



CBPAT
2024



**De 17/07/2024 a 20/07/2024
Fortaleza, Ceará.
DOI: 10.5281/zenodo.13243984**

Congresso Brasileiro de Patologia das Construções

INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE METACAULIM NA DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Thaís Rodrigues Fortes^{1,2*}, Carina Mariane Stolz²

*thais.fortes@csn.com.br

¹ Assessoria Técnica, CSN Cimentos, Rio de Janeiro, Brasil

² Programa de Engenharia Ambiental (PEA)/POLI/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

RESUMO

A utilização do concreto armado vem se mostrando dominante na construção civil brasileira, tendo em vista motivos culturais e econômicos. Ao passar dos anos, muitas estruturas vêm apresentando problemas com durabilidade, o que impacta em alto custo com manutenção e reforço estrutural. Um dos principais agentes para a degradação da estrutura é a corrosão das armaduras, sendo importante que o concreto dificulte ou impeça a penetração de agentes agressivos até esses elementos. O presente trabalho aborda a utilização de adições minerais na composição do concreto, de forma a alterar a estrutura interna e consequentemente as condições de permeabilidade, evidenciando a relevância dessas adições para o atendimento da vida útil e durabilidade que se pretende nas estruturas de concreto armado. Foram avaliadas as propriedades mecânicas do concreto, módulo de elasticidade e permeabilidade, de quatro proporcionamentos, dosados em betoneira, moldados corpos de prova e após período de cura, realizados os ensaios. As quatro dosagens foram de um proporcionamento referência, sem adição de Metacaulim e outro três, com adição de 8%, 10% e 12% de Metacaulim em substituição a parte do aglomerante da composição. Os resultados demonstraram que a adição de 10% de Metacaulim em substituição a parte do aglomerante da composição, trouxe os melhores resultados para as avaliações realizadas.

Palavras-chave: Concreto armado; Durabilidade; Adições minerais; Permeabilidade.

ABSTRACT

The use of reinforced concrete has proven to be dominant in Brazilian civil construction, for cultural and economic reasons. Over the years, many structures have presented durability problems, resulting in high maintenance and structural reinforcement costs. One of the main agents for the degradation of the structure is the corrosion of the reinforcement, and the concrete must hinder or prevent the penetration of aggressive agents to these elements. The present work addresses the use of mineral additions in the composition of concrete to alter the internal structure and consequently the permeability conditions, highlighting the relevance of these additions in meeting the useful life and durability intended in reinforced concrete structures. The mechanical properties of concrete, modulus of elasticity, and permeability of four proportions of concrete were evaluated, one reference, without the addition of Metakaolin, and another three, with the addition of 8%, 10% and 12% of Metakaolin replacing part of the binder of the composition. The results demonstrated that the addition of 10% Metakaolin to replace the binder part of the composition, brought the best results for the evaluations carried out.

Keywords: Reinforced concrete; Durability; Mineral additions; Permeability

1. INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland foi desenvolvido em meados do século XIX e os primeiros edifícios em concreto armado foram construídos há mais de um século, a partir daí, o concreto vem sendo a base da construção das sociedades, viabilizando a construção de moradias, estradas, pontes e grande obras de infraestrutura (SERRA, 2007).

A necessidade do estudo de materiais que agreguem ao concreto alta resistência e durabilidade, vem da demanda de superar as limitações do concreto, no que se refere ao precoce envelhecimento das estruturas, decorrente de infiltrações de água nos capilares, entre outras manifestações patológicas que podem ter por consequência a corrosão das armaduras, provenientes da alta porosidade que o concreto convencional pode ter (MEHTA & MONTEIRO, 2014). Conforme Aïtcin já afirmava há alguns anos que (2000, p.2), “[...] é inevitável que em um futuro muito próximo o concreto seja mais especificado e usado pela sua durabilidade do que, especificamente, pela sua alta resistência à compressão”.

