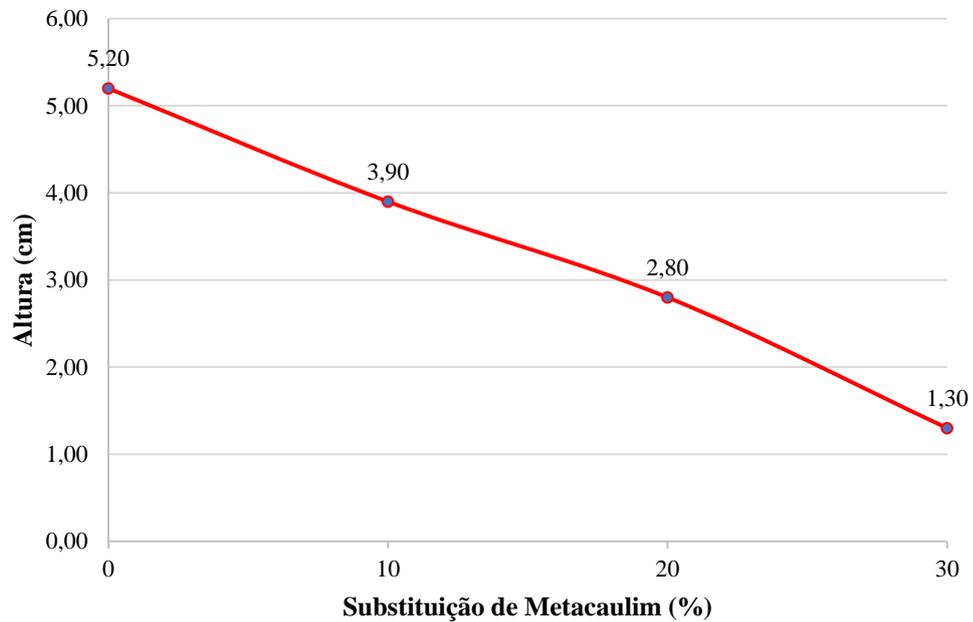
Slump Test		
Traços	Altura do abatimento (cm)	Diferença Percentual (%)
T-SP	5,20	-
T-MC ₁₀	3,90	-25,00%
T-MC ₂₀	2,80	-46,15%
T-MC ₃₀	1,30	-75,00%

Fonte: Autor (2021)

Analisando-se os resultados presentes na Tabela 17, quanto à altura do abatimento do tronco de cone, mantendo-se a quantidade de água constante para os diferentes traços, percebe-se uma tendência de diminuição de altura na medida em que a porcentagem de adição de Metacaulim aumenta na mistura, podendo justificar por meio das reduções percentuais de -25%, -46,15% e -75% para as misturas com teores de substituições de 10%, 20% e 30%, respectivamente.

Ao executar o preparo das diferentes misturas para a moldagem dos corpos de prova, percebeu-se a mistura mais seca, em relação referencial (T-SP), o que dificultava a trabalhabilidade do concreto. Os valores justificam-se pelo fato da diminuição de fluidez da mistura. Como estão representados os valores de ensaio do Método de Finura Blaine, $4.534,51 \pm 100,04 \text{ cm}^2/\text{g}$ e $15.000,00 \text{ cm}^2/\text{g}$, para o cimento e a adição, respectivamente, nas Tabelas 1 e Tabela 2, a área superficial do Metacaulim é maior que a do cimento, fazendo com que a quantidade de água livre na mistura diminua, e assim, tornando o concreto menos adensável ao aumentar a concentração da adição. A Figura 7 apresenta o Gráfico de dispersão da Altura (cm) vs Substituição de Metacaulim (%), em que representa a tendência quando ao decréscimo de altura do concreto na medida em que se aumenta a quantidade da adição na mistura.

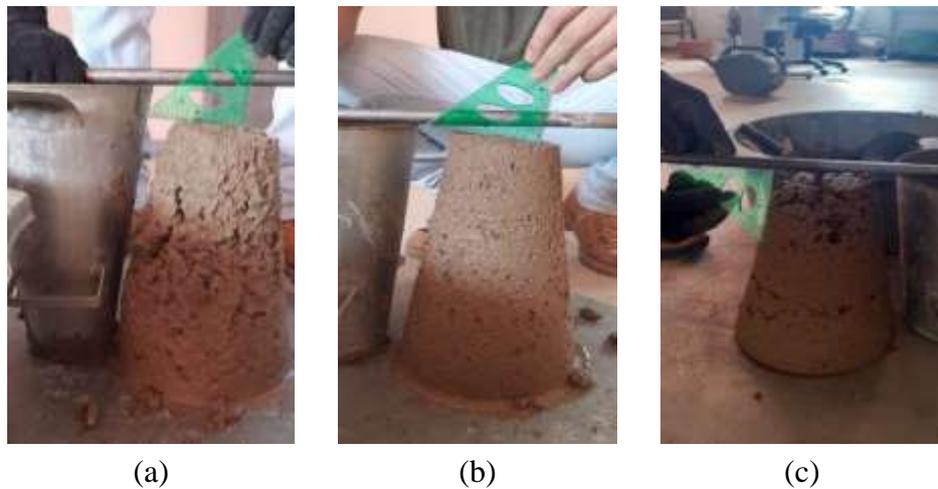
Figura 6 - Gráfico da altura (cm) do abatimento em função da quantidade (%) de substituição do Metacaulim



Fonte: Autor (2021)

A Figura 8, apresenta o registro das misturas durante a execução do ensaio de abatimento tronco de cone.

