

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

Rinaldo Guilherme da Silva

**ANÁLISE DO POTENCIAL DA SÍLICA ATIVA COMO ADIÇÃO PARA
CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO SUBMETIDOS A MEIOS AGRESSIVOS**

Belo Horizonte
2024

Rinaldo Guilherme da Silva

**ANÁLISE DO POTENCIAL DA SÍLICA ATIVA COMO ADIÇÃO PARA
CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO SUBMETIDOS A MEIOS AGRESSIVOS**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil.

Orientadora: Prof^a Dr^a Carmen Couto Ribeiro

Coorientadora: Prof^a Dr^a Marys Lene Braga Almeida

Belo Horizonte

2024

S586a

Silva, Rinaldo Guilherme da.

Análise do potencial da sílica ativa como adição para concretos de alto desempenho submetidos a meios agressivos [recurso eletrônico] / Rinaldo Guilherme da Silva. – 2024.

1 recurso online (102 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Maria Carmen Couto Ribeiro
Coorientadora: Marys Lene Braga Almeida.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 97-102.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses. 3. Sílica - Teses. 4. Concreto - Durabilidade - Teses. 5. Concreto - Permeabilidade - Teses. I. Ribeiro, Carmen Couto, 1953-. II. Almeida, Marys Lene Braga. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 691(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO RINALDO GUILHERME DA SILVA

Realizou-se no dia 11 de julho de 2024 às 14:30 horas, na Escola de Engenharia da UFMG, a defesa de dissertação intitulada ANÁLISE DO POTENCIAL DA SÍLICA ATIVA COMO ADIÇÃO PARA CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO SUBMETIDOS A MEIOS AGRESSIVOS, apresentada por RINALDO GUILHERME DA SILVA, número de registro 2022663203, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Construção Civil na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, à seguinte Comissão Examinadora: Prof^a. Maria Carmen Couto Ribeiro (Orientadora), Prof^a. Marys Lene Braga Almeida (Coorientadora), Prof^a. Danielle Meireles de Oliveira e Prof. Felipe de Souza Abreu.

A Comissão considerou a dissertação:

(X) Aprovada

() Reprovada

Finalizados os trabalhos, foi lavrada a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada eletronicamente pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 11 de julho de 2024.

Maria Carmen Couto
Ribeiro:22173021672

Assinado de forma digital por
Maria Carmen Couto
Ribeiro:22173021672
Dados: 2024.07.11 17:44:30 -03'00'

Prof^a. Dra. Maria Carmen Couto Ribeiro (Orientadora) – UFMG



Documento assinado digitalmente
MARYS LENE BRAGA ALMEIDA
Data: 11/07/2024 22:30:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dra. Marys Lene Braga Almeida (Coorientadora) – UFMG

Danielle Meireles de
Oliveira:04897576695

Assinado de forma digital por Danielle
Meireles de Oliveira:04897576695
Dados: 2024.07.11 19:01:04 -03'00'

Prof^a. Dra. Danielle Meireles de Oliveira – UFMG



Documento assinado digitalmente
FELIPE DE SOUZA ABREU
Data: 12/07/2024 11:10:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Felipe de Souza Abreu – PUC MINAS

Eduardo
Chahud

Assinado de forma
digital por Eduardo
Chahud
Dados: 2024.07.15
15:49:54 -03'00'

Dedico este trabalho a toda a minha família, os quais foram os responsáveis por ser quem sou hoje. E a todos os meus amigos e colegas, que de alguma maneira contribuíram em minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Não poderia finalizar este trabalho sem mencionar aqueles que durante toda minha trajetória acadêmica contribuíram para o meu crescimento.

Agradeço em especial ao meu falecido pai que foi e sempre será um exemplo de pessoa, com quem tive o grande prazer de compartilhar momentos incríveis. À minha mãe que sempre me apoiou, incentivou e contribuiu para minha formação pessoal.

Aos meus avós, com os quais tenho o prazer de compartilhar momentos importantes da minha vida. Aos meus tios, que sempre estiveram ao meu lado, em momentos de alegria e nos momentos difíceis me apoiando e aconselhando.

À minha orientadora Prof^a Dr^a Carmen Couto Ribeiro, pela confiança, dedicação e contribuição à minha capacidade de pesquisa, análise crítica e compromisso. À Prof^a Dr^a Marys Braga Almeida, por ter aceitado o convite de ser minha coorientadora e por sua importante contribuição a este trabalho.

A todos os meus professores que contribuíram significativamente para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal, em especial ao Prof. Dr. Felipe de Souza Abreu, da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, que sempre foi meu incentivador e um exemplo na minha trajetória acadêmica. À Prof^a Dr^a Joana Darc Silva Pinto, da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, pelo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho e por seu exemplo como pesquisadora e professora.

A todos da Escola de Engenharia da UFMG, em especial aos professores dos quais tive o prazer de ser aluno. Ao Prof. Dr. Eduardo Chahud, coordenador do Curso de Mestrado em Construção Civil, pelo suporte e apoio. À Camila Souza, secretária do Curso de Mestrado em Construção Civil, pela presteza, agilidade e apoio nas demandas acadêmicas.