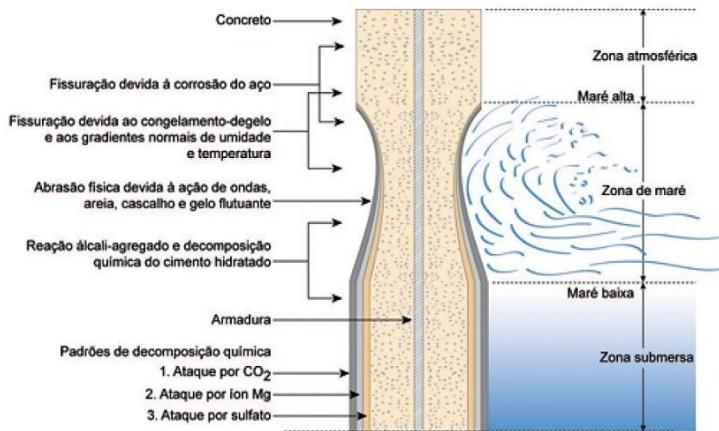
As demandas dos projetos estão cada dia mais desafiadoras e a evolução do concreto mostra-se se uma importância para atender às solicitações mecânicas, químicas e físicas, advindos de projetos de pontes extensas, pisos industriais, edificações com altura elevada, exposição a ambientes agressivos, entre outras solicitações (AÏTCIN, 2000).

1.1 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL

A durabilidade é a capacidade que um sistema ou edificação tem de manter corretamente o desempenho de suas funções, ao passar do tempo, sendo esse iniciado com o uso e finalizado quando o desempenho deixa de atender aos requisitos do usuário, mesmo submetido às condições de uso e de manutenção e esse é um requisito econômico do usuário, pois está diretamente ligado ao custo global do bem. O período compreendido entre o início da operação, ou uso e o momento em que esse deixa de atender aos requisitos do usuário pré-estabelecido, é denominado vida útil (ABNT, 2024).

A estrutura de concreto armado quando exposta a ambientes agressivos, como sais de degelo e água do mar, estão suscetíveis à ocorrência de graves problemas, como já ocorrido em estruturas como tabuleiros de pontes, túneis submarinos, e outras estruturas expostas a regiões de maré, com idade inferior a 20 anos (METHA e BURROWS, 2001). A severidade da deterioração em estruturas de concreto pode não ser uniforme em toda a estrutura, conforme pode ser observado na Figura 1, que ilustra uma estrutura cilíndrica de concreto armado, exposta à água do mar. Acima do nível de maré a estrutura está mais exposta à ação da corrosão da armadura, devido a presença de oxigênio, já entre as linhas de maré alta e baixa, essa fica exposta a fissuração e lascamento, devido aos ciclos de molhagem e secagem. Os ataques químicos provenientes da reação álcali-agregado, interagindo com a água do mar, também atuam nesse ponto. A parte submersa da estrutura só está sujeita a ataques químicos da água do mar. Dessa forma, a região da estrutura que terá a maior deterioração, será a situada junto à zona de maré (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Figura 1 - Representação esquemática de um pilar de concreto armado exposto a água do mar.



Fonte: MEHTA & MONTEIRO, 2008.

1.2 PERMEABILIDADE X POROSIDADE

Segundo Mehta e Monteiro (2008): “Permeabilidade é a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido através de um sólido poroso”. A permeabilidade da pasta de cimento é proporcional a porosidade capilar e rege o quanto resistente será um concreto a ataques químicos, dessa forma, em uma estrutura porosa e compacta, o ataque se restringirá a superfície. Quando a permeabilidade ocorre em uma estrutura simplesmente porosa a ação dos agentes agressivos acontecerá também no interior da peça (HELENE et al., 2001).

A relação água/cimento é o agente que controla a porosidade, quanto menor a relação, menos poroso será o concreto. Além do teor de poros, deve-se considerar a conectividade entre os poros, ou seja, poros só terão influência na penetração de agentes agressivos se estiverem conectados entre si, permitindo o acesso dos agentes através dos canais formados entre eles (HELENE et al., 2001). O tamanho dos poros e também, a conexão entre eles, influenciam nas propriedades de transporte de materiais, como a permeabilidade e a difusão de íons (OLLIVIER & VICHOT, 2014).