Figura 7 – (a) Medição de abatimento do concreto para a mistura T-SP, (b) Medição de abatimento do concreto para a mistura T-MC₂₀, (c) Medição de abatimento do concreto para a mistura T-MC₃₀



Fonte: Autor (2021)

4.5 Resistência à Compressão Simples

Realizada a moldagem e o processo de cura submersa é água, os corpos de prova foram inseridos na prensa e rompidos. A Figura 8, apresenta o processo de cura dos corpos de prova submersos em um tanque com água.

Figura 8 - Corpos de prova no processo de cura do concreto



Fonte: Autor (2021)

Foram obtidos os resultados após 7 e 28 dias de cura. A Figura 9, apresenta as etapas do processo de rompimento das amostras, na prensa.

Figura 9 - (a) Corpo de prova posicionado na prensa para ser comprimido, (b) Corpo de prova rompido após o ensaio de compressão



(a)



(b)

Fonte: Autor (2021)

A Tabela 18, apresenta os resultados obtidos para o ensaio de compressão das amostras com e sem a substituição do Metacaulim, para as idades de 7 dias e 28 dias.

Tabela 18 - Resistência Média a Compressão das amostras analisadas

Resistência à compressão			
	AMOSTRAS	f_{cm} (MPa)	Diferença percentual (%)
7 dias	CP-SP	11,30 ± 0,99	-
	CP-MC ₁₀	14,46 ± 0,45	28,03%
	CP-MC ₂₀	17,86 ± 0,62	58,10%
	CP-MC ₃₀	17,25 ± 0,63	52,70%
28 dias	CP-SP	24,36 ± 1,06	-
	CP-MC ₁₀	27,86 ± 0,47	14,36%
	CP-MC ₂₀	30,30 ± 0,55	24,39%
	CP-MC ₃₀	28,48 ± 0,52	16,89%

Fonte: Autor (2021)

O ensaio foi realizado em triplicata para cada tipo de amostra, sendo assim, calculou-se a média e o desvio padrão das amostragens. Obtidos os resultados, percebe-se que há o ganho de resistência média a compressão com a introdução do Metacaulim no concreto, em relação ao concreto convencional.

Há o ganho de resistência em percentagem nos valores 28,03%, 58,10% e 52,70% para as amostras de CP-MC₁₀, CP-MC₂₀, CP-MC₃₀, respectivamente, em relação ao CP-SP, para os corpos de prova com a idade de 7 dias. Já com relação ao tempo de cura de 28 dias, o ganho foi de 14,36%, 24,39% e 16,89%, para as amostras de CP-MC₁₀, CP-MC₂₀, CP-MC₃₀, respectivamente, em relação ao CP-SP. O aumento da resistência a compressão justifica-se pelo fato das partículas finas do Metacaulim preencherem os vazios no interior do concreto, assim, aumentando sua resistência. Visto que uma das contribuições da adição mineral de Metacaulim é a diminuição do índice de vazios internos do concreto, o que torna o mesmo mais compacto e assim aumenta a sua resistência a compressão.

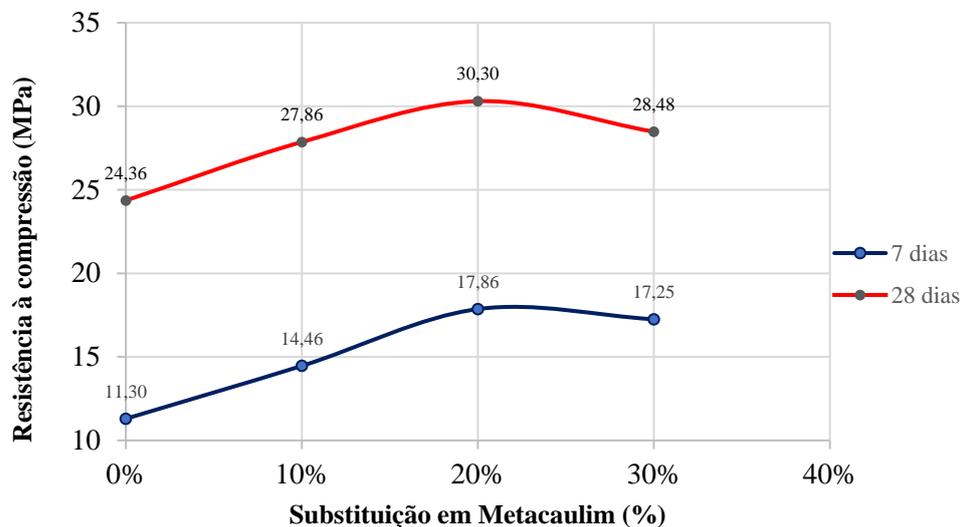
De acordo com os resultados obtidos por Lacerda (2005), para concretos com a adição mineral de Metacaulim e com uma relação a/c de 0,50, comparados com os concretos de referência, o ganho de resistência após os 28 dias de cura foi de 21%, sendo assim, além do aumento da resistência a compressão, houve uma redução no consumo do aglomerante (cimento), visto que obteve-se uma maior resistência à compressão usando-se menos cimento. Logo, comparando-se os resultados obtidos na pesquisa com os de Lacerda (2005), comprova-se que com a substituição parcial do cimento por Metacaulim, há um ganho de resistência a compressão.

Comparando os resultados das amostras de CP-MC₂₀ e CP-MC₃₀, percebe-se que com a substituição de 30%, a resistência do concreto diminuiu em relação a porcentagem de 20%,

logo, por possuir uma área superficial maior que as partículas do cimento, as partículas de Metacaulim na mistura com substituição de 30% absorvem mais água livre da mistura do concreto, fazendo com que a mesma fique mais seca e com menos fluidez, dificultando a moldagem e adensamento dos corpos de prova, justificando os valores de resistência à compressão menores que a mistura com substituição parcial de 20% de Metacaulim.

