

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

ROBSON RAUL BARBOSA DE MOURA

**EFEITO DA ADIÇÃO DE FÍLER CALCÁRIO E METACAULIM NA
CARBONATAÇÃO DE ARGAMASSA COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO
DOSADO COM EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS**

Cajazeiras-PB
2022

ROBSON RAUL BARBOSA DE MOURA

**EFEITO DA ADIÇÃO DE FÍLER CALCÁRIO E METACAULIM NA
CARBONATAÇÃO DE ARGAMASSA COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO
DOSADO COM EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, sob Orientação do Prof. Dr. Robson Arruda dos Santos.

Cajazeiras-PB
2022

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Suellen Conceição Ribeiro CRB-2218

M929e Moura, Robson Raul Barbosa de

Efeito da adição de fíler calcário e metacaulim na carbonatação de argamassa com baixo consumo de cimento dosado com empacotamento de partículas / Robson Raul Barbosa de Moura. – Cajazeiras/PB: IFPB, 2022.

41f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-IFPB, Campus Cajazeiras. Cajazeiras, 2022.

Orientador(a): Prof. Dr. Robson Arruda dos Santos.

1. Argamassa. 2. Meio ambiente. 3. Empacotamento. 4. Cimento Portland.

I. Moura, Robson Raul Barbosa de. II. Título.

CDU: 691.53 M929e

ROBSON RAUL BARBOSA DE MOURA

**EFEITO DA ADIÇÃO DE FÍLER CALCÁRIO E METACAULIMNA
CARBONATAÇÃO DE ARGAMASSA COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO
DOSADO COM EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
Campus Cajazeiras, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 02 de setembro de 2022.

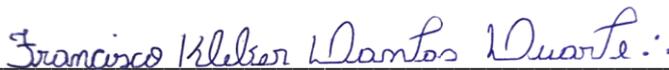
BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 ROBSON ARRUDA DOS SANTOS
Data: 24/10/2022 18:22:30-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Robson Arruda dos Santos – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Documento assinado digitalmente
 JOSE HENRIQUE MACIEL DE QUEIROZ
Data: 24/10/2022 16:37:12-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Me. José Henrique Maciel de Queiroz – IFPB-*Campus* Patos
Examinador Externo



Esp. Francisco Kléber Dantas Duarte – CBX Engenharia
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meu avô Antônio Crispim que foi minha maior referência na construção civil e aos meus pais, em especial, pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Aos meus avôs, Seu Antônio e Dona Valder por terem me criado como um filho, por todo amor, carinho e ensinamentos.

Aos meus pais, Célia e Avanildo por sempre me apoiar em tudo que faço e por nunca deixarem de acreditar em mim.

Aos meus irmãos, Raoni e Emanuel, pela amizade e parceria.

A minha namorada, Estefani, por tanto amor, carinho, amizade, dedicação, por fazer com que eu queira ser sempre melhor, por toda ajuda na revisão deste trabalho e por ter se tornado essa pessoa essencial em minha vida.

Ao meu orientador e xará Robson Arruda, por ter sido fundamental neste trabalho, pela imensa ajuda, pela paciência e por todo ensinamento até aqui.

A minha prima Osmanda, por sempre me inspirar e incentivar nessa caminhada da graduação e por toda ajuda não só neste trabalho, mas em todos que precisei ao longo do curso.

A minha prima Lívia, por todo apoio, por sempre passar minhas atividades a limpo e emprestar o notebook sempre que precisei.

Aos demais familiares, por todo apoio e por nunca medirem esforços quando preciso de vocês.

Ao meu amigo Roberto, por ser ter sido um irmão e por toda ajuda e incentivo ao longo do curso.

Aos meus amigos Malysson e Saulo por dividirem apartamento comigo e por toda amizade e parceria.

Aos meus amigos Felipe, Cristiano, Uilliam, Ítalo e Danilo, pela amizade, parceria.

À banca examinadora por estarem presentes nesse momento final de conclusão dessa etapa que abre outras inúmeras oportunidades.

Ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB), *Campus Cajazeiras* pela oportunidade de realização de trabalhos na área de pesquisa.

Aos colegas do IFPB pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

RESUMO

Sabe-se que o concreto é o material mais consumido fabricado pelo homem. Hoje é quase impossível imaginar o mundo sem concreto, sua importância se dá pela vasta presença em praticamente todos os tipos de instalações humanas, seja no transporte aéreo, terrestre, marítimo e fluvial, na habitação, na armazenagem de resíduos e materiais, na geração de energia ou na expressão artística e cultural. Porém esse material causa um grande impacto ao meio ambiente, por ser composto de 5% a 20% de cimento, material responsável por grandes emissões de CO₂ na atmosfera, gás esse que é classificado como um dos principais agentes causadores do efeito estufa, minimizar a emissão desse gás no planeta é um dos grandes desafios em se tratando da produção do cimento. Dessa forma, O emprego de materiais seja para adição ou substituição parcial ou total do cimento Portland como agregado miúdo do concreto, tem sido alvo de diversos estudos, que buscam desenvolver materiais que possuam durabilidade e propriedades mecânicas satisfatórias, garantindo assim sua viabilidade. Assim, com o intuito de reduzir o consumo de cimento na composição do concreto e contribuir para diminuição dos danos que o cimento causa ao meio ambiente, a presente pesquisa visa avaliar como as adições de fíler calcário e metacaulim influenciam no processo de carbonatação do concreto na fase de argamassa dosado com empacotamento de partículas, assim como a resposta dessas adições na eficiência do cimento. Para tal, foram confeccionados corpos de prova de argamassa com adições minerais que neste caso foram: fíler calcário e o metacaulim. Para tal, foi realizado um estudo experimental com quatro traços distintos, denominados, RCE, RSE, T1 e T2. Os traços T1 e T2 foram dosados com substituição do cimento Portland por fíler e metacaulim. Os resultados de resistência à compressão mostraram que o traço com empacotamento de partículas (RCE), obteve uma resistência superior aos demais traço para todas as idades. O desempenho de T2 foi superior ao de T1 que possui menor consumo de cimento em sua composição, porém T2 apresentou resistência superior ao traço RSE e valores bem próximos a argamassa de referência (RCE). Tratando-se a eficiência dos ligantes, as argamassas dosadas com empacotamento de partículas e adições minerais resultaram nos menores índices de ligante, ou seja, necessitaram de menos cimento para produzir um 1 Mpa de resistência. Ficou constatado que metacaulim e o fíler calcário usados como substituição parcial do cimento Portland tornou a argamassa mais susceptível ao avanço da carbonatação em relação traço sem adições minerais, visto a diminuição na reserva alcalina, comprovada pela análise térmica (TG/DTG) das pastas de cimento.

Palavras-Chave: Argamassa, Empacotamento, Adições minerais., Carbonatação.

ABSTRACT

It is known that concrete is the most consumed material manufactured by man. Today it is almost impossible to imagine the world without concrete, its importance is due to its vast presence in virtually all types of human facilities, whether in air, land, sea and river transport, housing, storage of waste and materials, energy generation or in artistic and cultural expression. However, this material causes a great impact on the environment, for being composed of 5% to 20% cement, a material responsible for large CO₂ emissions into the atmosphere, a gas that is classified as one of the main causes of the greenhouse effect, minimizing the emission of this gas on the planet is one of the great challenges when it comes to cement production. Thus, the use of materials for addition or partial or total replacement of Portland cement as fine aggregate of concrete, has been the target of several studies, which seek to develop materials that have durability and satisfactory mechanical properties, thus ensuring their viability. Thus, in order to reduce the consumption of cement in the composition of concrete and contribute to reducing the damage that cement causes to the environment, this research aims to evaluate how the additions of limestone filler and metakaolin influence the carbonation process of concrete in the mortar phase dosed with particle packing, as well as the response of these additions in the cement efficiency. For this purpose, mortar specimens were made with mineral additions, which in this case were: lime filler and metakaolin. For this, an experimental study was conducted with four different mixtures, denominated RCE, RSE, T1 and T2. The mixtures T1 and T2 were dosed with replacement of Portland cement by limestone filler and metakaolin. The results of compressive strength showed that the mix with particle packing (RCE), obtained a higher strength than the other mixes for all ages. The performance of T2 was superior to T1, which has lower cement consumption in its composition, but T2 showed higher strength than the RSE mixture and values very close to the reference mortar (RCE). Regarding the efficiency of binders, the mortars dosed with particle packing and mineral additions resulted in the lowest rates of binder, i.e., needed less cement to produce a 1 MPa of resistance. It was found that metakaolin and lime filler used as partial replacement of Portland cement made the mortar more susceptible to the advance of carbonation in relation to the mix without mineral additions, since the decrease in alkaline reserve, proven by thermal analysis (TG/DTG) of cement pastes.