Aos meus amigos, com quem tive e tenho o prazer de compartilhar minha vida profissional, que sempre me apoiaram e ajudaram no desenvolvimento deste trabalho. Ao Ricardo Alexandre, técnico de Laboratório que me ajudou incansavelmente na execução dos ensaios. Ao Ednaldo Ribeiro, supervisor do Laboratório da Cimentos Nacional, por fornecer parte dos materiais utilizados nesta pesquisa e apoio nos ensaios. À Giovanna Ribeiro, diretora da GR Brasil Assessoria Empresarial, por fornecer os aditivos utilizados nesta pesquisa.

A todos meus amigos, que sempre apoiaram, incentivaram e comemoram minhas conquistas pessoais e acadêmicas.

Agradeço especialmente à FAPEMIG, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pela concessão da bolsa de mestrado, o que de forma direta viabilizou a elaboração e a conclusão deste trabalho.

Nossas crenças se transformam em pensamentos, os pensamentos em palavras, as palavras se tornam ações e estas ações repetidas se tornam hábitos. E estes hábitos formam nossos valores e nossos valores determinam nosso destino.

(Mahatma Gandhi).”

RESUMO

Este estudo compara concretos de alto desempenho com e sem adição de sílica ativa. Os concretos de alto desempenho são capazes de atingir elevadas resistências, maiores que 60MPa, e elevada durabilidade. A sílica ativa é amplamente utilizada na produção de concretos por melhorar propriedades como resistência mecânica e durabilidade. Foram produzidos concretos com adição de 6%, 10% e 14% de sílica ativa. Os resultados mostram que a sílica ativa foi capaz de aumentar a resistência à compressão em até 10,36%, o módulo de elasticidade em 9,48% e a resistência à tração por compressão diametral em 32,85%. Além disso, observa-se uma redução da absorção de água em até 25,79% e da absorção capilar em até 42,91%, comprovando o aumento da impermeabilidade do concreto, promovendo uma maior durabilidade. O concreto com sílica ativa também demonstrou maior resistência a ambientes agressivos, pois os concretos foram submersos em uma solução de ácido sulfúrico (solução de H_2SO_4 a 2,5%) durante sete dias. Após este período foram avaliadas suas características mecânicas e físicas, sendo que os concretos com sílica ativa apresentam maior resistência em ambientes agressivos. Esses resultados sugerem que a sílica ativa pode prolongar a vida útil das estruturas de concreto, reduzindo a necessidade de manutenção e atendendo às exigências de durabilidade da norma NBR 6118:2023. Vale ressaltar que o emprego da sílica ativa proporciona ganhos ambientais significativos, uma vez que a produção de cimento é muito mais agressiva ao meio ambiente, quando comparada à produção de sílica ativa.

Palavras-chave: ataque ácido; permeabilidade; durabilidade.

ABSTRACT

This study compares high-performance concretes with and without the addition of silica fume. High-performance concretes are capable of achieving high strengths, greater than 60MPa, and also high durability. Silica fume is widely used in the production of concrete to improve properties such as mechanical strength and durability. Concretes were produced with the addition of 6%, 10% and 14% of silica fume. The results show that silica fume was able to increase the compressive strength by up to 10.36%, the elastic modulus by 9.48% and the tensile strength by diametral compression by 32.85%. Furthermore, we observed a reduction in water absorption by up to 25.79% and capillary absorption by up to 42.91%, proving the increase in the impermeability of the concrete, promoting greater durability. Concrete with silica fume also demonstrated greater resistance to aggressive environments, as the concretes were submerged in a sulfuric acid solution (2.5% H₂SO₄ solution) for seven days. After this period, their mechanical and physical characteristics were evaluated, with concrete with silica fume showing greater resistance in aggressive environments. These results suggest that silica fume can extend the useful life of concrete structures, reducing the need for maintenance and meeting the durability requirements of standard NBR 6118:2023. It is worth mentioning that the use of silica fume provides significant environmental gains, since cement production is much more aggressive to the environment, when compared to the production of silica fume.

Keywords: acid attack; permeability; durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 (a, b, c) - Representação esquemática de partículas de cimento Portland, (a) sem aditivos, (b) com aditivos superplastificante, (c) adicionando aditivo mineral fino.....	30
Figura 02 – Esquema de produção do silício metálico e captação da sílica ativa.....	34
Figura 03 – Concreto sem e com sílica ativa respectivamente.....	35
Figura 04 – Gráfico de tensão-deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto.....	44
Figura 05 – Representação do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial.....	45
Figura 06 – Ensaio de tração por compressão diametral em corpo de prova cilíndrico.....	46
Figura 07 – Influência das condições de cura sobre a resistência do concreto.....	51
Figura 08 - Grupos de tratamento de superfície para concreto: (a) formadores de película (b) bloqueadores de poros (c) hidrofugantes de superfície.....	58
Figura 09 – Ensaio de Espalhamento do concreto.....	63
Figura 10 – Ensaio de resistência à compressão do concreto.....	64
Figura 11 – Equivalência de cobertura, sistema de proteção superficial e concreto de cobertura.....	67
Figura 12: Curva Granulométrica Areia.....	69
Figura 13: Curva Granulométrica da Brita.....	70
Figura 14 – Ganho de resistência à compressão.....	74
Figura 15 – Rompimento do agregado graúdo.....	75
Figura 16 – Módulo de elasticidade.....	77
Figura 17 – Resistência à tração por compressão diametral.....	79
Figura 18 – Absorção de água e índice de vazios.....	81
Figura 19 – Corpos de prova em contato com a água.....	83
Figura 20 – Avaliação visual da ascensão capilar.....	84
Figura 21 – Redução da absorção de água por capilaridade.....	85
Figura 22 – Perdas de massa.....	87
Figura 23 – Deterioração superficial do concreto após o ataque ácido.....	89

