

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JUAN ROGER BERVIAN SEGER

**ANÁLISE DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COM ADIÇÕES
DE SÍLICA ATIVA E METACAULIM**

TOLEDO-PR

2022

JUAN ROGER BERVIAN SEGER

**ANÁLISE DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COM ADIÇÕES
DE SÍLICA ATIVA E METACAULIM**

**ANALYSIS OF CHLORIDE PENETRATION IN CONCRETE WITH SILICA FUME
AND METAKAOLIN ADDITIONS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Lucia Bressiani.

Coorientadora: Tassiane Apolinário de Oliveira.

TOLEDO-PR

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JUAN ROGER BERVIAN SEGER

**ANÁLISE DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COM ADIÇÕES
DE SÍLICA ATIVA E METACAULIM**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 24/novembro/2022

Prof. Gustavo Savaris
Doutor em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Prof. Fernando Nunes Cavalheiro
Mestre em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Prof. Lucia Bressiani (Orientadora)
Doutora em Engenharia Civil
Universidade Federal do Paraná - UFPR

TOLEDO-PR

2022

Dedico este trabalho à minha mãe e meu pai, pelo
apoio em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a meus pais, que deram a oportunidade e condições para dedicar minha vida aos estudos.

Agradeço as minhas orientadoras, Prof. Me. Tassiane Apolinário de Oliveira e Prof. Dr. Lucia Bressiani pela partilha dos conhecimentos que me guiaram neste trabalho.

Agradeço à minha namorada, Bárbara, pelo apoio e carinho em todos os momentos.

Agradeço ao professor Dr. Carlos Balestra, pelo empréstimo de material e partilha de conhecimentos. Aos professores Dr. Gustavo Savaris e Me. Fernando Cavalheiro, pelos apontamentos que enriqueceram esta pesquisa. Ao professor Dr. Ricardo Schneider, pelo auxílio na coleta de dados.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia Civil da UTFPR campus Toledo, pela dedicação na docência.

Agradeço aos meus amigos que me acompanharam nesta jornada.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma me ajudaram nestes anos de graduação.

RESUMO

Estruturas em concreto armado são suscetíveis a ação de agentes deletérios, principalmente se localizadas em ambientes agressivos. Regiões costeiras possuem elevadas concentrações de íons cloreto (Cl^-), composto que inicia a deterioração das armaduras por meio da corrosão. A penetração destes íons através do concreto se dá por difusão, desse modo, concretos com elevada permeabilidade facilitam a entrada do agente deletério e, conseqüentemente, aceleram a deterioração das armaduras. Objetivando proteger a estrutura do ataque de íons cloreto, este trabalho utilizou adições pozolânicas (sílica ativa e metacaulim) para reduzir a permeabilidade do concreto. Três proporções foram analisadas, 5/5, 3/7 e 7/3 (nomeadas S5M5, S3M7 e S7M3, respectivamente), em percentual das adições em relação a massa de cimento, totalizando 10% de adição de material pozolânico. A aferição da penetração de cloretos foi feita de acordo com os métodos ASTM C1202/19 e NT BUILD 492/99. Foi utilizado o ensaio de difratometria de raios X (DRX) para comprovar a inexistência de compostos com cloro nos corpos de prova de concreto antes da realização dos ensaios de penetração. O ensaio de resistência a compressão axial, normatizado pela ABNT NBR 5739/18, avaliou o comportamento mecânico dos traços confeccionados. A fim de analisar a trabalhabilidade do concreto em estado fresco, o ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*, ABNT NM 67/98) foi executado. Os resultados obtidos mostraram ganhos no desempenho do concreto quanto a resistência à compressão e penetração de cloretos, mas perdas na trabalhabilidade, em comparação a um traço de referência (sem adições). O melhor desempenho foi verificado no traço S7M3, apresentando bons resultados em termos de resistência à compressão e excelentes na penetração de cloretos.

Palavras-chave: Concreto; Patologia; Degradação; Cloretos; Adições minerais.

ABSTRACT

Reinforced concrete structures are susceptible to deleterious agents, especially if located in aggressive environments. Coastal regions have high concentrations of chloride ions (Cl^-), a compound that initiates steel deterioration through corrosion. The ion penetration through the concrete occurs by diffusion, thus, concrete with high permeability facilitate the deleterious agent entry and, consequently, accelerate steel deterioration. Aiming structure protection from chloride ions attack, this work used pozzolanic additions (silica fume and metakaolin) to reduce concrete permeability. Three proportions were analyzed, 5/5, 3/7 and 7/3 (named S5M5, S3M7 and S7M3, respectively), in percentage of additions in relation to cement mass, totaling 10% of addition. The measurement of chloride penetration was performed according to ASTM C1202/19 and NT BUILD 492/99 methods. The X-ray diffraction test (XRD) was used to prove chloride compounds absence in concrete specimens before carrying out penetration tests. The axial compressive strength test, standardized by ABNT NBR 5739/18, evaluated the mechanical behavior of the mixtures. In order to analyze the concrete workability, the slump test (ABNT NM 67/98) was performed. The obtained results showed gains in concrete performance in terms of compressive strength and chloride penetration, but losses in workability, compared to a reference mix (without additions). The best performance was seen in the S7M3 mix, showing good results in terms of compressive strength and excellent in chloride penetration.

Keywords: Concrete; Pathology; Degradation; Chloride; Mineral additions.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Justificativa	10
1.2	Objetivos	11
1.2.1	Objetivo geral	11
1.2.2	Objetivos específicos.....	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	Manifestações patológicas em concreto armado	12
2.1.1	Despassivação por íons cloreto.....	13
2.1.2	Transporte de cloretos através do concreto	14
2.2	Adições minerais	16
2.2.1	Dosagem da sílica ativa	17
2.2.2	Dosagem do metacaulim.....	17
2.3	Relação água/cimento e superplastificantes	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1	Materiais utilizados	20
3.2	Caracterização dos agregados	21
3.3	Preparação dos traços de concreto	21
3.4	Ensaio de trabalhabilidade e resistência	23
3.4.1	Ensaio de abatimento de tronco de cone (<i>slump test</i>).....	23
3.4.2	Ensaio de resistência à compressão axial.....	23
3.5	Difratometria de raios X (DRX)	25
3.6	Ensaio de penetração de cloretos	26
3.6.1	Adaptações	26
3.6.2	Ensaio de penetração acelerada (ASTM C1202/19)	26
3.6.3	Ensaio colorimétrico (NT BUILD 492/99).....	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	Caracterização dos agregados	34
4.2	Ensaio de trabalhabilidade e resistência	35
4.3	Difratometria de raios X (DRX)	37
4.4	Ensaio de penetração de cloretos	38
5	CONCLUSÕES	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Edificações em concreto armado são estruturas suscetíveis à ação de agentes agressores. Quando não devidamente protegidas, os danos causados por estes podem comprometer severamente a vida útil da edificação.

Dentre os diversos danos causados por diferentes agentes deletérios, encontra-se a corrosão das armaduras, deterioração esta gerada, principalmente, pela carbonatação e a penetração de íons cloreto (Cl^-) através do concreto (ABNT, 2014; SALES et al., 2018).

Segundo Tuuti (1982), a corrosão pela ação de cloretos se dá de forma localizada, denominada *pitting* (corrosão por pites). Este tipo de dano concentrado pode levar a severa redução da seção transversal das armaduras.

Sales et al. (2018) explicitam o mecanismo de difusão como principal meio de transporte de cloretos através do concreto. Este mecanismo baseia-se nas Leis de Fick de difusão. Estas demonstram que o fluxo e a concentração de cloretos em determinada profundidade são dependentes do tempo, do coeficiente de difusividade do concreto e da concentração superficial de cloretos.

A análise de parâmetros que reduzem a penetração de cloretos no concreto, tais como a permeabilidade do mesmo, é um dos caminhos para encontrar possíveis soluções que sejam benéficas para a proteção de estruturas (HELENE, 1993).

Hoffmann (2001) e Figueiredo et al. (2014) analisam concretos com adições minerais objetivando a redução na penetração de cloretos. Os autores mostram que adições pozolânicas (sílica ativa e metacaulim, respectivamente) quando adicionadas ao concreto agregam propriedades de resistência à penetração de cloretos.

O presente trabalho contribui para o estudo de estruturas resistentes à penetração de cloretos pela confecção de um concreto com duas adições (sílica ativa e metacaulim) e avaliação da profundidade atingida por cloretos pelos métodos C1202 (ASTM, 2019) e NT BUILD 492 (NORDTEST METHOD, 1999), comparando os resultados obtidos entre os traços com e sem adições.

1.1 Justificativa

Este trabalho é fruto da necessidade crescente de materiais mais eficientes e duráveis na Engenharia Civil. Meira e Padaratz (2002) demonstraram por meio de um estudo de caso que o gasto com serviços de recuperação de estruturas deterioradas pode atingir mais de 10% do valor de execução da estrutura de uma edificação. Se comparado ao valor total da obra, esse gasto pode variar entre 2% e 5% por intervenção. Os autores ressaltam ainda que no período de vida útil de uma estrutura podem ser necessárias várias intervenções, fazendo com que o gasto com recuperações atinja proporções ainda maiores em relação ao custo de execução da obra.

Devido aos problemas econômicos e executivos relacionados a recuperação de estruturas, diversos autores vêm estudando materiais que previnam ou atrasem o processo de deterioração de estruturas de concreto armado.

Dentre as pesquisas na área de deterioração das armaduras por corrosão iniciada por íons cloreto, é comum a utilização de uma adição mineral no concreto a fim de prolongar a vida útil da estrutura, como feito por Hoffmann (2001) com a sílica ativa, por Figueiredo et al. (2014) com o metacaulim e Fedumenti (2013) com a cinza de casca de arroz. Todos os autores encontram resultados favoráveis quanto a resistência à penetração de cloretos, mostrando que estas adições minerais são promissoras no desenvolvimento de materiais de maior longevidade.