Keywords: Mortar, Packing, Mineral additions, Carbonation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
2.1	MATERIAIS.....	13
2.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	13
2.2.1	<i>Cimento</i>	13
2.2.2	<i>Metacaulim</i>	14
2.2.3	<i>Fíler Calcário</i>	14
2.2.4	<i>Aditivo Superplastificante</i>	15
2.2.5	<i>Agregados</i>	15
2.3	GRANULOMETRIA A LASER.....	16
2.4	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	16
2.5	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA.....	16
2.6	DOSAGEM DA ARGAMASSA DO CONCRETO.....	17
2.7	PREPARO, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA.....	17
2.8	TESTES FÍSICOS E MECÂNICOS DA ARGAMASSA.....	18
2.8.1	<i>Ensaio de consistência (Flow Table)</i>	18
2.8.2	<i>Ensaio de resistência – Compressão axial</i>	19
2.9	CARBONATAÇÃO.....	19
2.9.1	<i>Preparação dos corpos de prova</i>	19
2.9.2	<i>Pré-condicionamento</i>	19
2.9.3	<i>Exposição dos corpos de prova na câmara de carbonatação</i>	20
3	RESULTADOS DA PESQUISA.....	23
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	23
3.2	METACAILIM.....	25
3.3	FÍLER CALCÁRIO.....	26

3.4	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX).....	27
3.5	TERMOGRAVIMETRIA (TG/DTG).....	28
3.6	DOSAGEM DAS ARGAMASSAS.....	30
3.7	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DA ARGAMASSA.....	30
3.8	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	31
3.9	ÍNDICE DE LIGANTE (IL).....	32
3.10	CARBONATAÇÃO.....	34
4	CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES.....	38
	REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

Cerca de 5% a 20% do concreto é composto de cimento, material esse que é feito de fragmentação e mistura de argila e calcário, estes materiais contêm ferro, alumínio, óxidos de cálcio e silício em sua composição (CSI, 2009). A mistura é aquecida a cerca de 1.500°C em um forno, assim é formado o clínquer que é um material hidráulico de cimento. Uma vez que o clínquer é feito, os materiais são ligados em um processo irreversível. Finalmente o clínquer é resfriado e moído com uma pequena proporção de gesso e outros aditivos para produzir um pó seco – cimento. Para melhorar propriedades como resistência, durabilidade, cor e trabalhabilidade, os ingredientes do cimento podem ser variados em diferentes produtos de acordo com o uso pretendido

O aumento da demanda por concreto está associado ao rápido desenvolvimento e crescimento da indústria da construção global. O cimento Portland é o principal componente da mistura de concreto, sua fabricação contribui com cerca de 5% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) em todo o mundo (KANNAN *et al.*, 2017, tradução nossa), gás esse que é classificado como um dos principais agentes causadores do efeito estufa, minimizar a emissão desse gás no planeta é um dos grandes desafios da produção do cimento.

Em palestra apresentada no congresso anual do IBRACON, Mehta (2008) apontou três ferramentas referentes a sustentabilidade na indústria do cimento: Redução de clínquer no cimento, redução de consumo do cimento no concreto e redução de concreto nas estruturas.

Outros vários estudos apontam na mesma direção de Mehta, como por exemplo os do Laboratório de Materiais Avançados a Base de Cimento (LMABC) da Escola de Engenharia de São Carlos, que tem realizado diversas pesquisas para verificar a viabilidade mecânica de concretos produzido com baixo consumo de cimento, obtendo concretos com resistência mecânica acima de 60Mpa utilizando consumo de cimento abaixo de 300 kg/m³.

O emprego de materiais seja para adição ou substituição parcial ou total do cimento Portland como agregado miúdo do concreto, tem sido alvo de diversos estudos, que buscam desenvolver materiais que possuam durabilidade e propriedades mecânicas satisfatórias, garantindo assim sua viabilidade.

Em se tratando de adições minerais para uso no concreto, o fíler calcário se destaca por ser um material inerte, de baixo custo e fácil acesso, além de proporcionar melhores condições ao meio ambiente. No concreto o material age provocando o efeito físico de empacotamento granulométrico na mistura, diminuindo os vazios e proporcionando maior compactação do

concreto (ISAISAS E FELTRIN, 2018).

No entanto, há uma restrição para uso deste mineral no Brasil, de acordo com as normas NBR 11578, (1991), NBR 5736, (1991), NBR EB-208, (1991) e NBR 5732, (1991), a porcentagem máxima de utilização do fíler calcário no cimento é de apenas 10%, o que é muito pouco em comparação com países Europeus que segundo a EN 197-1, (2000) a substituição pode chegar a 35%.

Outro material que se destaca no campo das adições minerais reativas na durabilidade de materiais cimentícios é o metacaulim, o mesmo apresenta resultados muito satisfatórios em relação à proteção da armadura contra corrosão pela reação álcali-agregados, ataques por sulfatos e íons cloretos. Entretanto, ainda existe muitas divergências quando o assunto é a carbonatação de argamassa com adição de metacaulim. Em estudo realizado por Ashish (2019), foi constatado que ao substituir o cimento portland em 10% por metacaulim, obteve-se, após 56 dias de carbonatação acelerada, uma redução de 31,5% na profundidade de carbonatação, enquanto Mon, Lee e Kim (2006) substituindo o mesmo teor de 10% de cimento por metacaulim, obtiveram um aumento de 70% na profundidade de carbonatação.

A carbonatação é um processo físico-químico que consiste na reação dióxido de carbono (CO_2) presente do ambiente, com compostos presentes nos poros do concreto. O dióxido de carbono entra no concreto e reage com a água (H_2O) formando o ácido carbônico (H_2CO_3), o mesmo reage com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) resultando em carbonato de cálcio ($CaCO_3 + H_2O$) e liberando água, conforme as equações 1 e 2.



A formação do $CaCO_3$ causa a redução do pH do concreto de valores acima de 12,5 para valores inferiores a 9, este fenômeno favorece a despassivação da camada de reforço do aço, desencadeando uma posterior corrosão da armadura (ARRUDA, 2022).

O estudo desse efeito se torna importante, em virtude da crescente utilização de materiais seja para adição ou substituição parcial ou total do cimento Portland no concreto, inclusive em grandes centros urbanos, onde ocorre uma grande emissão de gás carbônico (CO_2), principalmente devido a queima de combustíveis fósseis.

Assim, a presente pesquisa visa avaliar como as adições de fíler calcário e metacaulim influenciam no processo de carbonatação do concreto na fase de argamassa dosado com

empacotamento de partículas, assim como a resposta dessas adições na eficiência do cimento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Trata-se de um estudo experimental de natureza aplicada e com uma abordagem quantitativa, estabelecendo de forma sistematizada uma série de procedimentos, que auxiliam no desenvolvimento de informações acerca da utilização do material alternativo estudado, além de sintetizar e analisar esses dados para desenvolver uma explicação mais abrangente do fenômeno em questão (LAKATOS; MARCONI, 2001).

2.1 Materiais

Para a confecção dos corpos de prova, utilizaram-se como agregados a areia em três faixas granulométricas, como grossa, média e fina, comercializados na cidade de Cajazeiras-PB. Por não possuir pozolanas em sua constituição, utilizou-se o cimento Portland CP V ARI. A água utilizada provém do sistema público de abastecimento da Companhia de Água e Esgoto da Paraíba - CAGEPA. As adições utilizadas nas argamassas confeccionadas, foram o fíler calcário e o metacaulim, em substituição parcial ao cimento. As massas específicas destas foram definidas de acordo com norma NBR 16605 (ABNT, 2017). O aditivo químico empregado foi o superplastificante ADVA 525, para atingir a consistência desejada com a redução da quantidade de água.

2.2 Caracterização dos Materiais

Os materiais a serem caracterizados foram selecionados segundo sua disponibilidade regional e uso recorrente nas obras locais, bem como pelo seu fornecimento por parte de empresas do ramo. De posse desses, os mesmos foram caracterizados por ensaios realizados em laboratório ou por meio de dados fornecidos por seus fabricantes.

2.2.1 Cimento

O cimento utilizado foi o Cimento Portland tipo V de alta resistência inicial (CP V-ARI), especificado pela NBR 5733/1991. Este cimento constitui-se de, no mínimo, 95% de clínquer, não possuindo adições pozolânicas na sua composição. Dessa forma, a composição presente no cimento não interferiu nas alterações agregadas pelas adições minerais, facilitando,

assim, a análise da influência causada pelas adições minerais, na produção da argamassa. A Tabela 1 apresenta a composição do Cimento CP V-ARI.

Tabela 1 - Características físicas, químicas e mecânicas do cimento utilizado.

Óxidos (%)	
SiO ₂	22.11
Al ₂ O ₃	3.99
Fe ₂ O ₃	3.41
MgO	1.97
K ₂ O	0.96
Na ₂ O	0.43
TiO ₂	0.37
CaO	62.25
BaO	0.09
P ₂ O ₅	0.64
SO ₃	3.51
MnO	0.03

Fonte: Autor (2022)

O ensaio da massa específica do cimento foi executado seguindo a NBR 16605 (ABNT, 2017), com o auxílio do frasco volumétrico de Le Chatelier, foi inserido o querosene como líquido não reagente, até o volume indicado. Todo o procedimento obedeceu às condições de temperatura e período, assim como determinado pela norma, e foi realizado para duas amostras distintas.

2.2.2 Metacaulim

Objetivando promover o refinamento de poros por meio do empacotamento nos níveis abaixo da granulometria do cimento, foi utilizada, como adição mineral, a metacaulinita vermelha. Nesta especificação, o metacaulim possui massa específica de, aproximadamente, 2,57 g/cm³. A composição química foi obtida através de ensaio de FRX.

2.2.3 Fíler Calcário

Para a pesquisa, utilizou-se um filer calcário, o qual pode ser utilizado na produção de plásticos, tintas, fritas cerâmicas, esmaltes e etc. Determinada conforme a ABNT NBR NM 23:2000, a massa específica do filer utilizado foi de 2,84 g/cm³. Foi realizado ensaio de granulometria a laser, no equipamento CILAS 1090 SECO, Faixa: 0.10 µm - 500.00 µm / 100 Classes. O filer apresentou diâmetro médio de 14,90 µm. A composição química foi obtida através de ensaio de FRX.

2.2.4 Aditivo Superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado foi o ADVA 585, no intuito de reduzir o uso de água, de modo que a proporção água/cimento permaneça proporcional. Este aditivo, segundo informações do fabricante, apresenta naftaleno sulfonado na sua composição, obtendo massa específica equivalente a 1,075 g/cm³.