Figura 24 – Corpos de prova com proteção superficial após o ataque ácido.....	90
Figura 25 – Corpo de prova com aplicação do sistema de proteção superficial em sua metade.....	90
Figura 26 – Resistência à compressão antes e após o ataque.....	92
Figura 27 – Absorção de água antes e após o ataque.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Sequência de reações no processo de fabricação do cimento Portland.....	21
Tabela 02 – Principais compostos químicos do clínquer.....	21
Tabela 03 – Designação, sigla e classe do cimento Portland conforme NBR 16697:2018.....	22
Tabela 04 – Limites de composição do cimento Portland.....	23
Tabela 05 – Classificação dos agregados segundo a sua obtenção.....	24
Tabela 06 – Classificação dos agregados segundo a forma dos grãos.....	25
Tabela 07 – Requisitos químicos das pozolanas.....	30
Tabela 08 – Requisitos físicos das pozolanas.....	31
Tabela 09 – Classe de resistência do concreto estrutural.....	41
Tabela 10: Condições de preparo do concreto.....	47
Tabela 11: Período mínimo de cura necessário a interrupção dos poros capilares.....	51
Tabela 12 – Classe de agressividade ambiental.....	53
Tabela 13 – Relação água/cimento correspondente a cada classe de agressividade.....	54
Tabela 14 – Tipos de ataques ácidos.....	55
Tabela 15: Características do Cimento.....	67
Tabela 16: % Retida Acumuladas Peneiras ABNT Areia industrial grossa.....	68
Tabela 17: Resultado Ensaio de Caracterização Areia industrial grossa.....	68
Tabela 18: % Retida Acumuladas Peneiras ABNT Brita.....	69
Tabela 19: Resultado Ensaio de Caracterização Brita.....	69
Tabela 20: Características da Sílica Ativa.....	70
Tabela 21: Características do Aditivo.....	70
Tabela 22: Resistência à compressão do concreto de alto desempenho com e sem adição de sílica ativa.....	72
Tabela 23 – Resistência à compressão aos 28 dias dos concretos de alto desempenho com e sem adição de sílica ativa - análise estatística.....	72
Tabela 24: Módulo de elasticidade do concreto de alto desempenho com e sem adição de sílica ativa.....	76

Tabela 25: Resistência à tração por compressão diametral do concreto de alto desempenho com e sem adição de sílica ativa.....	77
Tabela 26: Absorção de água e índice de vazios do concreto de alto desempenho com e sem adição de sílica ativa.....	80
Tabela 27 – Análise qualitativa do índice de vazios e absorção de água.....	81
Tabela 28: Absorção de água por capilaridade do concreto de alto desempenho com e sem adição de sílica ativa.....	83
Tabela 29: Perdas de Massa dos concretos após o ataque ácido.....	86
Tabela 30: Resistência à compressão dos concretos antes e após o ataque por ácido sulfúrico.....	91
Tabela 31: Absorção de água dos concretos após o ataque ácido.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – Relação água/cimento

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ACI - American Concrete Institute

ARI – Alta Resistencia Inicial

CAD – Concreto de Alto Desempenho

CP – Corpo de prova

CP I – Cimento Portland tipo I

CP I-S - Cimento Portland tipo I com adição de Filler calcário

CP II-E – Cimento Portland tipo II com Adição de escoria de alto forno

CP II-F – Cimento Portland tipo II com adição de Filler

CP II-Z – Cimento Portland tipo II com Adição de Pozolana

CP III – Cimento Portland de Alto Forno

CP IV – Cimento Portland Pozolânico

CP V – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

CP-BC – Cimento Portland Branco

GPa – Giga Pascoal

MPa – Mega Pascoal

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

RS – Resistente a Sulfatos

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3 – Óxido de Alumino

CaO – Óxido de Cálcio

CaSO_4 – Sulfato de Cálcio

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ – Hidróxido de Cálcio

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

C_2S – Silicato Dicálcio

C_3A – Aluminato Tricálcio

C_3S – Silicato Tricálcio

C_4AF – Ferro Aluminato Tetracálcio

H_2O – Água

H_2SO_4 - Ácido sulfúrico

SiO_2 – Óxido de Silicio

$^{\circ}\text{C}$ - Celsius

% - Porcentagem

μ – micro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVO	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 Concreto	20
3.2 Materiais componentes do concreto	21
3.2.1 <i>Cimento e Agregados</i>	21
3.3 Adições Minerais	27
3.5 Aditivos químicos	37
3.6 Concreto de alto desempenho	39
3.7 Resistência mecânica do concreto	41
3.8 Controle tecnológico do concreto	47
3.8.1 <i>Dosagem</i>	47
3.8.2 <i>Cura do concreto</i>	50
3.9 Durabilidade do Concreto	51
3.9.1 <i>Permeabilidade e absorção</i>	51
3.9.2 <i>Durabilidade do concreto</i>	54
3.10 Concreto submetido à ataques	56
3.11 Sistema de proteção superficial	57
4. METODOLOGIA	60
4.1 Caracterização dos materiais	60
4.1.1 <i>Cimento e Agregados</i>	60
4.2 Composição de métodos de dosagem	61