A Figura 10, apresenta o gráfico com as curvas de ganho de resistência média a compressão em função da quantidade de adição mineral em Metacaulim substituída na mistura do concreto, para o tempo de cura de 7 dias e 28 dias.

Figura 10 - Gráfico Resistência a Compressão (MPa) vs Substituição em Metacaulim (%), para o tempo de cura de 7 e 28 dias

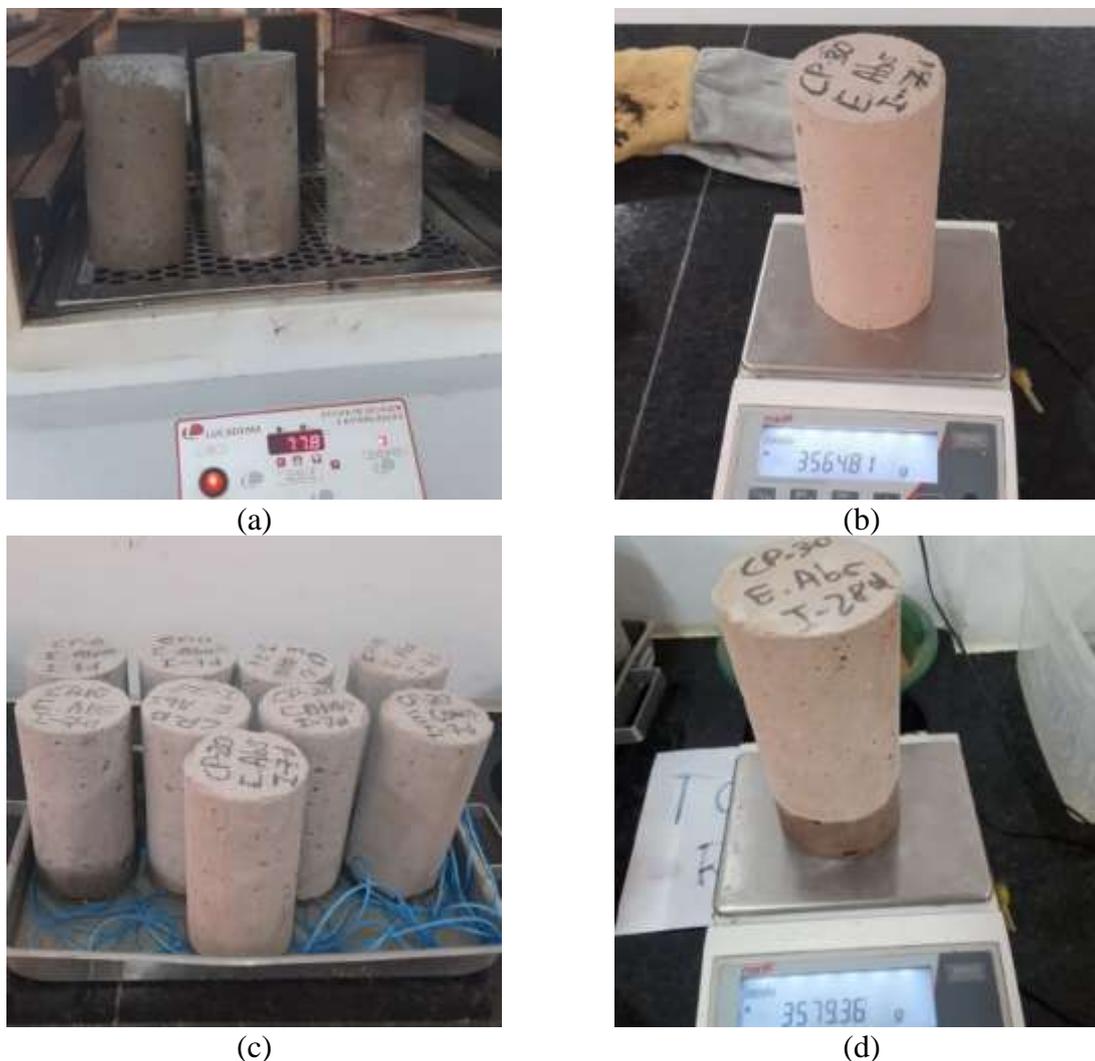


Fonte: Autor (2021)

4.6 Absorção de água por Capilaridade

O ensaio de Absorção de água por Capilaridade foi realizado em triplicata para cada tipo de mistura, logo, foi calculada a média e o desvio padrão para os corpos de prova de referência e com as diferentes porcentagens de substituição parcial do cimento por Metacaulim. A Figura 11, apresenta as etapas do ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade.

Figura 11 - (a) Amostras secas em estufa após 24 horas, (b) Aferição do peso da amostra seca após esfriar a temperatura ambiente, (c) Amostras posicionadas sobre uma lâmina de 5 mm de água, (d) Aferição da massa da amostra após absorver a água



Fonte: Autor (2021)

Aferidas todas as massas secas e do ganho de água absorvida, calcula-se a absorção. Como a prática foi realizada em triplicata, para a amostra simples e com os teores de substituição de Metacaulim, fez-se a média entre os valores de massas secas e do ganho de água absorvida em cada tempo especificado, e assim, foi calculada a absorção. A Tabela 19, apresenta os valores de absorção em cada tempo especificado pela norma, e a diferença percentual de absorção de água das amostras com a substituição do Metacaulim (CP-MC₁₀, CP-MC₂₀ e CP-MC₃₀), em relação as amostras de referência (CP-SP).

