

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

Trabalho de Conclusão de Curso

Douglas Augusto Rodrigues de Carvalho Dias

Gabriela Sayuri Kuma Raine

Leticia Marinho Maurutto

Matheus Barone

Raul Andrade de Oliveira

INFLUÊNCIA DA SÍLICA ATIVA E METACAULIM COMO
SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO EM CONCRETO POROSO

Engenharia Civil

Sandro Martini

São Paulo, SP - Brasil

2022

AGRADECIMENTOS

Somos agradecidos primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo das nossas vidas, e não somente nestes anos como universitários, além de nos ter mantido no caminho certo durante este projeto de pesquisa com saúde e forças para chegar até o final.

Agradecemos a família a qual cada um representa, cujo apoio que sempre nos deram durante toda as nossas vidas, e apesar das dificuldades nunca mediram esforços para nos manter sempre no caminho dos estudos nos mostrando que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente.

Aos nossos professores por nos proporcionar o conhecimento não apenas técnico, mas a manifestação do caráter no processo de formação profissional, e, não menos importante, um agradecimento especial ao nosso orientador Prof. Sandro Martini e nosso professor de Trabalho de Conclusão de Curso Prof. Dimas Alan Strauss Rambo, ambos tendo papel fundamental para confecção deste trabalho, constantes ensinamentos, sendo grandes instrutores e exemplos de profissionais a serem seguidos.

Agradecemos a instituição Universidade São Judas Tadeu, local que abriu as portas para o início de uma caminhada cheia de desafios, agradecemos ao corpo docente, técnicos de laboratório, direção e administração que muito contribuíram e ofereceram a oportunidade de hoje vislumbrar um horizonte melhor.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado.

RESUMO

Os principais problemas encontrados em áreas urbanas atualmente, que são responsáveis por apresentar altos níveis de degradação ambiental no cotidiano urbano são as enchentes e as ilhas de calor, que são causadas pela crescente e desenfreada impermeabilização do solo devido à falta de planejamento do uso e da ocupação do solo de maneira mais consciente. Perante essa problemática foi estudado o desempenho e propriedades mecânicas e físicas do concreto poroso com adições, a fim de verificar possíveis alternativas que possam ser aplicadas para minimizar os efeitos causados pelo excesso de áreas impermeabilizadas. Para este trabalho foram produzidos cinco traços de concreto poroso que foram ensaiados tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, sendo um traço padrão sem nenhuma adição mineral e quatro traços utilizando variações de 5% e 8% de sílica ativa e 8% e 10% de metacaulim em substituição ao cimento. As substituições do cimento por aditivos minerais se devem perante a necessidade de grandes quantidades de cimento para a execução do concreto, o qual emite um elevado nível de dióxido de carbono (CO_2) ao meio ambiente, que é um composto químico gasoso que provoca o desequilíbrio no efeito estufa. A partir da análise de resultados dos ensaios realizados com e sem a adição mineral, conclui-se que os concretos com a substituição do cimento apresentam melhorias em suas propriedades físicas e mecânicas, e auxiliam na diminuição do consumo de cimento, e consequentemente na emissão de CO_2 .

Palavras-chave: Concreto Poroso; Sílica Ativa; Metacaulim.

ABSTRACT

One of the main problems found in urban areas today, which are responsible for presenting high levels of environmental degradation in urban daily life, are floods and heat islands, which are caused by the increasing and unbridled soil sealing due to lack of planning considering the use and land occupation in a more conscious way. Faced with this problem, the performance and mechanical and physical properties of porous concrete with additions were studied, in order to verify possible alternatives that can be applied to minimize the effects caused by the excess of waterproofed areas. For this work, five porous concrete mixes were produced, which were tested both in the fresh and hardened state, a standard mix without any mineral addition and four mixes using variations of 5% and 8% of Silica fume and 8% and 10% of metakaolin to replace cement. The replacement of cement by mineral additives is due to the need for large amounts of cement for the execution of concrete, which emits a high level of carbon dioxide (CO₂) to the environment, which is a gaseous chemical compound that causes imbalance in the greenhouse effect. From the analysis of the results of the tests carried out with and without the mineral addition, it is concluded that the concretes with the replacement of cement present improvements in their physical and mechanical properties, and help in the reduction of cement consumption, and consequently in the emission of CO₂.

Keywords: Porous Concrete; Silica Fume; Metakaolin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma detalhado	4
Figura 2: Textura do concreto poroso	5
Figura 3: Emissões de CO ₂ por subsetor, de 1990 a 2020	7
Figura 4: Análise microscópica da porosidade	8
Figura 5: Materiais utilizados no traço	11
Figura 6: Separação do agregado graúdo - Pesagem da amostra de 5 kg	17
Figura 7: Agregado graúdo secando na estufa por 24 h	17
Figura 8: Ensaio de granulometria	18
Figura 9: Curva granulométrica da faixa utilizável	18
Figura 10: Curva granulométrica da faixa ótima	19
Figura 11: Preparação da amostra para o ensaio de densidade do agregado	20
Figura 12: Preparação da amostra após peneiramento	20
Figura 13: Preparação da amostra após imersão em água	21
Figura 14: Determinação das massas submersas em água (m_c)	21
Figura 15: Preparação da amostra seca	22
Figura 16: Calibração do recipiente	23
Figura 17: Ensaio de densidade da pasta	24
Figura 18: Equipamentos para execução do concreto	25
Figura 19: Equipamentos para realização do ensaio de <i>Slump</i>	26
Figura 20: Ensaio de abatimento de tronco de cone	27
Figura 21: Preparação do corpo de prova	27
Figura 22: Produção dos CPs	28
Figura 23: Preparação da amostra para o ensaio de teor de ar incorporado no concreto	29
Figura 24: Equipamento para medição, medidor tipo B	29
Figura 25: Dimensões dos corpos de prova	30
Figura 26: Preparação do corpo de prova utilizando chapas de madeira	31

Figura 27: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	31
Figura 28: Capeamento do CP com gesso	32
Figura 29: Ensaio de resistência à compressão	33
Figura 30: Permeâmetro de carga variável	34
Figura 31: Ensaio de permeabilidade	34
Figura 32: Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica	35
Figura 33: CPs imersos em água por 72h	36
Figura 34: Determinação da massa em água (mi)	36
Figura 35: Secagem superficial dos CPs	37
Figura 36: Determinação das massas na condição de superfície seca (msat)	37
Figura 37: Gráfico da densidade da pasta	40
Figura 38: Gráfico do Abatimento do Tronco de Cone por traço	41
Figura 39: Leitura manométrica	42
Figura 40: Gráfico de Resistência à Tração por Compressão Diametral	43
Figura 41: Gráfico de Resistência à Compressão	44
Figura 42: Gráfico do coeficiente de permeabilidade	45
Figura 43: Gráfico da absorção de água	46
Figura 44: Gráfico do índice de vazios	46
Figura 45: Gráfico da massa específica	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos tipos de adições	6
Tabela 2: Limites de composição do cimento Portland (% de massa)	10
Tabela 3: Propriedades do cimento e sua composição (% em massa)	12
Tabela 4: Propriedades físicas e mecânicas do CP-II-F-32	12
Tabela 5: Propriedades e características do agregado graúdo	13
Tabela 6: Propriedades e características da sílica Ativa	13
Tabela 7: Propriedades e características do metacaulim	14
Tabela 8: Proporção cimento:agregado (em massa)	15
Tabela 9: Definição dos traços	16
Tabela 10: Dosagem para confecção de CP	16
Tabela 11: Resultados obtidos do ensaio de densidade do agregado	23
Tabela 12: Relação do fator de perda de cada material, em %	39
Tabela 13: Relação do fator de emissão de CO ₂ de cada material, em %	39
Tabela 14: Teor de ar aparente	42
Tabela 15: Emissão de CO ₂ por material/traço	48

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Reação do metacaulim no concreto	9
Equação 2 – Reação do metacaulim no concreto	9
Equação 3 – Porcentagem de Silicato Tricálcico no Cimento Portland	10
Equação 4 – Porcentagem de Silicato Bicálcico no Cimento Portland	10
Equação 5 – Porcentagem de Aluminato Tricálcico no Cimento Portland	10
Equação 6 – Porcentagem de Ferroaluminato Tetracálcico no Cimento Portland	10
Equação 7 – Densidade do agregado na condição seca	22
Equação 8 – Densidade do agregado na condição saturada superfície seca	22
Equação 9 – Calibração do volume do recipiente	23
Equação 10 – Densidade de massa de argamassa no estado fresco	24
Equação 11 – Resistência à tração por compressão diametral	32
Equação 12 – Resistência à compressão	33
Equação 13 – Coeficiente de permeabilidade	35
Equação 14 – Absorção de água	38
Equação 15 – Índice de vazios	38
Equação 16 – Densidade seca	38
Equação 17 – Densidade saturada	38
Equação 18 – Densidade real	38
Equação 19 – Emissão de CO ₂	38

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

%.....	Porcentagem
°C.....	Graus Celsius
a/c	Relação água/cimento
ABNT	Associação brasileira de Normas Técnicas
Al ₂ O ₃	Alumina
Al ₂ O ₃ .SiO ₂	Metacaulim
ACI.....	American Concrete Institute
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CaH.....	Aluminato de cálcio hidratado
CaSH.....	Aluminossilicato de cálcio hidratado
CO ₂	Dióxido de carbono
CP.....	Corpo de Prova
CP I.....	Cimento Portland Comum
CP II.....	Cimento Portland Composto
CP II-F.....	Cimento Portland Composto com material carbonático
CP III.....	Cimento Portland de Alto Forno
CP IV.....	Cimento Portland Pozolânico
CP V.....	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CPB.....	Cimento Portland Branco
CSH.....	Silicato de cálcio hidratado
C ₂ S.....	Silicato bicálcico
C ₃ A.....	Aluminato tricálcico
C ₃ S.....	Silicato tricálcico
C ₄ AF.....	Ferroaluminato tetracálcico
H ₂ O.....	Água

ICU.....	Ilha de calor Urbano
IPCC.....	Intergovernmental Panel on Climate Change
NBR.....	Norma Brasileira
SiO ₂	Sílica
SP.....	Superplastificante
8S%8M%.....	8% de sílica ativa e 8% de metacaulim
8S%10M%.....	8% de sílica ativa e 10% de metacaulim
5S%5M%.....	5% de sílica ativa e 5% de metacaulim
5S%10M%.....	5% de sílica ativa e 10% de metacaulim

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1. Justificativa.....	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Estrutura do trabalho.....	3
2. Revisão bibliográfica	5
2.1. Concreto poroso convencional	5
2.2. Adição mineral no concreto	6
2.3. Sílica Ativa.....	7
2.4. Metacaulim.....	8
2.5. Cimento Portland	9
3. Materiais e métodos	11
3.1. Cimento	11
3.2. Brita	12
3.3. Sílica Ativa.....	13
3.4. Metacaulim.....	13
3.5. Superplastificante (SP).....	14
3.6. Água.....	15
3.7. Traço de dosagem de referência	15
3.8. Granulometria.....	16
3.9. Densidade do agregado	19
3.10. Densidade da pasta	23
3.11. Produção do corpo de prova do concreto poroso	25
3.12. Abatimento do tronco de cone.....	26
3.13. Moldagem e cura do CP	27
3.14. Teor de ar incorporado no concreto	28
3.15. Resistência à tração por compressão diametral	30
3.16. Resistência à compressão	32
3.17. Permeabilidade	33
3.18. Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica	35
3.19. Emissão de CO ₂	38
4. Resultados e discussão	40
4.1. Densidade da pasta	40
4.2. Abatimento do tronco de cone.....	41

4.3.	Teor de ar incorporado no concreto	42
4.4.	Resistência à tração por compressão diametral	43
4.5.	Resistência à compressão	44
4.6.	Permeabilidade	44
4.7.	Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica	45
4.8.	Emissão de CO ₂	47
5.	Conclusões	49
5.1.	Sugestões para futuros estudos	50
6.	Referências	51

1. Introdução

Segundo Holtz (2011), com o aumento da urbanização decorrente do modelo de desenvolvimento vigente, ocorreu uma gradual impermeabilização do solo à construção de edifícios com calçadas impermeáveis, ligados por ruas pavimentadas. O crescimento urbano e a demanda por vias de tráfego asfaltadas e planas levaram à ocupação de grande parte da superfície das cidades com materiais impermeáveis, como concreto asfáltico e o concreto de cimento Portland.

Devido ao crescimento das grandes cidades da Europa na década de 40, o concreto poroso, também conhecido como concreto permeável, surge como uma alternativa positiva e uma solução de problemas, mesmo sendo uma tecnologia do século XIX. Com as características de um concreto sem finos, com grandes quantidades de vazios que permitem a percolação da água e por possuir função estrutural, ele se destaca ainda mais pelo fato de reduzir os impactos ambientais, e por muitos ser considerado um concreto sustentável.

Conforme Ferguson (2005), Suzuki, Azevedo e Kabbach Júnior (2013), o principal objetivo da pavimentação permeável é permitir a infiltração de água proveniente das precipitações para o solo, sendo possível a captação, direcionamento e armazenamento das águas para reutilização. Podendo também existir pavimentos mistos que promovam a infiltração de parte da incidência pluviométrica, onde pode ser captada e direcionada para reutilização ou simplesmente direcionada para a rede de coleta pluvial.

Além da impermeabilização do solo, causando alagamentos e enchentes, as vias asfaltadas armazenam calor durante o dia, se dissipando durante à noite, formando-se as chamadas Ilha de Calor Urbano (ICU). O balanço de energia é fortemente alterado nas cidades devido a substituição da vegetação por construções e a impermeabilização do solo. (AMORIM, 2020). Segundo o relatório elaborado pelo IPCC (AR4, 2007), a principal causa das mudanças climáticas é a ação antrópica devido a emissão de poluentes e gases de efeito estufa.

De acordo com Costa (2012), para a produção de uma tonelada de cimento são emitidos 0,652 toneladas de dióxido de carbono (CO_2). Visando diminuir as ICUs através da redução de gases poluentes como CO_2 emitidos na atmosfera e minimizar enchentes, este trabalho tem como objetivo desenvolver um concreto permeável que utilizará os aditivos minerais sílica ativa e metacaulim em substituição ao Cimento Portland.

1.1. Justificativa

A carbonatação é um fenômeno natural nas estruturas de concreto, o qual ocorre quando o CO_2 se propaga por meio da interconectividade dos poros do material reagindo com os minerais do cimento hidratado diminuindo o pH do concreto, causando a despassivação das armaduras. Fenômeno que depende de características dos materiais e do ambiente (MARTINS, 2017).

O desenvolvimento urbano se acelerou na segunda metade do século XX com grande concentração de população em pequeno espaço, impactando o ecossistema terrestre e aquático e a própria população através das inundações, doenças e perda de qualidade de vida. Este processo ocorre devido à falta de controle do espaço urbano que produz efeito direto sobre a infraestrutura de água: abastecimento, esgotamento sanitário, águas pluviais (drenagem urbana e inundações ribeirinhas) e resíduos sólidos (TUCCI, 2005).