4.3	Produção dos concretos	62
4.4	Análise dos concretos no estado fresco	63
4.5	Análise dos concretos no estado endurecido	64
4.5.1	<i>Moldagem dos corpos de prova</i>	64
4.6	Ataque por ácido aos concretos	65
4.7	Perdas de massa	65
4.8	Sistema de proteção superficial	66
5.	RESULTADOS	68
5.1	Materiais Constituintes	68
5.1.1	<i>Cimento e Agregados</i>	68
5.1.2	<i>Sílica Ativa</i>	71
5.1.3	<i>Aditivo</i>	71
5.1.4	<i>Água</i>	72
5.2	Dosagem	72
5.3	Resistência Mecânica do Concreto	72
5.4	Permeabilidade e Índice de Vazios	80
5.5	Perdas de massa e inspeção visual dos concretos após o ataque por ácido	86
5.6	Resistência à compressão dos concretos após o ataque	91
5.7	Influência da absorção de água dos concretos antes e após ataque ácido	93
6.	CONCLUSÃO	95
	REFERÊNCIAS	97

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material extremamente versátil, capaz de se adaptar a diferentes locais e aplicações, principalmente quando comparado a outros materiais, apresentando elevada resistência e durabilidade, desde que bem dosado e com a escolha correta dos seus componentes. Fatores relacionados a porosidade do concreto estão diretamente relacionados a sua durabilidade, com isto, um concreto impermeável pode ser considerado durável.

A partir de pesquisas, foram adicionados ao concreto materiais que geram características especiais como, ganho de resistência, durabilidade e conseqüentemente aumento da sua vida útil, como é o caso das adições minerais, as quais tem o poder de alterar a reologia do concreto no estado fresco, suas características mecânicas e físicas.

Com o advento de tais materiais foram criados os concretos de alto desempenho, que tem como principal atributo, a alta performance de resistência, atingindo valores superiores a 60,0MPa aos 28 dias. Além de apresentarem elevados valores de resistência à compressão, possuem alta plasticidade, o que agiliza a execução da concretagem e a possibilidade de produção de peças mais delgadas. Por possuírem uma matriz mais impermeável os concretos de alto desempenho apresentam uma excelente durabilidade. A permeabilidade de um concreto é o principal determinante da vulnerabilidade aos agentes externos, logo, para um concreto ser durável, ele precisa ser impermeável.

Desta forma, a análise da influência da adição de sílica ativa em concretos de alto desempenho se torna uma interessante maneira de buscar melhorias nas propriedades físicas e mecânicas de concretos de alto desempenho, em busca de aperfeiçoar suas características, promover ganhos econômicos e ambientais.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a durabilidade do concreto de alto desempenho com e sem adição de sílica ativa, submetidos a um meio agressivo, a partir das seguintes etapas:

- Elaboração de estudos de dosagem para a formulação de concretos de alto desempenho, avaliando a adição de sílica ativa, com o propósito de atingir uma resistência à compressão superior a 60 MPa e otimizar a sua performance mecânica e durabilidade;
- Produção e seleção dos concretos aliando a resistência proposta aos requisitos de durabilidade;
- Realização de ensaios de absorção de água por imersão para verificar a influência da porosidade na vulnerabilidade dos concretos ao ingresso do agente agressivo avaliado;
- Avaliação da degradação dos concretos, após imersão em ácido sulfúrico durante sete dias.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desenvolvimento de um concreto durável está diretamente relacionando à qualidade dos materiais utilizados em sua produção, aos cuidados durante sua dosagem, processo de fabricação, na sua aplicação e por último em sua utilização durante sua vida útil.

Recentemente, após a constatação de diversos problemas ligados a durabilidade do concreto, tanto em edificações mais antigas, quanto em edificações recentes, a questão da durabilidade do concreto vem sendo o tema de diversas pesquisas, com o objetivo de entender melhor o processo de degradação das estruturas e de forma a garantir a sua utilização por longos períodos.

3.1 Concreto

O concreto é um material composto amplamente utilizado na Construção Civil, sua obtenção é por meio da mistura de cimento Portland, agregados e água, podendo ou não ter a presença de aditivos e adições, o que pode influenciar em seu desempenho. A dosagem do concreto é responsável pela proporção de seus componentes de maneira a atender às necessidades requeridas de resistência, trabalhabilidade, impermeabilidade e durabilidade, tais propriedades são as principais características do concreto. A resistência mecânica do concreto normalmente fornece uma indicação geral de sua qualidade por estar diretamente relacionada à estrutura da pasta de cimento endurecida. (Mehta, 2014; Ribeiro et al., 2013).

O concreto no estado fresco deve apresentar trabalhabilidade adequada às condições de utilização, definidas pelo transporte, lançamento e adensamento (NEVILLE, 2016). No estado endurecido o concreto deve ter características principalmente aos esforços mecânicos a que será submetido e pelas questões que estão relacionadas à sua durabilidade.

De acordo com o tipo de utilização do concreto, características específicas podem ser obtidas em função dos seus materiais constituintes (Ribeiro et al., 2013). Concretos

que possuem em sua composição a utilização de adições minerais e superplastificantes apresentam características específicas e são conhecidos como concretos de alto desempenho, sendo sua principal característica aliar a alta resistência e durabilidade (Amaral, 1992). A utilização de adições minerais para melhorar as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido conseqüentemente torna o concreto de alto desempenho mais econômico e ecológico (Aitcin, 2003).

3.2 Materiais componentes do concreto

A correta escolha dos materiais que compõem o concreto tem influência direta na sua qualidade, implicando em uma maior ou menor durabilidade e desempenho.