Tabela 19 - Resultados da absorção de água por capilaridade para os corpos de prova com tempo de cura de 7 dias e 28 dias

Absorção de água por capilaridade										
Idade de 7 dias										
AMOSTRAS	Absorção (g/cm ²)					Diferença Percentual (%)				
	3h	6h	24h	48h	72h	3h	6h	24h	48h	72h
CP-SP	0,273	0,345	0,555	0,615	0,656	-	-	-	-	-
CP-MC ₁₀	0,355	0,371	0,544	0,578	0,604	30,0%	7,5%	-2,1%	-5,9%	-7,8%
CP-MC ₂₀	0,350	0,388	0,535	0,589	0,600	28,2%	12,5%	-3,7%	-4,2%	-8,4%
CP-MC ₃₀	0,288	0,339	0,467	0,482	0,560	5,6%	-1,9%	-16,0%	-21,5%	-14,5%
Idade de 28 dias										
AMOSTRAS	Absorção (g/cm ²)					Diferença Percentual (%)				
	3h	6h	24h	48h	72h	3h	6h	24h	48h	72h
CP-SP	0,415	0,497	0,855	1,070	1,187	-	-	-	-	-
CP-MC ₁₀	0,303	0,413	0,655	0,773	0,836	-27,0%	-16,8%	-23,4%	-27,7%	-29,5%
CP-MC ₂₀	0,338	0,415	0,658	0,800	0,834	-18,6%	-16,5%	-23,1%	-25,2%	-29,8%
CP-MC ₃₀	0,217	0,312	0,389	0,451	0,472	-47,7%	-37,1%	-54,6%	-57,8%	-60,3%

Fonte: Autor (2021)

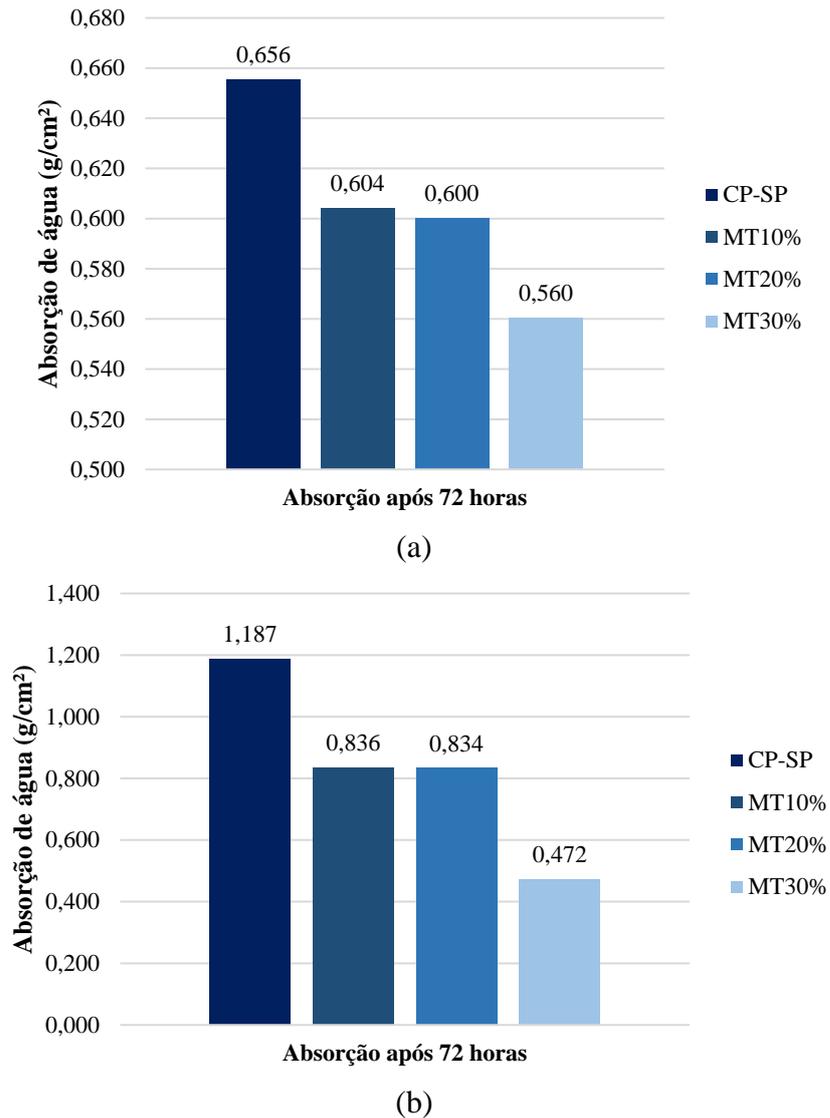
Analisando os resultados contidos na Tabela 19, percebe-se que ao substituir o cimento pelo Metacaulim no concreto, reduz a absorção de água por capilaridade, assim como, na medida em que aumenta a porcentagem da adição na mistura, a absorção também é reduzida. Isso é comprovado pela diferença percentual da absorção no final do ensaio, para as amostras, sendo a redução de -7,8%, -8,4% e -14,5% para os corpos de prova CP-MC₁₀, CP-MC₂₀, CP-MC₃₀, respectivamente, na idade de 7 dias. E para o tempo de cura de 28 dias, as reduções de -29,5%, -29,8% e -60,3%, para o CP-MC₁₀, CP-MC₂₀, CP-MC₃₀, respectivamente.