Para a execução de concreto é necessário um alto volume de cimento, o qual emite um elevado nível de dióxido de carbono ao meio ambiente, tendo em vista que o CO_2 é um composto químico gasoso que provoca o desequilíbrio no efeito estufa. As adições minerais têm sido bastante utilizadas para a diminuição desses efeitos e também para melhorar o desempenho do concreto. Além disso, a diminuição parcial do cimento e o uso de aditivos minerais diminui consideravelmente as emissões poluentes, e uma opção para substituir frações de cimento na fabricação do concreto, seria a utilização da sílica ativa e o metacaulim.

Considerando os problemas no ecossistema devido a emissão de CO_2 , os danos causados pelas grandes chuvas, como enchentes e inundações e a carência de informações no âmbito acadêmico sobre estudos da utilização de concreto poroso com sílica ativa e metacaulim, os estudos provenientes deste trabalho procuram analisar as propriedades físicas e mecânicas desse concreto em diferentes proporções de adições minerais, além de auxiliar futuros projetos e estudos.

1.2. Objetivos

O objetivo geral do trabalho foi analisar a influência da sílica ativa e metacaulim como substituto ao cimento em concreto poroso. Para cumprir o objetivo geral foram definidos dois objetivos específicos:

- Estudar as propriedades físicas e mecânicas no concreto poroso com a utilização de sílica ativa e metacaulim.
- Quantificar a redução da emissão de dióxido de carbono (CO_2) no concreto poroso gerado a partir da substituição parcial do cimento por sílica ativa e metacaulim.

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho trata de uma pesquisa experimental que tem como finalidade estudar as influências das adições minerais utilizadas em cinco traços de diferentes proporções. A Figura 1 apresenta uma visão geral da estrutura do trabalho desenvolvido, destacando a campanha experimental realizada.

Os materiais e métodos foram divididos em dois grupos, os métodos laboratoriais que englobam os ensaios de caracterização do agregado gráudo, para garantir a veracidade das informações adotadas na pesquisa, ensaios com a pasta, ensaios com o concreto fresco e ensaios com o concreto endurecido, enquanto os métodos teóricos representam o estudo realizado para comparação da emissão de CO_2 , todos os métodos adotados estudaram as variações dos resultados nos diferentes traços estabelecidos.

Figura 1: Fluxograma detalhado



2. Revisão bibliográfica

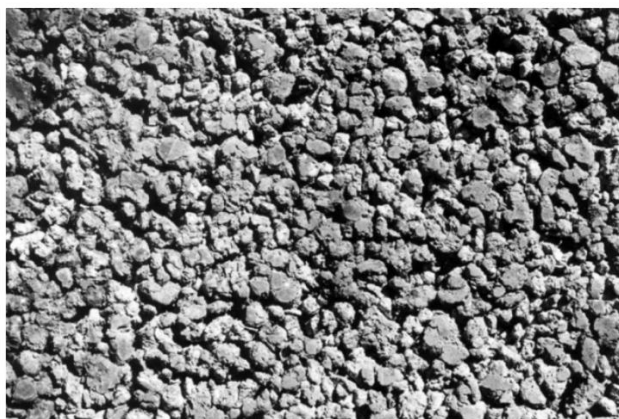
2.1. Concreto poroso convencional

De acordo com Lee *et al.* (2009), concreto poroso é caracterizado por possuir vazios conectados em sua estrutura, possibilitando a passagem de água pelo seu interior e pela sua baixa ou nenhuma utilização de agregados miúdos, conforme ilustra a Figura 2. Utilizado principalmente como pavimento a fim de evitar o escoamento superficial das águas das chuvas, o concreto poroso é também uma solução para o aquecimento dos pavimentos, o que permite a diminuição das chamadas ICU, uma vez que sua estrutura permite a entrada de ar.

De acordo com o Instituto Americano de Concreto (ACI 522-R10, 2010), o concreto poroso foi inicialmente utilizado em 1852 em uma casa no Reino Unido e consistia apenas em cimento e agregado graúdo. E apenas em 1930 a chamada Associação Escocesa de Habitação Especial adotou a utilização do concreto poroso para construção residencial. A partir disso, o material continuou a ser utilizado como uma alternativa sustentável em diversos países como Reino Unido, Alemanha, Holanda, França, Bélgica, entre outros.

Enquanto o concreto convencional, dependendo da quantidade de cimento utilizado na mistura, chega a ter uma resistência à compressão próxima a 60 MPa aos 28 dias, o concreto poroso convencional (com uma proporção de 350 kg/m³ de cimento) chega a obter uma resistência à compressão próxima 33 MPa aos 28 dias (VÉLEZ, 2010). O concreto poroso não possui, ou possui muito pouco, agregados miúdos em sua mistura e uma graduação aberta de agregados graúdos como brita 1, brita 0 e pedriscos.

Figura 2: Textura do concreto poroso



Fonte: ACI (2010)

2.2. Adição mineral no concreto

As adições minerais vêm sendo muito utilizadas na construção civil nas últimas décadas como adição ou substituição ao cimento no concreto convencional. Estas adições podem se classificar como adições cimentantes, pozolânicas, e inertes, conforme Tabela 1.

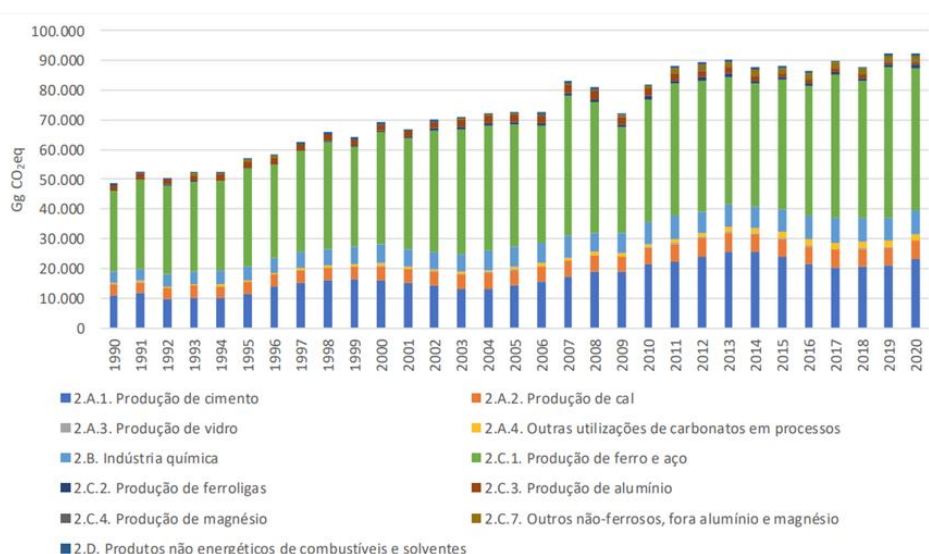
Tabela 1: Classificação dos tipos de adições

Classificação	Tipos de Adições
Cimentantes	Escória granulada de alto-forno
Cimentantes e pozolânicas	Cinzas volantes com alto teor de cálcio
Superpozolanas	Sílica ativa, metacaulim, cinzas de casca de arroz
Pozolanas comuns	Cinzas volantes com baixo teor de cálcio, argilas calcinadas, cinzas vulcânicas
Pozolanas pouco reativas	Escória de alto-forno resfriada lentamente, cinza de casca de arroz predominantemente cristalina
Filler	Pó de quartzo, pó de pedra

Fonte: Adaptado Fonseca, 2010

Uma das razões que contribui para a utilização de adições minerais é o impacto ambiental para se obter o cimento quanto às emissões de gases de efeito estufa. Conforme o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2022), a produção de cimento em 2020 teve uma contribuição para emissões de CO₂ de 22,7% no Brasil, perdendo apenas para a produção de ferro-gusa e aço com 52,1%, como pode ser verificado na Figura 3.

Figura 3: Emissões de CO₂ por subsetor, de 1990 a 2020



Fonte: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2022.

A utilização de adições minerais como substituição ao cimento, além de diminuir a necessidade pelo cimento, diminuindo sua produção, também beneficia o setor por utilizar materiais residuais de processos industriais, como a sílica ativa e o metacaulim.

Para este trabalho utilizamos duas adições classificadas como superpozolanas: A sílica ativa e o metacaulim. A introdução destas pozolanas na mistura cimentícia provoca alterações das propriedades: no estado fresco aumenta o consumo de água e melhora a trabalhabilidade, e no estado endurecido aumenta a resistência à compressão e resistência à tração (CARMO e PORTELLA, 2008).

2.3. Sílica Ativa

A sílica ativa é um material cimentício oriundo da produção de silício ou ligas de ferrosilício. Sua formação se dá a partir de quartzo com alto grau de pureza e carvão em forno elétrico a arco submerso. O dióxido de silício é liberado em seu estado gasoso, sofre oxidação e se condensa em partículas de sílica vítrea em que é altamente reativa. (SEIDENSTUCKER *et al.*, 2019).

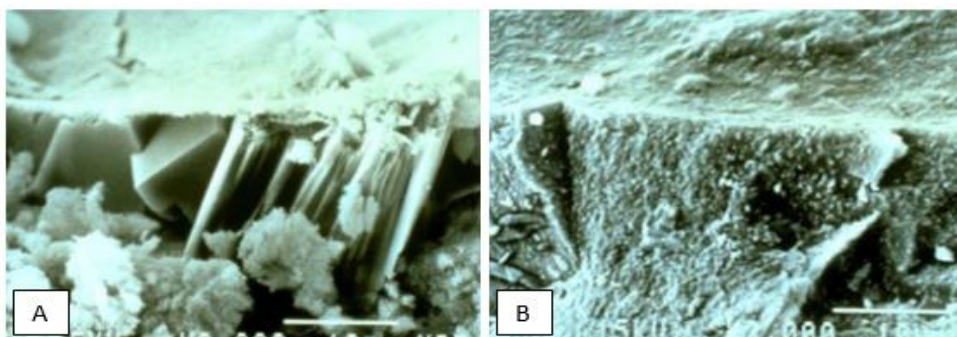
A sílica ativa atua quimicamente na pasta do concreto conforme as partículas altamente reativas de SiO₂ (dióxido de silício) reagem com o Ca(OH)₂ (hidróxido de cálcio) que é produzido pela hidratação do cimento, resultando em CSH (silicato de cálcio hidratado). Da

mesma maneira ocorre a reação química do cimento com a água, resultando também em silicato de cálcio hidratado, elemento este que influencia diretamente nas propriedades físicas e mecânicas no concreto.

Atualmente, a sílica ativa é mais utilizada na construção civil no reparo de estruturas, em concreto armado e protendido, revestimentos e rejuntas, pisos industriais, entre outros. Conforme NBR 13956-1 - Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos (ABNT, 2012), a utilização de sílica ativa proporciona ao concreto aumento da resistência à compressão e a flexão, reduz a porosidade e permeabilidade, aumenta a resistência a sulfatos, reduz a ocorrência de eflorescência e aumenta a resistividade elétrica, entre outros benefícios. Ainda há redução de danos ambientais quando utilizamos a sílica ativa, que é um resíduo da indústria, por reduzir o consumo de energia e as emissões de CO₂.

Devido ao tamanho dos grãos da sílica ativa serem menores que os grãos do cimento, a pasta se torna mais densa, uma vez que a sílica ativa preenche os microporos formados durante a hidratação do cimento. Portanto, é possível verificar através da Figura 4 a diferença da porosidade de um concreto com sílica ativa e outro sem sílica ativa.

Figura 4: Análise microscópica da porosidade - (A) de Concreto Convencional e (B) Concreto com sílica ativa



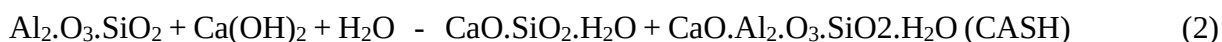
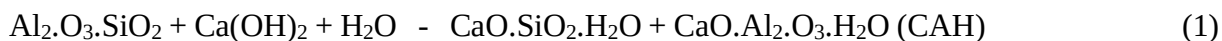
Fonte: Tecnosil

2.4. Metacaulim

O metacaulim ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) é obtido a partir do processo de calcinação da Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). Conforme NBR 15894-1 - Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos (ABNT, 2010), o material acelera a hidratação do cimento portland e atua como *filler* reagindo com água e com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) proveniente da hidratação do cimento, produz silicato de cálcio hidratado (CSH). De acordo com Frías e Cabrera (2000), as reações do metacaulim no concreto também forma

aluminato de cálcio hidratado (CAH) e aluminossilicato de cálcio hidratado (CASH), estes três componentes estão ligados diretamente às propriedades mecânicas do concreto.

As Equações (1) e (2) representam a reação do metacaulim no concreto.



Conforme o Departamento Nacional da Produção Mineral (2001), as reservas mundiais de caulim são abundantes, porém apenas 4 países concentram aproximadamente 95% das 14,2 bilhões de toneladas estimadas, são eles: Estados Unidos com cerca de 53%, seguido pelo Brasil com 28%, Ucrânia e Índia próximos de 7%. O Balanço Mineral Brasileiro de 2001 ainda posiciona os Estados com base nas reservas, sendo os mais relevantes: Amazonas com 63,4%, Pará com 18,9% e Amapá com 8,9% das reservas brasileiras.

Atualmente, o metacaulim é muito utilizado na construção civil para diminuição de danos no concreto pelo meio agressivo. Como exemplo, o metacaulim foi utilizado na construção do Porto do Açú em São João da Barra, RJ a fim de conferir ao concreto aumento das propriedades mecânicas, redução da penetração de íons cloreto e controle da corrosão das armaduras. Também foi utilizado na construção da Estação de Tratamento de Esgoto Alegria - Rio de Janeiro, RJ a fim de conferir ao concreto aumento na resistência ao sulfato e redução de permeabilidade, conforme Metacaulim do Brasil (2022).

2.5. Cimento Portland

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico pelo fato de reagir na presença de água causando o endurecimento da pasta e é obtido pela queima de argilas e calcários em fornos rotativos. Seu processo constitui de 3 fases: moagem de matéria-prima; produção do clínquer por meio do aquecimento do calcário moído a aproximadamente 1500°C; e finalmente tem-se a moagem do clínquer e adição de gesso obtendo-se o material chamado Cimento Portland.

Ainda pode ser classificado como CP I, CP II, CP III, CP IV, CP V e CPB, e são diferenciados pelas proporções de clínquer, sulfatos e cálcios e adições como materiais carbonáticos, escória de alto forno e pozolanas, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2: Limites de composição do cimento Portland (% de massa)

LIMITES DE COMPOSIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND (PORCENTAGEM DE MASSA)						
Sigla	Classe de Resistência	Sufixo	Clínquer + Sulfatos de Cálcio	Escória Granulada de Alto Forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
CPI	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 - 100	0 - 5	0 - 5	0 - 5
CPI-S	25, 32 ou 40	RS ou BC	90 - 94	0	0	6 - 10
CPII-E	25, 32 ou 40	RS ou BC	51 - 94	6 - 34	0	0 - 15
CPII-Z	25, 32 ou 40	RS ou BC	71 - 94	0	6 - 14	0 - 15
CPII-F	25, 32 ou 40	RS ou BC	75 - 89	0	0	11 - 25
CPIII	25, 32 ou 40	RS ou BC	25 - 65	35 - 75	0	0 - 10
CPIV	25, 32 ou 40	RS ou BC	45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
CPV	ARI	RS ou BC	90 - 100	0	0	0 - 10

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

Com maior proporção no cimento, o clínquer pode ter composições diferentes, conforme Equações (3) a (6), as quais ditam as propriedades do cimento de acordo com a proporção dos elementos presentes na composição.