Dados os resultados positivos obtidos pelos autores, esta pesquisa surge como uma tentativa de melhorar ainda mais as propriedades do concreto por meio do emprego de duas adições (sílica ativa e metacaulim) simultaneamente.

1.2 Objetivos

As metas desta pesquisa dividem-se entre objetivo geral e objetivos específicos, necessários para atingir o objetivo geral.

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a resistência a penetração de cloretos em corpos de prova de concreto com adições de sílica ativa e metacaulim.

1.2.2 Objetivos específicos

Caracterizar as propriedades dos materiais utilizados no procedimento experimental;

Confeccionar os corpos de prova de concreto de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015), nos traços 1:0,5:2:1,5 (cimento:água:brita:areia) com adições de sílica ativa e metacaulim, nas proporções de 0/0, 5/5, 3/7 e 7/3, respectivamente, em percentual sobre a massa de cimento.

Avaliar a consistência das misturas de concreto por meio do teste de abatimento de tronco de cone (*slump test*), de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998);

Comparar o comportamento mecânico dos concretos por meio do ensaio de resistência a compressão axial de corpos de prova de concreto contendo sílica ativa e metacaulim aos 28 dias com corpos de prova sem adição, seguindo a e NBR 5739/18;

Avaliar a penetração de cloretos nos traços de concreto confeccionados, utilizando os métodos C1202 (ASTM, 2019) e NT BUILD 492 (NORDTEST METHOD, 1999).

Comparar os resultados obtidos nos ensaios de penetração de cloretos entre os concretos com sílica ativa e metacaulim e concretos sem adições e analisar a viabilidade da aplicação destas adições.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manifestações patológicas em concreto armado

O estudo de manifestações patológicas é uma área da engenharia que tem como objetivo observar os sintomas que construções com problemas apresentam, de modo a diagnosticar suas causas, origens e buscar métodos para tratá-las (HELENE, 1992).

Manifestações patológicas em estruturas de concreto armado implicam na deterioração do material e redução da vida útil da edificação. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), entende-se como vida útil “o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto”.

A velocidade da progressão da degradação de uma estrutura de concreto armado é função do meio na qual está inserida. Meios mais agressivos devem ter medidas prévias de proteção mais rigorosas. Objetivando a durabilidade das estruturas, a NBR 6118 (ABNT, 2014) faz exigências mínimas de cobrimento, relação água/cimento e classe de concreto em função da classe de agressividade ambiental (Tabela 1) do meio no qual a estrutura se encontra.

Tabela 1 - Classe de agressividade Ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha Industrial	Grande
IV	Muito forte	Industrial Respingos de maré	Elevado

Fonte: adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014)

Helene (1993) aborda os ambientes de modo semelhante a NBR 6118 (ABNT, 2014). O autor os classifica em atmosferas, dividindo-as em rural, urbana, marinha, industrial e viciada, na ordem da mais branda à mais agressiva.

A presença de íons cloreto (Cl^-) é mais acentuada na atmosfera marinha, caracterizada pelas regiões próximas ao mar. Este agente é extremamente danoso às

estruturas de concreto armado, dada sua capacidade corrosiva mesmo em pequenas concentrações (HELENE, 1993).

Bertolini (2010) atrela a facilidade de penetração de íons no concreto à porosidade do mesmo. O autor explica que quanto mais porosa e saturada a microestrutura do concreto, maior a facilidade de difusão de íons.

Outro fator que contribui diretamente na degradação da estrutura é a má execução da mesma. A falta de cuidado no processo construtivo pode gerar fissuras nos primeiros dias após a retirada das fôrmas, levando a degradação precoce do concreto armado (BERTOLINI, 2010).

Quanto aos métodos de corrosão das armaduras, a NBR 6118 (ABNT, 2014) define dois mecanismos de deterioração: as despasseações por carbonatação ou por ação de cloretos. Para o segundo, precursor deste trabalho, a norma indica a adoção de medidas que dificultem o ingresso de cloretos no concreto, como a utilização de um concreto com pequena porosidade e cimentos com adições pozolânicas.

2.1.1 Despasseação por íons cloreto

O ferro, principal componente do aço, quando em estado metálico, possui um nível de energia maior do que sua versão encontrada na natureza (na forma de óxidos ou hidróxidos). Desse modo, o material reagirá com o meio ambiente em busca de atingir seu estado de menor energia, formando, principalmente, o Fe_2O_3 , a ferrugem, um composto volumoso que pode levar ao desprendimento do cobrimento de concreto (SALES et al., 2018).

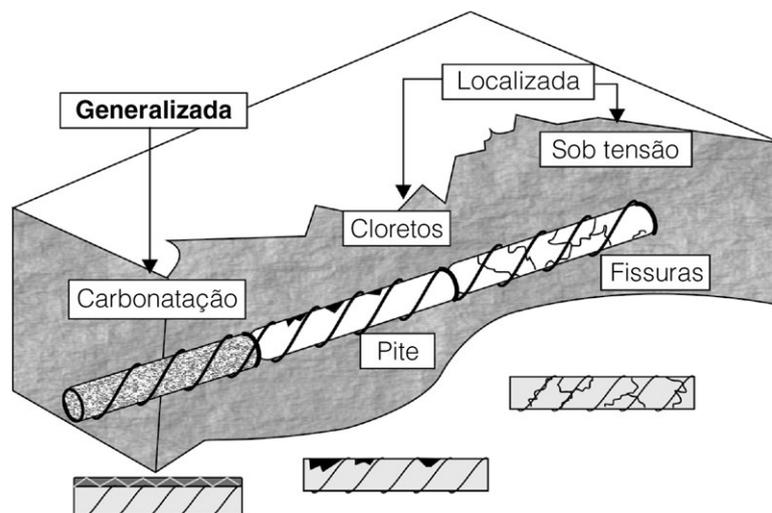
A corrosão ocorre de maneira espontânea. Entretanto, pode ser formado, em torno da armadura, um filme superficial compacto e aderente que irá amenizar o processo corrosivo (SALES et al., 2018). Segundo Bertolini (2010), este filme pode ser formado pela separação dos produtos de corrosão ou pelo processo anódico (no caso de aços inoxidáveis e ligas de alumínio).

Os produtos formados dependem do pH do meio corrosivo. O ambiente que envolve as armaduras, em condições ideais, é altamente alcalino, com pH entre 13 e 14 (TUUTI, 1982). Desse modo, o produto formado será o Fe_3O_4 (óxido de ferro), um composto compacto e aderente que fornece resistência a corrosão. Todavia, em

condições de pH reduzido, o Fe_3O_4 deixa de ser estável e é formado o $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (ferrugem), que não possui propriedades passivantes (SALES et al., 2018).

A penetração de íons cloreto se faz problemática por sua interação com o filme passivante, fazendo com que este deixe de proteger as armaduras da corrosão mesmo em meio alcalino. São nos defeitos/heterogeneidades do filme que os cloretos atuam, de modo a despassar as armaduras em pontos isolados (SALES et al., 2018). Esta ação localizada é conhecida como corrosão por pites (BERTOLINI, 2010). Neste mecanismo de corrosão a redução da seção transversal das armaduras não ocorre de maneira uniforme ao longo de seu comprimento, mas de maneira pontual, como demonstrado na Figura 1. Segundo Tuuti (1982), a profundidade atingida pela corrosão por pites é entre 4 e 10 vezes maior que as profundidades atingidas por outros mecanismos de corrosão. Bertolini (2010) explica que a corrosão por pites pode começar quando a concentração de cloretos na superfície do metal atinge um patamar crítico, de modo que o filme passivante seja rompido. Fatores como a diminuição da temperatura, aumento do pH e tempo de contato prolongado também aumentam a probabilidade da ativação da corrosão por pites.

Figura 1 - Mecanismos de corrosão



Fonte: Sales et al. (2018)

2.1.2 Transporte de cloretos através do concreto

A penetração de cloretos através do concreto ocorre por difusão, um mecanismo de transporte de massa que depende diretamente da microestrutura (poros, fissuras) do material penetrado (SALES et al., 2018).

Segundo Bertolini (2010), a difusão é um processo que ocorre pela diferença de concentração de um composto dentro de um meio. O fluxo pode ser constante (definido pela primeira lei de Fick) ou variável em relação ao tempo e a profundidade de penetração (definido pela segunda lei de Fick).

O modelo matemático para fluxo variável demonstra-se mais condizente com a realidade (HOFFMANN, 2001), sendo este definido pela expressão 1:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

Uma das soluções para a equação 1 é:

$$\frac{C - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ef} \cdot t}}\right) \quad (2)$$

Onde:

- C concentração (g/cm³)
- C₀ concentração inicial (g/cm³)
- C_s concentração superficial (g/cm³)
- D_{ef} coeficiente de difusão efetivo (cm²/s)
- erf função de erro de Gauss
- t tempo (s)
- x profundidade penetrada (cm)

Para fluxo constante, também conhecido como fluxo estacionário, temos a expressão 3:

$$q_m = -D_{ef} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3)$$

Para determinação do coeficiente de difusão efetivo à fluxo constante, Helene e Guimarães (2001) obtiveram a expressão 4 a partir de 3:

$$D_{ef} = \frac{q_m \cdot x}{C_s - C_2} \quad (4)$$

Onde:

- C₂ concentração na última camada do corpo de prova (g/cm³)
- C_s concentração superficial (g/cm³)
- D_{ef} coeficiente de difusão efetivo (cm²/s)
- q_m fluxo de íons cloreto (g/cm².s)
- t tempo (s)
- x profundidade penetrada (cm)

Dessa maneira, temos que o fluxo do agente deletério através do concreto é função do coeficiente de difusão do concreto. Este, por sua vez, depende de muitas variáveis, entre elas a porosidade, relação água/aglomerante, teor de cimento, composição química do cimento, umidade e grau de saturação da pasta de cimento (HELENE, 1993).

Nas últimas décadas, várias pesquisas vêm sendo divulgadas na área de durabilidade de estruturas de concreto. Trabalhos como os de Figueiredo et al. (2014) e Hoffmann (2001) mostram que as adições pozolânicas de metacaulim e sílica ativa são promissoras quanto a finalidade de proteção das armaduras ao ataque de íons cloreto.