Segundo Helene et al. (2013), em estruturas de concreto expostas a teores elevados de cloreto, a penetração desses pode ocorrer através da absorção capilar das fissuras ou por difusão. O processo de molhagem e secagem do concreto, quando exposto a água do mar, favorece o acúmulo de sais no seu interior, elevando a concentração de sais.

Uma das formas de reduzir a porosidade do concreto é o uso de adições minerais. A Portlandita, Ca(OH)₂, produto da hidratação do cimento, apresentada na Equação 1 e Equação 2, em reação química com a SiO₂, presente na adição mineral, formam o Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H), conforme Equação 3, elemento resistente da pasta de cimento (TUTIKIAN, 2011), além de reduzir a taxa de exsudação interna e superficial da mistura, propiciando a estrutura uma Zona de Transição mais compacta e menos porosa, quando comparada a um concreto sem adições.

Segundo Ollivier & Vichot (2014) as adições minerais pozolânicas, são ricas em sílica (SiO₂) e pobres em óxido de cálcio (CaO), dessa forma ocorrem reações de balanço de dissolução e precipitação, chamadas de reações pozolânicas, formando (C-S-H), descrita na reação abaixo:



O Metacaulim é um exemplo dessas adições; De acordo com a NBR 15894 (ABNT, 2010), o Metacaulim é uma pozolana de alta reatividade. A interação química e física com o cimento altera a reologia do compósito cimentício no estado fresco e confere propriedades especiais relacionadas a durabilidade e ao desempenho mecânico no estado endurecido:

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

1.3 CORROSÃO DAS ARMADURAS

A corrosão pode ser definida como “[...] a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, seja por ação física, química, eletroquímica ou a combinação destas” (HELENE, 1993, p.17).

Em uma estrutura de concreto armado, provido de cobertura adequada do aço, combinado a um material de baixa permeabilidade, é esperado que a corrosão das armaduras e os problemas associados a ela não ocorram, porém, na prática, a alta frequência de deterioração prematura, devida a corrosão do aço vem sendo estudada por especialistas há muitos anos. Um relatório emitido em 1991, destacou que 134.000 pontes de concreto armado dos EUA, que representa 23% do total de pontes do país, necessitavam de reparos imediatos. O custo estimado para reparo das estruturas foi estimado em 90 bilhões de dólares (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

O processo eletroquímico de corrosão do aço pode ser gerado de duas formas (MEHTA & MONTEIRO, 2014): quando há presença de metais diferentes ou quando há variações significativas nas características do aço empregado ou quando há diferenças na concentração de íons dissolvidos, como álcalis e cloretos.

O concreto que possui alta compacidade, sem presença de ninhos, “bicheiras”, excesso de exsudação ou vazios, que é homogêneo e com adequado teor de argamassa, propicia pela baixa permeabilidade, a proteção contra-ataques de agentes corrosivos externos, presentes na atmosfera industrial e urbana. O cobrimento age não só como barreira física aos agentes agressivos do meio, mas também como uma barreira aos elementos básicos necessários para a existência da corrosão eletroquímica, ou seja, a água e o oxigênio (HELENE, 1993).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. MATERIAIS

2.1.1. CIMENTO PORTLAND

O cimento utilizado no estudo foi o CP V ARI RS fabricado na cidade de Pedro Leopoldo, no estado de MG e suas características estão apresentadas na os requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018) para o cimento CP V ARI RS.

Tabela 1 – Requisitos físicos e mecânicos para o cimento utilizado.