Silicato Tricálcico (C_3S - 20 a 65%)

$$= CaO + SiO_2 - 3CaO.SiO_2 \quad (3)$$

Silicato Bicálcico (C_2S - 10 a 55%)

$$= CaO + SiO_2 - 2CaO.SiO_2 \quad (4)$$

Aluminato Tricálcico (C_3A - 0 a 15%)

$$= CaO + Al_2O_3 - 2CaO.Al_2O \quad (5)$$

Ferroaluminato Tetracálcico (C_4AF - 5 a 15%)

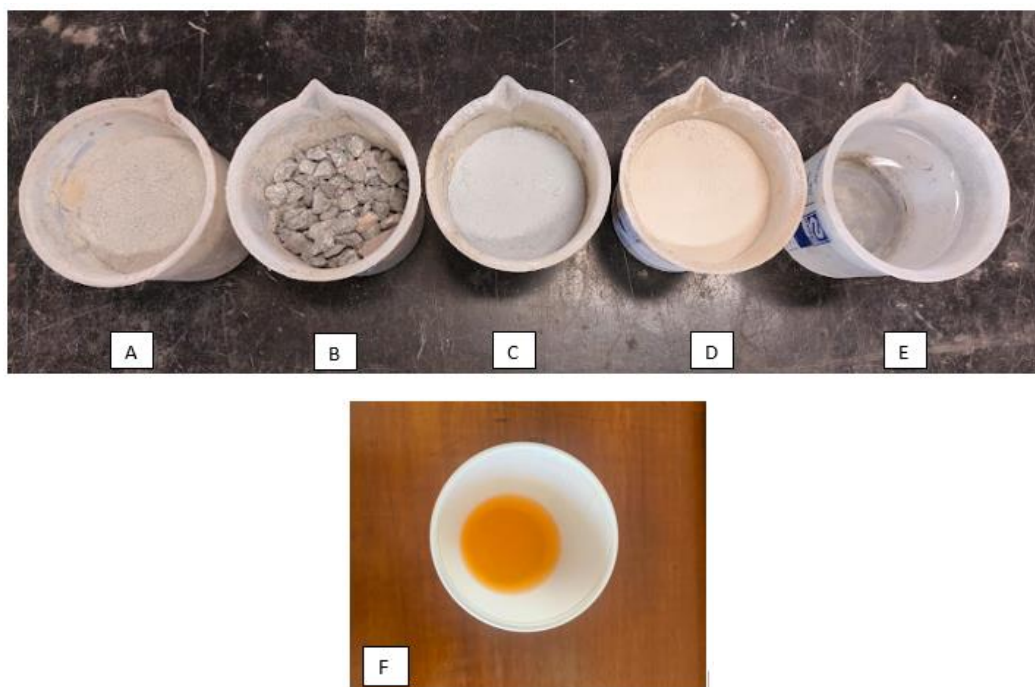
$$= CaO + Fe_2O_3 + Al_2O_3 - 4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 \quad (6)$$

Aïtcin (2008) explica as fases e obtenções dos elementos com base nas temperaturas atingidas pelos fornos rotativos. Entre 700 e 900°C começa a ser produzido o silicato bicálcico (C_2S) a partir da combinação da alumina, óxidos de ferro e sílica Ativada. Entre 900°C e 1200°C dá início à formação de aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) e a quantidade de silicato bicálcico atinge o seu limite. E além de 1260°C é constituído o silicato tricálcico (C_3S) a partir do silicato bicálcico (C_2S) já formado.

3. Materiais e métodos

Para a realização deste trabalho, com a finalidade de atingir os objetivos descritos, foram utilizados os materiais apresentados na Figura 5 e realizados ensaios conforme o fluxograma apresentado na Figura 1, com base nas normativas da ABNT.

Figura 5: Materiais utilizados no traço – (A) Cimento, (B) Brita 1, (C) sílica ativa, (D) metacaulim, (E) Água e (F) Aditivo Superplastificante



3.1. Cimento

O cimento utilizado foi o Cimento Portland Composto (CP-II-F-32) da empresa Votorantim Cimentos, este cimento apresenta em sua composição (% em massa) variação de 75% a 89% de clínquer + sulfato de cálcio e 11% a 25% de material carbonático, conforme pode ser visto na Tabela 3, que representa a composição dos tipos de cimento de acordo com a norma brasileira NBR 16697 (ABNT, 2018).

Foi optado por este material devido à disponibilidade no laboratório da Universidade São Judas Tadeu, onde foram realizados os ensaios. As propriedades químicas, físicas e mecânicas, tais como finura, tempo de pega e resistência à compressão podem ser verificadas na Tabela 4 de acordo com o boletim de ensaios de cimento do fabricante.

Tabela 3: Propriedades do cimento e sua composição (% em massa)

Sigla do cimento	Classe de resistência	Clínquer + Sulfato de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material Carbonático
CP II-F	25, 32 ou 40	75 - 89	0	0	11 - 25

Fonte: Adaptado NBR 16697 (ABNT, 2018)

Tabela 4: Propriedades físicas e mecânicas do CP-II-F-32

	Finura (%)		Tempo de pega (min)		Resistência à compressão (MPa)		
	#200	#325	Início de pega	Fim de pega	3 Dias	7 Dias	28 Dias
Limites da Norma NBR 1667	≤12,0	N/A	≥60	≤600	≥10,0	≥20,0	≥32,0
CP II -F-32 (Média)	1,07	8,40	328	365	23,8	28,1	34,8

Fonte: Boletim de Ensaio de cimento da Votorantim Cimentos (Mês de referência: Julho de 2022)

3.2. Brita

A brita utilizada na pesquisa é proveniente da pedreira Santa Isabel onde é ensacado e distribuído em sacos de 20 kg pela empresa Construsac. Esse material é definido como agregado graúdo, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira de malha de 4,75 mm conforme NBR 7211 (ABNT, 2019). Para garantir as condições necessárias estabelecidas neste trabalho, todo o material consumido foi previamente lavado e peneirado utilizando as peneiras de série normal e intermediária de diâmetros entre 4,75 mm e 25 mm e somente o material retido entre as peneiras de diâmetros entre 9,5 mm e 19 mm foram aproveitados, o material excedente foi descartado.

Na Tabela 5, é possível verificar a composição mineralógica e propriedades do agregado.

Tabela 5: Propriedades e características do agregado graúdo

Propriedades físico-químicas	Valores Típicos
SiO ₂	55,31%
Al ₂ O ₃	15,31%
Densidade	0,986 kg/dm ³
Massa específica	2,766 g/cm ³
Densidade aparente	2,750 g/cm ³

Fonte: Ficha de informações pedreira Santa Isabel (2022)

3.3. Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada é da empresa Tecnosil. Esse aditivo mineral é proveniente do processo de fabricação do silício metálico ou ferro silício e pode ser utilizado em substituição ao cimento, recomenda-se às variações de teor entre 5% e 8% em relação ao peso do cimento conforme descrito pelo fabricante. As especificações de suas propriedades estão descritas na Tabela 6.

Tabela 6: Propriedades e características da sílica Ativa

Propriedades físico-químicas	Valores Típicos
Massa Específica	2.2200 kg/m ³
Teor do SiO ₂	>90%
Superfície Específica	~19.000 m ² /kg
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio da partícula	0,20 µm

Fonte: Tecnosil

3.4. Metacaulim

O aditivo mineral utilizado é o metacaulim HP Ultra da empresa metacaulim do Brasil, cuja massa específica é de 2,56 kg/dm³. Esse aditivo composto de silicato de alumínio pode ser utilizado em substituição ao cimento, recomenda-se variações entre 5% e 15% conforme descrito pelo fabricante, as especificações de suas propriedades estão descritas na Tabela 7.

Tabela 7: Propriedades e características do metacaulim

Propriedades físico-químicas	Valores Típicos	Valores Limite (NBR 15.894)
SiO ₂	57%	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%	-
TiO ₂	1,5%	-
Umidade	0,5%	< 2%
Perda ao Fogo	3%	< 4%
Resíduo #325	6%	< 10%
Desempenho com cimento (7 dias)	115%	> 105%
Atividade Pozolânica Chapelle	880 mg Ca(OH) ₂ /g	> 750 mg Ca(OH) ₂ /g
Área Específica BET	230.000 cm ² /g	150.000 cm ² /g
Massa específica	2,56 kg/dm ³	-

Fonte: metacaulim Brasil

3.5. Superplastificante (SP)

Foi utilizado o superplastificante ADVA CAST 525 da empresa *GCP Applied Technologies*, esse aditivo é recomendado por fornecer alta trabalhabilidade e resistência à segregação do concreto.

Esse material apresenta um aspecto líquido e de cor alaranjada, sua dosagem recomendada varia de 0,4 a 1,2% sobre a massa de cimento e sua massa específica pode variar de 1,04 a 1,06 g/cm³.

3.6. Água

A água potável utilizada para o desenvolvimento dos ensaios deste trabalho é fornecida pelo sistema de abastecimento da Cantareira, através da Companhia de saneamento básico do estado de São Paulo (Sabesp).

3.7. Traço de dosagem de referência

De acordo com Garcia (2021), as proporções mais utilizadas de massa de cimento/agregado que compõem o traço nos últimos anos foi de 1:4, como pode ser verificado na Tabela 8. Sendo assim, por se tratar de um estudo de concreto poroso, para este trabalho foi utilizado o mesmo traço.

Tabela 8: Proporção cimento:agregado (em massa)

Ano da Pesquisa	Cimento:Agregado	Autor
2016	1:4	(PIERALISI, 2016)
2017	1:4	(LÓPEZ-CARRASQUILLO; HWANG, 2017)
2019	1:4	(COSTA et al., 2019)
2020	1:3	(MARTINS FILHO et al., 2020)

Fonte: Adaptado Garcia (2021)

A relação cimento/agregado e o procedimento de compactação utilizados na produção do concreto poroso são os principais fatores da mistura, afetando diretamente as características mecânicas do material. De acordo com ACI (2010) a relação a/c está entre 0,26 e 0,40. Neste trabalho a relação água/cimento adotada foi 0,35, ressaltando que para os traços com variações de adições minerais a relação a/c refere-se à água/(cimento + adição).

Para este trabalho foram produzidos cinco traços de concreto poroso, sendo um traço padrão sem nenhuma adição mineral e quatro traços utilizando variações de 5% e 8% de sílica ativa e 8% e 10% de metacaulim em substituição ao cimento, e superplastificante como pode ser verificado na Tabela 9.

Tabela 9: Definição dos traços

Traço	(Cimento:Brita:Silica Ativa:metacaulim:Água/cimento:SP)
Padrão	1:4:0:0:0,35:0,2
5%S 8%M	0,87:4:0,05:0,08:0,35:0,2
5%S 10%M	0,85:4:0,05:0,1:0,35:0,2
8%S 8%M	0,84:4:0,08:0,8:0,35:0,2
8%S 10%M	0,82:4:0,08:0,1:0,35:0,2

Para a execução de todos os ensaios estabelecidos, foram produzidos 13 CPS cilíndricos com dimensões de 10 x 20 cm utilizando a Tabela 10, que representa a quantidade de material em massa para produção de cada CP.

Tabela 10: Dosagem para confecção de CP

Traço	Cimento (kg)	Brita 1 (kg)	Sílica ativa (kg)	Metacaulim (kg)	Água (kg)	SP (kg)
Padrão	0,5616	2,246	0,000	0,000	0,197	0,011
5%S 8%M	0,4886	2,246	0,028	0,045	0,197	0,011
5%S 10%M	0,4774	2,246	0,028	0,056	0,197	0,011
8%S 8%M	0,4717	2,246	0,045	0,045	0,197	0,011
8%S 10%M	0,4605	2,246	0,045	0,056	0,197	0,011

Para garantir a homogeneidade dos traços durante os ensaios foram realizados os ensaios de granulometria e densidade do agregado.

3.8. Granulometria

O ensaio de granulometria foi realizado conforme a NBR 17054 - Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio (ABNT, 2022), inicialmente as amostras foram coletadas e reduzidas conforme a NBR 16915 - Agregados - Amostragem (ABNT, 2021) através do método de quarteamento. Para dimensão máxima nominal do

agregado de 19 mm, foram separadas e pesadas duas amostras de 5 kg cada a serem ensaiadas, conforme Figura 6.

Figura 6: Separação do agregado gráudo - Pesagem da amostra de 5 kg



Em seguida, todo o material foi lavado e colocado para secar na estufa a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ durante 24 h, posteriormente foi resfriado em temperatura ambiente durante um período de 3 h, conforme Figura 7.

Figura 7: Agregado gráudo secando na estufa por 24 h



Depois de secas, as amostras foram pesadas e determinadas as suas respectivas massas m_1 e m_2 e em seguida utilizando um agitador mecânico, foi realizado o peneiramento de cada amostra utilizando as peneiras 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3 mm e fundo, durante um período de 2 min por amostra e ao término do tempo foram pesados os valores obtidos em cada peneira, conforme Figura 8.

Figura 8: Ensaio de granulometria - (A) Peneiramento do agregado (B) Pesagem retida em cada peneira



Com os resultados obtidos foi determinado a somatória de todas as massas, a porcentagem retida em cada peneira e as porcentagens médias retidas e acumuladas que foram utilizadas para calcular a curva granulométrica da faixa utilizável e da faixa ótima conforme Figuras 9 e 10. Os resultados obtidos estão respeitando os limites estabelecidos na NBR 7211 - Agregados para concreto – Especificação (ABNT, 2019).