2.2 Adições minerais

Adições minerais são compostos incorporados ao concreto visando ganhos de resistência e durabilidade. Dentre as principais adições disponíveis estão a sílica ativa e o metacaulim, devido a suas propriedades pozolânicas.

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015), materiais pozolânicos são aqueles que possuem a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água e formar um material com propriedades ligantes. Estes materiais são os compostos siliciosos ou silicoaluminosos.

A sílica ativa é um subproduto da fabricação do silício metálico ou de ligas de ferrosilício. É formada pela oxidação e condensação de SiO (monóxido de silício) que gera como subproduto o SiO₂ (dióxido de sílica amorfo), um composto de partículas vítreas esféricas de diâmetro extremamente pequeno. Sua adição ao concreto gera um melhor preenchimento dos vazios e a densificação da zona de transição entre pasta de cimento e agregado (SALES et al., 2018).

O metacaulim é um material aluminossilicioso obtido pela calcinação de argilas cauliníticas. Possui partículas pequenas e lamelares, característica que confere ao material uma alta superfície específica. Assim como a sílica ativa, o metacaulim confere propriedades de durabilidade quando adicionado ao concreto (SALES et al., 2018).

O emprego destas adições objetiva a redução da permeabilidade do concreto. Encontrar uma proporção ideal entre sílica ativa e metacaulim em relação a massa de

cimento que atenda este objetivo é um grande passo para o estudo de durabilidade de estruturas.

2.2.1 Dosagem da sílica ativa

Isaia e Helene (1995) explicam que concretos com adições pozolânicas apresentam melhor refinamento dos poros e grãos dos produtos de hidratação, de modo que a porosidade seja reduzida em virtude do incremento da tortuosidade e do tamponamento dos capilares.

Pereira et al. (2013) demonstram experimentalmente que a adição de sílica ativa contribui para a redução do processo de deterioração das armaduras. Assim como Isaia e Helene (1995) e Hoffmann (2001), o autor atribui tal comportamento às propriedades pozolânicas da adição. Entretanto, a adição de sílica ativa deixa de influenciar na proteção do concreto quando são utilizadas relações água/cimento maiores ou iguais a 0,60. Pereira et al. (2013) notam um grande ganho na proteção contra a penetração de cloretos em concretos com sílica ativa e relação água/cimento de 0,40 em comparação a concretos sem sílica ativa e mesma relação água/cimento.

Fornasier (1995) conclui que a adição de sílica ativa é o principal fator na diminuição da migração de cloretos através do concreto. Entretanto, valores elevados desta adição (superiores a 20% em relação a massa de cimento) podem gerar um aumento excessivo da coesão do concreto, prejudicando a homogeneidade e o adensamento. O autor recomenda valores de sílica ativa de 10% da massa de cimento com relação água/cimento de 0,28 para garantir baixa permeabilidade e valores de 20% de sílica ativa e relação água cimento 0,37 para baixa migração de cloretos.

2.2.2 Dosagem do metacaulim

Semelhante à sílica ativa, o metacaulim possui atividade pozolânica, reagindo, durante a hidratação, com o Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio), formando silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Esta reação é consideravelmente acelerada devido à alta superfície específica do metacaulim, decorrente do tamanho pequeno de seus grãos. Além disso, a finura do material melhor acomoda a microestrutura do concreto, fato que garante refinamento na porosidade do mesmo (FIGUEIREDO et al., 2014).

Li e Ding (2003) concluíram que adições de 10% de metacaulim em relação a massa de cimento (juntamente com adições de 20% a 30% de escória ultrafina) melhoraram as propriedades de plasticidade e resistência à compressão. Kim, Lee e Moon (2007) verificaram que adições de metacaulim entre 10% e 15% da massa de cimento não apresentam diferenças significantes em relação as propriedades físicas do concreto. Entretanto, substituindo 20% da massa de cimento pela adição, verifica-se a redução da resistência à compressão do concreto. Dados os resultados, temos que o teor ideal de substituição da massa de cimento por metacaulim é em torno de 10%.

2.3 Relação água/cimento e superplastificantes

A relação água/cimento é o fator mais importante na porosidade do concreto (FORNASIER, 1995; PEREIRA et al., 2013). A redução da água de amassamento faz com que os cristais dos produtos de hidratação tenham menor tamanho, canais capilares se formem em menor quantidade e a porosidade reduza, tornando a microestrutura do material mais densa, principalmente na zona de transição pasta/agregado (FORNASIER, 1995). Hoffmann (2001) demonstra que reduções na relação água/cimento gera decréscimos de até 90% na penetração de cloretos.

Entretanto, apesar de ser um fator de grande contribuição para a durabilidade do concreto, a relação água/cimento deve ter um valor ótimo, visto que valores excessivamente baixos geram problemas quanto a trabalhabilidade do material e, conseqüentemente, perdas na resistência à compressão. Hoffmann (2001) verificou que valores de água/cimento entre 0,28 e 0,45 retardam significativamente o início da corrosão, corroborando com os valores analisados por Pereira et al. (2013), demonstrados no tópico 3.1.

Para manter valores baixos de água de amassamento, é comum a utilização de aditivos superplastificantes para melhorar a trabalhabilidade do concreto. Adições de superplastificantes quebram a tensão superficial da água, melhorando a distribuição das partículas de cimento que atraem água (MEHTA e AITCIN, 1990), de modo a garantir um comportamento plástico mesmo em concretos secos.

A C494 (ASTM, 2019) normatiza os aditivos superplastificantes de acordo com sua finalidade, dividindo-os em categorias. As categorias D, E, F e G englobam

os aditivos redutores de água. As mais comumente empregadas são as categorias F e G, que são divididas em quatro subcategorias (RAABE, 1991; FORNASIER, 1995):

A) Tipo M (Condensados de formaldeídos melamina sulfonado): atuam lubrificando as partículas de cimento. Segundo Raabe, estes aditivos não causam excessiva incorporação de ar por não provocarem significativa redução na tensão.

B) Tipo N (Condensados de formaldeído naftaleno sulfonados): geram maiores abatimentos no *slump test* em comparação ao tipo L, devido a redução da tensão superficial da água. Entretanto, em dosagens elevadas, este aditivo provoca a incorporação de ar ao concreto (RAABE, 1991);

C) Tipo L (lignosulfonados): as partículas são repelidas por cargas elétricas produzidas em sua superfície;

D) Outros: outros aditivos a base de ácidos, ésteres sulfônicos e ésteres carboidratos.

As subcategorias A e B são as mais empregadas mundialmente, por possibilitarem maior redução na relação água/aglomerante com menores efeitos colaterais (RAABE, 1991).

Barboza e Filho (2015) avaliam diferentes teores de superplastificante no cimento CP V-ARI. Os autores utilizaram o aditivo *Adiment Super MC* e verificaram que para dosagens baixas (0,4% a 1,2% da massa de cimento) ocorrem maiores alterações no ensaio de espalhamento do concreto. Em dosagens maiores (acima de 1,2%), o espalhamento do concreto passa a ter variações pequenas.

Conclui-se, a partir das observações dos autores, que as dosagens ideais de aditivo para garantir boa trabalhabilidade são inferiores a 1,2% da massa de cimento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados

Para confecção das misturas de concreto foram utilizados: cimento CP V–ARI RS (marca: VOTORAN), devido a predominância de CP V-ARI no comércio da região oeste do Paraná; agregado miúdo (areia) natural, oriundo do Rio Paraná, na região de Guaíra/PR, seco em estufa; agregado graúdo (brita) de origem basáltica, oriundo da pedreira municipal de Toledo/PR, seco em estufa; água do abastecimento público (SANEPAR); adições minerais de sílica ativa, da marca Tecnosil (propriedades físico-químicas demonstradas na Tabela 2) e metacaulim, modelo Metacaulim HP Ultra, da marca Metacaulim do Brasil (propriedades físico químicas demonstradas na Tabela 3); aditivo superplastificante Adiment Super MC, escolhido em virtude de sua eficiência, observada em experimentos realizados na UTFPR campus Toledo.

Para os ensaios de penetração de cloretos foram utilizados: soda cáustica, da marca Indaiá; sal marinho, da marca Apolo; nitrato de prata (AgNO_3), solução de 0,1M.

Tabela 2 – Propriedades físico-químicas da sílica ativa

Massa específica	2220kg/m ³
Teor de SiO ₂	>90%
Superfície específica (B.E.T)	19000m ² /kg
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio da partícula	0,2µm
Massa unitária densificada	>350kg/m ³
Massa unitária não densificada	<350kg/m ³

Fonte: adaptado de Tecnosil (2022)

Tabela 3 – Propriedades físico-químicas do metacaulim HP Ultra

Massa específica	2560kg/m ³
Teor de SiO ₂	57%
Teor de Al ₂ O ₃	34%
Umidade	0,50%
Desempenho com cimento (7 dias)	115%
Atividade pozolânica Chapelle	800mg Ca(OH) ₂ /g
Superfície específica (BET)	23000m ² /kg

Fonte: adaptado de Metacaulim do Brasil (2022)

A sílica ativa e o metacaulim estão em conformidade com as normativas NBR 13956-1 (ABNT, 2012) e NBR 15894-1 (ABNT, 2010), respectivamente.

3.2 Caracterização dos agregados

Para ambos agregados, foram realizados os ensaios de granulometria, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), massa unitária, de acordo com a NBR 16972 (ABNT, 2021) e teor e material pulverulento, de acordo com a NBR 16973 (ABNT, 2021).

3.3 Preparação dos traços de concreto

O concreto foi preparado utilizando betoneira, nas proporções definidas na Tabela 4. A brita foi o primeiro material adicionado, em sequência a areia, cimento e adições minerais. A água foi despejada e a betoneira foi ligada por 1 minuto. Após isto, o superplastificante foi adicionado e a mistura seguiu por mais 4 minutos, garantindo a homogeneidade do concreto.