Com a utilização dos aditivos desta classe, a argamassa pode apresentar uma maior trabalhabilidade, sem alterar a relação água/cimento. Sendo assim, Helene (2011) mostra que o uso de aditivos superplastificantes permitem, de maneira alternativa, uma economia de cimento, mantendo a consistência, a relação a/c e a resistência à compressão.

2.2.5 Agregados

Para a composição do traço determinado pelo empacotamento das partículas, foi necessária a separação, através de peneiramento, para a obtenção adequada da granulometria de três areias, denominadas como areia fina, média e grossa. Dessa forma, para separar a areia grossa, foi utilizada uma peneira com abertura de 1,2mm, em seguida, utilizou-se a peneira com abertura de 0,6mm para separar a areia média e fina.

Sendo assim, denominou-se de areia 1 (areia grossa) a fração que ficou retida na peneira de 1,2mm, já a areia 2 (areia média) equivale à passante pela 1,2mm e retida na 0,6mm. Por último, chama-se areia 3 (areia fina) aquela que passante pela peneira de 0,6mm. Para determinar a composição granulométrica das faixas de areias utilizadas, foi-se seguida as normas da NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Para determinar a massa específica das areias, conforme especifica a NBR NM 52 (ABNT, 2009), foi-se utilizado um molde de tronco de cone para achar o exato momento em que o agregado iria apresentar-se saturado e seco, desmorrando-se após a retirada do molde.

2.3 Granulometria a Laser

As granulometrias a laser do cimento, fíler e metacaulim foram realizadas com o objetivo de comparar a distribuição dos diâmetros das partículas dos materiais finos utilizados na preparação da argamassa. Para a análise de granulometria a laser foi utilizado um analisador CILAS, Particle Size Analyser, modelo CILAS 1090. Sua faixa de análise (seco) é de 0,1 µm a 500 µm.

2.4 Difração de Raios-x

As análises de difração de Raios-x para do fíler e metacaulim foram realizadas com o objetivo de auxiliar na identificação das fases cristalinas desses materiais. Com o DRX é possível identificar a pureza do fíler calcário. Foi utilizado um difratômetro da Shimadzu, modelo XRD – 6000, do Laboratório de Combustíveis e Materiais/LACOM/UPFB, com varredura angular de 5 a 70° com incremento de 0,02° e tempo de passo de 2s.

2.5 Análise termogravimétrica

Foram realizados ensaios de termogravimetria (TG) e de termogravimetria diferencial (DTG) em pastas com cimento e metacaulim, para determinar a perda de massa das amostras em função da elevação da temperatura. Esses ensaios foram empregados para avaliação da atividade pozolânica do metacaulim, a partir do consumo do hidróxido de cálcio do cimento.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos – LabFilm/CEAR/UPFB, utilizando um analisador térmico simultâneo SDT 650, com taxa de aquecimento de 20°C/min e temperatura final de 1000°C.

Para o cálculo do teor de hidróxido de cálcio e de carbonato de cálcio nas amostras foram utilizadas as equações usadas por (PILAR et al., 2016). A Equação 3 relaciona a massa molecular do hidróxido de cálcio à massa molecular da água, e a Equação 4 relaciona a massa molecular do carbonato de cálcio à massa molecular do CO₂.

$$Ca(OH)_2 = \frac{M_{Ca(OH)_2}}{M_{H_2O}} \cdot H_2O = \frac{74}{18} \cdot H_2O = 4,11 \cdot H_2O \quad (3)$$

$$CaCO_3 = \frac{M_{CaCO_3}}{M_{CO_2}} \cdot CO_2 = \frac{100}{44} \cdot CO_2 = 2,27 \cdot H_2O \quad (4)$$

Onde:

$Ca(OH)_2$: é o teor de hidróxido de cálcio (%);

$M_{Ca(OH)_2}$: é a massa molecular do hidróxido de cálcio (74);

M_{H_2O} : é a massa molecular da água (18);

H_2O : é a perda de massa referente à decomposição do hidróxido de cálcio (%).

$CaCO_3$: é o teor de carbonato de cálcio (%);

M_{CaCO_3} : é a massa molecular do carbonato de cálcio (100);

M_{CO_2} : é a massa molecular do dióxido de carbono ou anidrido carbônico (44);

CO_2 : é a perda de massa referente à decomposição do dióxido de carbono (%).

2.6 Dosagem da argamassa do concreto

A argamassa foi dosada com o software Q-Mix, desenvolvido por Arruda (2022). O software realiza a otimização das misturas de agregados e calcula as porcentagens ótimas, levando em consideração o modelo de empacotamento Alfred modificado (FUNK; DINGER, 1994).

No software, o usuário insere as informações do agregado, dá um nome a ele e preenche os resultados da análise de peneiramento. Em seguida deve escolher qual o diâmetro mínimo (D_s) e máximo (D_L), assim como o módulo de distribuição q . Por último clica no botão “Resolver”. O software realiza as combinações dos agregados e armazena o valor dos desvios entre a curva de cada combinação e a curva do modelo Alfred (CPFT) (FUNK; DINGER, 1994), desde que a soma dos agregados seja 100%. O cálculo está completo quando todas as combinações foram realizadas. O menor desvio (RSS) determina a melhor proporção de agregados. Para que o cálculo não demore muito, o código de programação levou em consideração a possibilidade de atender números com até uma casa decimal.

2.7 Preparo, moldagem e cura dos corpos de prova

A mistura de argamassa foi produzida utilizando o material em uma betoneira de 150 litros. Para a mistura que continha as adições de fíler e metacaulim, a mistura foi realizada com o cimento ainda seca em saco plástico, antes de iniciar o processo de moldagem, a fim de homogeneizar os finos e ter um melhor resultado na combinação de materiais. Para os aditivos,

como a relação água/finos (a/f) foi mantida constante, o teor de aditivo foi ajustado durante o processo de mistura.

O processo de mistura foi realizado da seguinte forma: primeiro foi adicionado um pouco de água com areia para escorvar a betoneira e, em seguida, iniciou-se o processo adicionando areia grossa e 30 % de água. Após cerca de 30 segundos, adicionou-se a areia média e fina e mais 30 % de água, deixando-se homogeneizar por cerca de 1 minuto e 30 segundos. depois adicionou-se os finos e mais 35 % de água. A água restante foi então adicionada com um superplastificante incorporado, continuando por mais dois minutos, garantindo a homogeneização completa. Se fosse necessário adicionar mais do aditivo superplastificante, este era somado pouco a pouco dissolvido em um copo extra de água.

Os corpos de prova (CPs) foram moldados em um molde metálico por aplicação de compactação mecânica e manual. Para os CPs cilíndricos (5 x 10 cm), a compactação foi manual, com pinça e espátula, preenchida com 30 golpes por quatro camadas. Para o cilíndrico (10 x 20) cm, a compactação foi mecânica, também preenchida em quatro camadas e compactada com vibrador.

Após 24 horas os moldes foram desmoldados e identificados, em seguida foram imersos em solução de água de cal saturada até os 7 e 28 dias de idade.

Para o ensaio de compressão foram utilizados dois dos corpos cilíndricos de (5 x 10) cm e o restante foram utilizados para os ensaios de durabilidade.

2.8 Testes físicos e mecânicos da argamassa

2.8.1 Ensaio de consistência (*Flow Table*)

O índice de consistência da argamassa no estado fresco, também chamado como flow table, foi feito com base na norma NBR 13276 (ABNT, 2016).

Ao término do preparo de cada um dos três traços foi executado o ensaio, em que o molde troncônico foi centralizado na mesa de abatimento, preenchido em três camadas sucessivas de argamassa com alturas aproximadamente iguais e aplicado em cada uma delas, respectivamente, quinze, dez e cinco golpes com o soquete. Após a retirada do molde, foi acionado a manivela da mesa para índice de consistência, com 30 giros de maneira uniforme e medido com uma régua, em três diâmetros, o espalhamento da argamassa.

2.8.2 Ensaio de resistência – Compressão axial

Para analisar o desempenho dos corpos de prova, estes foram ensaiados nas idades de 7, 28 e 90 dias (após moldagem). Assim, os corpos de prova foram caracterizados quanto à resistência à compressão axial. A fim de se obter as variações da resistência resultante da redução do cimento com o método de empacotamento de partículas e adições minerais.

2.9 Carbonatação

Sobre esse tema, existe uma variedade de metodologias na literatura. Este trabalho optou pela metodologia utilizada por Jerônimo (2014), pela facilidade de execução e resultados satisfatórios. As condições de ensaio da metodologia estão descritas nos itens subsequentes.

2.9.1 Preparação dos corpos de prova

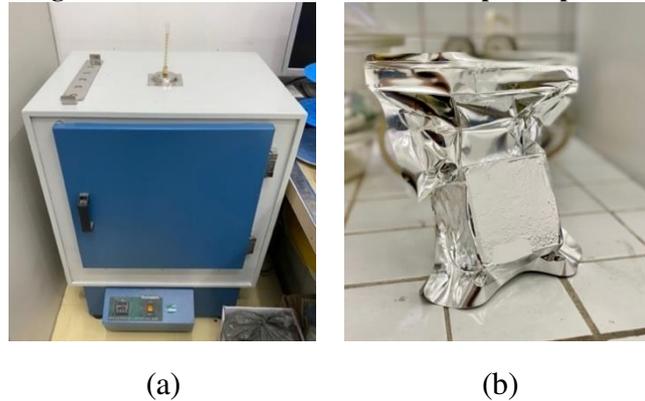
Foram moldados 2 (dois) CPs cúbicos com aresta de 80 mm, sem armadura, para cada condição de ensaio em que foi realizado o acompanhamento da frente de carbonatação. Os CPs foram desmoldados com 24 horas e, em seguida, postos em cura úmida até o sétimo dia. Finalizado esse período, os CPs foram cobertos com filme de PVC em duas camadas e embalados a vácuo com plástico impermeável, para evitar alteração de umidade e penetração de CO₂.