Figura 9: Curva granulométrica da faixa utilizável

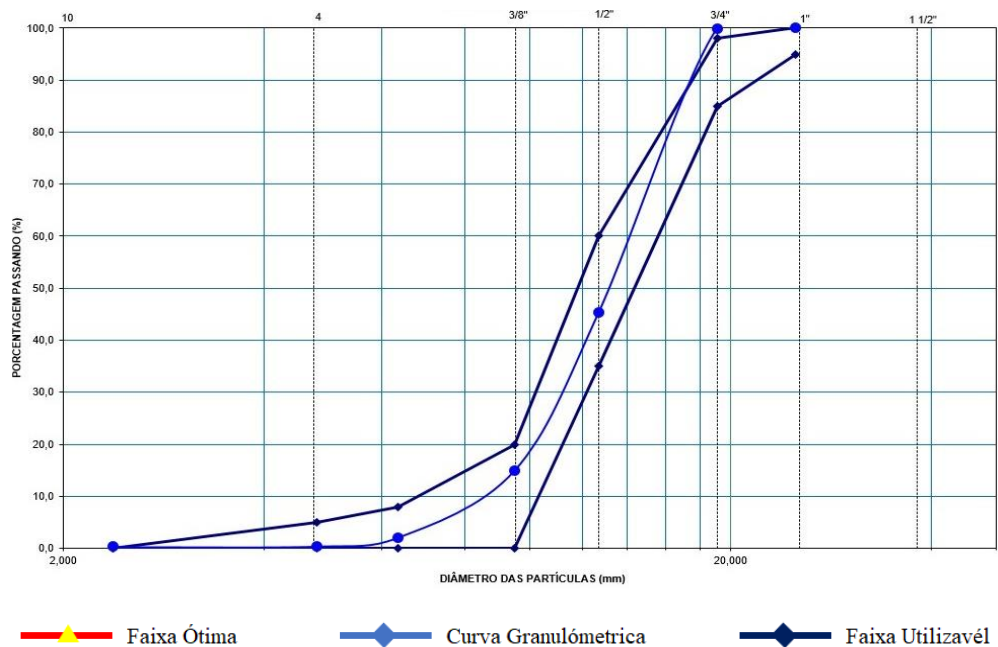
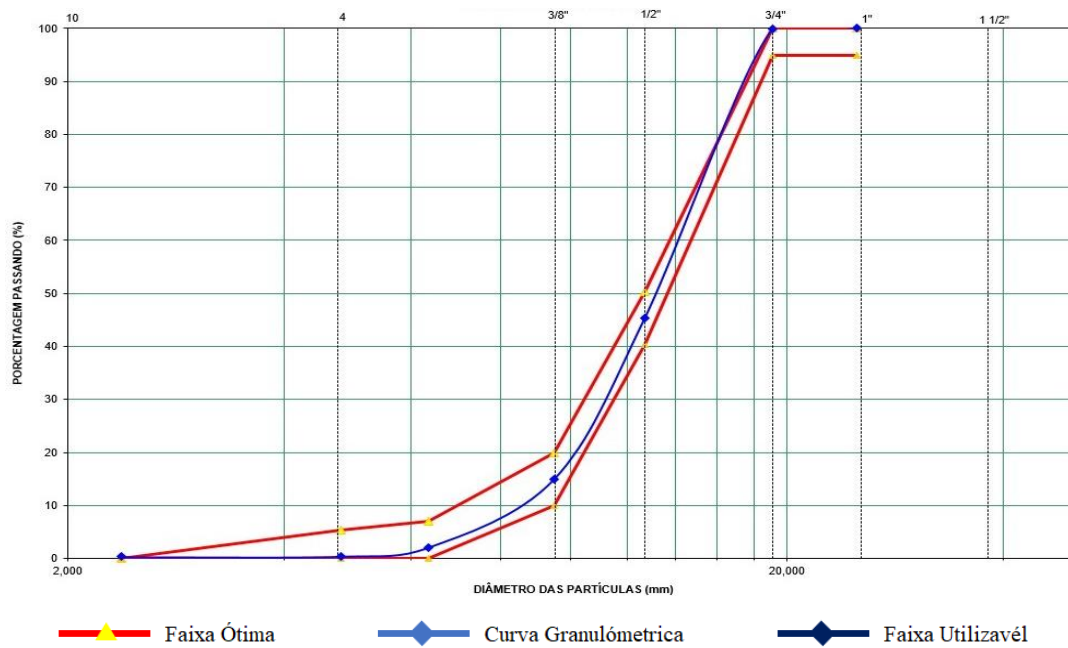


Figura 10: Curva granulométrica da faixa ótima



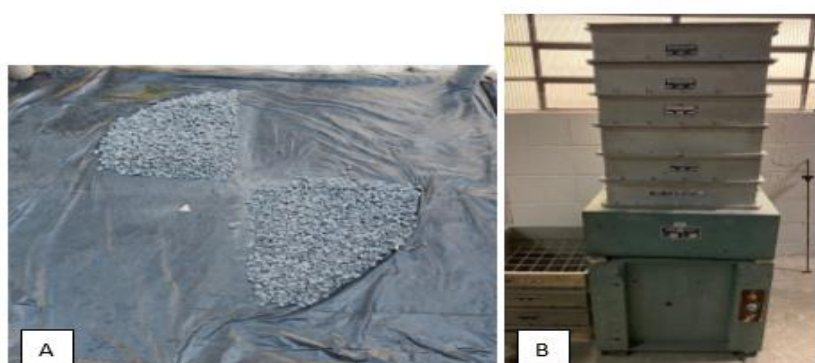
3.9. Densidade do agregado

Para a realização do ensaio de densidade do agregado prescrito na norma NBR 16917 - Determinação da densidade e da absorção de água (ABNT, 2021) foram coletadas duas amostras e reduzidas através do método de quarteamento, conforme prescrito na NBR 16915 (ABNT, 2021). A massa mínima adotada para cada amostra ensaiada foi de 3 kg, para a dimensão máxima - característica nominal de 19 mm do agregado, diâmetro adotado para este trabalho.

Em seguida, com auxílio de um agitador de peneiras da Produtest, todo o material foi peneirado utilizando as peneiras principais de série normal e intermediária nos diâmetros de 9,5 mm a 19 mm, conforme Figura 11.

O material passante pela peneira de 4,75 mm e superior a 25 mm foi descartado.

Figura 11: Preparação da amostra para o ensaio de densidade do agregado - (A) Amostragem - método de quarteamento e (B) Peneiramento



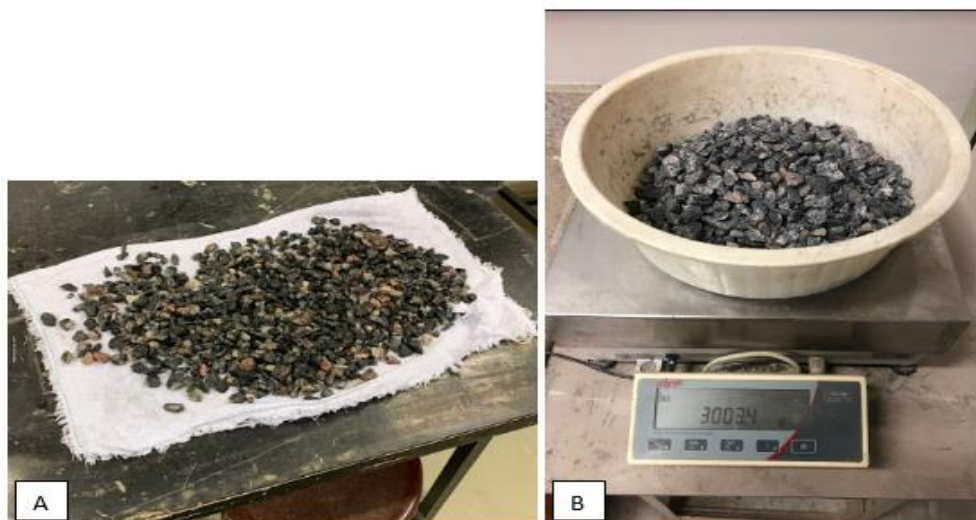
Após o peneiramento, as amostras foram lavadas, a fim de remover os materiais pulverulentos sobre a peneira de malha de 4,75 mm e em seguida foram colocadas em uma bandeja cobertas com água potável durante 24 h, conforme Figura 12.

Figura 12: Preparação da amostra após peneiramento - (A) Lavagem do agregado, (B) Amostras emergidas em água



Depois de retiradas da água, as amostras foram enxugadas superficialmente com auxílio de um pano seco, eliminando toda a água aparente e utilizando uma balança, com resolução mínima de 0,1% da massa da amostra do ensaio, foram pesadas separadamente as amostras determinando a massa da amostra na condição de superfície seca (m_b), conforme Figura 13.

Figura 13: Preparação da amostra após imersão em água - (A) Secagem superficial da amostra e (B) Determinação das massas na condição de superfície seca (m_b)



Em seguida, utilizando um cesto de arame, as amostras foram submersas em água a temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e registrado a massa da amostra submersa em água (m_c), conforme Figura 14.

Figura 14: Determinação das massas submersas em água (m_c)



As amostras foram colocadas novamente na bandeja e levadas à estufa a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ durante 24 h e posteriormente resfriadas em temperatura ambiente durante 2 h. Depois disso, foi pesado a massa da amostra seca em estufa (m_a), conforme Figura 15.

Figura 15: Preparação da amostra seca - (A) Secagem do material na estufa e (B) Determinação da massa da amostra seca (ma)



Com os resultados obtidos foram calculadas a densidade do agregado na condição seca pela Equação (7) e densidade do agregado na condição saturada superfície seca pela Equação (8).

$$\rho_s = \frac{m_a}{m_b - m_c} \quad (7)$$

$$\rho_{sss} = \frac{m_b}{m_b - m_c} \quad (8)$$

Onde:

ρ_s é a densidade do agregado na condição seca (g/cm³);

ρ_{sss} é a densidade do agregado na condição saturada superfície seca (g/cm³);

m_a é a massa da amostra seca em estufa a (105 ± 5)°C (g);

m_b é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

m_c é a massa da amostra submersa em água na condição saturada superfície seca (g).

É possível verificar através da Tabela 11 que resultados encontrados no ensaio estão dentro dos parâmetros estabelecidos pela NBR (ABNT,), onde os resultados devem ser a média e não podem diferir mais que 0,02 g/cm³ entre si.

Tabela 11: Resultados obtidos do ensaio de densidade do agregado

Características	Amostra 1	Amostra 2 (g)
ρ_s (g/cm ³)	2,700	2,693
ρ_{sss} (g/cm ³)	2,710	2,706
média ρ_s (g/cm ³)	2,697	
média ρ_{ss} (g/cm ³)	2,708	

3.10. Densidade da pasta

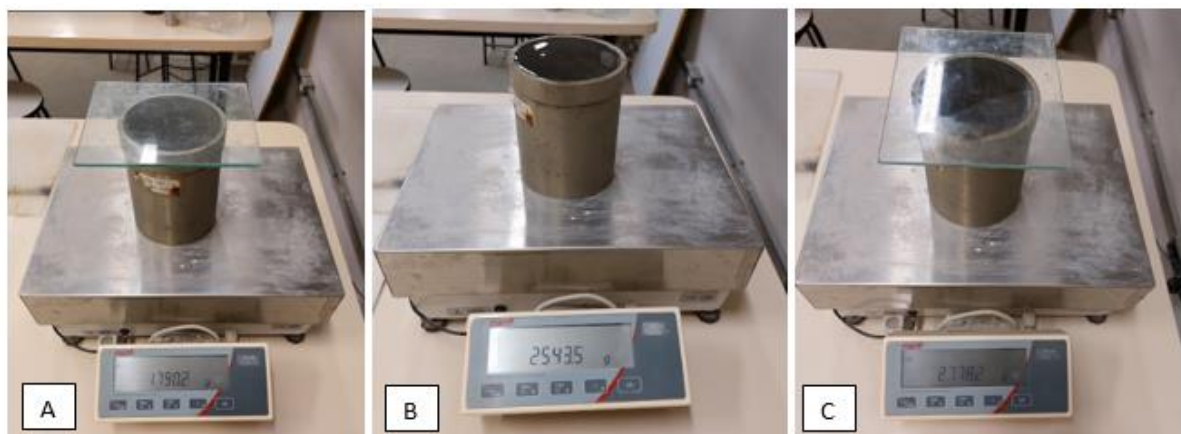
Devido à falta de uma norma específica brasileira para realização do ensaio de densidade da pasta, foi utilizado a NBR 13278 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado (ABNT, 2005).

Antes de iniciar o ensaio, foi realizada a calibração do recipiente cilíndrico, utilizando um recipiente com volume de 0,998 litros e uma placa de vidro de dimensões 15x15 cm. Primeiro pesou-se o recipiente vazio com a placa de vidro registrando a massa (m_v) com valor de 1790,2 g. Em seguida, foi pesado o recipiente com água a temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e anotado o volume (v_r) e posteriormente foi pesado o recipiente com água e com a placa de vidro e registrado a massa (m_a) com valor de 2778,2 g, conforme Figura 16.

Com os resultados obtidos, obteve-se o volume (v_r) através da Equação (9), onde foi possível verificar que o volume calculado através da calibração foi o mesmo que o evidenciado no recipiente.

$$v_r = m_a - m_v \quad (9)$$

Figura 16: Calibração do recipiente - (A) Recipiente vazio com a placa de vidro, (B) Recipiente com água e em (C) Recipiente com água e placa de vidro



Após a calibração do recipiente foram preparadas as amostras de pasta para cada traço analisado neste trabalho seguindo a mesma proporção dos materiais utilizados para a execução do concreto. Ao término da preparação, a pasta foi inserida no recipiente em três camadas de alturas similares, executando 20 golpes e três quedas do recipiente com altura de 3cm em cada camada, a fim de eliminar os vazios existentes entre a argamassa e o recipiente.

Em seguida, o recipiente foi rasado com o auxílio da espátula a fim de retirar o excesso de material e o recipiente com argamassa foi pesado, registrando o resultado (m_c), conforme Figura 17.

Figura 17: Ensaio de densidade da pasta



Com os resultados obtidos foram calculadas as densidades da pasta pela Equação (10).

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} \times 1000 \quad (10)$$

Onde:

d é a densidade de massa de argamassa no estado fresco (kg/m^3);

m_c é a massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio (g);

m_v é a massa do recipiente cilíndrico vazio (g);

v_r é o volume do recipiente cilíndrico (cm^3).

3.11. Produção do corpo de prova do concreto poroso

Para a produção dos corpos de prova de concreto foi utilizado a NBR 12821 (ABNT, 2009) como base para o procedimento. Os equipamentos utilizados foram a balança de precisão de 0,01 g, para a separar as proporções do traço, a betoneira estacionária e a colher de pedreiro para a homogeneização do concreto, conforme Figura 18 seguindo a sequência: totalidade da brita com 1/3 do volume da água, acionando a betoneira por aproximadamente 30 segundo, seguido pela totalidade de cimento, sílica ativa e metacaulim, em suas devidas proporções conforme cada traço com 1/3 do volume da água por mais 30 segundos, e, pôr fim, a totalidade do aditivo SP com o restante do volume da água, acionando a betoneira durante o tempo necessário para garantir a homogeneidade e trabalhabilidade do concreto.

Figura 18: Equipamentos para execução do concreto - (A) Betoneira, (B) Colher de pedreiro e (C) balança



É válido ressaltar a dificuldade de homogeneização da mistura dos materiais quando utilizadas elevadas proporções de sílica ativa e metacaulim devido ao material ficar retido na parede interna da betoneira. Nestas circunstâncias, foi necessária a mistura manual com a colher de pedreiro com a finalidade de retirar o material preso e dar sequência ao processo automatizado com a betoneira.

3.12. Abatimento do tronco de cone

Para o ensaio de abatimento de tronco de cone (ou *Slump Test*), foi utilizado a NBR 16889 (ABNT, 2020) e a amostra de concreto ensaiada foi preparada conforme a NBR 16886 (ABNT, 2020), retirada da betoneira estacionária.

Inicialmente foi preparada a base para a placa de base, colocando uma porção de areia para garantir a planicidade, e o molde foi colocado sobre a placa de base, ambos umedecidos, conforme Figura 19.

Figura 19: Equipamentos para realização do ensaio de *Slump*



Durante o preenchimento de molde com o concreto, o responsável pela realização do ensaio se encontrava com os pés sobre as aletas para que o molde permanecesse estável. O preenchimento foi realizado com três camadas, cada uma com aproximadamente $\frac{1}{3}$ da altura do molde e foi aplicado 25 golpes com a haste de adensamento, tomando o cuidado para que na primeira camada fosse golpeada toda a sua espessura e que nos golpes das camadas superiores também penetrasse na camada diretamente inferior.