Rossignolo e Oliveira (2007), afirmam que o concreto com a substituição parcial de cimento por Metacaulim reduzem consideravelmente o ganho de peso do concreto devido a absorção de água, reduzindo em média de 20% a absorção de água, se comparado com o concreto de referência. A afirmação de Rossignolo e Oliveira, são provadas ao comparar com os resultados obtidos na pesquisa para a absorção de água dos concretos de referência e com a adição de Metacaulim, fazendo com que ocorra a redução da absorção de água nos corpos-de-prova com a adição mineral.

A Figura 12 apresenta os Gráficos de barras com os valores finais de absorção de água para as amostras após o final do ensaio, para o tempo de cura de 7 dias e 28 dias. Nota-se de forma mais simplificada que com o aumento da adição mineral, a absorção de água diminui nos corpos de prova. Esse fato justifica-se pelo fato de que como as partículas de Metacaulim

possuem uma área superficial maior que a do cimento, pois o seu diâmetro também é maior. Sendo assim, o número de vazios internos é diminuído, logo, a absorção de água é reduzida.

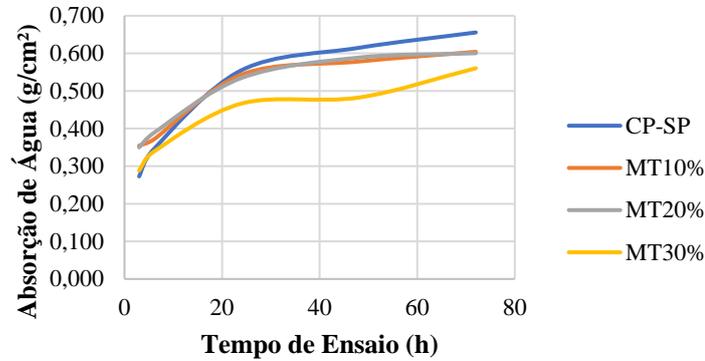
Figura 12 - (a) Gráfico de barras da quantidade de água absorvida pelas amostras ao final do ensaio, para a idade de 7 dias de cura, (b) Gráfico de barras da quantidade de água absorvida pelas amostras ao final do ensaio, para a idade de 28 dias de cura



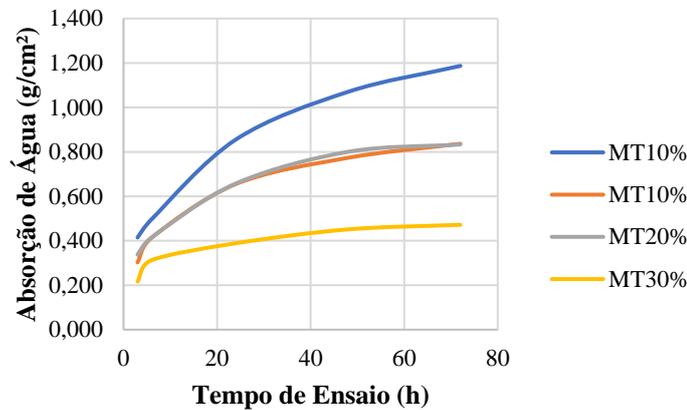
Fonte: Autor (2021)

A Figura 13, apresenta os gráficos da Absorção de água em função do Tempo de realização do ensaio. Nota-se uma semelhança entre os Gráficos (a) e (b), quanto as curvas de absorção para as amostras de CP-MC₁₀ e CP-MC₂₀, a absorção é bem parecida para essas porcentagens substituições.

Figura 13 - (a) Gráfico da Absorção de água (g/cm^2) vs Tempo de ensaio (h), para o tempo de cura de 7 dias, (b) Gráfico da Absorção de água (g/cm^2) vs Tempo de ensaio (h), para o tempo de cura de 28 dias



(a)



(b)

Fonte: Autor (2021)

A Tabela 20, apresenta os resultados de medição da altura de ascensão capilar que a água atingiu nas amostras. Após a realização do ensaio de tração por compressão diametral, em que os corpos de prova foram rompidos ao meio, aferiu-se a altura até onde a água atingiu, após o fim do ensaio de absorção, com o auxílio de uma trena. Como os corpos de prova foram moldados em triplicata, foi feito o cálculo da média e desvio padrão para as alturas.

Tabela 20 - Altura de Ascensão Capilar dos Corpos de Prova

Altura de Ascensão Capilar (cm)		
AMOSTRAS	Idade de 7 dias	Idade de 28 dias
CP-SP	$9,03 \pm 0,153$	$10,23 \pm 0,351$
CP-MC ₁₀	$15,47 \pm 0,351$	$16,77 \pm 0,058$
CP-MC ₂₀	$16,27 \pm 0,379$	$17,03 \pm 0,153$
CP-MC ₃₀	$18,12 \pm 0,104$	$19,27 \pm 0,379$

Fonte: Autor (2021)

Analisando os resultados apresentados na Tabela 20, com a substituição do aglomerante por Metacaulim, a altura de ascensão capilar é maior, e na medida que aumenta a porcentagem de adição na mistura, a altura também aumenta. Logo, esse fato é justificado devido ao aumento nas tensões capilares com a introdução do Metacaulim, preenchendo os poros internos do concreto, fazendo com que a água ao ser absorvida atinja alturas maiores.

A Figura 14, apresenta os corpos de prova rompidos para a medição da altura de ascensão capilar. Percebe-se que da face interior do concreto até certo ponto, está mais úmido, devido a absorção. Logo, o ponto até onde o corpo de prova está úmido, é a altura de ascensão.

Figura 14 - Altura de ascensão capilar das amostras



Fonte: Autor (2021)

4.7 Determinação da Profundidade de Carbonatação

De início, os corpos de provas foram expostos ao ambiente externo, em climas adversos como sol, chuva e ação de intempéries, pelo tempo de 30 e 60 dias. Conforme a ABNT NBR 6118:2018, o local de exposição é classificado Classe de Agressividade Ambiental II, pois está localizado na Zona Urbana e agressividade moderada.