Tabela 4 – Traços do concreto

Material	REF	S5M5	S7M3	S3M7
Água	0,50	0,50	0,50	0,50
Brita	2,00	2,00	2,00	2,00
Areia	1,50	1,50	1,50	1,50
Sílica Ativa	-	0,05	0,07	0,03
Metacaulim	-	0,05	0,03	0,07

Proporções em relação a 1 unidade de massa de cimento

Fonte: autoral (2022)

As proporções de agregados foram determinadas a partir do método IPT/EPUSP (apud TOLEDO et al., 2020). A dosagem das adições minerais totaliza 10% de adição pozolânica, corroborando pesquisas prévias (FORNASIER, 1995; HOFFMANN, 2001; LEE E DING, 2003; KIM, LEE E MOON, 2007; FIGUEIREDO et al., 2014). A dosagem do superplastificante foi feita em função da consistência necessária para moldagem dos corpos de prova. Traços teste mostraram boa trabalhabilidade já com 0,5% de adição de superplastificante (em relação a massa de cimento), fazendo com que este teor fosse adotado nos traços definitivos.

Em estado fresco, o concreto foi coletado para análise do abatimento e moldagem dos corpos de prova. Os mesmos permaneceram por 24h nos moldes para então, depois de endurecidos, serem imersos em tanque de cura por 28 dias à

temperatura média de 22°C. O procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos segue o disposto pela NBR 5738 (ABNT, 2015).

Foram confeccionados, no total, 24 corpos de prova (CP) cilíndricos de 100mm de diâmetro e 200mm de altura (Figura 2). Para cada traço, 3 CP foram rompidos no ensaio de compressão axial e 5 CP foram fatiados, totalizando 20 CP de 100mm de diâmetro e 50mm de altura (Figura 3).

Figura 2 – Confeção dos corpos de prova 100x200mm



Fonte: autoral (2022)

Figura 3 – Corpos de prova 100x50mm



Fonte: autoral (2022)

Estes 20 CP (por traço) com novas dimensões foram utilizados nos ensaios de penetração de cloretos, normatizados pela C1202 (ASTM, 2019) e NT BUILD 492 (NORDTEST METHOD, 1999).

3.4 Ensaios de trabalhabilidade e resistência

3.4.1 Ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*)

O procedimento para determinação do abatimento de tronco de cone (*slump test*) do concreto em estado fresco seguiu o disposto pela NBR NM 67 (ABNT, 1998).

O molde (cone) possui 200mm de diâmetro na base inferior e 100mm na base superior, com altura de 300mm. A haste de adensamento tem pontas arredondadas, 600mm de comprimento e 16mm de diâmetro. O apoio para o molde é uma placa retangular, metálica e plana, com dimensão não inferior a 500mm e espessura maior ou igual a 3mm.

O molde foi umedecido para então ser preenchido. O preenchimento se deu em camadas, cada uma com aproximadamente 1/3 da altura do molde. Após despejar cada camada, a mesma foi adensada pela aplicação de 25 golpes uniformemente distribuídos com o auxílio da haste de adensamento.

A retirada do molde foi constante e vertical, evitando aplicar esforços laterais no concreto.

A medição do abatimento foi feita imediatamente após a retirada do molde. Esta é dada em milímetros, aferida com régua metálica, de acordo com a Figura 4.

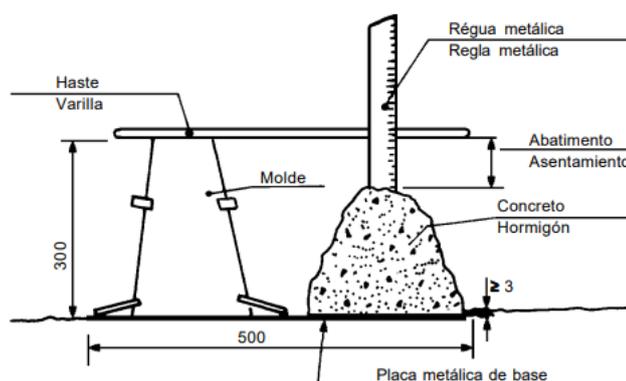


Figura 4 - Medida do abatimento

Fonte: NBR NM 67 (ABNT, 1998)

3.4.2 Ensaio de resistência à compressão axial

O procedimento para determinação da resistência a compressão axial seguiu o disposto pela NBR 5739 (ABNT, 2018).

A máquina utilizada para o ensaio foi uma prensa de compressão da marca EMIC, em conformidade com os padrões estabelecidos pela ABNT NBR ISO 7500-1.

Os corpos de prova foram rompidos após 28 dias de cura, com tolerância de, no máximo, 24h. Os mesmos tiveram suas superfícies devidamente planificadas em retífica e limpas antes do início do ensaio.

O procedimento consiste na inserção do corpo de prova cilíndrico entre os pratos de compressão da máquina, de modo que fique perfeitamente centralizado (Figura 5). Os pratos são feitos de aço e suas superfícies possuem menor dimensão 4% maior que o diâmetro do corpo de prova.

Figura 5 – Ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: autoral (2022)

O carregamento foi aplicado de maneira contínua, com velocidade de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s até a ruptura do corpo de prova.

A resistência a compressão do corpo de prova é dada pela equação 5:

$$f_c = \frac{4F}{\pi * D^2} \quad (5)$$

Onde:

- f_c resistência à compressão (MPa)
- F força axial aplicada (N)
- D diâmetro do corpo de prova (mm)

3.5 Difractometria de raios X (DRX)

Em virtude desta pesquisa analisar o transporte de cloretos de fonte exógena através do concreto, é interessante comprovar que as misturas de concreto (depois de confeccionadas) não possuem cloretos em sua composição. Para tal, o método de difratometria de raios X foi utilizado para verificar os componentes do concreto e descartar a hipótese da existência de cloretos endógenos.

A leitura no ensaio de difratometria de raios X é feita sobre amostras em pó. Para obtenção destas, os corpos de prova de concreto foram perfurados com auxílio de uma broca diamantada. O pó resultante deste processo foi coletado (Figura 6) e armazenado para dar seguimento ao ensaio.

Figura 6 – Amostras em pó dos corpos de prova de concreto



Fonte: autoral (2022)

As amostras em pó foram atingidas por raios X em um difratômetro SmartLab SE da marca Rigaku, operando na geometria BB e variando a angulação da incidência de 10° a 80°. O aparelho leu a intensidade da difração a cada 0,02° e salvou os resultados. Durante o ensaio, a temperatura ambiente média foi de 23°C.

A análise da varredura foi feita com o auxílio do software Match!, utilizando as bases de dados de materiais cimentícios e compostos inorgânicos como parâmetro.

3.6 Ensaios de penetração de cloretos

3.6.1 Adaptações

Algumas adaptações foram feitas nos ensaios de penetração de cloretos em virtude da disponibilidade de materiais para esta pesquisa.

No ensaio de penetração acelerada C1202 (ASTM, 2019), a saturação dos corpos de prova foi feita pela imersão dos mesmos em água por, no mínimo, 24h antes do ensaio, em virtude da falta de uma *vaccum pump* na universidade.

No ensaio colorimétrico NT BUILD 492 (NORDTEST METHOD, 1999), o recipiente em que os corpos de prova foram acoplados foi um joelho 90° de PVC, uma adaptação da *rubber sleeve* mencionada pela normativa. A saturação dos corpos de prova foi feita de maneira análoga ao ensaio de penetração acelerada.

3.6.2 Ensaio de penetração acelerada (ASTM C1202/19)

Este ensaio é um método rápido para medir a penetração de cloretos através do concreto por meio da análise da condutância do material.

O método consiste em verificar a carga elétrica total passante por um corpo de prova cilíndrico de 100mm (podendo variar até 95mm) de diâmetro e 50mm de altura, oriundo de um corpo de prova de 100mm de diâmetro e 200mm de altura (normatizado pela NBR 5738/15) fatiado por disco diamantado.

Inicialmente, o corpo de prova foi vedado com material selante (parafina) (Figura 7) e saturado em tanque de cura para então ser colocado entre as células de tensão.

Figura 7 – Corpo de prova selado



Fonte: autoral (2022)

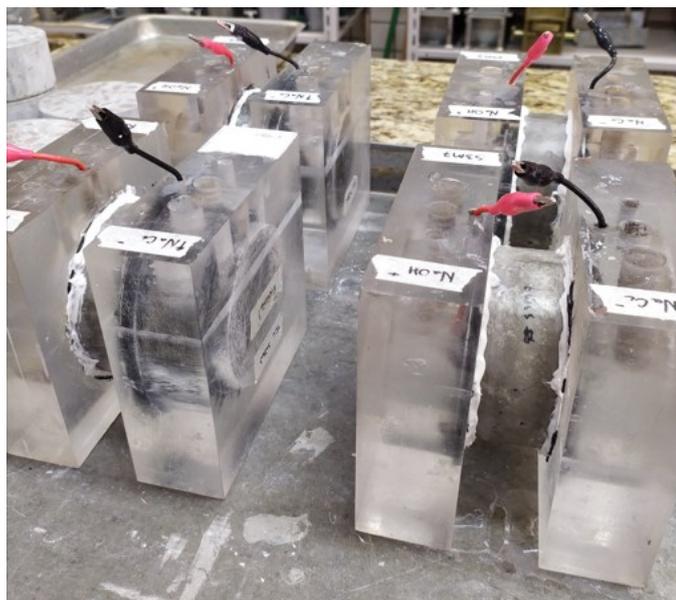
Dentro das células de tensão deve haver um componente metálico que garanta a passagem de corrente elétrica de maneira uniforme através do corpo de prova. Para tal, foram utilizadas chapas e fios de cobre (Figura 8).

Figura 8 – Células de tensão



Fonte: autoral (2022)

Para garantir a estanqueidade do sistema, material selante (silicone) foi aplicado na região de contato célula-corpo de prova (Figura 9).

Figura 9 – Sistema estanque

Fonte: autoral (2022)

Prosseguindo, uma célula de tensão foi preenchida com solução de cloreto de sódio (NaCl) em água destilada (3% da massa) e a outra com solução de hidróxido de sódio (NaOH, 12g/L) em água destilada. A célula com NaCl foi conectada ao terminal negativo da fonte e a célula com NaOH ao terminal positivo (Figura 10).