Em sequência, a superfície do concreto foi rasada com uma colher de pedreiro e retirado o molde cuidadosamente na direção vertical, para cima. Imediatamente o molde foi invertido e colocado sobre a placa de base para registrar o abatimento do concreto determinado pela

distância entre o molde e o eixo do topo do corpo de prova, conforme Figura 20. O ensaio foi repetido uma vez para todos os traços estabelecidos, conforme item 3.7.

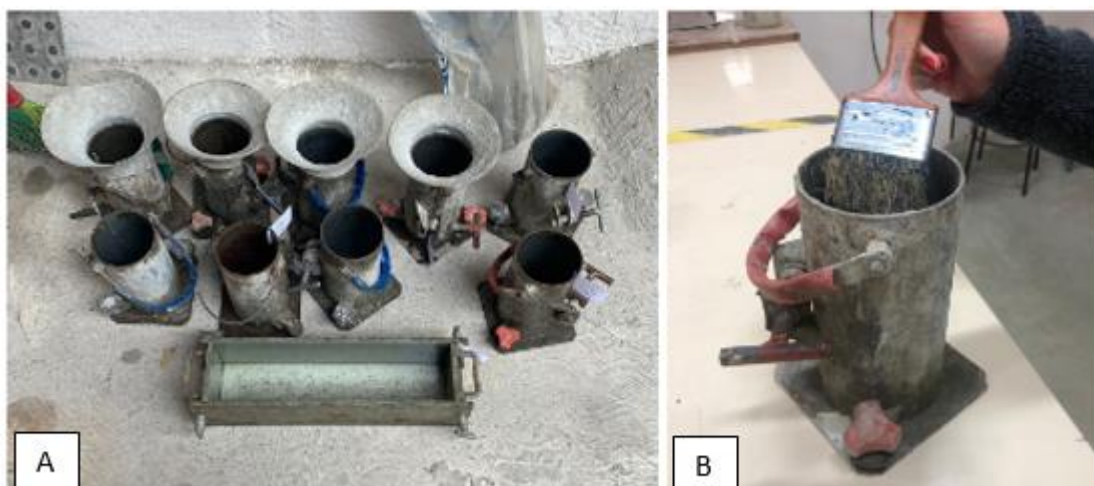
Figura 20: Ensaio de abatimento de tronco de cone



3.13. Moldagem e cura do CP

Deu-se início a moldagem dos corpos de prova, seguindo a NBR 5738 (ABNT, 2015). Para cada traço foram utilizados 13 moldes cilíndricos (10x20) cm, conforme Figura 21, e aplicado uma demão de desmoldante na parte interna de cada um dos moldes.

Figura 21: Preparação do corpo de prova - (A) Separação dos CPs para recebimento do concreto, (B) Passando desmoldado no CP



Cada molde cilíndrico foi preenchido inicialmente com o concreto até a metade e golpeada 12 vezes com a haste em toda sua seção transversal, tomando cuidado para que não golpeie o fundo do molde, e para a última camada acumulou concreto sobre a superfície do molde, de forma que, ao ser adensada, complete a outra metade do molde, e golpeado por mais 12 vezes. Após, foi realizado o rasamento da superfície com o auxílio da colher de pedreiro.

Finalizado o adensamento de todos os CPs, os mesmos foram colocados em uma superfície rígida, livre de intempéries e cobertos por uma lona com a finalidade de evitar a perda de água do concreto. Após 24 h os CPs cilíndricos foram desmoldados e encaminhados à câmara úmida à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, conforme Figura 22.

Figura 22: Produção dos CPs - (A) CPs após moldagem e (B) CPs desmoldados na câmara úmida



3.14. Teor de ar incorporado no concreto

Para a realização do ensaio de determinação do teor de ar incorporado no concreto fresco, foi utilizado neste trabalho a NBR 16887 (ABNT, 2020). E foi escolhido o medidor tipo B, para desenvolvimento do método.

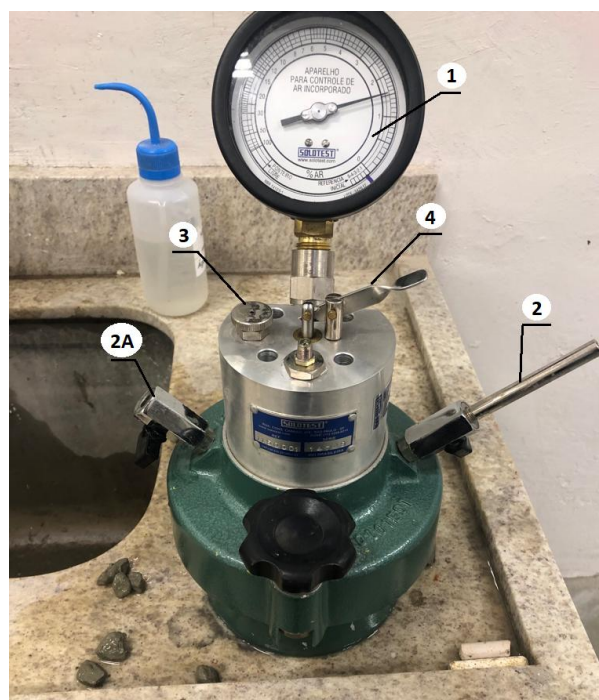
Coletou-se a amostra seguindo a NBR 16886 (ABNT, 2020), a amostra de concreto foi retirada da betoneira estacionária após a homogeneização do concreto e realizado o adensamento manual da amostra no recipiente de medida, distribuídas em três camadas de concreto e, com a haste, foram aplicados 14 golpes em cada uma das camadas e golpeado de 10 a 15 vezes na parede externa do recipiente, ao final foi feito o rasamento da superfície do concreto com uma régua, conforme Figura 23. As bordas do recipiente foram limpas cuidadosamente e o recipiente foi fechado hermeticamente.

Figura 23: Preparação da amostra para o ensaio de teor de ar incorporado no concreto - (A) Golpeamento da camada de concreto, (B) Golpeamento na parede externa do recipiente e (C) rasamento da superfície da amostra



Após o fechamento do recipiente foi injetado água por meio de uma piceta pela torneira (2) até que todo o ar fosse expelido e que a água saísse pela torneira oposta (2A). Permanecendo as torneiras abertas, certificou-se que a válvula de sangramento de ar (3) estivesse fechada e foi bombeado ar para a câmara até que o manômetro (1) estivesse na linha de pressão inicial. Fechou-se as torneiras (2 e 2A) e pressionou-se a alavanca (4) por alguns segundos, até que o ponteiro se estabilizasse, para que transferisse a pressão ao recipiente. Leu-se a porcentagem do teor de ar aparente A1 da amostra no manômetro (1). Este passo a passo está ilustrado conforme Figura 24.

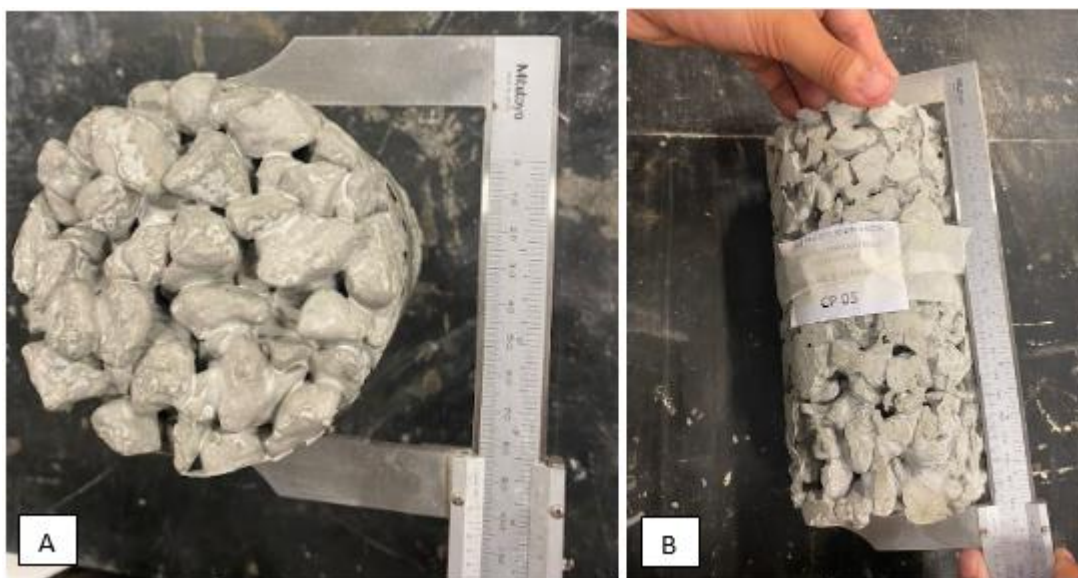
Figura 24: Equipamento para medição, medidor tipo B



3.15. Resistência à tração por compressão diametral

Para realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, inicialmente foram retirados os corpos de prova da câmara úmida e determinadas as suas dimensões (altura e diâmetro) utilizando um paquímetro com exatidão de $\pm 0,01$ mm, conforme Figura 25. A altura foi determinada através da medida sobre o eixo longitudinal do CP e o diâmetro foi encontrado através da média de dois diâmetros medidos ortogonalmente na metade da altura do corpo de prova. O diâmetro encontrado foi utilizado para o cálculo da área da seção transversal do corpo de prova, conforme NBR 7222 (ABNT, 2011).

Figura 25: Dimensões dos corpos de prova - (A) Verificação do diâmetro do CP e em (B) Verificação da altura do CP



Em seguida, foram produzidas tiras de chapas de madeira com 15 mm de largura e 3,5 mm de espessura em quantidade suficiente para cada corpo de prova. Foram traçados em cada extremidade dos corpos de prova, com auxílio de giz, uma linha reta diametral de tal forma que as duas linhas resultantes ficaram contidas no mesmo plano axial. Através das linhas diametrais criadas, foram posicionadas e fixadas as chapas de madeira utilizando fita adesiva, como pode ser observado na Figura 26.

Figura 26: Preparação do corpo de prova utilizando chapas de madeira



Os corpos de prova foram posicionados entre os pratos superiores e inferiores da máquina, de maneira que o plano axial definido por geratrizes diametralmente opostas coincidissem com o eixo de aplicação da carga. Posteriormente foi utilizada uma viga complementar de aço usinado para garantir que a força aplicada durante o ensaio fosse distribuída uniformemente sobre toda a geratriz do corpo de prova, conforme Figura 27.

Após o término do posicionamento do corpo de prova na máquina, iniciou-se a aplicação de carga contínua a uma velocidade constante de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s até que o corpo de prova se rompesse.

Figura 27: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral - (A) Posicionamento do CP na máquina de compressão e em (B) Aplicação de carga no CP



Registrou-se a força máxima aplicada para determinação da resistência à tração por compressão calculada pela Equação (11).

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi d l} \quad (11)$$

Onde:

$f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F é a força máxima obtida no ensaio (N);

d é o diâmetro do corpo de prova (mm);

l é o comprimento do corpo de prova (mm).

O ensaio foi realizado para todos os traços, nas idades de 14 e 28 dias.

3.16. Resistência à compressão

Inicialmente os CPs foram nivelados pelo método de capeamento, utilizando o gesso estrutural, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015) pois, devido a sua porosidade, sua superfície estava desnivelada e, com o auxílio do paquímetro de precisão 0,1 mm, suas dimensões (altura e diâmetro) foram verificadas, conforme NBR 5739 (ABNT, 2018), conforme Figura 28.

Figura 28: Capeamento do CP com gesso



Desta forma, os pratos da máquina foram devidamente limpos e secos, assim como as superfícies de cada CP e, por fim, centralizou-se o CP entre o prato inferior e superior da máquina, com o auxílio dos círculos concêntricos de referência indicado no prato inferior, conforme Figura 29.

Figura 29: Ensaio de resistência à compressão



Iniciou-se o carregamento com a velocidade $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s constante durante todo o procedimento, até que houvesse a queda de força que indica que o CP atingiu sua ruptura. Registrou-se a força máxima aplicada para determinação da resistência à compressão calculada pela Equação (12).

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (12)$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão (MPa);

F é a força máxima aplicada (N);

D é o diâmetro do CP (mm).

O ensaio de resistência à compressão foi realizado para todos os traços, nas idades de 14 e 28 dias.

3.17. Permeabilidade

A determinação do coeficiente de permeabilidade (k) foi calculada a partir dos princípios da lei experimental de Henry Darcy, que descreve o fluxo de um fluido através do meio poroso. Para este trabalho foi escolhido o permeâmetro de carga variável, conforme Figura 30.

Figura 30: Permeâmetro de carga variável



Inicialmente é conferido as dimensões do CP, altura e diâmetro, com o auxílio do paquímetro de precisão 0,1 mm. Após a verificação, o CP foi colocado no permeâmetro e colocado água até a marcação de 15,00 cm, conforme Figura 31.

Figura 31: Ensaio de permeabilidade



A válvula é aberta até que a água chegue ao nível 0,00 cm, registra-se o tempo t (em segundos) e a água que foi eliminada do permeâmetro é coletada em outro recipiente e, então, é registrada o volume V (em cm^3).

O ensaio foi repetido três vezes para cada traço e realizado a média aritmética para sequência dos cálculos.

Deu-se então sequência aos cálculos pelo Equação (13), de Darcy.

$$k = \frac{(V \times L)}{(A \times t \times \Delta h)} \quad (13)$$

Onde:

k é o coeficiente de permeabilidade (cm/s);

V é a quantidade de água medida após a coleta (cm³);

L é a altura do CP (cm);

A é a seção transversal do CP (cm²);

t é o tempo medido entre o início e o fim do ensaio (s);

Δh é a diferença de nível entre os reservatórios, superior e inferior (cm).

3.18. Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica

Para determinação da absorção da água, do índice de vazios e da massa específica foi utilizado a NBR 9778 (ABNT, 2005). Primeiramente foi colocado os CPs na estufa por 72 h e registrado (m_s), conforme Figura 32.

Figura 32: Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica - (A) Posicionamento do CPs na bandeja e (B) CPs na estufa



Determinando sua massa na condição seca, imergiu-se, então, os CPs em água na temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ por mais 72 h, conforme Figura 33.

Figura 33: CPs imergidos em água por 72h



Completada as 72 h imergido em água, os CPs foram trocados de recipiente, também, com água, e levado à ebulição por 5 h, após esta etapa, deixou os CPs esfriarem até atingir a temperatura ambiente, naturalmente, e, com o auxílio da balança hidrostática registrou sua massa imersa em água (m_i), conforme Figura 34.

Figura 34: Determinação da massa em água (m_i)



Retirou a amostra da água e retirou o excesso de água, enxugando com pano úmido, conforme Figura 35 e determinou-se a massa na condição saturada (m_{sat}) tomando cuidado para que o cesto imerso em água não encoste em nenhuma das partes do recipiente com água, conforme Figura 36.