Ensaio	NBR	Unidades	Resultado	Requisitos de Norma NBR 16697/2018
Perda ao Fogo 950°C	NM 18/12	%	3,28	≤6,5
SO ₃	NBR 14656/01	%	2,89	≤4,5
MgO	NBR 14656/01	%	2,02	n/a
Blaine	NBR 16372/15	cm ² /g	4859	n/a
Ret. 38 mic	NBR 12826/14	%	0,2	n/a
Início de Pega	NBR 16607/18	minutos	174	≥60
Fim de Pega	NBR 16607/18	minutos	240	≤600
Resist. à Compressão 1 dia	NBR 7215/19	MPa	17,9	≤14
Resist. à Compressão 3 dias	NBR 7215/19	MPa	30,7	≤24
Resist. à Compressão 7 dias	NBR 7215/19	MPa	40,8	≤34
Resist. à Compressão 28 dias	NBR 7215/19	MPa	51,2	n/a

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (ABNT, 2018).

2.1.2. METACAULIM

O Metacaulim utilizado no estudo é produzido pela empresa Metacaulim do Brasil, denominado Metacaulim HP Ultra, fabricado na cidade de Jundiaí, no estado de São Paulo. As características do produto fornecido pelo produtor estão apresentadas na Tabela 2. O fornecedor sugere a utilização de 5% a 15% de Metacaulim em substituição a parte do cimento da mistura.

Tabela 2 – Ficha Técnica do produto Metacaulim HP Ultra.

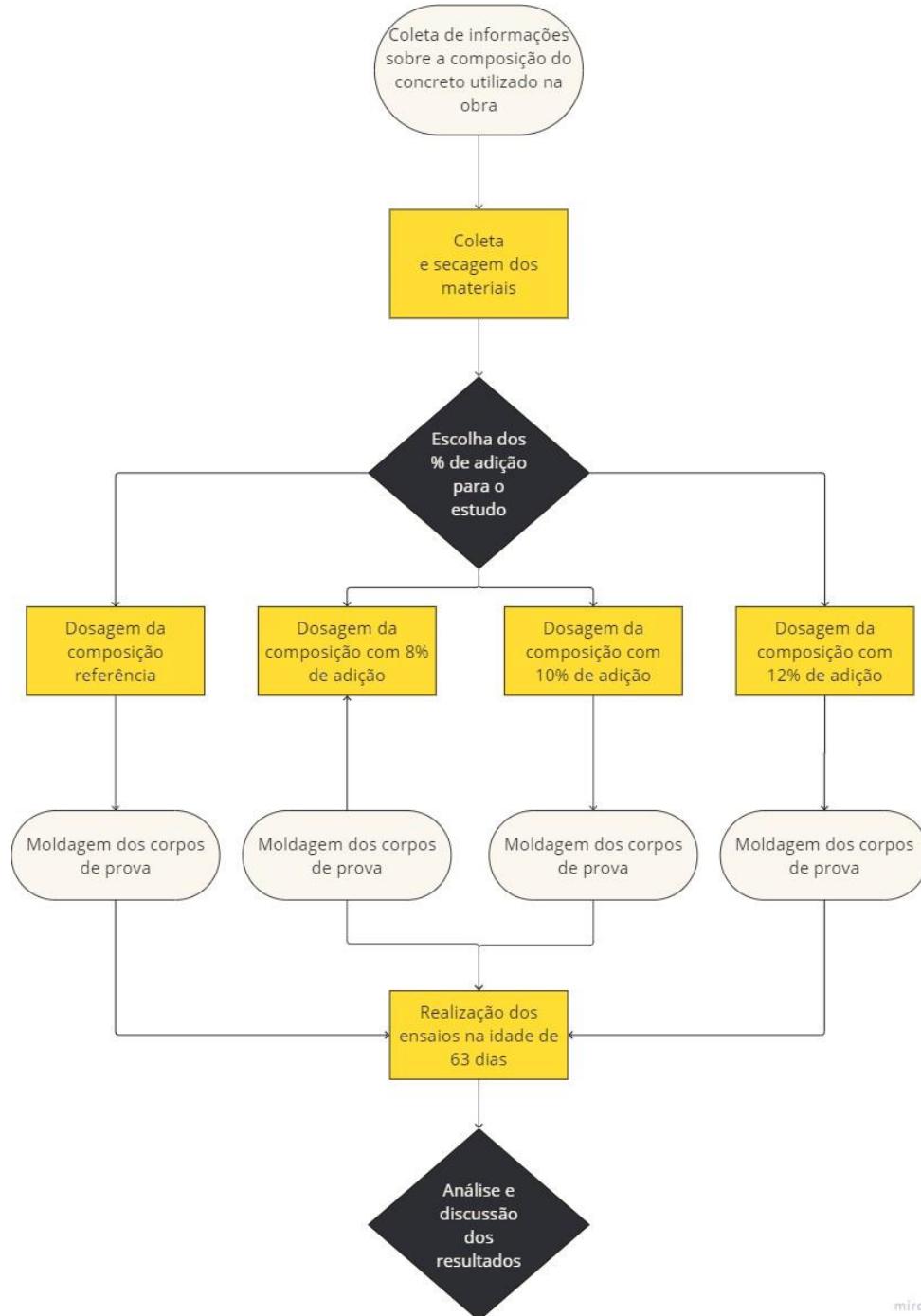
Propriedades Físico-Químicas	Valores típicos	Valores limites
		(NBR 15.894)
SiO ₂	57,0%	44% a 65%
Al ₂ O ₃	34%	32% a 46%
CaO + MgO	< 0,1%	< 1,5%
SO ₃	< 0,1%	< 1%
Na ₂ O	< 0,1%	< 0,5%
Eq.Alcalino Na ₂ O	< 1,5%	< 1,5%
Fe ₂ O ₃	2,0%	-
TiO ₂	1,50%	-
Umidade	0,50%	< 2%
Perda ao Fogo	3,0%	< 4%
Resíduo #325	6,0%	< 10%
Desempenho com Cimento (7 dias)	115%	> 105%
Atividade Pozolânica Chapelle	880mg Ca(OH) ₂ /g	> 750mg Ca(OH) ₂ /g
Área Específica BET	230.000cm ² /g	150.000cm ² /g
Massa Específica	2,56kg/dm ³	-