3.2.1 Cimento e Agregados

O cimento é um aglomerante amplamente utilizado na construção civil e mundialmente conhecido como cimento Portland, que é um pó finamente moído de coloração acinzentado, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, o qual apresenta inúmeras propriedades e características, destacando a sua capacidade de ser moldável quando misturado com água e ser capaz de desenvolver elevadas resistências mecânicas ao longo do tempo. Sua denominação é decorrente da semelhança com a pedra de Portland, calcário extraído em Dorset, na Inglaterra (Ribeiro et al., 2013; Neville, 2016).

O cimento Portland é produzido a partir da moagem de um produto denominado clínquer, o qual é obtido pela calcinação de uma mistura de cálcio e sílica, provenientes do calcário e argila, respectivamente. A reação de calcinação ocorre em temperaturas próximas de 1450 °C, e após concluída ocorre a formação do clínquer, o qual é moído juntamente com aproximadamente 5% de sulfato de cálcio ou gipsita, a fim de controlar as reações iniciais de endurecimento do cimento (Ribeiro et al., 2013; Mehta e Monteiro, 2014).

A Tabela 01 apresenta a sequência de reações no processo de fabricação do cimento Portland.

Tabela 01 – Sequência de reações no processo de fabricação do cimento Portland

Temperatura	Processo
Até 100 °C	Evaporação da água livre.
100 °C - 500 °C	Calcinação das Argilas
500 °C - 900 °C	Modificações estruturais nos silicatos Decomposição dos carbonatos
900 °C - 1200 °C	Reação de CaO com os sílico-aluminatos
>1280 °C	Formação dos compostos do cimento - clínquerização

Fonte: Ribeiro et al., 2013.

O clínquer possui uma série de compostos químicos em sua composição, os quais apresentam propriedades distintas no processo de hidratação do cimento Portland (Ribeiro et al., 2013). A Tabela 02 apresenta os principais compostos químicos do clínquer e suas propriedades.

Tabela 02 – Principais compostos químicos do clínquer

Compostos	Fórmula química	Abrev.	Propriedades específicas decorrentes dos compostos do clínquer.
Silicato tricálcio	3CaO.SiO ₂ 50 - 65%	C ₃ S	Endurecimento rápido Alto calor de hidratação Alta resistência inicial
Silicato dicálcio	2CaO.SiO ₂ 15 - 25%	C ₂ S	Endurecimento lento Baixo calor de hidratação Baixa resistência inicial
Aluminato tricálcio	3CaO.Al ₂ O ₃ 6 - 10%	C ₃ A	Pega muito rápida, controlado com adição de gesso Suscetível ao ataque de sulfatos Alto calor de hidratação, alta retração Baixa resistência final.
Ferro aluminato tetracálcio	4CaO.Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ 3 - 8%	C ₄ AF	Endurecimento lento, resistente a meios sulfatados Não apresenta contribuição para a resistência Coloração escura.
Cal livre	CaO 0,5 - 1,5%	C	Aceitável em pequenas quantidades Em quantidades maiores causa aumento de volume e fissuras

Fonte: Ribeiro et al., 2013.

Além dos diferentes tipos de compostos químicos encontrados no clínquer, na produção individual de cada tipo de cimento é possível encontrar diferentes composições, as quais fornecem aos cimentos características e aplicações distintas. A NBR 16697:2018 determina que os cimentos Portland são designados por seu tipo que correspondem a adições e propriedades especiais, são identificados por suas siglas, seguidas de sua classe de resistência, sendo os principais tipos apresentados na Tabela 03:

Tabela 03 – Designação, sigla e classe do cimento Portland conforme NBR 16697:2018

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland Comum	Sem adição	CP I		
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland Composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F	25, 32 ou 40	RS ou BC
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI	

Fonte: NBR 16697:2018 – Cimento Portland – Requisitos.

- Cimento Portland Comum – CP I pode possuir em sua composição a adição de filler calcário (CP I-S);
- Cimento Portland Composto – CP II possui em sua composição a adição de algum dos seguintes compostos, escoria de alto-forno (CP II-E), pozolana (CP II-Z) e material carbonático (CP II-F);
- Cimento Portland de Alto-Forno – CP III possui em sua composição a adição de escoria de alto-forno, e apresenta baixo calor de hidratação;

- Cimento Portland Pozolânico – CP IV possui em sua composição a adição de material pozolânico;
- Cimento Portland de alta resistência inicial – CP V-ARI possui em sua composição apenas a adição de material carbonático.

A Tabela 04 apresenta a composição e os respectivos limites definidos pela NBR 16697:2018 para cada tipo de cimento.

Tabela 04 – Limites de composição do cimento Portland

Tipos de Cimento Portland	Sigla	Composição (% de massa)			
		Clínquer	Escória granulada de alto-forno	Material Pozolânico	Material carbonático
Comum	CP I	95 - 100		0 - 5	
Comum (com adição)	CP I - S	90 - 94	0	0	6 - 10
Composto com escória	CP II - E	51 - 94	6 - 34	0	0 - 15
Composto com Pozolana	CP II - Z	71 - 94	0	6 - 14	0 - 15
Composto com material carbonático	CP II - F	75 - 89	0	0	11 - 25
Alto-forno	CP III	25 - 65	35 - 75	0	0 - 10
Pozolânico	CP IV	45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
Alta Resistência Inicial	CP V - ARI	90 - 100	0	0	0 - 10

Fonte: NBR 16697:2018.