2.9.2 Pré-condicionamento

O pré-condicionamento foi realizado em duas etapas:

- Os CPs foram mantidos em câmara climática a $65 \pm 5\%$ de umidade e 25°C até que atingissem a massa constante, que segundo as recomendações da RILEM (TC 116-PCD) é atingida quando a diferença de massa entre duas pesagens consecutivas no intervalo de 24h é menor que 0,1g.
- Os CPs foram embalados à vácuo em recipientes impermeáveis para garantir que não houvesse troca de umidade com o meio e levados à estufa a 50°C , por um período de 14 dias, como preconiza a RILEM, para promover a redistribuição da umidade interna, Figura 1.

Figura 1 - Pré-condicionamento dos corpos de prova.



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 1: (a) Estufa ventilada utilizada para pré-condicionamento, (b) embalagem impermeável selada a vácuo, para evitar perda de umidade e troca gasosa com o meio.

Após o período de pré-condicionamento, as embalagens foram abertas e foi realizado o primeiro corte, em que foi retirada uma fatia de 5 mm para verificar se houve carbonatação significativa nos CPs durante o período da desmoldagem até o início do ensaio de carbonatação. Não foi constatada carbonatação inicial nos CPs.

2.9.3 *Exposição dos corpos de prova na câmara de carbonatação*

Os CPs foram expostos em uma câmara de carbonatação modelo BASS-UUC-RH-STD-CO2-1000. A alimentação de CO₂ foi mantida em 10%, umidade relativa em 65% ± 5% e temperatura em 25°C, como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Câmara de carbonatação BASS-UUC-RH-STD-CO2-1000.



Fonte: Autor (2022)

Os CPs permaneceram na câmara de carbonatação e foram analisados periodicamente, de acordo com a velocidade do avanço da frente de carbonatação.

A profundidade da frente de carbonatação foi avaliada utilizando-se solução de fenolftaleína a 1%, seguindo procedimento da RILEM (1988). A cada avaliação foi realizado um corte de, no máximo, 5 mm de espessura no sentido perpendicular às faces expostas. As faces, então cortadas, foram limpas com uma escova macia para remoção de pó, para evitar interferências na medida da frente de carbonatação. Em seguida, foi aspergida a solução de fenolftaleína, medindo-se a profundidade da frente de carbonatação.

Com os valores das profundidades médias das frentes de carbonatação ao longo do tempo, foram ajustadas curvas baseadas na primeira lei de difusão de Fick, adaptada para ser utilizada no acompanhamento de tal fenômeno, apresentada na equação 5.

$$e_{CO_2} = K_{CO_2} \sqrt{t} \quad (5)$$

Onde:

e_{CO_2} = profundidade ou espessura carbonatada;

K_{CO_2} = coeficiente de carbonatação;

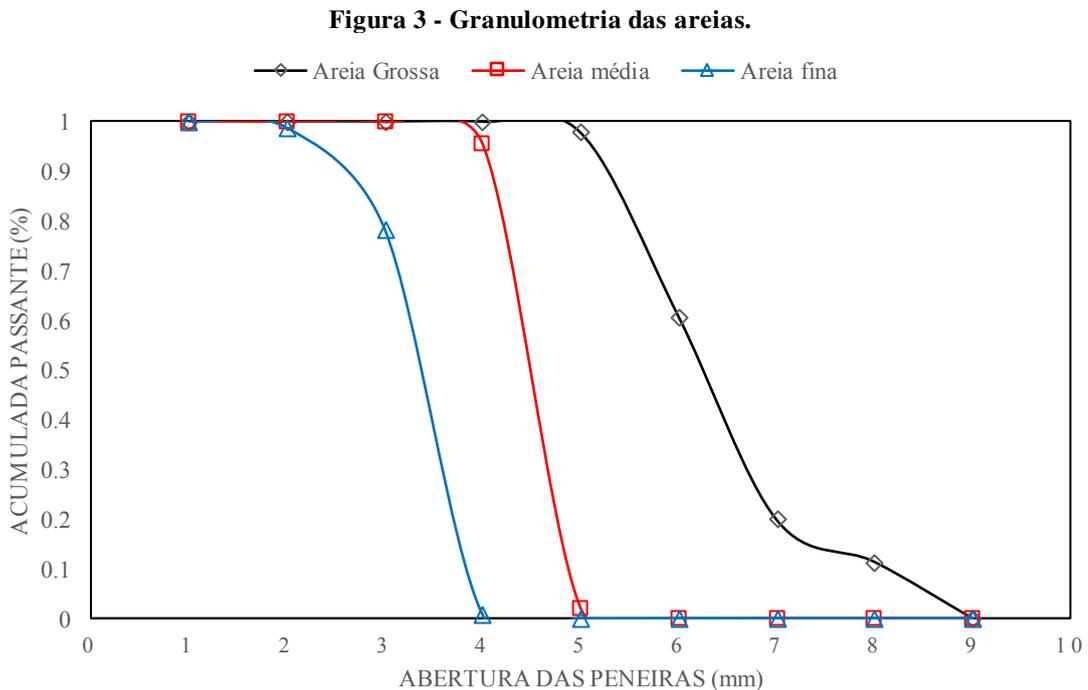
t = tempo de exposição.

Segundo Helene (1993), K_{CO_2} é uma constante que depende da difusividade, do gradiente de concentração e da quantidade de CO_2 retida nos poros que reagiu com produtos alcalinos formando carbonatos. Para ambientes internos, em que as condições são controladas, esse modelo apresenta forte correlação do fenômeno.

3 RESULTADOS DA PESQUISA

3.1 Caracterização dos materiais

Para otimizar a dosagem pela definição do empacotamento de partículas, é necessário que haja a distribuição granulométrica adequadas dos agregados. A Figura 3 apresenta os resultados das curvas de massa retida acumulada, obtidas pela composição granulométrica de cada faixa de areia utilizada (fina, média e grossa) nos traços da argamassa do concreto.



Fonte: Autor (2022)

O módulo de finura é a soma das porcentagens retidas acumuladas, composto pelos resultados da granulometria. Na tabela 2, podemos observar o módulo de finura das areias, variando de acordo com sua classificação.

Tabela 2 - Módulo de finura das areias.

Módulo de Finura	
Fina	1,79
Média	2,97
Grossa	4,89

Fonte: Autor (2022)

A Tabela 3 mostra os valores de massa específicos para duas amostras de areia. No entanto, esses valores ainda são suscetíveis à relação proporcional entre o tamanho das partículas e seus resultados, e pode-se notar uma redução da massa à medida que a granulometria diminui.

Tabela 3 - Massa específica do agregado miúdo.

Massa na Condição Saturada Superfície Seca (g/cm³)		
	Amostra 1	Amostra 2
Fina	2,14	2,18
Média	2,19	2,33
Grossa	2,25	2,24

Fonte: Autor (2022)

A massa específica do cimento é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Massa específica do cimento.

Massa Específica do Cimento (g/cm³)		
	Amostra 1	Amostra 2
V1 (cm ³)	0,4	1
V2 (cm ³)	20,5	21
m (g)	60	60
ρ (g/cm ³)	2,99	3

Fonte: Autor (2022)

Por fim, as Tabelas 5 e 6 apresentam os valores das massas específicas obtidas para as adições do filer e metacaulim respectivamente.

Tabela 5 - Massa específica do filer.

Massa Específica do Fíler (g/cm³)		
	Amostra 1	Amostra 2
V1 (cm ³)	0,6	1
V2 (cm ³)	21,7	22,2
m (g)	60	60
ρ (g/cm ³)	2,84	2,83

Fonte: Autor (2022)

Tabela 6 - Massa específica do metacaulim.

Massa específica do Metacaulim (g/cm³)	
V0 (cm ³)	0,6
Vf (cm ³)	23,2
m (g)	60
ρ (g/cm ³)	2,84

Fonte: Autor (2022)

Com base nas análises dos dados obtidos, podemos concluir que os resultados adquiridos atendem as condições estabelecidas na NBR 16605:2017, considerando os valores das amostras individuais não diferem em mais de 0,02 g/cm³.

3.2 Metacaulim

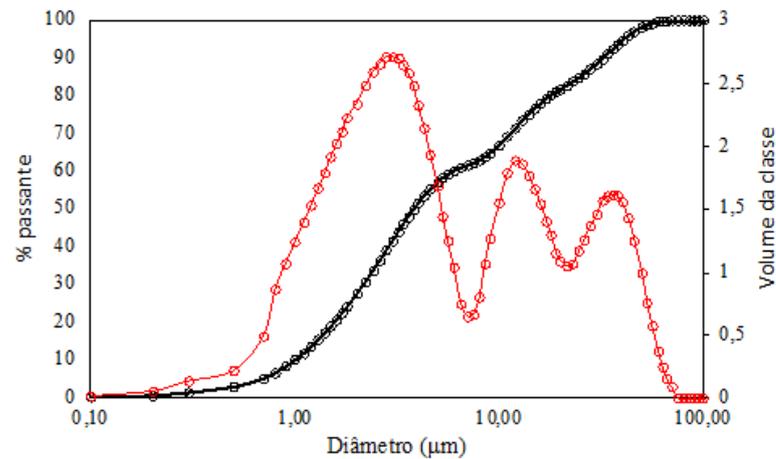
Objetivando promover o refinamento de poros por meio do empacotamento nos níveis abaixo da granulometria do cimento, foi utilizada, como adição mineral, a metacaulinita vermelha. Nesta especificação, o metacaulim possui massa específica de, aproximadamente, 2,57 g/cm³. A composição química foi obtida através de ensaio de FRX, apresentada da Tabela 7, e a análise granulométrica apresentada na Figura 4.