Fonte: Metacaulim do Brasil (2024).

2.2. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O presente estudo tem como objetivo evidenciar a influência que as adições minerais, especificamente o Metacaulim, pode ter nas propriedades físicas do concreto, contribuindo para a sua durabilidade. O estudo foi realizado através da dosagem de um proporcionamento de concreto utilizado em uma obra de infraestrutura, no estado do Espírito Santo, avaliando 3 percentuais de adição de Metacaulim em substituição a parte do consumo de cimento, quais sejam; 8%, 10% e 12%, e um traço referência, no qual não há presença de Metacaulim. O fluxograma está apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma do planejamento experimental



miro

Fonte: As autoras (2024).

2.3.1 Variáveis Independentes

Como variáveis controláveis do estudo, podem-se citar:

- Cimento CP V ARI RS CSN – Fábrica de Pedro Leopoldo/MG;
- Adição de Metacaulim HP da Metacaulim do Brasil;
- Agregados miúdos de areia natural e Pó de pedra;
- Agregados graúdos, brita 0 e brita 1;
- Água potável da rede de abastecimento;
- Classe de abatimento 22 ± 3 cm;
- Proporção entre o cimento e os agregados em massa de materiais secos: 1:4,503 (com substituição de 8%, 10% e 12% de cimento por Metacaulim).

2.3.2 Variáveis Dependentes

As variáveis dependentes têm o intuito de avaliar o desempenho do concreto para atendimento das especificações de projeto. Fez-se uso de ensaios capazes de fornecer dados sobre o comportamento do concreto, não só do ponto de vista da sua resistência mecânica como também da sua durabilidade. No Quadro 1 estão apresentados os ensaios empregados nesta fase do estudo, assim como as idades de sua realização.

Quadro 1 - Variáveis dependentes do estudo.

Propriedades	Método de Ensaio	Dimensões dos corpos de prova	Idade (dias)	Nº de corpos de prova
Resistência à compressão	NBR 5739:2018	10 x 20 cm	63	4
Penetração de água sob pressão	NBR 10787:2011	15 x 15 cm	63	3
Módulo estático de elasticidade	NBR 8522:2021	10 x 20 cm	63	3

Fonte: As autoras (2024).