Figura 10 – Sistema final para o ensaio ASTM C1202/19

Fonte: autoral (2022)

Foi aplicada uma diferença de potencial de 60 Volts durante 6 horas e a carga total passante, em Coulombs, foi aferida.

Para a determinação da carga total que atravessa o corpo de prova, a C1202 (ASTM, 2019) dispõe a expressão 6:

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + 2I_{360}) \quad (6)$$

Onde:

Q carga total passante (Coulombs)

I_0 corrente imediatamente após a aplicação da ddp (Amperes)

I_t corrente medida no instante t minutos (Amperes)

Observando a carga positiva na célula contendo a solução de cloreto de sódio sabemos que haverá passagem de corrente elétrica, forçando íons negativos, como os cloretos (Cl^-), através do corpo de prova. Desse modo, a carga total passante é um indicador da resistência à penetração de cloretos do concreto. Segundo a normativa C1202 (ASTM, 2019), quão maior a carga total passante pelo corpo de prova, maior a facilidade de penetração de íons cloreto através do mesmo. A mesma norma dispõe a Tabela 5 para classificar os corpos de prova quanto a sua resistência à penetração de cloretos em função das cargas passantes observadas.

Tabela 5 – Penetração de cloretos em função da carga total passante

Carga total passante (Coulombs)	Penetração de íons cloreto
>4000	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baixa
100-1000	Muito Baixa
<100	Insignificante

Fonte: adaptado de C1202 (ASTM, 2019)

3.6.3 Ensaio colorimétrico (NT BUILD 492/99)

O método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata (AgNO_3) é uma ferramenta visual utilizada para medir a profundidade atingida pela penetração de íons cloreto no concreto (MEDEIROS et al., 2018).

Em contato com a superfície de concreto, o nitrato de prata gera uma reação fotoquímica. Caso haja cloretos livres na região, é formado um precipitado branco/cinza azulado de cloreto de prata, e caso não haja, é formado o óxido de prata, de cor marrom, como ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Corpo de prova atingido por cloretos



Fonte: autoral (2022)

Para o condicionamento dos corpos de prova, os mesmos foram acoplados a joelhos 90° de PVC e vedados com silicone (Figura 12). Em seguida, foram submersos em água por, no mínimo, 24h, de modo a garantir a saturação.

Figura 12 – Corpos de prova vedados



Fonte: autoral (2022)

Iniciando o ensaio, os joelhos com os corpos de prova já saturados foram postos em um recipiente fundo, de modo que as faces de cada corpo de prova ficassem totalmente expostas. Os joelhos foram preenchidos com solução de hidróxido de sódio em água destilada (NaOH , 12g/L), de modo que toda a face do corpo de prova fosse coberta. O recipiente fundo em que os joelhos foram colocados

foi preenchido com solução de cloreto de sódio (1g de NaCl para 9g de água) até cobrir a face exposta do corpo de prova.

Dentro de cada Joelho foi colocada uma haste de inox em contato com a solução de hidróxido de sódio, que serviu para a transmissão da corrente elétrica. Estas hastes foram conectadas ao polo positivo da fonte. Dentro do recipiente fundo, em contato com a solução de cloreto de sódio, foi posta outra haste de inox, esta conectada ao polo negativo da fonte (Figura 13).

Figura 13 – Sistema final para o ensaio NT BUILD 492/99



Fonte: autoral (2022)

Ligando a fonte em 30V, verificou-se a corrente inicial passante e foram feitos os devidos ajustes de acordo com a Tabela 6 para determinar o tempo de ensaio.

Tabela 6 – Voltagem e duração do ensaio

Corrente inicial (i) para 30V (mA)	Voltagem aplicada pós-ajuste (V)	Nova corrente inicial (i) possível (mA)	Duração do ensaio (h)
$i < 5$	60	$i < 10$	96
$5 \leq i < 10$	60	$10 \leq i < 20$	48
$10 \leq i < 15$	60	$20 \leq i < 30$	24
$15 \leq i < 20$	50	$25 \leq i < 35$	24
$20 \leq i < 30$	40	$25 \leq i < 40$	24
$30 \leq i < 40$	35	$35 \leq i < 50$	24
$40 \leq i < 60$	30	$40 \leq i < 60$	24
$60 \leq i < 90$	25	$50 \leq i < 75$	24
$90 \leq i < 120$	20	$60 \leq i < 80$	24
$120 \leq i < 180$	15	$60 \leq i < 90$	24
$180 \leq i < 360$	10	$60 \leq i < 120$	24
$i \geq 360$	10	$120 \geq i$	6

Fonte: adaptado de NT BUILD 492 (NORDTEST METHOD, 1999)

Para todos os corpos de prova a tensão ajustada resultou em 30V, desse modo, o tempo de ensaio adotado foi de 24h. Decorrido este tempo, os corpos de prova foram removidos dos joelhos, lavados e partidos ao meio com o auxílio de talhadeira e marreta (Figura 14). Com um borrifador, foi aspergida a solução de nitrato de prata (AgNO_3) sobre a superfície penetrada por cloretos.

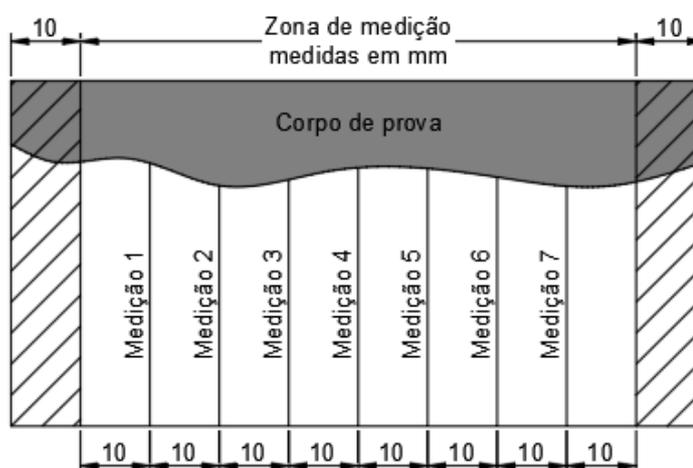
Figura 14 – Corpo de prova dividido ao meio



Fonte: autoral (2022)

A NT BUILD 492 (NORDTEST METHOD, 1999) indica medir a profundidade atingida por cloretos em intervalos de 10mm como indicado na Figura 15, devido a penetração não homogênea dos íons cloreto. O resultado final é dado pela média aritmética entre as profundidades aferidas.

Figura 15 - Medidas da profundidade atingida pelos cloretos



Fonte: adaptado de NT BUILD 492 (NORDTEST METHOD, 1999)

Caso a penetração seja bloqueada por algum agregado graúdo e prejudique a medida da profundidade, a NT BUILD 492 (NORDTEST METHOD, 1999) permite que a penetração seja aferida no ponto mais próximo em que não ocorra tal interferência ou ainda que a medida daquele ponto seja desprezada, caso haja mais de 5 medidas válidas em outros pontos.

Se, por algum defeito do corpo de prova, houver um ponto em que a penetração de cloretos seja muito superior as demais, este deve ser desconsiderado para o cálculo da média e anotado no relatório do ensaio, como disposto pela normativa do ensaio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos agregados

Os resultados obtidos no ensaio de granulometria, normatizado NBR NM 248 (ABNT, 2003) constam na Tabela 7.

A massa unitária, obtida pelo ensaio normatizado pela NBR 16972 (ABNT, 2021), e o teor de material pulverulento, aferido pelo método da NBR 16973 (ABNT, 2021), estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 7 – Granulometria

Peneiras da série normal	Material retido acumulado (%)	
	Brita	Areia
75mm	-	-
37,5mm	-	-
19mm	-	-
9,5mm	92,00	-
4,75mm	7,65	-
2,36mm	-	-
1,18mm	-	-
600µm	-	0,13
300µm	-	44,64
150µm	-	51,59
Fundo	0,30	3,95

Fonte: autoral (2022)

Tabela 8 – Caracterização dos agregados

Agregado	DMC (mm)	MF	Massa unitária (kg/m ³)	Material passante na peneira 75µm (%)
Areia	-	1,41	1590,82	0,51
Brita	4,75	-	1559,71	0,38

Fonte: autoral (2022)

O agregado graúdo foi classificado como brita 1 e o agregado miúdo como areia fina, de acordo com a NBR 7225 (ABNT, 1993).

4.2 Ensaio de trabalhabilidade e resistência

Os traços de concreto, em estado fresco, apresentaram o abatimento (*slump*) descrito na Tabela 9.

Tabela 9 – Abatimento

	REF	S5M5	S7M3	S3M7
<i>Slump</i> (cm)	24,0	20,0	19,0	20,0

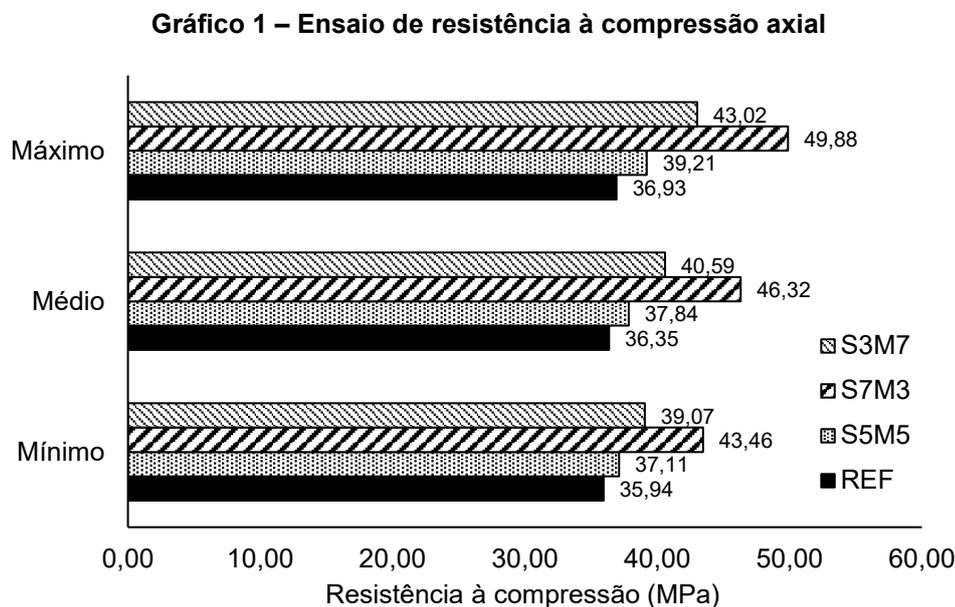
Fonte: autoral (2022)

Nota-se perda de trabalhabilidade (redução do abatimento) em todos os traços com adições em comparação ao traço de referência. Este resultado era esperado por conta do pequeno tamanho dos grãos da sílica ativa e do metacaulim. O aumento de material fino na mistura gera um maior consumo de água para hidratação das partículas e, conseqüentemente, reduz a fluidez do concreto (SHI et al., 2015). Ainda assim, devido a adição de 0,5% de superplastificante sobre a massa de cimento, os traços com adições minerais apresentam boa trabalhabilidade, sendo classificados na categoria S160 segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015).