Agregado é a denominação genérica dada aos materiais que são acrescentados ao cimento e água para obter as argamassas e os concretos. Eles apresentam forma granular como as areias e britas, devendo ser inertes, de maneira a não provocar reações indesejáveis nas argamassas e concretos. Os agregados constituem aproximadamente 70% do volume total dos produtos em que são utilizados, desempenhando, um importante papel do ponto de vista do custo total dos mesmos (Ribeiro et al., 2013).

Os agregados apresentam características relevantes a serem consideradas durante a dosagem e produção de concretos, sendo elas, composição ou distribuição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial, resistência à compressão, modulo de elasticidade e tipo de substâncias deletérias presentes. Tais características são resultantes da composição mineralógica da rocha de origem, da exposição a qual a rocha foi submetida antes da produção do agregado e do tipo de equipamento utilizado para a produção do agregado (Mehta e Monteiro, 2014).

Os agregados podem ser obtidos diretamente na natureza, em leitos de rios ou barrancos, como as areias e pedregulhos, ou por meio de processos artificiais, como a fragmentação ou trituração de materiais provenientes de extração, como as britas e areais artificiais (Ribeiro et al., 2013).

A Tabela 05 apresenta a classificação dos agregados segundo seu processo de obtenção.

Tabela 05 – Classificação dos agregados segundo a sua obtenção

Classificação	Obtenção	Exemplo
Naturais	Rochas fragmentadas pela ação do vento, das chuvas, das variações de temperatura, etc. e encontradas na natureza sob a forma de agregados.	Areias e pedregulhos
Artificiais	Materiais que foram fragmentados ou triturados com auxílio de britadores ou outro meio artificial;	Areais artificiais e britas de granito, gnaisse, calcário, etc.

Fonte: Ribeiro et al., 2013.

A classificação dos agregados de acordo com a dimensão das partículas, massa específica ou origem gerou uma terminologia especial. Os agregados graúdos são aqueles que apresentam partículas maiores que 4,75 mm, já os agregados miúdos são aqueles que apresentam partículas menores que 4,75 mm. Em geral as partículas dos agregados graúdos variam de 4,75 mm a 50 mm, já os agregados miúdos apresentam partículas variando de 75 µm a 4,75 mm (Mehta e Monteiro, 2014).

A grande maioria dos agregados apresentam massa unitária variando de 1520 a 1680 kg/m³, os quais são capazes de produzir concretos com densidade de aproximadamente 2400 kg/m³. Para situações especiais, agregados de densidade maior ou menor podem ser utilizados para a produção de concretos leves ou pesados. Geralmente os agregados leves são aqueles que apresentam massa unitária menor do que 1120 kg/m³ e os agregados pesados apresentam massa unitária maior que 2080 kg/m³ (Mehta e Monteiro, 2014).

Outra forma de classificar os agregados é segundo a forma dos grãos, o que influencia diretamente nas características dos produtos em que são empregados, ou seja, argamassas e concretos, principalmente no que se refere à sua trabalhabilidade. A Tabela 06 apresenta a classificação dos agregados segundo a forma dos grãos.

Tabela 06 – Classificação dos agregados segundo a forma dos grãos

Forma	Descrição	Exemplo
Arredondados	Completamente erodido por água ou por atrito	Seixos ou areias de rio ou de praia
Angulosos	Com arestas bem definidas	Pedras britadas de todo o tipo
Irregulares	Irregularidade natural	Seixos de escavação

Fonte: Ribeiro et al., 2013.

Durante o processo de dosagem do concreto é importante conhecer certas características dos agregados. A porosidade ou massa específica, composição granulométrica, forma e textura superficial determinam as propriedades do concreto no estado fresco. A massa específica e composição mineralógica do agregado afeta a resistência, dureza, módulo de elasticidade e sanidade que, influenciam em várias propriedades do concreto endurecido (Mehta e Monteiro, 2014).

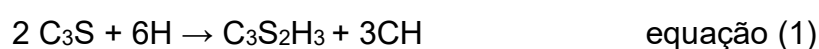
Outra importante característica dos agregados é a sua reatividade potencial, isto é, a possibilidade de vir ocorrer reações álcalis-agregados, ou seja, reações prejudiciais entre os agregados e a pasta de cimento que os envolve. O tipo mais comum de reação é entre os hidróxidos originados dos álcalis (Na₂O e K₂O) do cimento e alguns minerais silicosos do agregado. Esta reação provoca expansões, fissurações e outras manifestações prejudiciais às estruturas de concreto (Ribeiro et al., 2013).

3.3 Adições Minerais

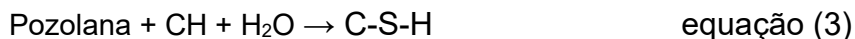
As adições minerais geralmente são materiais silicosos finamente divididos, normalmente adicionados ao concreto em quantidades variando de 6 até 70% por massa de material cimentício total. Embora as adições de origem naturais em estado bruto ou após ativação térmica são usadas em algumas partes do mundo, devido a aspectos econômicos e ambientais, muitos subprodutos industriais têm se tornado fonte primária de adições minerais no concreto (Mehta e Monteiro, 2014). Com controle de qualidade adequado, grandes quantidades de muitos subprodutos industriais podem ser incorporados ao concreto, em forma de cimento Portland composto ou como adição mineral (Mehta e Monteiro, 2014).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) os motivos pelos quais a reação pozolânica exerce um efeito benéfico nas propriedades do concreto é a mesma, independe do fato de o material pozolânico ser adicionado ao concreto em forma de adição, ou como componente de um cimento Portland composto.