2.3.3 Metodologia de dosagem

A metodologia de dosagem utilizada no estudo seguiu as seguintes premissas:

- Todos os agregados utilizados nas dosagens foram previamente secos;
- Antes da colocação dos materiais, a betoneira foi lavada para evitar a perda de água por absorção do concreto pela superfície interna da betoneira;
- A ordem de colocação dos materiais dentro da betoneira teve sempre a mesma sequência: brita, água, areia, cimento, adição, água retida e os aditivos;
- Foi adotado, como objetivo, um abatimento 22 ± 3 cm;
- Para cada concreto dosado foram moldados 7 corpos de prova (CPs) cilíndricos de 10 cm x 20 cm, com a finalidade de ensaiá-los à compressão axial (4 CPs) e 3 CPs para ensaio de módulo de deformação;

- Para cada concreto dosado foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos de 15 cm x30 cm, moldados na metade, obtendo-se assim dimensões de 15 cmx15 cm para ensaio de penetração da água sob pressão;
- Os concretos foram dosados com o uso de uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 250 litros. O período de mistura foi mantido em dez minutos antes da primeira verificação de abatimento; e
- A opção de se adotar 4 corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão, foi feita para dar validade às conclusões experimentais.

2.3.4 Proporcionamento dos materiais

Na Tabela 2 estão apresentados os proporcionamentos dos materiais utilizados no estudo para as 4 composições analisadas.

Tabela 3 – Proporcionamento dos materiais.

MCC	Descrição/ fornecedor	m.e.	Exp 01		Exp 02		Exp 03		Exp 04	
		(g/cm ³)	(%)	kg/m ³						
Cimento	CP V ARI RS CSN	3,03	100	420	92	383	90	378	88	369
Adição	Metacaulim HP Ultra	2,56	-	-	8	37	10	42	12	50
Agg. miúdo	Areia natural	2,65	85,1	746	85,1	742	85,1	742	85,1	741
	Pó de pedra	2,90	14,9	143	14,9	142	14,9	142	14,9	142
Agg. graúdo	Brita 0	2,90	25,4	255	25,4	255	25,4	255	25,4	255
	Brita 1	2,90	74,6	748	74,6	748	74,6	748	74,6	748
Água	Rede	1,00	100	169	100	169	100	169	100	169
Aditivo	Mr Bras 180 Aditibras	1,08	1,061	5,258	0,45	5,258	0,45	5,258	0,45	5,258

Fonte: As autoras (2024).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para todos as dosagens obteve-se consistência do concreto no estado fresco, verificados através do ensaio de slump de $23\pm0,5$ cm.

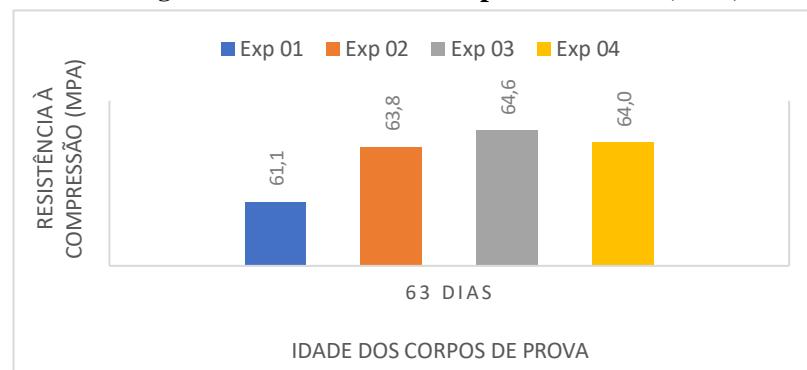
Os corpos de prova permaneceram em câmara úmida até a data de ensaio. Todos os CPs foram retificados antes do ensaio de resistência à compressão e para o ensaio de módulo, realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 8522 (ABN, 2021) respectivamente, cujos resultados são apresentados na Tabela 3 e Figura 5 para resistência à compressão e no Gráfico 2 para o ensaio de módulo de elasticidade.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de resistência à compressão.