Figura 35: Secagem superficial dos CPs



Figura 36: Determinação das massas na condição de superfície seca (m_{sat})



Após a realização dos ensaios, com os dados coletados, seguimos para os cálculos. Para a determinação da absorção de água utilizou-se a Equação (14); para determinação de índice de vazios, utilizou-se a Equação (15); e para a determinação da massa específica, utilizou-se a Equação (16) para amostra seca, (17) para amostra saturada e (18) para a massa específica real. Foi considerada a massa específica da água sendo 1g/cm^3 .

$$\text{Absorção de água} = \frac{m_{sat}-m_s}{m_s} \times 100 \quad (14)$$

$$\text{Índice de vazios} = \frac{m_{sat}-m_s}{m_{sat}-m_i} \times 100 \quad (15)$$

$$\rho_{seca} = \frac{m_s}{m_{sat}-m_i} \quad (16)$$

$$\rho_{saturada} = \frac{m_{sat}}{m_{sat}-m_i} \quad (17)$$

$$\rho_{real} = \frac{m_s}{m_s-m_i} \quad (18)$$

Sendo:

m_{sat} é a massa saturada em água após imersão e fervura;

m_s é a massa seca em estufa;

m_i é a massa saturada imersa em água após fervura e ρ é a massa específica.

3.19. Emissão de CO₂

Para estimar a emissão de CO₂ de cada traço realizado neste trabalho utilizou-se o método desenvolvido por Costa (2012), pelo Método para Quantificação de Emissão de CO₂ (Método QE-CO₂), este método leva em consideração as etapas de extração das matérias primas, processamento e transporte do material na construção civil. O Método QE-CO₂ é subdividido em três níveis, sendo eles o Básico, o Intermediário e o Avançado, neste trabalho foi escolhido o nível Básico.

De acordo com Costa (2012), quando os dados são limitados, ou seja, quando não se conhece detalhes dos consumos energéticos, emissões ou composição química, assim como distâncias entre locais de extração, produção e consumo ou tipo de meio de transporte utilizado, deve-se empregar a seguinte Equação (19):

$$Emissões_{MT,j} = QT_j \times FP_j \times FEP_j \quad (19)$$

Onde:

$Emissões_{MT,j}$ é emissões de CO₂ devido a utilização do produto j em edificações (em tonelada de CO₂);

QT_j é a quantidade de produto j necessária na obra (em toneladas);

FP_j é o fator de perda do produto, adimensional (conforme tabela xxx);

FEP_j é o fator de emissão de CO₂ devido a utilização do produto j em edificações (em toneladas de CO₂/tonelada de produto acabado).

O fator de perda (%) determinado para cada material causado pelo desperdício é indicado na Tabela 12 a seguir:

Tabela 12: Relação do fator de perda de cada material, em %

Material	Unidade	Média
Cimento	%	95
Brita	%	75

Fonte: Agopyan (1998)

O fator de emissão de CO₂ calculado com base nas fases de extração, processamento e transporte de cada material é indicado na Tabela 13. Conforme Guimarães (2018), a sílica ativa tem emissão de 0 Kg/t de CO₂ e de acordo com Borges et al. (2014) o material ligante não emite CO₂, um dos produtos para obtenção do metacaulim é a água.

Tabela 13: Relação do fator de emissão de CO₂ de cada material, em %

Material	Unidade	Média
Cimento	tCO ₂ /t produto	0,652 (COSTA, 2012)
Brita	tCO ₂ /t produto	0,086 (COSTA, 2012)
Sílica ativa	tCO ₂ /t produto	0 (COSTA, 2018)
Metacaulim	tCO ₂ /t produto	0 (BORGES <i>et al.</i> , 2014)

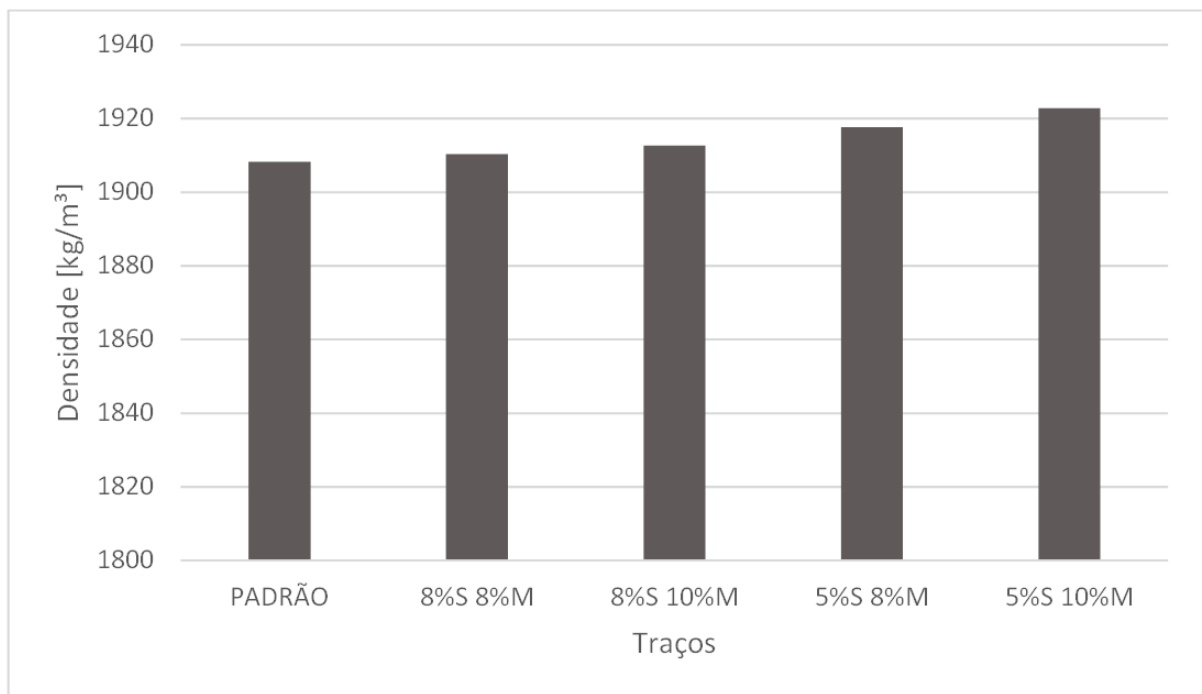
4. Resultados e discussão

Nos próximos itens serão apresentados os resultados de cada ensaio proposto neste trabalho, bem como suas discussões.

4.1. Densidade da pasta

Na Figura 37 estão os cálculos para determinação da densidade da pasta de cada traço. Observa-se que os traços com substituição de sílica ativa e metacaulim, independente da porcentagem de substituição, apresentam densidade maior que o traço padrão, que obteve a densidade de 1908,3 kg/m³. O traço que obteve o maior resultado foi o traço com 5% de sílica ativa e 10% de metacaulim, com a densidade de 1922,87 kg/m³. Conforme Carmo *et al.* (2008) o aumento da densidade é ocasionado pelo “efeito microfíler”, ou seja, o preenchimento de vazios pelo material pozolânico na mistura.

Figura 37: Gráfico da densidade da pasta



4.2. Abatimento do tronco de cone

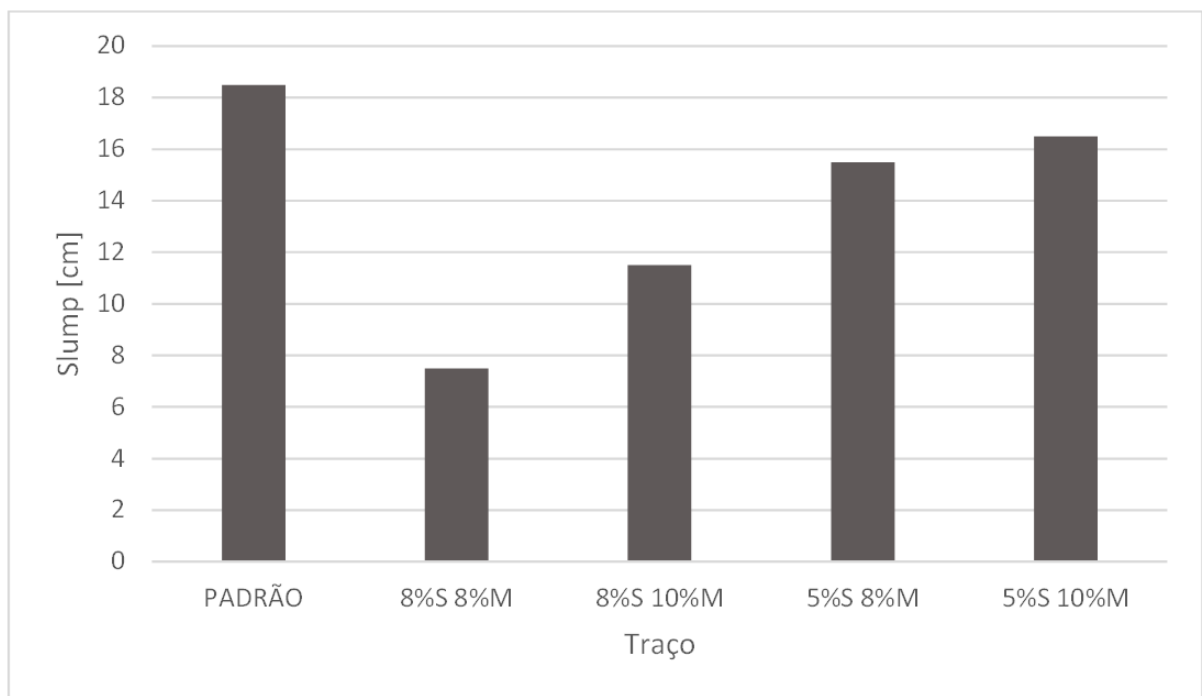
Os valores da medição do abatimento do tronco de cone (*slump*) estão expressos na Figura 38. Pode-se observar que quanto maior a quantidade de cimento substituído por sílica Ativa, menor é o *slump* do traço. Porém, o metacaulim auxiliou no aumento do *slump*.

Se comparado os dois traços com substituição de 8% de cimento por sílica Ativa, o primeiro com 8% de sílica ativa e 8% de metacaulim obteve o *slump* de 7,50 cm, já o segundo traço, com 8% de sílica ativa e 10% de metacaulim obteve o *slump* de 11,50 cm, apresenta uma diferença de 4,00 cm.

Comparando os dois traços com substituição de 5% de cimento por metacaulim, o primeiro com 8% de sílica ativa e 8% de metacaulim e o segundo com 5% de sílica ativa e 8% de metacaulim que obteve o *slump* de 15,50 cm, apresenta uma diferença de 8,00 cm.

De acordo com ACI (2010) o abatimento do tronco de cone deve ser próximo a zero, isso faz com que o concreto apresente baixa trabalhabilidade, porém, quando houve a substituição parcial da sílica ativa na proporção de 5%, apresentou uma melhora na trabalhabilidade.

Figura 38: Gráfico do Abatimento do Tronco de Cone por traço



4.3. Teor de ar incorporado no concreto

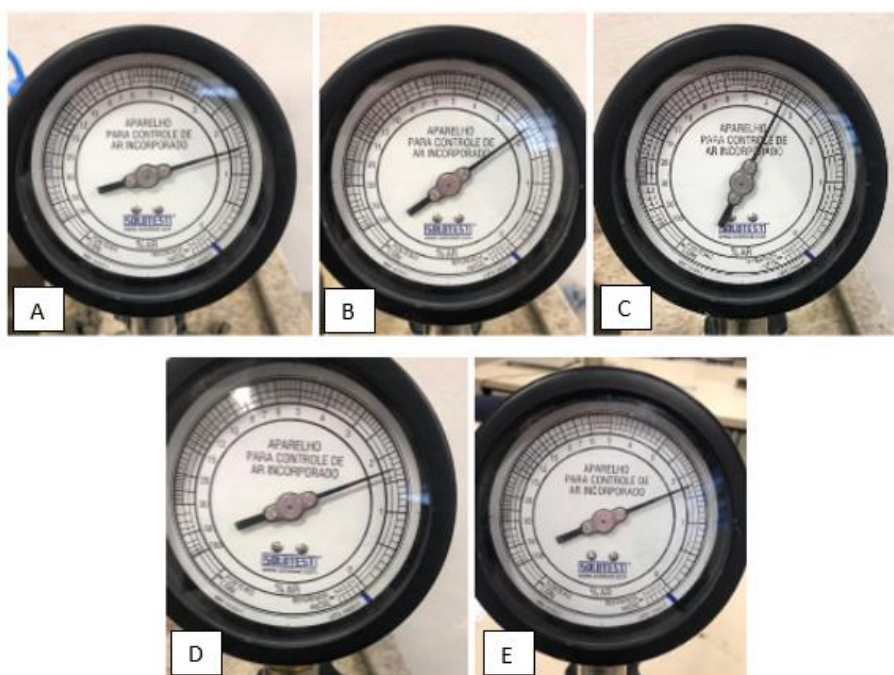
Conforme o ensaio para determinação do teor de ar incorporado no concreto, leu-se a porcentagem do teor de ar aparente (A1) no manômetro, conforme Tabela 14. A Figura 39 demonstra todos os resultados obtidos.

Tabela 14: Teor de ar aparente

Traço	A1 - Leitura manômetro
Padrão	1,50%
5%S 8%M	2,20%
5%S 10%M	3,25%
8%S 8%M	1,70%
8%S 10%M	1,75%

As leituras obtidas no manômetro estão entre os limites de acordo com Mehta e Monteiro (2008), Bauer *et al.* (1994), que informa que o teor de ar incorporado pode variar de 1% a 3%, podendo chegar até 4% em concretos produzidos em usinas.

Figura 39: Leitura manométrica - (A) Traço padrão, (B) Traço 5%S 5%M, (C) Traço 5%S 10%M, (D) Traço 8%S 8%M e (E) Traço 8%S 10%M



Pode-se observar que nos traços com menor porcentagem de sílica ativa (traços com 5% sílica), a porcentagem de ar aparente no concreto foi mais elevada, chegando a apresentar 1,75% a mais em relação ao traço padrão. E para os traços com maior porcentagem de sílica ativa (traços com 8% sílica), a porcentagem de teor de ar aparente no concreto foi mais baixa, não havendo tanta diferença com o traço padrão, com apenas 0,25% a mais em relação ao traço padrão.

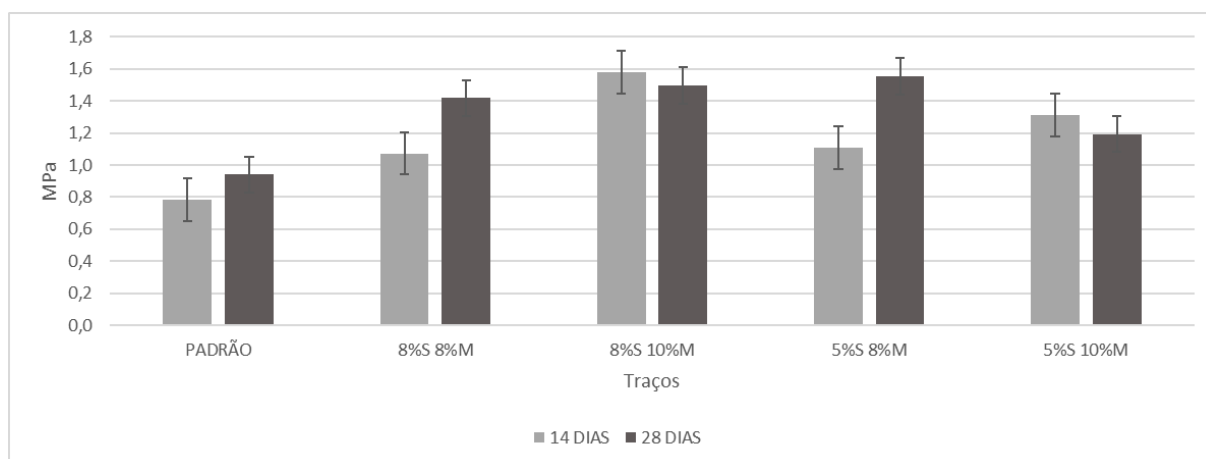
4.4. Resistência à tração por compressão diametral

Conforme os resultados expressos na Figura 40, pode-se observar as resistências atingidas referente ao ensaio realizado nas idades de 14 e 28 dias. Por mais que o traço com substituição de 8% de sílica ativa e 10% de metacaulim teve uma leve queda de resistência aos 28 dias, o mesmo obteve maior desempenho comparado com os demais, chegando a 1,58 MPa aos 14 dias e 1,50 MPa aos 28 dias.