As reações de hidratação do cimento Portland, que são reações químicas entre os silicatos e aluminatos com água, ocorrem quase que instantaneamente à medida que se adiciona água ao cimento (Neville, 2016). Os principais constituintes do cimento são: silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato 11 tetracálcico (C_4AF). O C_3S , responsável pela resistência inicial e pelo aumento da resistência final da pasta, apresenta uma rápida hidratação e desprende uma quantidade média de calor, comparado as outras fases. O C_2S , por sua vez, é responsável pelo aumento da resistência nas idades avançadas, apresenta uma lenta hidratação e desprende uma quantidade pequena de calor. A hidratação dos dois compostos produz silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH). As reações estão descritos nas Equações 01 e 02.



Quando materiais pozolânicos são acrescentados à mistura, durante a hidratação do cimento, a sílica (SiO_2) e/ou alumina (Al_2O_3) amorfas, presentes nestes materiais, reagem com o hidróxido de cálcio (CH), resultante do processo de hidratação do cimento, formando C-S-H e C-A-H, de acordo com a Equação 3



De forma simplificada, a reação do hidróxido de cálcio com a pozolana pode variar segundo fatores como: conteúdo da pozolana, teor de SiO_2 ativa na mistura, natureza das fases ativas da pozolana, taxa de reação, área superficial da pozolana, relação de sólidos por água e temperatura da mistura (Cordeiro, 2006).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), para pastas de cimento com idades entre 3 e 12 meses o teor referente à quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é da ordem de 15 a 25%, estando a amostra sem adição de sílica ativa de acordo com o indicado pelos autores. Zelic et al., (2000), ao investigarem a cinética da hidratação de pastas cimentícias contendo diferentes teores de sílica ativa, observaram que a presença de sílica ativa aumenta levemente o grau de hidratação da matriz cimentícia nas primeiras idades, servindo como pontos de nucleação para a precipitação de produtos hidratados. Os autores observaram ainda o início das reações pozolânicas após 3 dias de hidratação e sua continuidade até 28 dias.

Em contrapartida, Neithalath et al., (2009) e Bhattacharya e Harish (2018) observaram que a incorporação de sílica ativa em teores de substituição de até 12% reagem com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento já nas primeiras idades (1-3 dias).

De acordo com Papadakis (1999), o hidróxido de cálcio dos compósitos cimentícios contendo sílica ativa é consumido desde o início da hidratação do cimento, logo, o teor de hidróxido de cálcio da matriz cimentícia passa por um ponto máximo entre o 10° e 30° dia de hidratação e, posteriormente, apresenta uma diminuição conforme reação pozolânica prossegue.

Os efeitos físicos gerados pelas pozolanas no concreto tem uma enorme influência nas suas propriedades mecânica, sendo os seguintes:

- Efeito microfíler: Tem a capacidade de promover o preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições;

- Refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento: As pequenas partículas das pozolanas podem agir como pontos de nucleação para os produtos hidratados proveniente da hidratação do cimento. O crescimento dos cristais ocorrerá também nos poros ocupados pela pozolana e pela água, e irá restringir o espaço para o crescimento dos cristais, gerando muitos cristais pequenos ao invés de poucos cristais grandes;

- Alteração da Microestrutura da zona de transição: como as pozolanas são muito finas, ela interfere na movimentação das partículas de água em relação aos sólidos da mistura, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que fica retido sob os agregados.

A inclusão das adições minerais ao concreto em substituição ao cimento acarreta vantagens como, por exemplo, melhoria da trabalhabilidade, durabilidade à fissuração térmica e à ataques químicos e aumento da resistência mecânica (MEHTA et al., 2014). Essas mudanças nas propriedades dos materiais cimentícios produzidos com adições minerais podem ser ocasionadas por efeitos químicos e físicos (CORDEIRO, 2006). Os efeitos químicos são resultados das reações pozolânicas retratadas anteriormente e os efeitos físicos são classificados como: diluição do cimento Portland, efeito fíler e nucleação heterogênea.

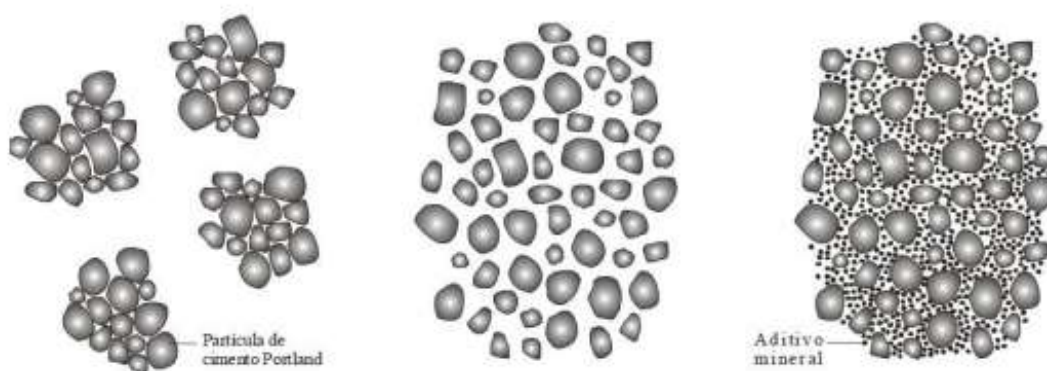
A diluição ocorre quando há a substituição de uma quantidade de cimento por uma adição mineral, aumentando a relação água/cimento (Lawrence et al., 2003). Esse efeito pode ocorrer de duas formas distintas. A primeira consiste na substituição de uma parcela do cimento pela adição e a segunda seria apenas acrescentar a adição mineral. Ambas as formas geram uma diluição do cimento Portland na mistura. A

inclusão de partículas finas e ultrafinas gera à mistura uma maior compacidade, denomina-se essa ação de efeito filler.