Identificação	Resistência à Compressão (MPa)				
	CP1	CP2	CP3	CP4	Média
Exp 01	61,6	56,1	63,8	62,9	61,1
Exp 02	62,6	63,6	66,8	62,0	63,8
Exp 03	64,0	63,1	63,2	67,9	64,6
Exp 04	64,4	64,8	66,0	60,7	64,0

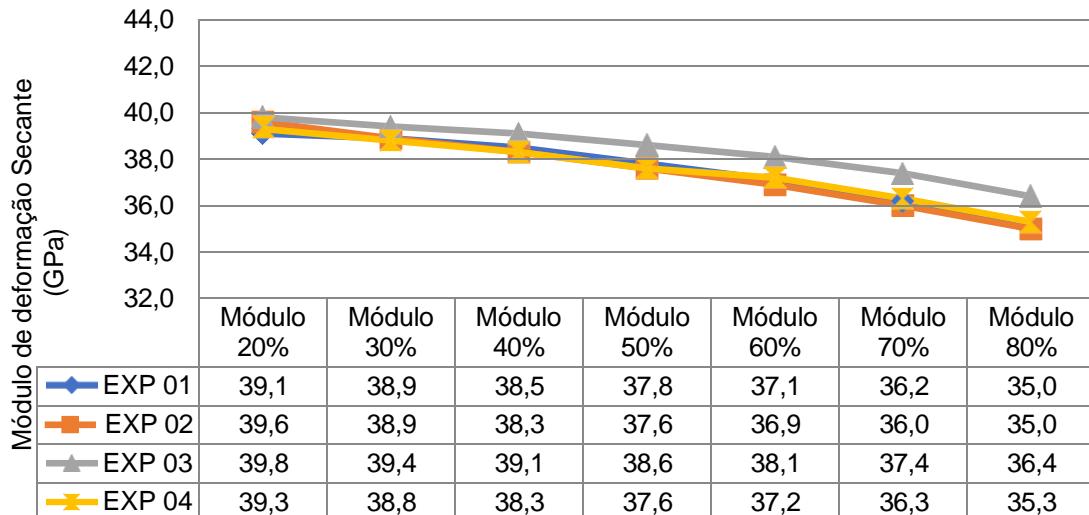
Fonte: As autoras (2024).

Figura 3 – Resistência à compressão média (MPa).



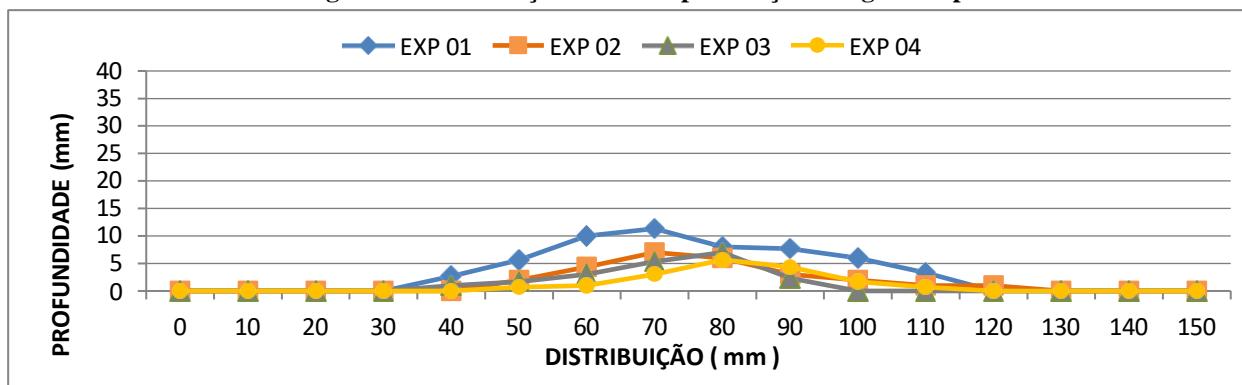
Fonte: As autoras (2024).