A Figura 15, apresenta os corpos de prova expostos ao ambiente externo.

Figura 15 - Corpos de prova expostos ao ambiente externo



Fonte: Autor (2021)

Por se tratar de um método qualitativo, a carbonatação é diferenciada pela tonalidade de cor da superfície do concreto ao ser aplicada a solução de Fenolftaleína 1% diluída em álcool etílico (P.A). A Figura 16, apresenta as amostras antes e depois da aplicação da solução.

Figura 16 - (a) Corpos de prova antes da aplicação da solução de fenolftaleína 1%, (b) Corpos de prova após da aplicação da solução de fenolftaleína 1%



(a)



(b)

Fonte: Autor (2021)

Para aferir a profundidade de carbonatação utilizou-se um paquímetro digital. A Figura 17, apresenta como foi realizada a medição da profundidade de carbonatação.

Figura 17 - Medição da Profundidade de Carbonatação para os corpos de prova

Fonte: Autor (2021)

Para a medição, fez-se a mesma nos locais em que a profundidade de carbonatação era maior, visto que visivelmente, as amostras não apresentavam grandes diferenças devido ao pouco tempo em que ficaram expostas. Como o ensaio foi realizado em triplicada para as amostras com a substituição de Metacaulim, calculou-se a média e o desvio padrão para os mesmos. A Tabela 21, apresenta os valores das profundidades obtidas após a medição.

Tabela 21 - Profundidade de Carbonatação dos Corpos de Prova

AMOSTRAS	Profundidade de Carbonatação (cm)	
	30 dias de exposição	60 dias de exposição
CP-SP	0,52 ± 0,029	0,72 ± 0,004
CP-MC ₁₀	0,42 ± 0,029	0,66 ± 0,035
CP-MC ₂₀	0,40 ± 0,050	0,51 ± 0,031
CP-MC ₃₀	0,38 ± 0,025	0,43 ± 0,036

Fonte: Autor (2021)

A medição da profundidade de carbonatação foi realizada em triplicata para as amostras com a porcentagem de substituição de Metacaulim e uma amostra referência. Logo, para as amostras com a adição, foi realizado o cálculo da média e desvio padrão das medições.

De acordo com os resultados na Tabela 21, percebe-se que a profundidade pouco variou durante os 30 dias que foram expostas as amostras. Quanto as amostras de 60 dias, mesmo que sem grandes variações, percebe-se as amostras com a substituição de Metacaulim atingem uma profundidade menor de carbonatação, se comparada a amostra simples, e que na medida em que a concentração de adição aumenta na mistura, a profundidade tende a diminuir.

Ferreira (2013) observou em seu estudo de concreto com diferentes adições, que para os concretos com a adição mineral de Metacaulim, com cura úmida apresentou medições de profundidades de carbonatação inferiores ao concreto referencial, e para os concretos com a cura seca, a profundidade de carbonatação para as amostras com Metacaulim foram maiores nos seis primeiros anos, e diminuíram aos 10 anos de exposição, se comparado ao concreto de referência.

Estabelecendo um comparativo dos resultados de profundidade de carbonatação natural para os concretos com a adição mineral de Metacaulim com os resultados obtidos por Ferreira (2013), nota-se que a tendência, com o passar do tempo, é que as amostras com a substituição parcial do Metacaulim apresentem valores ainda menores de profundidade carbonatada, que os corpos-de-prova do concreto de referência.

Rossignolo e Oliveira (2007), ainda afirmam que ocorre a redução da profundidade carbonatada devido ao uso do Metacaulim na mistura do concreto, além de reduzir a porosidade e redução da permeabilidade, fazendo com que o concreto melhore em propriedades como durabilidade e desempenho.

5 CONCLUSÃO

A substituição parcial da adição mineral de Metacaulim na produção do concreto aprimorou as propriedades Físico-mecânicas do mesmo.

Analisando a absorção de água por capilaridade ao final do ensaio, foram obtidos bons resultados, pois com a introdução da adição na mistura do concreto, as reduções de ganho de peso por absorção, para as porcentagens de 10%, 20% e 30% de substituição de Metacaulim foram -29,5%, -29,8% e -60,3%, respectivamente, para as amostras aos 28 dias de cura. Provando que com a implementação do mesmo há a diminuição dos poros internos no concreto.

Quanto a resistência média à compressão apresentou bons resultados, com o ganho de resistência aos 28 dias de cura submersa em água de 14,36%, 24,39% e 16,89%, para a porcentagens de substituição de 10%, 20% e 30%, respectivamente, em relação as amostras de concreto sem a incrementação da adição mineral. Concluiu-se também que o ganho de resistência é maior durante os primeiros 7 dias de cura, já que a mesma aumentou em 28,03%, 58,10% e 52,70%, para a porcentagens de substituição de 10%, 20% e 30%, respectivamente.

Nas medições de profundidade de carbonatação, com a introdução do Metacaulim na mistura, a profundidade diminui, pois aos 60 dias de exposição ao meio externo, ocorreu uma redução de -7,51%, -28,77% e -39,38%, para as amostras de 10%, 20% e 30% de substituição de cimento por Metacaulim. Sendo assim, conclui-se que resultados de medição da profundidade de carbonatação nas amostras não apresentaram grandes diferenças, visivelmente, das amostras sem a adição mineral e com a substituição parcial do Metacaulim, visto que o processo de carbonatação natural é lento, e pode decorrer anos para que o mesmo se manifeste no concreto.