Além do traço com substituição de 8% de sílica ativa e 10% de metacaulim, o traço com 5% de sílica ativa e 10% de metacaulim também apresentou uma leve queda, isso já era esperado pois, com teores de substituição menores que 10% de sílica Ativa, há um decréscimo de resultados de resistência à tração por compressão diametral devido a menor área do corpo de prova submetido à tração, onde a sílica apresenta um papel essencial (Morais, 1990; Sabir 1995 apud Carmo e Portella, 2008).

Analisando os resultados como um todo, todos os traços com adições de sílica ativa e metacaulim, independentemente de suas proporções, obtiveram resistências maiores que o traço padrão.

Figura 40: Gráfico de Resistência à Tração por Compressão Diametral

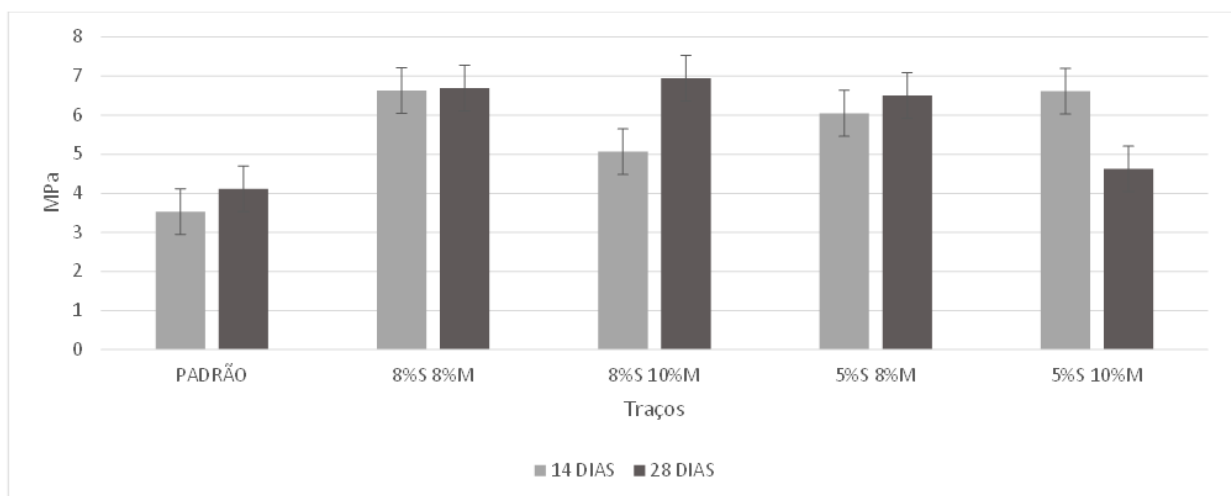


4.5. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado nas idades de 14 e 28 dias após a moldagem dos CPs. Pode-se analisar as resistências conforme Figura 41. O traço que obteve melhor resultado médio, com 6,95 MPa aos 28 dias, foi o traço com substituição de 8% de sílica ativa e 10% de metacaulim. Também pode-se observar que todos os traços com adição de sílica ativa e metacaulim, independente da porcentagem de substituição, obteve melhor desempenho comparado o traço padrão, que contém apenas o cimento como aglomerante.

A resistência à compressão com adição de pozolanas de alta reatividade apresenta uma melhora devido ao processo de refinamento de poros e dos cristais presentes na pasta de cimento hidratada (Mehta e Monteiro, 1994, apud Carmo e Portella, 2008).

Figura 41: Gráfico de Resistência à Compressão

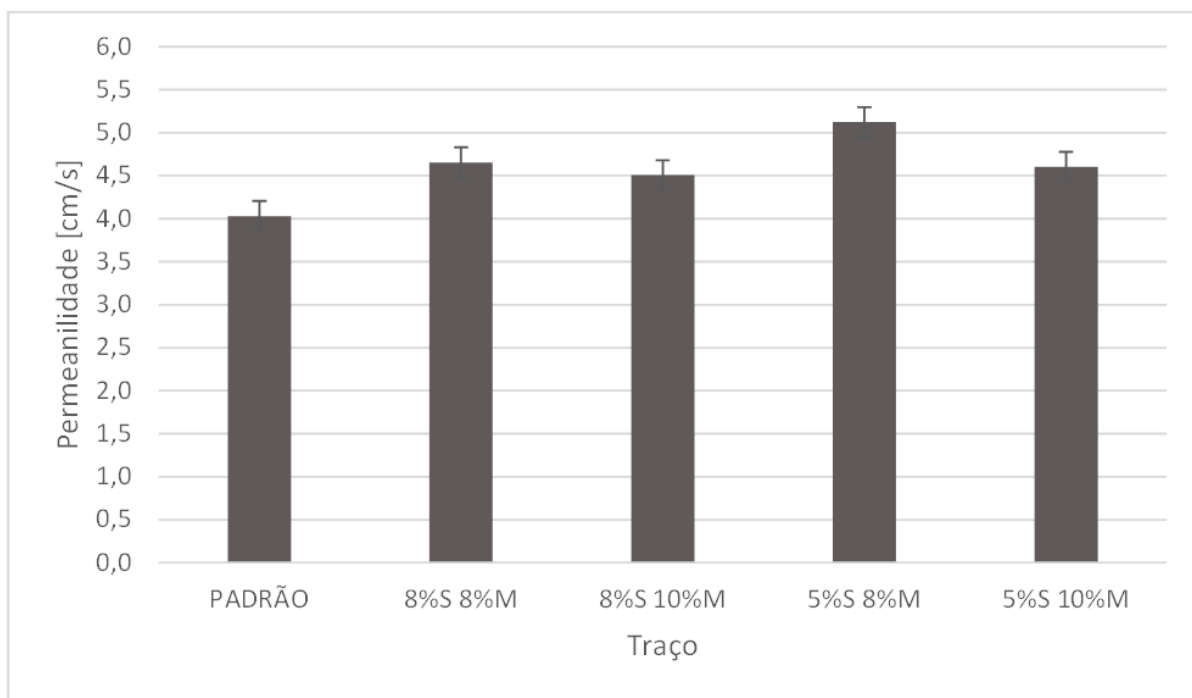


4.6. Permeabilidade

Pode-se observar, pelos resultados expressos na Figura 42, que todos os traços com substituição parcial de sílica ativa e metacaulim obtiveram o coeficiente de permeabilidade (k), referente ao ensaio realizado aos 28 dias. O traço que obteve o maior coeficiente de permeabilidade (k) foi o traço com 5% de sílica ativa e 8% de metacaulim. Além disso, independente se houve ou não substituição de sílica ativa e metacaulim, todos os traços,

inclusive o traço padrão, está de acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015), que informa que o coeficiente de permeabilidade do pavimento de concreto recém construído deve ser maior que 0,001 m/s ou 0,1 cm/s.

Figura 42: Gráfico do coeficiente de permeabilidade



4.7. Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica

Para determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, foi realizado o procedimento descrito no item 3.18. com dois CPs de cada traço, na idade de 28 dias, e realizado a média aritmética simples, conforme resultado expressos nas Figuras 43, Figura 44 e Figura 45.

Figura 43: Gráfico da absorção de água

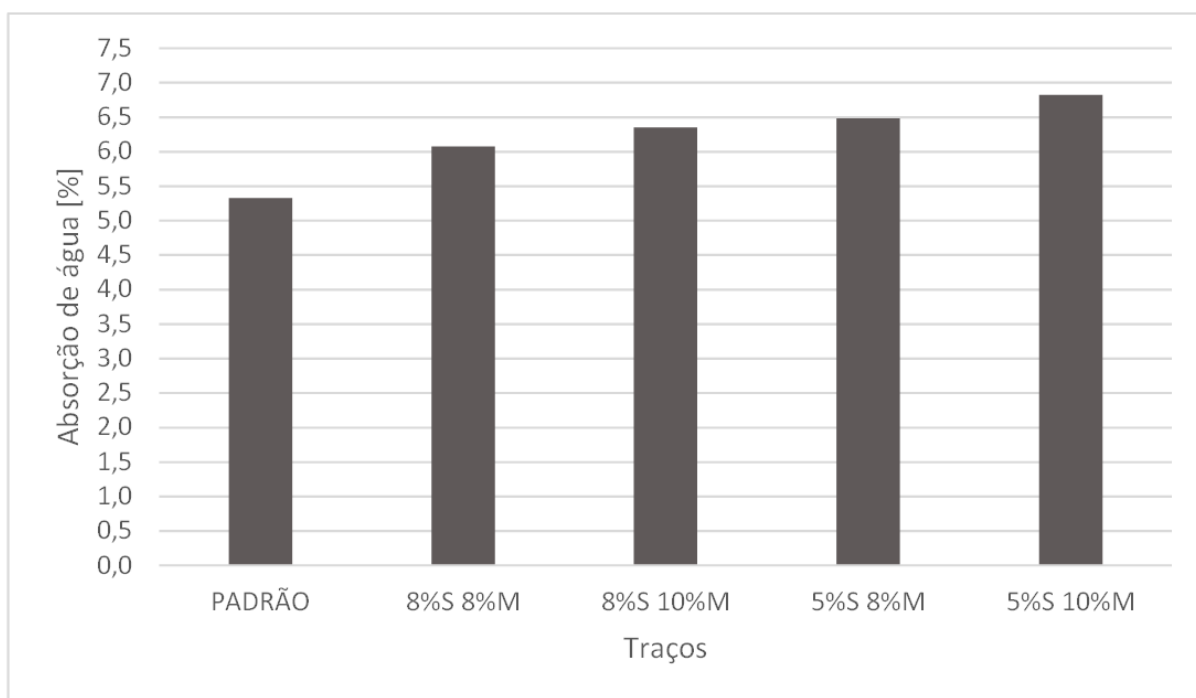
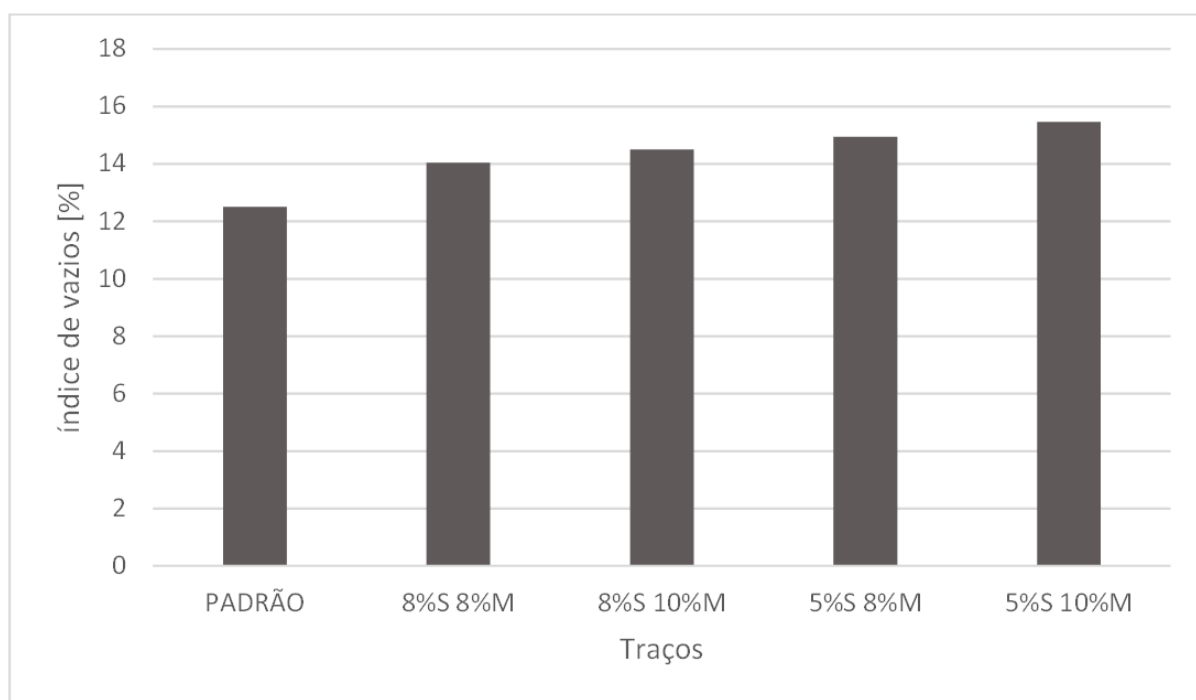


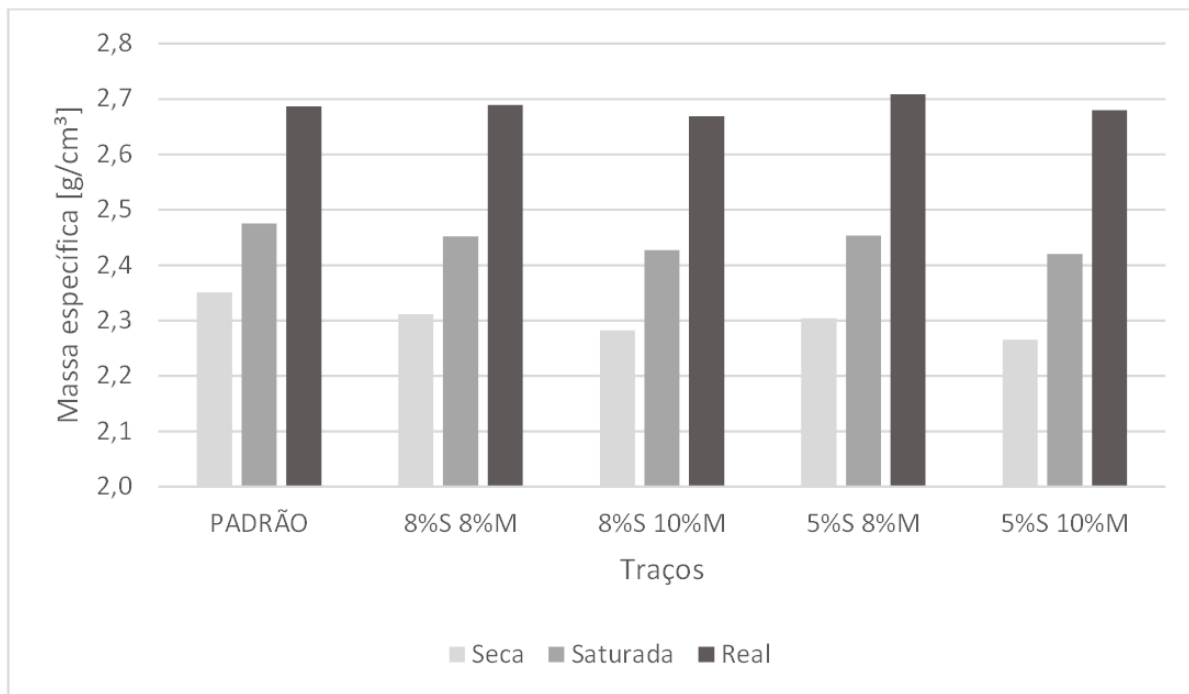
Figura 44: Gráfico do índice de vazios



Pode-se analisar que todos os CPs realizados com os traços com substituição de sílica ativa e metacaulim obtiveram as porcentagens mais elevadas de absorção de água e índice de vazios comparado ao CP realizado com o traço padrão. Os traços com menor substituição de sílica ativa, com substituição apenas 5%, obtiveram os resultados mais elevados de absorção de água e índice de vazios.