Além disso, verificou-se que o traço S7M3 apresentou abatimento inferior aos demais. A principal causa para este resultado é a característica de aglomeração que a sílica ativa possui. Segundo Yajun e Cahyadi (2003), partículas de sílica ativa tendem a unir-se e formar aglomerados que podem ultrapassar dimensões de 100µm (partículas isoladas possuem diâmetros de 0,1µm a 0,5µm). Este fenômeno densifica a argamassa do concreto e piora sua trabalhabilidade, além de impedir a sílica ativa no interior dos aglomerados de reagir com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), reduzindo a efetividade da adição.

Mesmo com a densificação da argamassa decorrente da utilização da sílica ativa, a diferença de trabalhabilidade entre o traço com maior teor de sílica ativa (S7M3) para o com menor teor (S3M7) não foi tão significativa. Isso deve-se à interação do metacaulim com o superplastificante também gerar um efeito negativo na trabalhabilidade do concreto. Schmid e Plank (2021) explicam que argilas calcinadas apresentam cargas negativas na superfície de suas partículas ao serem adicionadas ao concreto. Essa característica faz com que o superplastificante adsorva no metacaulim ao invés de ser homogêneo disperso, reduzindo sua efetividade e, conseqüentemente, a trabalhabilidade do concreto.

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial dos concretos aos 28 dias estão representados no Gráfico 1. Os dados brutos constam na Tabela 10.



Fonte: autoral (2022)

Tabela 10 – Ensaio de resistência à compressão axial

Corpo de prova	Resistência à compressão (MPa)			
	REF	S5M5	S7M3	S3M7
1	35,94	37,11	43,46	39,07
2	36,19	37,19	45,61	39,68
3	36,93	39,21	49,88	43,02
Média	36,35	37,84	46,32	40,59
Desv. Pad.	0,51	1,19	3,27	2,13

Fonte: autoral (2022)

Nota-se o aumento da resistência à compressão em todos os traços com adições. Este resultado deve-se à melhoria da microestrutura do concreto face as propriedades pozolânicas das adições utilizadas (POON et al., 2006). Estas garantem aumento de resistência devido a formação de silicatos de cálcio hidratados secundários pela reação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), oriundo da hidratação do cimento, com a sílica (SiO_2) presente no metacaulim e na sílica ativa (Zeyad et al., 2017).

A maior resistência verificada se deu no traço S7M3, sendo 27% superior ao traço sem adições (REF). Ainda em comparação ao traço de referência, o S5M5 apresentou ganhos de apenas 4% e o traço S3M7, 12%.

Medeiros et al. (2017) demonstram que adições de sílica ativa e metacaulim sobre a massa de cimento geram ganhos na resistência à compressão superiores à utilização destas adições minerais como substituição de parte do cimento. Os autores obtêm ganhos de 42% na resistência à compressão para concretos com adição de 10% de metacaulim e 27% para adição de 10% de metacaulim.

Comparando os resultados demonstrados por Medeiros et al. (2017) às aferições da presente pesquisa, nota-se que a adição isolada de 10% de metacaulim proporciona melhor desempenho mecânico aos 28 dias de cura em comparação a adições conjuntas de metacaulim e sílica ativa. Entretanto, sabe-se que a reação pozolânica da sílica ativa é mais lenta que a do metacaulim (ZHANG e MALHOTRA, 1995), desse modo, aos 28 dias, os produtos de hidratação que conferem resistência mecânica ao concreto estarão mais presentes em compostos com adição predominante de metacaulim. Porém, em períodos de cura prolongados, quando grande parte da sílica ativa já reagiu, esta discrepância em desempenho mecânico tende a se equilibrar, como observado por Poon et al. (2006). Estes fatos levam a crer que o melhor desempenho mecânico observado na presente pesquisa (traço S7M3) possa ser ainda maior, podendo se igualar a resistência à compressão de traços com adição de 10% de metacaulim em idades de cura avançadas.

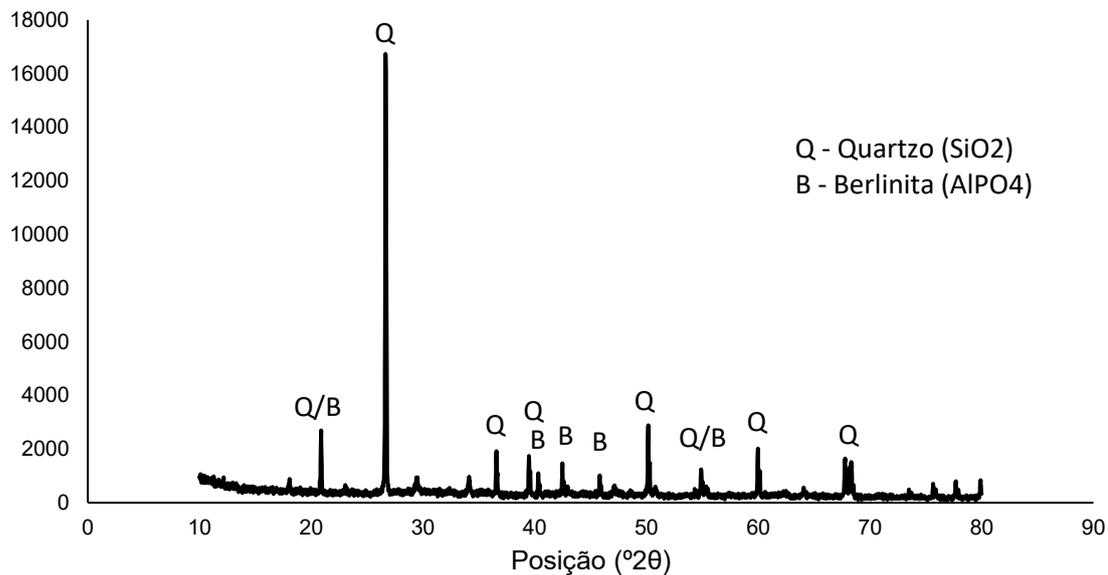
4.3 Difratomia de raios X (DRX)

O ensaio de difratometria por raios X, adotado para descartar a possível existência de cloretos endógenos, comprovou que a estrutura do concreto avaliado é cristalina e que não há picos de intensidade que justifiquem a presença de cloretos no concreto antes da realização dos ensaios de penetração, como apresentado na Figura 16. A demonstração do difratograma do traço de referência foi escolhida pelo fato deste apresentar menor quantidade de elementos na mistura e facilitar a visualização de um possível composto que possua cloro.

A predominância do quartzo (SiO_2) nos resultados, demonstrada pelo grande pico de intensidade próximo aos 28° , deve-se ao colhimento das amostras em pó a partir dos corpos de prova de concreto endurecido. A pulverização dos agregados na coleta elevou o teor de sílica das amostras. A berlinita (AlPO_4) também se faz presente

em grandes quantidades pois esta é um dos compostos formados na hidratação do concreto.

Figura 16 – DRX do traço de referência (REF)

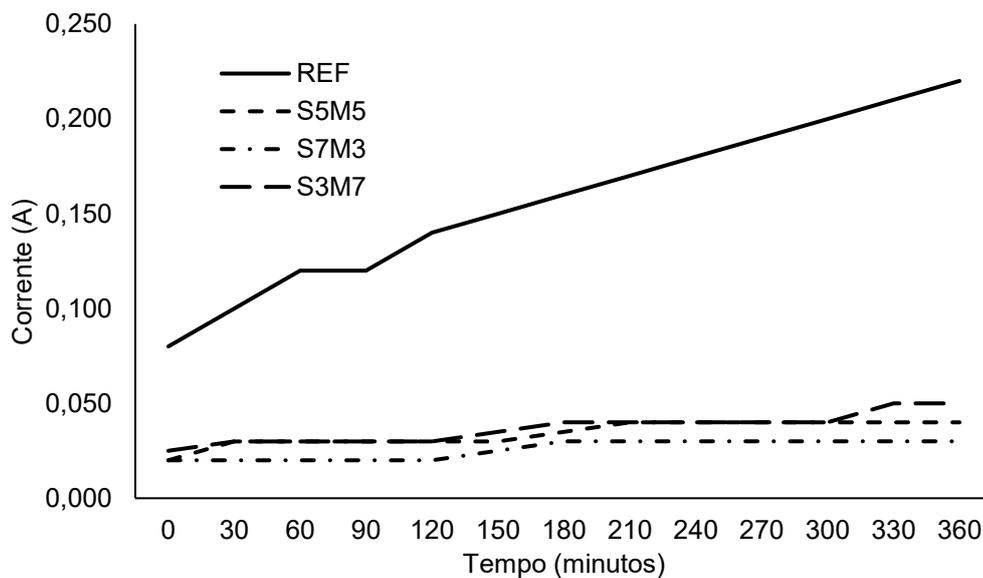


Fonte: autoral (2022)

4.4 Ensaios de penetração de cloretos

As leituras realizadas no ensaio de penetração acelerada de cloretos C1202 (ASTM, 2019) são demonstradas pelo Gráfico 2. Os dados brutos estão especificados na Tabela 11.