REFERÊNCIAS

- AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de construção: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório**, 1ª ed. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Parâmetros de Dosagem de Concreto**. São Paulo, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118 Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9935: Agregados – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15894-1: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 2395: Peneira de ensaio e ensaio de peneiramento – Vocabulário**. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- BRISOLARA, Gil Carlos Pegoraro. **Patologia na construção civil: A permanência de velhos erros em novos contextos**. 2014. Disponível via internet: < <https://portal.crea->

sc.org.br/patologia-na-construcao-civil-a-permanencia-de-velhos-erros-em-novos-contextos/>. Acesso em 26. set. 2021.

CIMENTO.ORG. **Efeito da qualidade da água no concreto**. 2010. Disponível em: <https://cimento.org/efeito-da-qualidade-da-agua-no-concreto/>. Acesso em: 06 de outubro de 2021.

COELHO, Laurimar; LACIALAMELLA, Thais. **O que fazer com as infiltrações na sua casa**, 2013. Disponível em: <http://revista.zapimoveis.com.br/saiba-como-evitar-infiltracoes-nasua-casa/>. Acesso em 02.set.2021

DA SILVA, Francimar José; MOTA, João Manoel de Freitas; GALVÃO, Simone Perruci. **Ação da Pozolana Metacaulim em Matriz Cimentícia**. Rio Grande do Sul, 2013. IBRACON.

DE ASSIS, Joaquim Teixeira; EINSFELD, Ricardo; DE CARVALHO, Gil; PESSÔA, José Renato C. **Estudo da porosidade em concretos de alto desempenho por técnicas de processamento de imagens**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. XXXI CNMAC, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 213: Solos – determinação do teor de umidade**. Método de Ensaio, 1994.

FERREIRA, Murillo Batista. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2013.

GOBBO, Luciano de Andrade. **Aplicação da difração de raios-x e método de rierveld no estudo de cimento Portland**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, São Paulo, 2009.

GARDOLINSKI, José Eduardo; MARTINS, Harley Paiva.; WYPYCH, Fernando; **Comportamento térmico da caulinita hidratada**. 2001. Departamento de Química da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná. Quim. Nova, v. 26, n. 1, p. 30-35, 2003.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. **Concreto: ciência e tecnologia**. In: Geraldo Cechela Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. v. 2. 3ª Ed. p. 931. São Paulo, 2010. IBRACON.

JOHN, Vanderley M.; NITA, Covis.; DIAS, Cleber M. R.; SAVASTANO, Holmer; TAKEASHI, Mario S. **Effect of Metakaolin on the performance of PVA and cellulose fibers reinforced cemen**. 9th International Inorganic-bonded cement composites. Vancouver, Canadá, 2004.

LACERDA, Charles Siervi; HELENE, Paulo R. L. **Estudo da influência da substituição de cimento Portland por metacaulim em concretos**. 2005. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

LA SERNA, Humberto Almeida de; REZENDE, Márcio Marques. **Agregados para a Construção Civil**. Minas Gerais, 2007.

MEDINA, Engler Apaza. **Pozolanidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. 134 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MEHTA P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. **CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª Ed. São Paulo, 2014. IBRACON

MUNHOZ, Flavio A. C.; BATTAGIN, Arnaldo Forti.; BATTAGIN, Inês Laranjeira da Silva. **Tendência da normalização de metacaulim para uso em concreto**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Fortaleza, v. 1, p. 1 - 16, 2010. IBRACON

NEVILLE. A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. PATTON. WILLIAM. JOHN. **Materiais de construção**. São Paulo, 1978.

PERURIFOY, Robert L.; SCHEXNAYDER, Clifford J.; SHAPIRA, Aviad; SCHMITT, Robert L. **Planejamento, Equipamentos e Métodos para a Construção Civil**. 8ª Ed. AMGH Editora Ltda, Rio Grande do Sul, 2015.

PETRUCCI, Eládio G. R. **Materiais de Construção**. Editora Globo, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2007

RIBEIRO, Carmem Couto; PINTO, Joana Darc da Silva; STARLING, Tadeu. **Materiais de Construção Civil**: 2. Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.

ROCHA, Guilherme Gallo Neves. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte, 2005.

RODRIGUES, Publio Penna Firme. **Parâmetros de Dosagem do Concreto**. ET-67. 3ª Ed. São Paulo. Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

ROSSIGNOLO, João Adriano; OLIVEIRA, Ismael Lorandi. **Efeito do Metacaulim nas propriedades do concreto leve estrutural**. Acta Scientiarum. Technology, Maringá, v. 29, n. 1, p. 55-60, 2007.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX. **RILEM CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth**. Recommendations CPC-18. Materials and Structures, p. 453-455, 1988.

SANTOS, Persio de Sousa. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2ª Ed. Editora Edgard Blücher Ltda, v. 1 e 3, São Paulo, 1992.

SILVA, Danillo de Almeida e; GEYER, André Luiz Bortolacci; PANTOJA, João da Costa. **Porosidade do concreto versus forma do agregado graúdo**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 8, p.60359- 60376, 2020.

VIEIRA, Bianca Alencar; NOGUEIRA, Lauro. **Construção civil: crescimento versus custos de produção civil**. Revista Eletrônica Sistemas & Gestão, Rio de Janeiro, v. 13, n. 3, p. 366-377, 2018.