Tabela 7 - Composição química do metacaulim utilizado.

Óxidos (%)	
SiO ₂	53,65
Al ₂ O ₃	31,79
Fe ₂ O ₃	9,9
MgO	1,17
K ₂ O	0,65
Na ₂ O	0,2
TiO ₂	1,84
Outros	0,6

Fonte: Autor (2022)

Figura 4 – Granulometria a Laser do metacaulim.



Fonte: Autor (2022)

3.3 Fíler Calcário

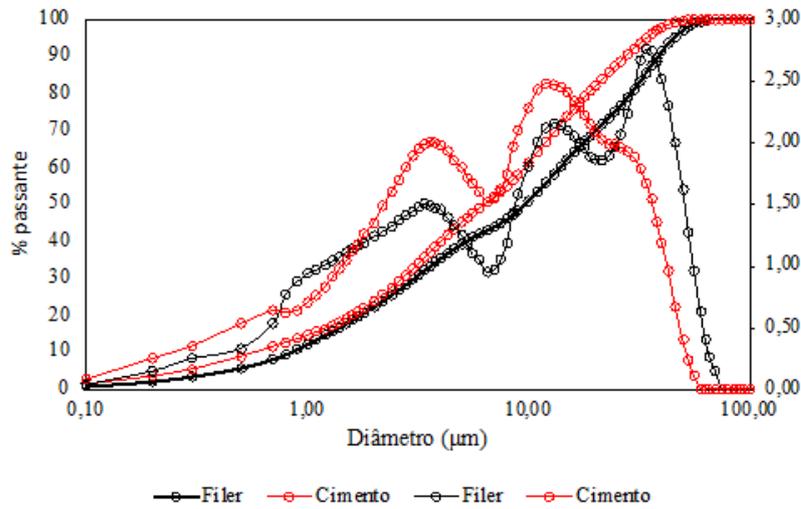
Para a pesquisa, utilizou-se um fíler calcário, o qual pode ser utilizado na produção de plásticos, tintas, fritas cerâmicas, esmaltes e etc. Determinada conforme a ABNT NBR NM 23:2000, a massa específica do fíler utilizado foi de $2,84 \text{ g/cm}^3$. Foi realizado ensaio de granulometria a laser, no equipamento CILAS 1090 SECO, Faixa: $0,10 \text{ } \mu\text{m} - 500,00 \text{ } \mu\text{m} / 100$ Classes. O fíler apresentou diâmetro médio de $14,90 \text{ } \mu\text{m}$. A Figura 5 apresenta o resultado do ensaio. Nota-se a finura do material, bem próxima ao cimento. Este material tem, portanto, potencial para atuar na substituição de cimento, como sugerido em ensaios por Bentz (2005). A composição química foi obtida através de ensaio de FRX, apresentada da Tabela 8.

Tabela 8 - Composição química do fíler calcário.

Óxidos (%)	
CaO	95,743
SiO ₂	3,455
Fe ₂ O ₃	0,46
K ₂ O	0,101
SrO	0,1
CuO	0,09
MnO	0,05

Fonte: Autor (2022)

Figura 5 – Granulometria a Laser do fíler calcário.

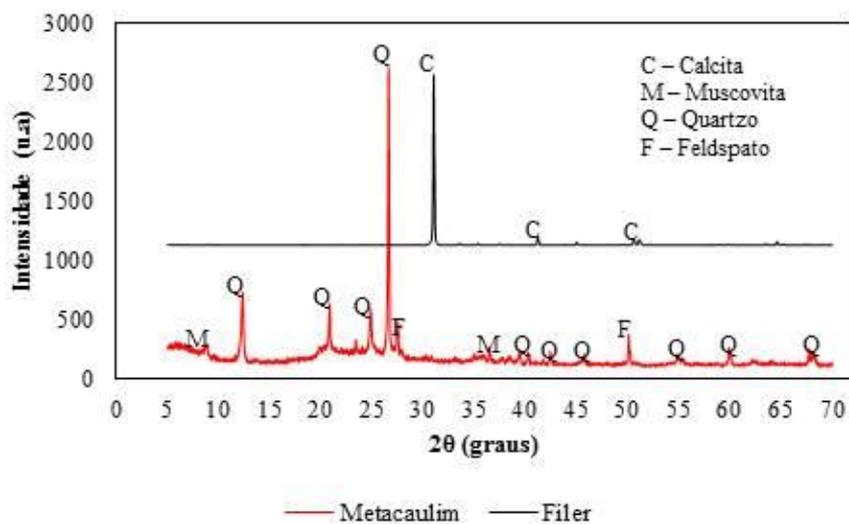


Fonte: Autor (2022).

3.4 Difração de raios X (DRX)

A Figura 6 apresenta o resultado do ensaio de DRX do fíler calcário e do metacaulim. Constata-se o alto grau de cristalinidade das fases do fíler, assim como confirma o resultado do FRX, com picos característicos de calcita (CaCO_3). O resultado do DRX do metacaulim mostra que há um pequeno halo amorfo, que indica a reatividade do material. Posteriormente será apresentada a análise da pozolanicidade do metacaulim.

Figura 6 - DRX do fíler calcário e metacaulim

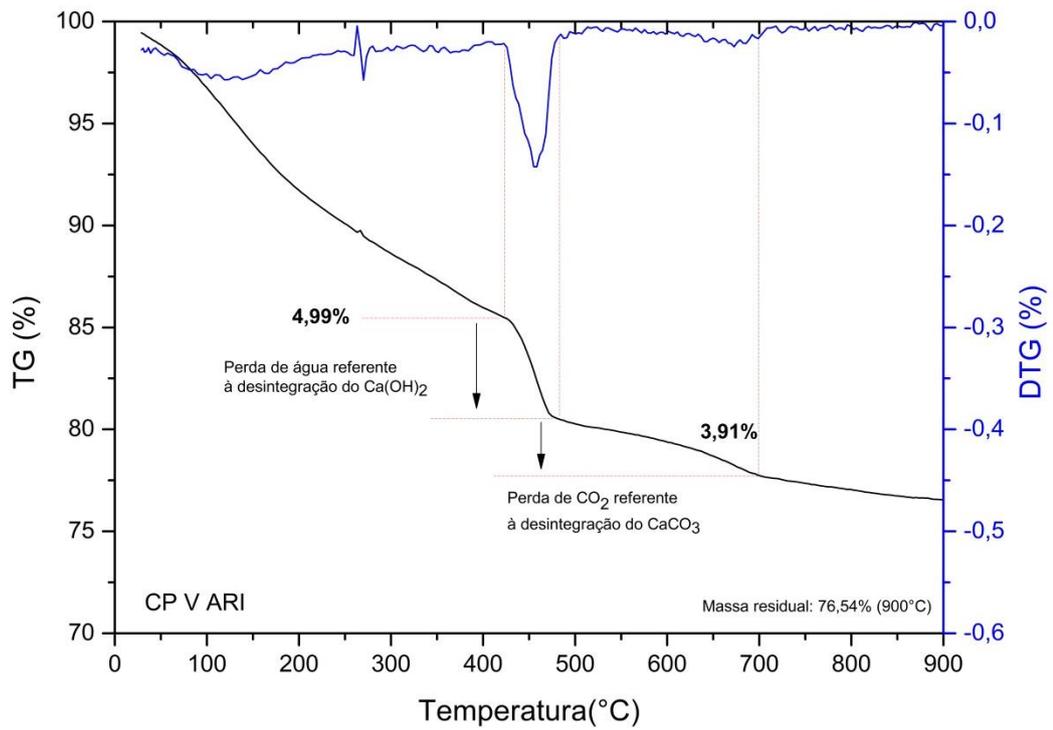


Fonte: Autor (2022)

3.5 Termogravimetria (TG/DTG)

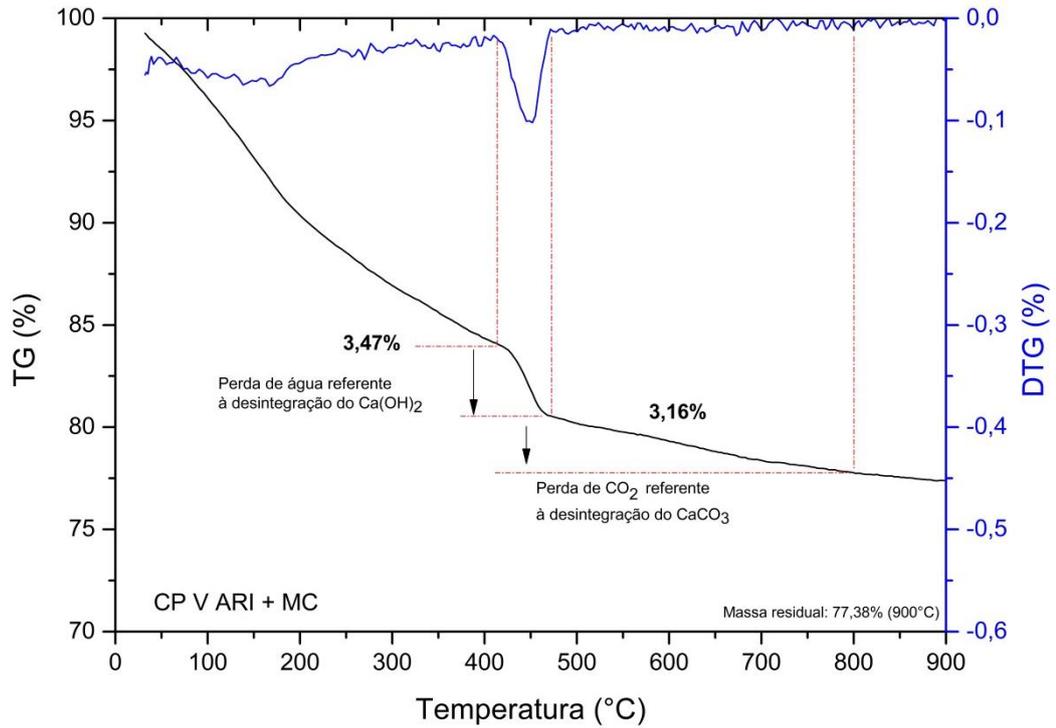
Para avaliar a pozzolanicidade do metacaulim foram realizadas análises térmicas (TG/DTG) de pastas de cimento contendo metacaulim e cimento, e outra pasta somente com cimento. As Figuras 7 e 8 apresentam o resultado da TG/DTG das pastas.