Gráfico 2 – Ensaio de penetração acelerada ASTM C1202/19



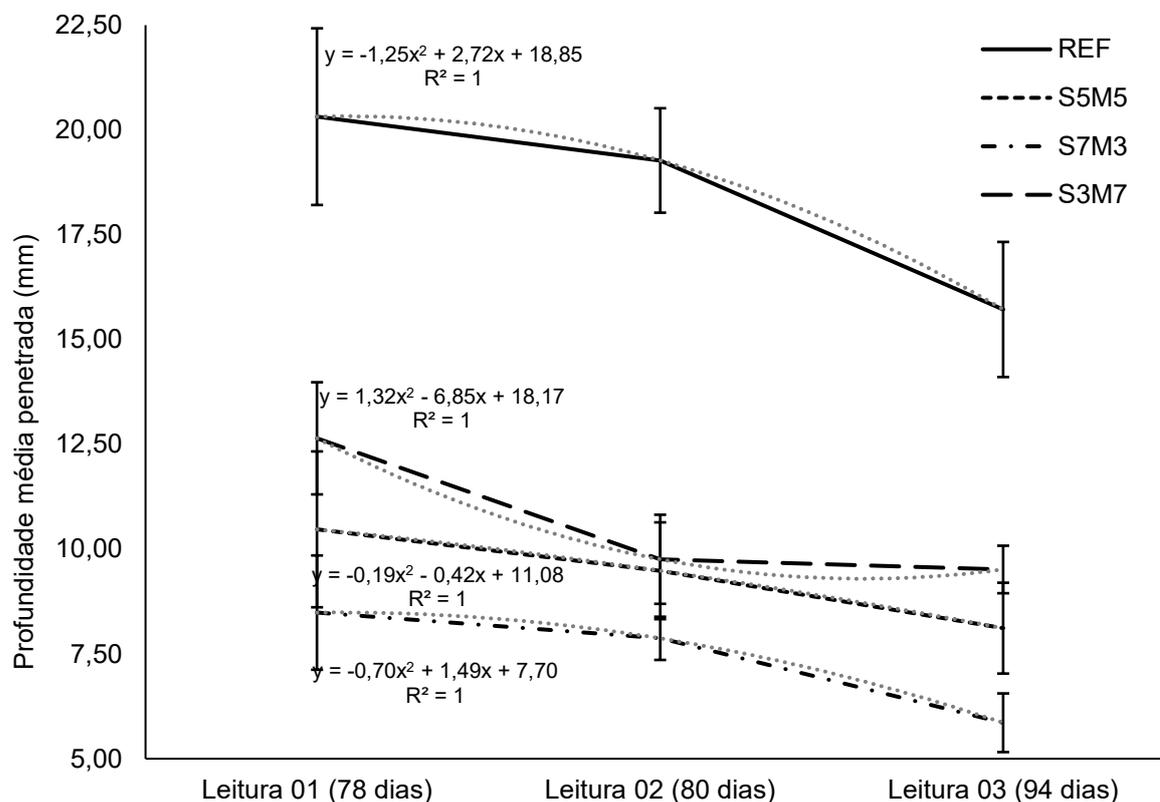
Fonte: autoral (2022)

Tabela 11 – Ensaio de penetração acelerada ASTM C1202/19

Medição	Leitura 01 – 78 dias de cura			
	Corrente (A)			
	REF	S5M5	S7M3	S3M7
0	0,080	0,020	0,020	0,025
30	0,100	0,030	0,020	0,030
60	0,120	0,030	0,020	0,030
90	0,120	0,030	0,020	0,030
120	0,140	0,030	0,020	0,030
150	0,150	0,030	0,025	0,035
180	0,160	0,035	0,030	0,040
210	0,170	0,040	0,030	0,040
240	0,180	0,040	0,030	0,040
270	0,190	0,040	0,030	0,040
300	0,200	0,040	0,030	0,040
330	0,210	0,040	0,030	0,050
360	0,220	0,040	0,030	0,050
Carga total (C)	3402,0	747,0	558,0	796,5

Fonte: autoral (2022)

As leituras feitas no ensaio colorimétrico NT BUILD 492 (NORDTEST METHOD, 1999) são demonstradas pelo Gráfico 3. Os dados brutos estão especificados nas Tabelas 12, 13 e 14.

Gráfico 3 – Ensaio colorimétrico NT BUILD 492/99

Fonte: autoral (2022)

Tabela 12 – Ensaio colorimétrico NT BUILD 492/99

Leitura 01 – 78 dias de cura				
Medição	Profundidade penetrada (mm)			
	REF	S5M5	S7M3	S3M7
1	24,40	14,00	7,40	13,90
2	19,60	9,30	8,20	13,40
3	19,40	9,20	10,90	11,00
4	20,20	11,10	7,50	12,10
5	18,30	10,90	7,70	13,00
6	20,00	10,50	9,90	14,20
7	-	8,30	7,80	10,90
Média	20,32	10,47	8,49	12,64
Desv. Pad.	2,11	1,86	1,36	1,34

Fonte: autoral (2022)

Tabela 13 – Ensaio colorimétrico NT BUILD 492/99

Leitura 02 – 80 dias de cura				
Medição	Profundidade penetrada (mm)			
	REF	S5M5	S7M3	S3M7
1	20,30	8,60	7,60	9,00
2	19,00	8,10	7,10	10,10
3	17,10	10,00	7,70	8,60
4	21,00	9,50	8,00	9,20
5	19,70	9,30	7,90	9,10
6	18,80	11,40	8,00	10,90
7	19,00	-	8,80	11,40
Média	19,27	9,48	7,87	9,76
Desv. Pad.	1,25	1,15	0,52	1,06

Fonte: autoral (2022)

Tabela 14 – Ensaio colorimétrico NT BUILD 492/99

Leitura 03 – 94 dias de cura				
Medição	Profundidade penetrada (mm)			
	REF	S5M5	S7M3	S3M7
1	16,40	9,00	5,40	10,30
2	17,90	7,00	6,60	9,20
3	14,70	7,70	6,40	8,60
4	15,40	7,90	4,70	9,60
5	13,30	6,80	6,50	10,00
6	16,60	8,60	5,90	9,70
7	-	9,80	5,50	9,20
Média	15,72	8,11	5,86	9,51
Desv. Pad.	1,61	1,08	0,70	0,57

Fonte: autoral (2022)

Verificou-se o aumento da resistência à penetração de cloretos em todos os traços com adições. Este fato deve-se à melhoria da microestrutura do concreto pela adição de materiais pozolânicos à mistura. A sílica (SiO_2) presente nestas adições reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) gerado pela hidratação do concreto. Esta reação forma silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) secundários, um material estável que confere um melhor preenchimento à microestrutura do material, além de propriedades resistentes (POON et al., 2006). Khan et al. (2017) explicam que adições de elevada finura como a sílica ativa e metacaulim apresentam efeito *filler*. Este efeito reduz os vazios do concreto, tornando o material menos permeável e, conseqüentemente, mais resistente à penetração de cloretos.

As linhas de tendência demonstradas no Gráfico 3 não podem ser utilizadas para admitir profundidades atingidas em idades de cura fora do intervalo analisado nesta pesquisa. Estas linhas sugerem que, em hidratação prolongada, o traço REF se igualaria (e ultrapassaria) aos traços com adições minerais quanto a resistência à penetração de cloretos. Entretanto, não é possível afirmar que esta suposição é verdadeira sem realizar o ensaio em questão nas idades de cura de interesse.

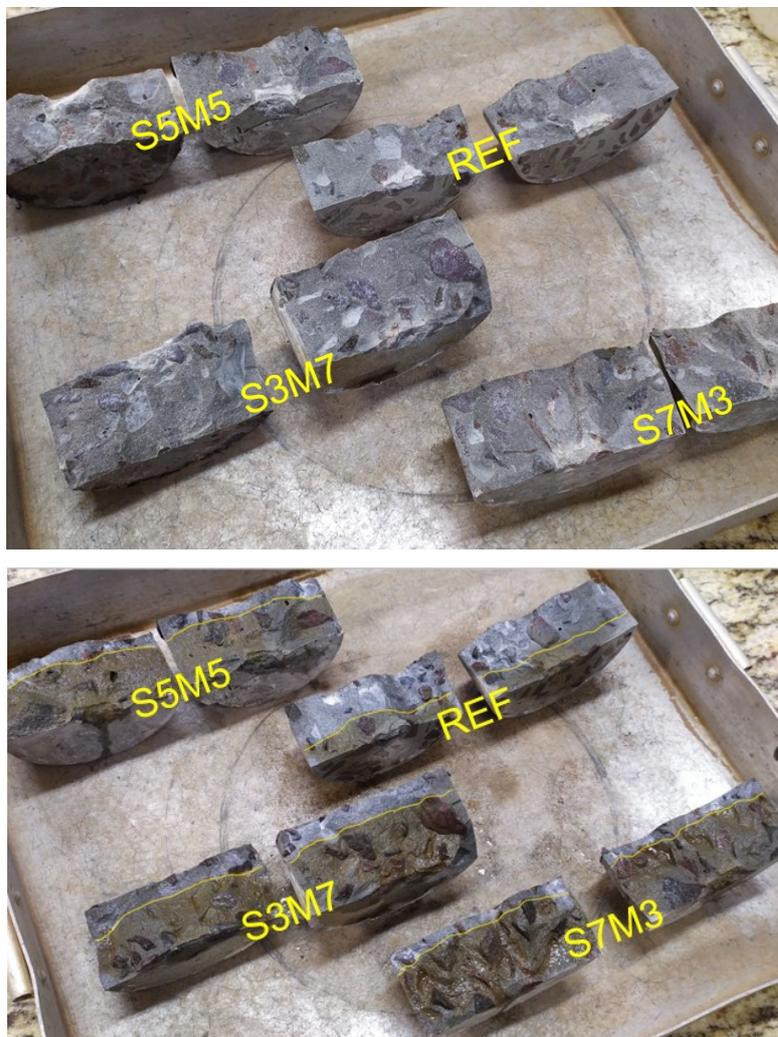
Segundo o ensaio da normativa C1202 (ASTM, 2019), o concreto de referência (REF) enquadrou-se na categoria “moderada” quanto a penetrabilidade de cloretos, apresentando carga total passante de 3402 Coulombs. Já os traços com adições, S7M3, S5M5 e S3M7, foram classificados na categoria “muito baixa”, demonstrando reduções de 84%, 78% e 77% na carga passante, respectivamente.