ANEXO A – QUADROS COM RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS

Quadro 1 - Resultados das resistências à compressão das amostras

Ensaio de Resistência à Compressão								
AMOSTRAS	Resistência a compressão do concreto (MPa)							
	Idade de 7 dias				Idade de 28 dias			
	CP I	CP II	CP III	Média	CP I	CP II	CP III	Média
CP-SP	12,28	11,30	10,31	11,30	24,64	23,19	25,25	24,36
CP-MC ₁₀	14,40	14,94	14,05	14,46	27,35	28,27	27,97	27,86
CP-MC ₂₀	18,40	18,01	17,18	17,86	30,40	30,81	29,71	30,30
CP-MC ₃₀	16,63	17,23	17,89	17,25	28,64	28,89	27,90	28,48

Fonte: Autor (2021)

Quadro 2 - Peso seco das amostras com idade de cura de 7 dias

Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade - 7 Dias de cura				
AMOSTRAS	Peso seco (g)			
	CP I	CP II	CP III	Média
CP-SP	3617,45	3623,43	3593,76	3611,55
CP-MC ₁₀	3554,64	3615,33	3554,67	3574,88
CP-MC ₂₀	3543,27	3570,59	3601,97	3571,94
CP-MC ₃₀	3526,68	3564,81	3575,36	3555,62

Fonte: Autor (2021)

Quadro 3 - Peso absorvido das amostras com idade de cura de 7 dias

Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade - 7 Dias de cura					
AMOSTRAS	Tempo de absorção	Peso com absorção (g)			
		CP I	CP II	CP III	Média
CP-SP	3 horas	3638,51	3638,20	3622,23	3632,98
CP-MC ₁₀		3579,95	3644,65	3583,61	3602,74
CP-MC ₂₀		3614,71	3600,75	3582,81	3599,42
CP-MC ₃₀		3587,44	3599,43	3547,91	3578,26
CP-SP	6 horas	3643,82	3625,34	3646,83	3638,66
CP-MC ₁₀		3645,43	3581,01	3585,63	3604,02
CP-MC ₂₀		3620,03	3584,43	3602,86	3602,44
CP-MC ₃₀		3551,60	3602,00	3593,03	3582,21
CP-SP	24 horas	3659,77	3641,47	3664,24	3655,16
CP-MC ₁₀		3597,40	3596,80	3658,51	3617,57
CP-MC ₂₀		3600,98	3609,03	3631,80	3613,94
CP-MC ₃₀		3608,75	3610,99	3557,06	3592,27
CP-SP	48 horas	3647,22	3668,73	3663,53	3659,83
CP-MC ₁₀		3600,20	3658,92	3601,77	3620,30
CP-MC ₂₀		3612,45	3639,00	3603,10	3618,18

CP-MC ₃₀		3612,16	3561,34	3607,02	3593,51
CP-SP	72 horas	3667,00	3649,77	3672,34	3663,04
CP-MC ₁₀		3603,54	3663,96	3599,50	3622,33
CP-MC ₂₀		3601,97	3647,83	3607,48	3619,09
CP-MC ₃₀		3619,47	3565,90	3613,51	3599,63

Fonte: Autor (2021)

Quadro 4 - Peso seco das amostras com idade de cura de 28 dias

Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade - 28 Dias de cura				
AMOSTRAS	Peso seco (g)			
	CP I	CP II	CP III	Média
CP-SP	3574,08	3559,47	3427,86	3520,47
CP-MC ₁₀	3540,78	3469,74	3553,37	3521,30
CP-MC ₂₀	3591,77	3507,62	3565,54	3554,98
CP-MC ₃₀	3626,36	3625,89	3559,53	3603,93

Fonte: Autor (2021)

Quadro 5 - Peso absorvido das amostras com idade de cura de 28 dias

Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade - 28 Dias de cura					
AMOSTRAS	Tempo de absorção	Peso com absorção (g)			
		CP I	CP II	CP III	Média
Simple	3 horas	3590,96	3605,34	3462,86	3553,05
MT10%		3568,80	3501,01	3565,43	3545,08
MT20%		3625,04	3528,08	3591,36	3581,49
MT30%		3635,08	3648,46	3579,36	3620,97
Simple	6 horas	3615,09	3464,42	3598,92	3559,48
MT10%		3571,35	3514,31	3575,60	3553,75
MT20%		3598,07	3533,91	3630,65	3587,54
MT30%		3642,17	3587,78	3655,45	3628,47
Simple	24 horas	3637,36	3498,00	3627,60	3587,65
MT10%		3578,35	3540,93	3598,99	3572,76
MT20%		3613,36	3544,18	3662,33	3606,62
MT30%		3647,42	3592,73	3663,23	3634,46
Simple	48 horas	3643,22	3519,20	3651,16	3604,53
MT10%		3580,86	3553,17	3612,08	3582,04
MT20%		3618,58	3554,91	3679,99	3617,83
MT30%		3597,11	3651,79	3669,19	3639,36
Simple	72 horas	3652,31	3661,61	3527,17	3613,70
MT10%		3615,22	3583,92	3561,84	3586,99
MT20%		3619,47	3558,14	3683,72	3620,44
MT30%		3599,14	3652,41	3671,40	3640,98

Fonte: Autor (2021)

Quadro 6 – Medições das profundidades de carbonatação das amostras

Profundidade de Carbonatação (cm)								
AMOSTRAS	30 de exposição ao meio externo				60 de exposição ao meio externo			
	CP I	CP II	CP III	Média	CP I	CP II	CP III	Média
CP-SP	0,50	0,54	-	0,52	0,71	0,72	-	0,72
CP-MC ₁₀	0,40	0,45	0,40	0,42	0,63	0,70	0,66	0,66
CP-MC ₂₀	0,35	0,40	0,45	0,40	0,48	0,52	0,54	0,51
CP-MC ₃₀	0,35	0,40	0,38	0,38	0,39	0,44	0,47	0,43

Fonte: Autor (2021)