Figura 7 - TG/DTG da pasta de cimento.



Fonte: Autor (2022)

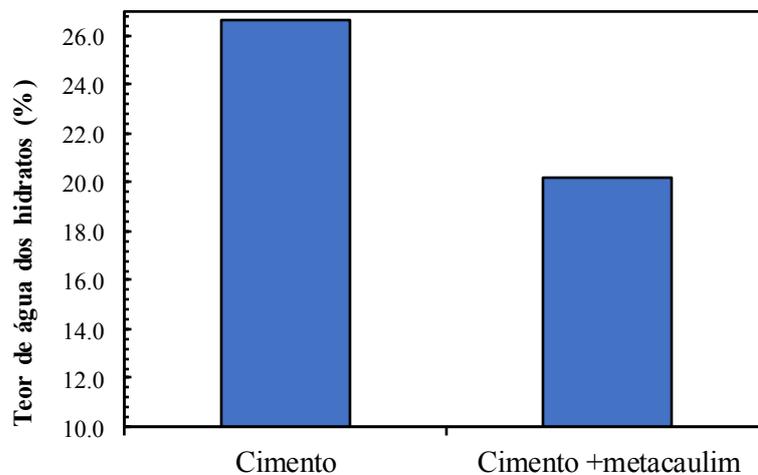
Figura 8 - TG/DTG da pasta com metacaulim.



Fonte: Autor (2022)

A Figura 9 apresenta o cálculo das porcentagens de hidróxido de cálcio nas duas pastas, através da análise da perda de água quimicamente combinada no pico entre 400 e 470° C, correspondente à portlandita.

Figura 9 - Porcentagem de hidróxido de cálcio nas pastas



Fonte: Autor (2022)

A atividade pozolânica do metacaulim pode ser constatada com os resultados expostos na Figura 9. A diferença das porcentagens de hidróxido de cálcio (6,5%) indica que houve consumo deste nas reações de hidratação do cimento, devido a pozolanicidade do metacaulim. Essa redução do teor de Ca(OH) reduz a reserva alcalina da pasta com o metacaulim.

3.6 Dosagem das argamassas

Com o auxílio do software Q-Mix, foi possível obter os dados para compor a dosagem final dos traços. Sendo assim, para a execução de quatro diferentes tipos de traços, foram determinadas as proporções adequadas para essas composições. Os traços foram subdivididos em RCE, RSE, T1 e T2, sendo denominado de RCE o traço composto somente com o empacotamento dos materiais, RSE o traço sem empacotamento dos agregados, T1 e T2 os traços com o empacotamento e adições de fíler e metacaulim. A Tabela 9 apresenta os consumos dos materiais utilizados para todos os traços.

Tabela 9 - Proporção e consumo dos materiais utilizados para o traço com empacotamento de partículas.

	RSE (kg/m ³)	RCE (kg/m ³)	T1 (kg/m ³)	T2 (kg/m ³)
Cimento	380	380	154	266
Fíler	-	-	165,47	53,47
Metacaulim	-	-	60,53	60,53
Areia fina	-	444,02	444,02	444,02
Areia média	-	188,69	188,69	188,69
Areia Grossa	-	691,6	691,6	691,6
Areia comercial	855,52	-		

Fonte: Autor, 2022.

Para a relação água/finos, foram utilizados os valores de 0,45 para RSE e RCE, e 0,47 para os traços T1 e T2. Houve uma variação na quantidade utilizada de aditivo em relação aos dois traços com adições, com a utilização de 1,5% do aditivo no traço T1, já foi observado uma consistência razoável, enquanto no traço T2 precisou adicionar uma maior quantidade de aditivo para chegar ao aspecto adequado de consistência e trabalhabilidade, 1,9%.

3.7 Índice de consistência da argamassa

Para analisar as características no estado fresco da argamassa estudada, verificou-se a capacidade de deformação do material quando aplicadas cargas na mesa de abatimento, podendo refletir, ainda, sobre a sua trabalhabilidade. Por fim, seguindo as condições impostas

pela NBR 13276 (ABNT, 2016), foi possível obter os resultados apresentados na Tabela 10, sabendo que o índice de consistência (IC) consiste na média obtida pelas três outras médias dos diâmetros (em mm).

Tabela 10 - Índice de consistência (IC) para T1 e T2.

Índice de Consistência				
	RSE	RCE	T1	T2
D1 (mm)	283	191	254	278
D2 (mm)	298	187	260	285
D3 (mm)	295	210	259	288
IC (mm)	292	196	258	284

Fonte: Autor, 2022.

Logo, percebe-se que o índice de consistência foi menor para o RCE, devido a maior área específica da areia fina. Além disso, após o abatimento na mesa, foi possível analisar o início da segregação através de uma observação visual.

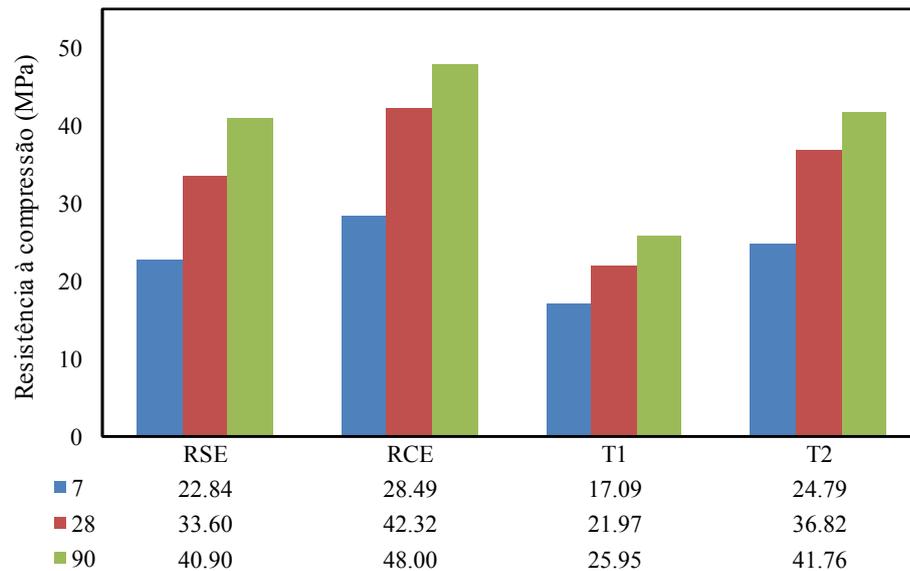
Ao utilizar as adições minerais nos traços T1 e T2, por sua vez, apresentaram espalhamentos maiores, assim como maior coesão da mistura, resultando, assim, numa argamassa mais fluida e com uma melhor trabalhabilidade, quando comparada ao índice de consistência do RCE.

A melhoria da trabalhabilidade dos traços T1 e T2 podem ser explicadas pela otimização do empacotamento, que pode reduzir a viscosidade plástica da mistura em um nível adequado, mesmo com baixo teor de água a alto teor de fíler (PROSKE *et al.*, 2013). El Barrak *et al.* (2009) demonstra que dependendo do fator a/c , o fíler calcário possui mais ação como agente lubrificante, visto que sua menor massa específica resulta maiores espaços entre as partículas, facilitando o escoamento, também descrito por Filho *et al.* (2020).

3.8 Resistência à compressão

Conforme recomendado na NBR 5739 (ABNT, 2018), os ensaios de resistência à compressão, foram realizados nas idades de 7, 28 e 90 dias, em que os corpos de prova ficaram submetidos à cura em cal. Os resultados são apresentados nas figuras 10 e 11

Figura 10 - Resistência à compressão dos corpos de prova.