Conforme TENNIS *et al.*(2004), o índice de vazios do concreto curado pode variar entre 15% a 25% e os resultados obtido nos traços deste trabalho estão entre esta faixa de porcentagem.

Figura 45: Gráfico da massa específica



Analisando os resultados das massas específicas de todos os traços, pode-se observar que não houve discrepância em relação ao traço padrão. Sendo a massa específica real do traço padrão 2,68 g/cm³ e os traços com substituição de sílica ativa e metacaulim variando de 2,66 g/cm³ a 2,70 g/cm³. Também pode-se observar que as massas específicas referente aos traços utilizados neste trabalho estão compreendidas entre a faixa considerada normal para concretos (2,00 g/cm³ a 2,80 g/cm³).

4.8. Emissão de CO₂

Conforme a Equação (19) referente ao Método QE-CO₂ de Costa (2012), a emissão de CO₂ referente a cada traço está expressa na Tabela 15. Pode-se observar que quanto maior a porcentagem de substituição de cimento por sílica ativa e metacaulim, menor a emissão de CO₂.

Portanto, o traço que mais houve diminuição de emissão de CO₂ foi o traço com substituição de 8% de sílica e 10% de metacaulim, com substituição de 18% da quantidade de cimento, com diminuição de 0,818 tCO₂.

Isso se dá pois, conforme Borges *et al.* (2014) um dos produtos gerados pela calcinação para a produção de metacaulim é a água, diferente da calcinação do clínquer, que tem como produto o CO₂. Já a sílica ativa é o produto proveniente da produção de silício ou ligas ferrosilício, conforme Seidenstucker *et al.* (2019).

Tabela 15: Emissão de CO₂ por material/traço

Traço	Cimento [tCO₂]	Sílica Ativa [tCO₂]	Metacaulim [tCO₂]	Brita [tCO₂]	Total [tCO₂]
Padrão	4,546	n/a	n/a	2,152	6,698
5%S 8%M	3,955	0	0	2,152	6,107
5%S 10%M	3,864	0	0	2,152	6,016
8%S 8%M	3,818	0	0	2,152	5,970
8%S 10%M	3,727	0	0	2,152	5,880

Os resultados acima representam a quantidade de material necessária para a realização de 10 m³ de concreto, conforme traços da Tabela 9 (Definição dos traços).

Não foi considerado o aditivo SP por apresentar uma quantidade de material muito baixa (0,007 t).

5. Conclusões

A partir dos resultados apresentados conclui-se que:

- Os traços com substituição de sílica ativa e metacaulim apresentaram baixa trabalhabilidade comparada ao traço padrão. Esse fato é devido aos grãos pozolânicos serem diversas vezes menores que os grãos do cimento, ou seja, há maior área de contato com a água, absorvendo-a melhor. Essa análise pode ser verificada com base nos ensaios de abatimento do tronco de cone e densidade da pasta.
- Foi possível verificar através dos demais ensaios não destrutivos que a utilização das adições minerais não apresentou diferenças significativas em relação ao traço de concreto poroso padrão, entretanto, para todos os ensaios realizados os traços com sílica ativa e metacaulim obtiveram melhor resultado em relação ao traço padrão.
- Quanto aos ensaios destrutivos, pode-se analisar uma resistência maior nos traços em que houve a substituição do cimento por adições minerais comparadas ao traço padrão. Como dito anteriormente, a sílica ativa e o metacaulim são utilizados na construção civil como elementos para melhorar a qualidade e resistência a intempéries do concreto em diversas obras. Assim, quando utilizado no concreto poroso, essas adições permitem, mesmo com a diminuição da quantidade de cimento, que o mesmo não perca sua resistência pelo fato das adições demonstrarem um aumento das propriedades mecânicas, e também proporciona maiores resistências aos danos externos, corrosão, sulfato, uma vez que sua pasta se torna mais densa.
- Em relação a emissão de CO₂, é inversamente proporcional a quantidade de cimento no concreto. Favorecendo, assim, a utilização dos traços com substituição do cimento por sílica ativa e metacaulim pelo fato da menor quantidade de cimento na pasta.

De forma geral, os resultados apresentados nesse trabalho mostraram que a utilização de adições minerais em substituição ao cimento no concreto poroso permite melhorar suas propriedades físicas e mecânicas significativamente, possibilitando, a sua utilização em locais como calçadas e meio-fio que não necessitam de concretos com alta resistência além de ser um concreto mais sustentável, auxiliando na diminuição da emissão de CO₂ no ambiente, nas ilhas de calor e nas enchentes.

5.1. Sugestões para futuros estudos

Abaixo, pode-se verificar possíveis estudos a serem pesquisados:

- Realizar ensaios complementares estudando o comportamento das propriedades físicas e mecânicas do concreto poroso em idades maiores, como 63 dias.
- Estudar o comportamento do concreto poroso utilizando as adições minerais separadamente e analisar suas propriedades únicas.
- Analisar a influência das adições de sílica ativa e metacaulim em substituição em diferentes tipos de cimentos, em especial o CP IV.

6. Referências

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12821 - Preparação de concreto em laboratório - Procedimento.pdf. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 6–9, 2009.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13278 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.pdf. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 5–8, 2005.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13956-1 - sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta.pdf. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 6–10, 2012.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15894-1 - metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta.pdf. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 6–12, 2010.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16416 - Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos.pdf **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 8-31, 2015.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos.pdf. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 6–16, 2018.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16886 - Concreto - amostragem de concreto fresco.pdf. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 5–8, 2020.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16887 - Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico.pdf. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 7–24, 2020.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16889 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.pdf. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 5–9, 2020.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16915 - Agregados - Amostragem.pdf. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 5–12, 2021.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16917 - Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.pdf. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 5–10, 2021.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 17054 - Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio.pdf. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 5–9, 2022.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.pdf. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 5–13, 2015.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.pdf. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 5–13, 2018.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211 - Agregados para concreto - Requisitos.pdf. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 6–14, 2019.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7222 - Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.pdf. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 5–9, Rio de Janeiro, 2011.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.pdf **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 5–8, 2009.

ACI 522R-10, American Concrete Institute. **Report on Pervious Concrete**. Estados Unidos, Farmington Hills, p. 8, 2010.

ADVA, Superplastificantes. **Aditivos para Concreto**. 2004. Disponível em: https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/grace/adva_cast525.pdf. Acesso em: 25 out. 2022.

ADVA, Superplastificantes. **INFORMAÇÕES DO PRODUTO**. Disponível em: https://gcpat.com.br/sites/br.gcpat.com/files/2017-10/GCP00101_ADVA_0117_BR_DS.pdf. Acesso em: 25 out. 2022.

AGOPYAN, V.; SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C.; ANDRADE, A. C. **Alternativas para a redução de desperdício de materiais nos canteiros de obras**. São Paulo: PCC/EPUSP, v. 5, 1998.

AİTCIN, P. C. **Binders for Durable and Sustainable Concrete - Modern Concrete Technology 16**. Estados Unidos e Canadá: Taylor & Francis, 2008.

AMORIM, M. C. C. **Ilhas de calor urbano em cidades de pequeno e médio porte no Brasil e o contexto das mudanças climáticas**. OpenEdition Journals, 2020. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/31403>. Acesso em: 25 out. 2022.

ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. **AValiação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial**. Porto Alegre: RBRH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 5, 2000.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção 1**. 5ª Ed, Rio de Janeiro: LTC, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1994.

BORGES, P. H. R.; LOURENÇO, T. M. F.; FOUREAX, A. F. S.; PACHECO, L. S. **Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II)**. Porto Alegre: Revista Ambiente Construído, 2014.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F. **Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2008.

COSTA, B. L. C., **QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ GERADAS NA PRODUÇÃO DE MATERIAIS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL**. Rio de Janeiro: COPPE UFRJ, 2012.

COSTA, M. C. B.; SILVA, L. S.; NOGUEIRA, M. H. P.; LIMA, G. K. M. BATISTA. N. J. S. **Estudo da viabilidade técnica do uso de concreto permeável em pavimentos urbanos de baixo tráfego utilizando agregado graúdo regional**. Roraima: RCT - Revista de Ciência e Tecnologia, v. 5, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Balanço Mineral Brasileiro**. Brasília: 2001.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Estudo da influência do metacaulimHP como adição de alta eficiência em concretos de cimento portland**. 2003. Disponível em: <http://www.metacaulim.com.br/pdf/metacaulim-hp-usp.pdf>. Acesso em: 14 out. 2022.

FERGUSON, B. K., **Porous pavements - Integrative Studies In Water Management and Land Developmen**. Boca Raton: Taylor & Francis Group CRC Press, 577p, 2005.

FONSECA, G. C. **ADIÇÕES MINERAIS E AS DISPOSIÇÕES NORMATIVAS RELATIVAS À PRODUÇÃO DE CONCRETO NO BRASIL: UMA ABORDAGEM EPISTÊMICA**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia da UFMG, 2010.

GARCIA, H. B. **INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CELULOSE NANOFIBRILADA SOBRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE UM CONCRETO PERMEÁVEL**. São Paulo: Universidade São Judas Tadeu, 2021.

GUIMARÃES, J. **A sílica ativa e sua contribuição para a sustentabilidade**. 2018. Disponível em: https://www.tecnosil.com.br/wp-content/uploads/2018/05/Artigo_Sustentabilidade.pdf. Acesso em: 14 out. 2022.

HAIGH, J. et al. **CLIMATE CHANGE 2007 - SYNTHESIS REPORT**. Sweden: IPCC, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2008.

HOLTZ, F. C., **USO DE CONCRETO PERMEÁVEL NA DRENAGEM URBANA: ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E DO IMPACTO AMBIENTAL**. Porto Alegre, 2011.

LEE, M. G.; CHIU, T. C.; KAN, Y. C.; YEN, T. **Experimental Study of Pervious Concrete on Parking Lot**. Taiwan: Department of Construction Engineering. Chaoyang University of Technology, 2009.

LÓPEZ-CARRASQUILLO, V.; HWANG, S. **Comparative assessment of pervious concrete mixtures containing fly ash and nanomaterials for compressive strength, physical durability, permeability, water quality performance and production cost**. Construction and Building Materials, 2017.

MARTINS FILHO, S. T.; BOSQUESI, E. M.; FABRO, J. R.; PIERALISI, R. **Caracterização do concreto permeável com foco em ensaios não destrutivos**. São Paulo: Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 13, 2020.

MARTINS, R. O. G. **DESEMPENHO ESTRUTURAL E DURABILIDADE À CARBONATAÇÃO DE ALVENARIAS DE BLOCOS DE CONCRETO**. Minas Gerais, Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. **Concreto: microestrutura propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 3ª Ed, 2008.

METACAULIM, do Brasil. **Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos**. 2016. Disponível em: <https://http://www.metacaulim.com.br/pdf/fispq.pdf>. Acesso em: 14 out. 2022.

METACAULIM, do Brasil. **METACAULIM HP ULTRA**. Disponível em: <http://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>. Acesso em: 14 out. 2022.

METACAULIM, do Brasil. **OBRAS E APLICAÇÕES**. Disponível em: <http://www.metacaulim.com.br/obras-metacaulim-do-brasil.html>. Acesso em: 14 out. 2022.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **ESTIMATIVAS ANUAIS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL**. Brasília: 6ª Ed, 2022

MONTEIRO, A. C. N. **CONCRETO POROSO: DOSAGEM E DESEMPENHO**. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2010.

OLIVEIRA, R. C. de. **Medidas não estruturais na prevenção e controle de enchentes em áreas urbanas, como subsídios para o planejamento de uso e ocupação do solo: estudo de caso: bacia do córrego do Gregório – São Carlos (SP)**. São Paulo, São Carlos: EESC-USP, Escola de Engenharia de São Carlos, 1998

PIERALISI, R. **Characterization and modelling of pervious concrete**. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2016.

RAMOS, G. M. **ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL COM ADIÇÃO DE AGREGADO MIÚDO E RESÍDUO (CINZA DE MADEIRA)**. Joinville:Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, 2018.

SABESP, São Paulo. **Qualidade da Água Distribuída por Sistema de Abastecimento**. 2022. Disponível em: https://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/relatorios_qualidade_agua/Inf_Qualidade_quant_julho_22.pdf. Acesso em: 14 out. 2022.

SABESP, São Paulo. **Qualidade da água tratada**. Disponível em: <https://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=40>. Acesso em: 14 out. 2022.

SEIDENSTUCKER, M. S. et al. **ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO DA ADIÇÃO DA SÍLICA ATIVA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS**. Tocantins, Palmas: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, 2019.

SUZUKI, C. Y.; AZEVEDO, A. M.; KABBACH JÚNIOR, F. I. **Drenagem subsuperficial de pavimentos: conceitos e dimensionamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

TECNOSIL, CONCRETO PERMEÁVEL: **O QUE É E QUAIS SEUS GRANDES ATRATIVOS?**. 2018. Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/concreto-permeavel-o-que-e-e-quais-seus-grandes-atrativos/>. Acesso em: 21 out. 2022.

TECNOSIL, Soluções Especiais. **sílica Ativa**. 2022. Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa/>. Acesso em: 21 out. 2022.

TECNOSIL, Soluções Especiais. **SÍLICA ATIVA: POR QUE USÁ LA NA CONSTRUÇÃO**. 2022. Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa-por-que-usa-la-na-sua-construcao-2/>. Acesso em: 21 out. 2022.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious concrete pavements**. Estados Unidos: Portland Cement Association e National Ready Concrete Association, 2004.

TUCCI, C. E. M. **COEFICIENTE DE ESCOAMENTO E VAZÃO MÁXIMA DE BACIAS URBANAS**. Porto Alegre: RBRH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 5, 2000.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Rio Grande do Sul: Instituto de Pesquisas Hidráulicas Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

VÉLEZ, L. **Permeabilidad y porosidad en Concreto**. Colômbia, Medellín: Instituto Tecnológico Metropolitano, Tecno Lógicas núm. 25, 2010.

VOTORANTIM, Cimentos. **Boletim de Ensaios de Cimento - CPII-F-32 Todas as Obras.pdf**. São Paulo, Salto de Pirapora, 2022.