Quanto ao ensaio NT BUILD 492 (NORDTEST METHOD, 1999), as profundidades atingidas por cloretos aferidas para o traço REF variaram entre 13,3mm e 24,4mm ao longo das leituras. Os traços S3M7 e S5M5 tiveram comportamento semelhante, apresentando redução média de 42% e 49% em relação ao traço referência. O melhor desempenho foi aferido no traço S7M3, que apresentou redução de 60% na profundidade atingida por cloretos.

A Figura 17 demonstra visualmente as diferenças entre profundidades penetradas observadas em um ensaio teste. A região de coloração cinza/prata (após aspersão de nitrato de prata) representa a parte do concreto contaminada por cloretos enquanto a marrom, a parte intacta. Traçando uma linha na interface da região atingida com a não atingida nota-se, visualmente, a magnitude do ganho em

resistência à penetração de cloretos que a combinação de sílica ativa e metacaulim garante ao concreto em comparação ao traço que não possui as adições.

Figura 17 – Penetração de cloretos (antes e depois da aspersão de nitrato de prata)



Fonte: autoral (2022)

O estudo de Poon et al. (2006) utilizou substituição de 10% do cimento por sílica ativa e apresentou resultados piores do que substituições por metacaulim quanto a carga passante no ensaio C1202 (ASTM, 2019). Os autores verificaram que a substituição de 10% da massa de cimento por metacaulim gera reduções de 73% na carga passante, resultado inferior ao observado em todos os traços desta pesquisa.

Figueiredo et al. (2014) realizaram um ensaio similar ao método NT BUILD 492 (NORDTEST METHOD, 1999). Os autores observaram redução de 20% na profundidade atingida por cloretos devido a substituição de 10% da massa de cimento por metacaulim em comparação a um traço sem adições. O resultado aferido por Figueiredo et al. (2014) mostra uma redução significativamente inferior a observada em todos os traços desta pesquisa.

Bilal et al. (2021) analisaram concretos com adições combinadas de sílica ativa e metacaulim, em mesmas proporções, em substituição de 10% da massa de cimento. Os autores observaram reduções na permeabilidade em torno de 50% em relação a um traço referência. Comparando os resultados da adição combinada com traços de adições exclusivas de metacaulim e sílica ativa (em mesmo teor de material pozolânico), Bilal et al. (2021) concluíram que a adição combinada apresenta melhor desempenho quanto a permeabilidade.

Os resultados obtidos por Bilal et al. (2021) corroboram com o aferido pelo ensaio NT BUILD 492 (NORDTEST METHOD, 1999) no traço S5M5 desta pesquisa, que combina as adições na mesma proporção dos autores. Entretanto, o melhor comportamento quanto a resistência à penetração de cloretos (que é proporcional à permeabilidade do concreto) neste ensaio se deu no traço S7M3, sendo 21% superior ao traço S5M5. Esta comparação mostra que a adição conjunta de 7% de sílica ativa com 3% de metacaulim é uma dosagem promissora para o estudo de concretos resistentes à penetração de íons cloreto.

5 CONCLUSÕES

A adição conjunta de sílica ativa e metacaulim em teor de 10% de material pozolânico sobre a massa de cimento piora a trabalhabilidade da mistura em comparação ao concreto convencional (sem adições). A sílica ativa é levemente mais prejudicial neste aspecto devido a densificação da argamassa pela formação de aglomerações que esta adição provoca. A utilização de superplastificante garantiu boa trabalhabilidade aos traços com adições.

O desempenho na resistência à compressão do concreto é melhorado em todas as adições conjuntas de sílica ativa e metacaulim devido a formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) secundários através da reação pozolânica. Os maiores ganhos são observados na proporção de 7% de sílica ativa para 3% de metacaulim.

A adição combinada de sílica ativa e metacaulim nas proporções de 5/5, 3/7 e 7/3 (em percentual de adição sobre a massa de cimento) melhora a microestrutura do concreto, tornando-o menos permeável e, conseqüentemente, mais resistente à degradação pelo ataque de íons cloreto. O melhor resultado é observado no traço de 7% de sílica ativa e 3% de metacaulim.

Sobretudo, a dosagem mais relevante é a adição conjunta de 7% de sílica ativa e 3% de metacaulim. Apesar da perda em trabalhabilidade, sua aplicação não é inviabilizada devido ao uso de superplastificante. Este traço apresenta bom comportamento mecânico e baixa permeabilidade, caracterizando um concreto eficiente quanto à resistência e compressão e penetração de íons cloreto.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7225**: Materiais de pedra e agregados naturais. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7500-1**: Materiais metálicos – calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial – parte 1: máquinas de ensaio de tração/compressão – calibração e verificação do Sistema de medição da força. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956-1**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-1**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometros por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASTM **C494**. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. 2019.

ASTM **C1202**. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. 1997.

ASTM **C1202**. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. 2019.

BERTOLINI, Luca. **Materiais de construção**. Patologia, reabilitação, prevenção. Traduzido por Leda Maria Marques Dias Beck. São Paulo: Oficina de Textos. 2010.

BILAL, H. et al. Influence of silica fume, metakaolin & SBR latex on strength and durability performance of pervious concrete. **Construction and building materials**. Volume 275. 2021.

FEDUMENTI, M. B. **Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto**. Dissertação de Pós-Graduação. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. 2013.

FIGUEIREDO, C. P. et al. O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**. Volume 7 nº4. Pg. 685-708. 2014.

FORNASIER, R. S. **Porosidade e permeabilidade do concreto de alto desempenho com microssilica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. 1995.

HELENE, P. R. do L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de Concreto**. São Paulo: Projeto de divulgação tecnológica - Fosroc/Pini, 1992.

HELENE, P. R. do L; GUIMARÃES, A. T. C. **Grau de saturação do concreto: um importante fator na difusão de cloretos**. 2001.

HELENE, P. R. do L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. do L. **Vida útil das estruturas de concreto**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2. Gramado. Anais [...] 1999.

HOFFMANN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. 2001.

ISAIA, G. C.; HELENE, P. R. do L. **Efeitos de altos teores de pozolanas em concreto de elevado desempenho sob a ação de cloretos**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo. 1995.

KHAN, M. N. N. et al. Filler Effect of Pozzolanic Materials on the Strength and Microstructure Development of Mortar. **KSCE Journal of Civil Engineering**. Volume 21, p. 274-284. 2017.

MEDEIROS, M. H. F. de, et al. **Nitrato de prata como método colorimétrico para detecção da penetração de cloretos: análise crítica**. TERCEIRO SIMPÓSIO PARANAENSE DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES. 2018.

MEDEIROS, M. H. F. de; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, Volume 17, n. 4, p. 125-139. 2017.

MEHTA, P. K.; AITCIN, P. C. **Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high-strength concrete**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGHSTRENGTH CONCRETE, 2., 1990, Berkeley. Proceedings ... Detroit: ACI. p.265-279. 1990.

MEIRA, G. R; PADARATZ, I, J. **Custos de recuperação e prevenção em estruturas de concreto armado: uma análise comparativa**. IX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. ENTAC. Foz do Iguaçu. 2002.

NORDTEST METHOD **NT BUILD 492**. Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. 1999.

PEREIRA, E., et al. Ensaio acelerado por cloretos: efeito da sílica ativa, relação água/aglomerante e espessura de cobrimento do concreto. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**. Volume 6 nº4. p. 561-581. 2013.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Compressive Strength, Chloride Diffusivity and Pore Structure of High Performance Metakaolin and Silica Fume Concrete. **Construction and Building Materials**. Volume 20, n. 10, p. 858-865, 2006.

RAABE, A. L. **Aditivos superplastificantes em concretos de cimento Portland pozolânico: análise da trabalhabilidade, resistência à compressão e consumo de cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - CPGEC/Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1991.

SALES, A. et al. **Corrosão e degradação em estruturas de concreto**: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2. ed. GEN. Grupo Editorial Nacional S.A. Rio de Janeiro, 2020.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. Dissertação (Mestrado em estruturas) – Departamento de Estruturas, Universidade de Brasília, Brasília. 2006.

SCHMID, M; PLANK, J. Interaction of individual meta clays with polycarboxylate (PCE) superplasticizers in cement investigated via dispersion, zeta potential and sorption measurements. **Applied Clay Science**. Volume 207. 2021.

SHI, C. et al. The hydration and microstructure of ultra high-strength concrete with cement–silica fume–slag binder. **Cement and Concrete Composites**. Volume 61, p. 44–52. 2015.

TOLEDO, W. K. et al. **Método de dosagem de concreto IPT – Estudo de caso**. Instituto Federal Goiano. 2020.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute. 469p. Stockholm, 1982.

YAJUN, J; CAHYADI, J. H. Effects of densified silica fume on microstructure and compressive strength of blended cement pastes. **Cement and Concrete Research**. Volume 33. Pg 1543-1548. 2003.

ZEYAD, A. M.; JOHARI, M. A. M.; TAYEH, B. A.; YUSUF, M. O. Pozzolanic reactivity of ultrafine palm oil fuel ash waste on strength and durability performances of high strength concrete. **Journal of Cleaner Production**. Volume 144, p. 511-522. 2017.

ZHANG, M. H; MALHOTRA, V. M. Characteristics of a thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete. **Cement Concrete Research**. 1995.