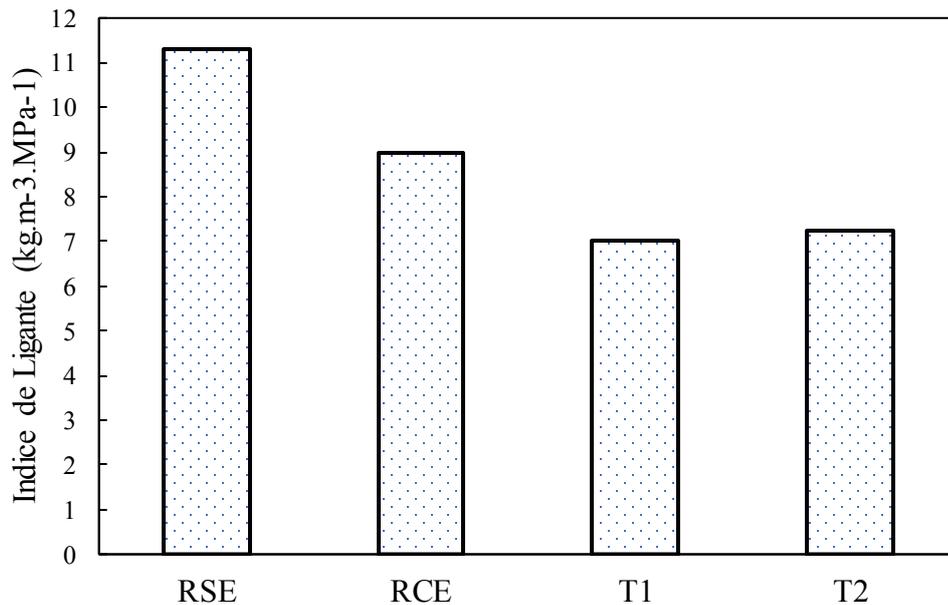
Fonte: Autor (2022)

Observa-se que o traço com empacotamento de partículas (RCE), obteve uma resistência superior aos demais traços para todas as idades. Percebe-se que nos traços em que houve a substituição do cimento por filer e metacaulim, o desempenho de T2 foi superior ao de T1 que possui menor consumo de cimento em sua composição, porém T2 apresentou resistência superior ao traço RSE e valores bem próximos ao concreto de referência (RCE), pela ação de refinamento dos poros causada pelo filer calcário e ação pozzolânica do metacaulim. Há estudos na literatura que relatam melhorias no desempenho mecânico de concretos até certos valores de filer calcário na mistura, visto que este reage com as fases de alumina do cimento e produz carboaluminatos, que contribuem para a resistência por meio da produção de mais hidratos e preenchimento dos poros (AMIR, HOOTON, 2014)

3.9 Índice de ligante (IL)

Com relação à eficiência dos ligantes, Daminieli *et al.* (2010) argumentam que poucos estudos têm focado no uso eficiente do cimento. Assim, propõem um indicador que possa medir esse parâmetro de argamassa e concreto, definido como a eficiência do concreto/argamassa, em termos da quantidade total de ligante ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) necessária para fornecer uma resistência mecânica de 1 MPa, denominado índice de ligante (IL). A Figura 11 mostra o índice de ligante das argamassas estudadas.

Figura 11 - Índice de ligante das argamassas.

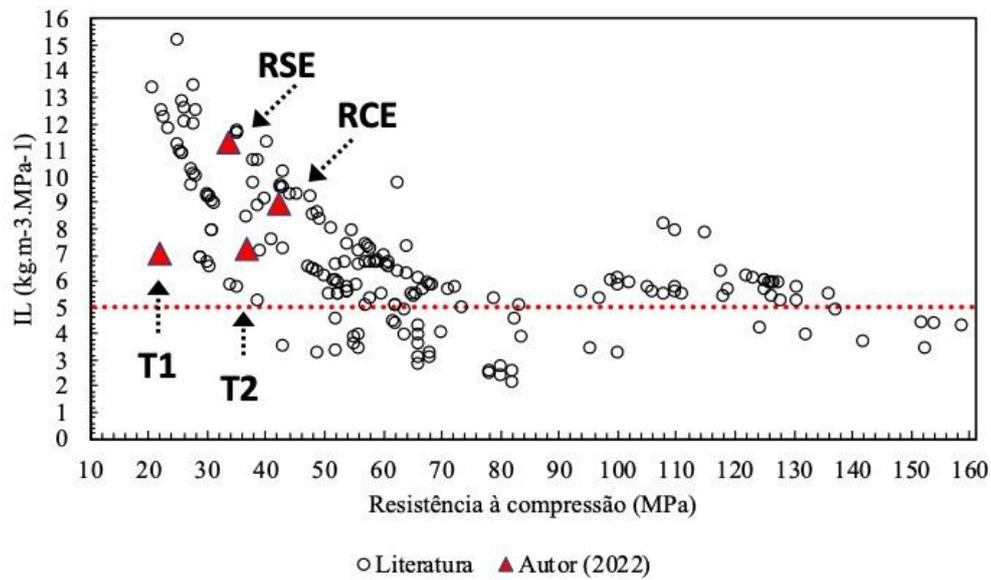


Fonte: Autor (2022)

Percebe-se que o IL tende a diminuir com dosagem através do empacotamento de partículas, sendo menor nos traços com adições minerais. Nota-se que o traço de referência sem empacotamento RSE obteve IL de $11,31 \text{ kg.m}^{-3}.\text{Mpa}^{-1}$ e o traço de referência com empacotamento apresentou IL igual a 8,97, portanto, houve um ganho de 25,95% na eficiência do ligante, assim como visto nos trabalhos de Daminelli *et al.* (2017), YOUSUF *et al.* (2019), Lopes *et al.* (2020) e Santos *et al.* (2021).

A Figura 12 apresenta a inserção dos resultados obtidos em relação a diversos trabalhos da literatura. Verifica-se que as argamassas T1 e T2 apresentam bom desempenho na classe de resistência abaixo de 50 Mpa, em que se apresentam diversos trabalhos com IL acima de $8 \text{ kg.m}^{-3}.\text{Mpa}^{-1}$. Vale ressaltar, também, a proximidade do IL de $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{Mpa}^{-1}$, estabelecido por Damineli (2010), como limite para concretos com elevada eficiência.

Figura 12 - Resultados obtidos em relação à literatura.



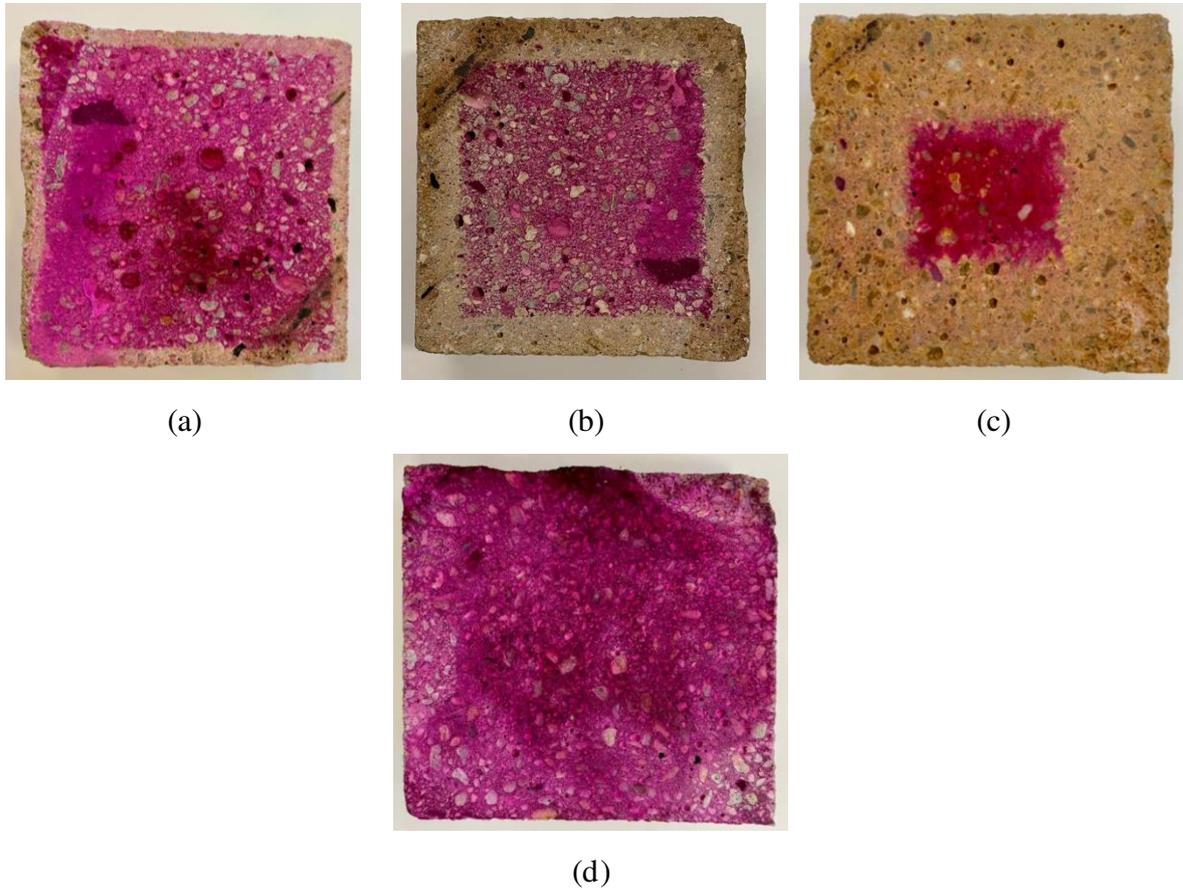
Fonte: Autor, 2022.

3.10 Carbonatação

Os resultados de carbonatação foram obtidos através do corte da seção transversal do corpo de prova e aspensão de fenolftaleína a 1%. O primeiro corte foi realizado antes dos CP entrarem na câmara, para verificar se houve carbonatação no período de cura e pré-condicionamento. Verificou-se que não houve carbonatação inicial.