Figura 4 – Módulo de deformação secante do concreto – Níveis de carregamento 0,2 a 0,8 de fc



Fonte: As autoras (2024).

Os resultados médios do ensaio de penetração da água sob pressão, realizados conforme a NBR 10787 (ABNT, 2011), estão apresentados na Figura 5 e na **Figura 5 – Distribuição média de penetração da água sob pressão.**



Fonte: As autoras (2024)

Tabela 5 - Resultados de penetração máxima média por experimento

Identificação	Penetração máxima média (mm)
EXP 01	15
EXP 02	7
EXP 03	7
EXP 04	7

Fonte: As autoras (2024)

Os resultados apresentados demonstram que a utilização do Metacaulim reduziu a permeabilidade das composições as quais foram adicionados o material, tendo assim sua profundidade de penetração de água reduzida de 15 mm para 7 mm.

As três composições com adição obtiveram comportamento similar e penetração de água média de 7 mm.

4. CONCLUSÃO

O estudo experimental demostrou que o uso do Metacaulim como material cimentício suplementar, contribui para o aumento da resistência à compressão, elevando assim o módulo de deformação, além de agregar ao material compacidade, obtendo-se desta maneira um concreto menos permeável, mais durável e sustentável, tendo em vista o menor consumo de cimento Portland. Avaliando os dados apresentados é possível concluir que a utilização de 10% de Metacaulim em substituição a parte do aglomerante empregado na composição, trouxe melhores resultados quanto a resistência à compressão e, também em relação ao módulo secante a 30% da carga.

Para o ensaio de penetração da água sob pressão, as três dosagens com utilização de Metacaulim tiveram comportamento similar e permeabilidade inferior a composição referência, onde não foi feito uso do Metacaulim. Dessa forma, para as análises aqui apresentadas, conclui-se que o traço com utilização de 10% de Metacaulim traz mais benefícios para a utilização por apresentar os melhores resultados.

O presente estudo não fez uma abordagem relacionada ao custo-benefício das adições, sendo assim realizada apenas uma análise comparativa do desempenho dos materiais quanto as características avaliadas.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C. Concreto de alto desempenho. Tradução de Gerardo G. Serra. São Paulo. PINI, 2000

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 10787 Concreto endurecido - Determinação da penetração de água sob pressão. Rio de Janeiro, 2011.

_____. – 5739 Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. – 5738 Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. – 8522 Concreto – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Rio de Janeiro, 2021.

- _____ – NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- _____ – NBR 12826 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico. Rio de Janeiro, 2014.
- _____ – NBR 16372 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.
- _____ – NBR 16607 – Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.
- _____ – NBR 16697 – Cimento Portland Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

HELENE P. R. L.; MEDEIROS, M. H. F.; GOBBI, A. & RÉUS, G. C. Reinforced concrete in marine environment: Effect of wetting and drying cycles, height and positioning in relation to the sea shore. Construction and Building Materials, 2013.

HELENE P. R. L.; TUTIKIAN B. F.; ISAIA G. C. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. Capítulo 36. IBRACON, 2011.

HELENE, P. R. L.; MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto, IBRACON, 2011.

HELENE, P.R.L. Contribuição ao estudo de concreto armado. 1^a Ed. São Paulo, 1993. 231p. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo

MEHTA P. K.; BURROWS R. W. Building durable structures in the 21st century. The Indian Concrete Journal, 2001.

MEHTA P. K.; MONTEIRO P.J.M. **Concreto – microestrutura, propriedade e materiais.** São Paulo 3^a Ed. Editora Ibracon, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** Trad. CREMONINI R. A. 5^a ed., Porto Alegre – RS. Editora Bookman, 2016.

Portland Composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1991

SERRA, G. G. Concreto de Alto Desempenho e a Nova Arquitetura, ABCP, 1997.

UCKIKAWA H.; HANEHARA S.; SAWAKI D. The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixtures. Cement and concrete research, 1997