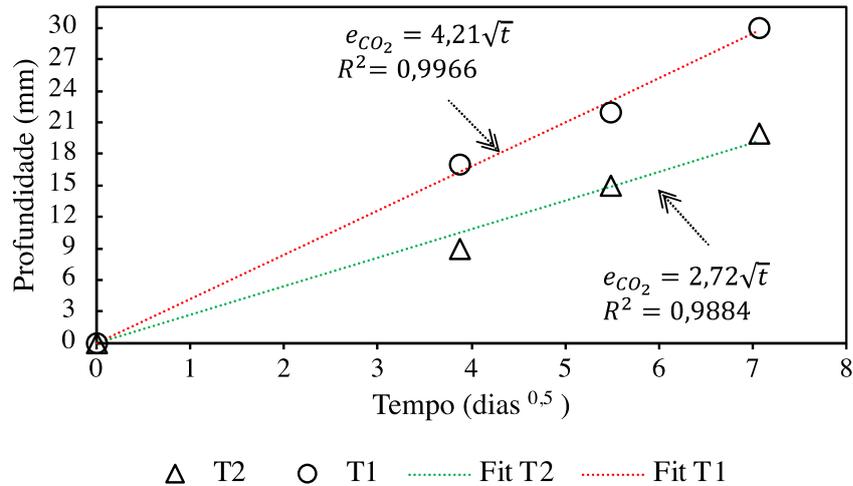
A Figura 13 mostra o estágio de três medidas do traço T1, que obteve desempenho inferior em relação aos demais traços. Consta-se o rápido avanço da frente de carbonatação, já esperado, visto o resultado da análise termogravimétrica, que indica a diminuição da reserva alcalina nas pastas com metacaulim. O T1 por possuir menor quantidade de cimento já se reduz o aporte alcalino, e com a inserção do metacaulim essa reserva de hidróxido diminui ainda mais.

Figura 13 – Frente de carbonatação dos traços T1 e T-RCE.



A Figura 14 apresenta o efeito das adições pozolânicas na velocidade de carbonatação por meio da profundidade de carbonatação (e_{CO_2}) em relação ao tempo de exposição das argamassas produzidas nesta pesquisa. As curvas foram obtidas através da primeira Lei de Fick ajustada para o fenômeno da carbonatação, apresentada no capítulo de materiais e métodos. Os traços T1 e T2 possuem a mesma proporção de metacaulim, porém em T2 o consumo de cimento é maior que em T1. Os traços com 100% de cimento não estão representados na Figura 14 porque não foi constatada frente de carbonatação no período estudado.

Figura 14 - Profundidade de carbonatação



Fonte: Autor (2022)

Os resultados indicam que o metacaulim e o filer calcário usados como substituição parcial do cimento Portland tornou a argamassa mais susceptível ao avanço da carbonatação em relação traço sem adições minerais. Verifica-se que o traço com maior consumo de cimento apresentou menor profundidade de carbonatação em relação a T1, que possui menor consumo de cimento Portland. Isso significa que T2 possui uma reserva alcalina maior por ter mais portlandita por unidade de volume de argamassa em sua composição.

O uso de adições em substituição parcial tende a diminuir a reserva alcalina conforme mostrado na Figura 13 e isso explica a tendência de aumento da profundidade de carbonatação nessas argamassas. Pessoa e Nepomuceno (2002), Mehta e Monteiro (2008), Shah; Bishnoi (2018) e Soldado *et al.* (2021), afirmam, com base em dados experimentais, que a velocidade de carbonatação tende a reduzir em concretos com maior consumo de cimento, comparando o concreto com a mesma relação água/aglomerante.

O trabalho de Ciry, Escadeillas e Diederich (2017) indica que quanto maior o teor de metacaulim, maior a profundidade de carbonatação. Eles explicam que o aumento na cinética de carbonatação foi devido ao consumo de portlandita pela reação pozolânica do metacaulim. Por outro lado, os autores relatam que a combinação de metacaulim e filer calcário em substituição ao cimento apresentou um comportamento muito bom contra a carbonatação, com uma profundidade de carbonatação quase equivalente à das amostras sem adições pozolânicas.

Nesse sentido, Ribeiro, Albuquerque e Santos (2020), ao avaliar a influência do metacaulim na reação de carbonatação, mostraram que seu comportamento é baseado em uma ampla variedade de variáveis de influência, como, por exemplo, microestrutura, macroestrutura

porosa, reserva alcalina inicial, umidade, ainda difícil de prever, reações simultâneas de hidratação e carbonatação, entre outros. Portanto, é necessário um estudo específico do concreto/argamassa especificado no projeto em termos de carbonatação, almejando um controle tecnológico mais eficiente do mesmo antes de sua utilização.

4 CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

No comportamento do concreto na fase de argamassa, foi demonstrado que houve uma redução dos vazios entre as partículas, resultando em uma argamassa menos porosa e com melhor desempenho mecânico, devido ao empacotamento de agregados, obtido com um coeficiente de distribuição granulométrica de 0,35 no modelo Andreassen modificado (Alfred).

As adições de filler e metacaulim afetaram diretamente a trabalhabilidade das argamassas, visto que os índices de consistência foram maiores para as misturas T1 e T2.

Além disso, as amostras apresentaram resultados satisfatórios em termos de resistência à compressão, atingindo valores acima de 20 MPa. Comparando todas as argamassas, verificou-se que o traço T2 apresentou a melhor eficiência de todas, embora RCE tenha apresentado um melhor resultado de resistência à compressão. O bom desempenho do T2 pode estar ligado ao refinamento dos poros através da adição de materiais finos.

As mostras dosadas com adições minerais em substituição parcial ao cimento Portland, expostas à câmara de carbonatação, apresentaram menor resistência a carbonatação acelerada, sendo mais desfavorável nas amostras com menor consumo de cimento, mesmo que estas apresentassem maior resistência à compressão.

Por fim, o estudo da durabilidade frente a carbonatação em concretos/argamassas com baixo consumo de cimento é relevante, visto que a redução deste por diferentes adições pode provocar o aumento da profundidade de carbonatação, dependendo do consumo de cimento presente nestes materiais. Enfatizando que concretos/argamassas com maior resistência mecânica não é sinônimo de durabilidade, tem-se que investigar a composição da matriz cimentícia. Com isso, em síntese, o trabalho apresentou resultados satisfatórios, atingindo aos objetivos propostos.

REFERÊNCIAS

- ASHISH, Deepankar Kumar. Concrete made with waste marble powder and supplementary cementitious material for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, Índia, v. 211, p. 716-729, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR EB-208**: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro. 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 5732**: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro. 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro. 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 11578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro. 1991.
- BUCHER, Raphaël *et al.* Service life of metakaolin-based concrete exposed to carbonation Comparison with blended cement containing fly ash, blast furnace slag and limestone filler. **Cement and Concrete Research**, França, ed. 99, p. 18-29, 2017.
- DAMINELI, B. L. KEMEID, F. M. AGUIAR, P. S. JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement and Concrete Composites*, V. 32, Issue 8, 2010.
- DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes. *REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS*, v. 10, p. 998-1024, 2017.
- DAMINELI, B. L. Conceitos para formulação de concreto com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 237, 2013.
- EUROPEAN COMMITTEE STANDARDIZATION. **EN 197-1**: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Bruxells, 2000.
- FELTRIN, Cristina Silva; ISAÍAS, Geraldo Cechella. Propriedades do concreto com adição de fíler calcário dolomítico. **Revista Ciência e Inovação**, v. 3, p. 58-71, 2018.
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. atual. São Paulo: Editora Atlas S.A, 2002. 176 p. ISBN 85-224-3169-8.
- HOMAYOONMEHR, Reza; RAMEZANIANPOUR, Ali Akbar; MIRDARSOLTANY, Mohammadamin. Influence of metakaolin on fresh properties, mechanical properties and corrosion resistance of concrete and its sustainability issues: A review. **Journal of Building Engineering**, França, ed. 44, 2021.
- KANNAN, D.M. *et al.* High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 35-41, 2017.

KIM, Hong-Sam; LEE, Sang-Ho; MOON, Han-Young. Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 21, ed. 6, p. 1229-1237, 2020.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M. Microestrutura do Concreto. *In*: MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: Editora IBRACON, 2008. cap. 2, p. 21-202.

NEGREDO, Alexandre Silveira. **Durabilidade de concretos com resíduo de marmoraria sob a ação combinada de carbonatação e cloretos**. Orientador: VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO. 2018. 145 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de de Brasília, Brasília, 2018.

OLIVEIRA, C. O. *et al.* Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Revista Matéria**, São Carlos, v. 23, 2018.

RAISDORFER, Janderson William. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos**. 2015. 151 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015

RICHARDSON, Roberto Jarry. **Pesquisa Social: Métodos e Técnicas**. 3. ed. rev. atual. e aum. São Carlos: Editora Atlas S.A, 1999. 329 p. ISBN 85-224-2111-0.

RILEM Recommendations. **CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth**. Materials and Structures, v. 21, n. 6, p. 453-455, Nov. 1988.

RODRIGUES, Dardania Aparecida Evangelista; GOMES, Abdias Magalhães; LINS, Vanessa de Freitas Cunha. Efeito da adição de metacaulim no capilar absorção e carbonatação do concreto. **Revista Matéria**, Belo Horizonte, 2017.

SANTOS, B.S.; ALBUQUERQUE, D.D.M.; RIBEIRO, D.V. Efeito da adição do metacaulim na carbonatação de concretos de cimento Portland. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, Salvador, v. 13, p. 1-18, 2020.

SHAH, Vineet; BISHNOI, Shashank. Carbonation resistance of cements containing supplementary cementitious materials and its relation to various parameters of concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 178, p. 219–232, 2018.

SOLDADO, Eliana; ANTUNES, Ana; COSTA, Hugo; DO CARMO, Ricardo; JÚLIO, Eduardo. Durability of mortar matrices of low-cement concrete with specific additions. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 309, p. 125060, 2021.

THE CEMENT SUSTAINABILITY INFINITIVE-CSI. **Recycling Concrete**. Suíça: World Business Council for Sustainable Development, 2009. 42 p. ISBN 978-3-940388-49-0.