A Figura 01 ilustra o efeito filler em uma pasta com cimento Portland, água, adição mineral e um aditivo químico superplastificante. Na Figura 1- a, tem-se cimento e água formando uma pasta, em que, devido às forças atrativas de origens eletrostáticas as partículas se encontram aglomeradas formando grandes vazios capilares, o que reduz a probabilidade de partículas de cimentos serem totalmente hidratadas.

Acrescentando-se a mistura um aditivo superplastificante há uma dispersão das partículas de cimento, contribuindo para uma hidratação completa (Figura 1 - b). Na Figura 1- c, pode-se observar que a incorporação do aditivo mineral promove o preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento, promovendo assim, uma maior compacidade a mistura (Cordeiro, 2006).

Figura 1 (a, b, c) - Representação esquemática de partículas de cimento Portland, (a) sem aditivos, (b) com aditivos superplastificante, (c) adicionando aditivo mineral fino



Fonte: (Cordeiro, 2006).

O terceiro efeito físico gerado pela incorporação da adição mineral é a nucleação heterogênea. Quando partículas muito finas são acrescentadas ao cimento Portland há uma facilidade destas se alojarem nos interstícios dos cristais de clínquer. Isso gera um aumento na superfície efetiva de contato, acelerando as reações de hidratação dos compostos (Cordeiro, 2006).

A partir da reação pozolânica e o efeito físico entre o cimento e as adições minerais se têm os seguintes benefícios, diminuição do calor de hidratação, melhora da resistência à fissuração térmica, aumento da resistência final e impermeabilidade devido ao refinamento dos poros, fortalecimento da zona de transição na interface, e uma durabilidade muito maior no que diz respeito ao ataque por sulfatos e à expansão pela reação álcali-agregado (Mehta e Monteiro, 2014).

Assim sendo, a principal propriedade de uma pozolana é a sua capacidade de reagir e se combinar com o hidróxido de cálcio, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como: silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Dessa forma, em compostos, a base de cimento Portland, o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação dos silicatos reage com a pozolana, utilizada como adição ao cimento, resultando em uma produção extra de silicatos de cálcio hidratados, que são produtos mais estáveis do cimento hidratado (OLIVEIRA e BARBOSA, 2006). A NBR 12653:2014, especifica os requisitos químicos e físicos que os materiais pozolânico devem estar em conformidade, elas estão apresentadas nas Tabelas 07 e 08.

Tabela 07 – Requisitos químicos das pozolanas

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
SiOSiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ - % min.	70	70	50
SO₃ - % máx.	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade - % máx	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo - % máx	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis- % máx	1,5	1,5	1,5

Classe N - pozolanas naturais e artificiais, classe C - cinza volante, classe E - qualquer pozolana cujo requisitos diferem das classes anteriores.
Fonte: ABNT NBR 12653:2014.

Tabela 08 – Requisitos físicos das pozolanas

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45 µm - % máx.	20	20	20
Índice de desempenho com o cimento aos 28 dias, em relação ao controle - % mín.	90	90	90
Atividade pozolânica com a cal aos 7 dias - em MPa	6,0	6,0	6,0

Classe N - pozolanas naturais e artificiais, classe C - conza volante, classe E - qualquer pozolana cujo requisitos diferem das classes anteriores.

Fonte: ABNT NBR 12653:2014.

De acordo com a NBR 13956:2012 a sílica ativa é um material decorrente do processo de produção de silício metálico ou de ligas de ferro-silício 75% em fornos elétricos, no qual, durante o seu processo é gerado o gás SiO que, ao sair do forno e em temperatura ambiente, oxida-se formando partículas de SiO₂, as quais, são captadas por sistemas de filtros.

A sílica ativa é considerada uma pozolana de alta reatividade constituída essencialmente de partículas esféricas com diâmetros menores que 10⁻⁶m de sílica no estado amorfo. Do ponto de vista químico a sílica ativa é considerada um produto homogêneo, apresentando teores de SiO₂ superiores a 85% e diâmetros menores que 1µm, sendo adequado seu uso em compósitos de cimento Portland (NBR 13956:2012).

Segundo Neville (2016) a sílica ativa pode ser considerada uma adição com propriedades cimentícias, já que reagem principalmente com o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação dos silicatos do cimento.

Por possuir uma elevada área superficial, a sílica ativa melhora os aspectos reológicos do concreto no estado fresco através da otimização da distribuição granulométrica da pasta, contribuindo na retenção de água, aumentando a coesão, reduzindo a segregação e exsudação e melhora no acabamento. Ao reagir com o Ca(OH)₂ resultante da hidratação do cimento Portland, forma silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, fornecendo ao concreto propriedades especiais relacionadas à

durabilidade e ao desempenho mecânico, quando comparado a concretos sem a presença de sílica, tais como:

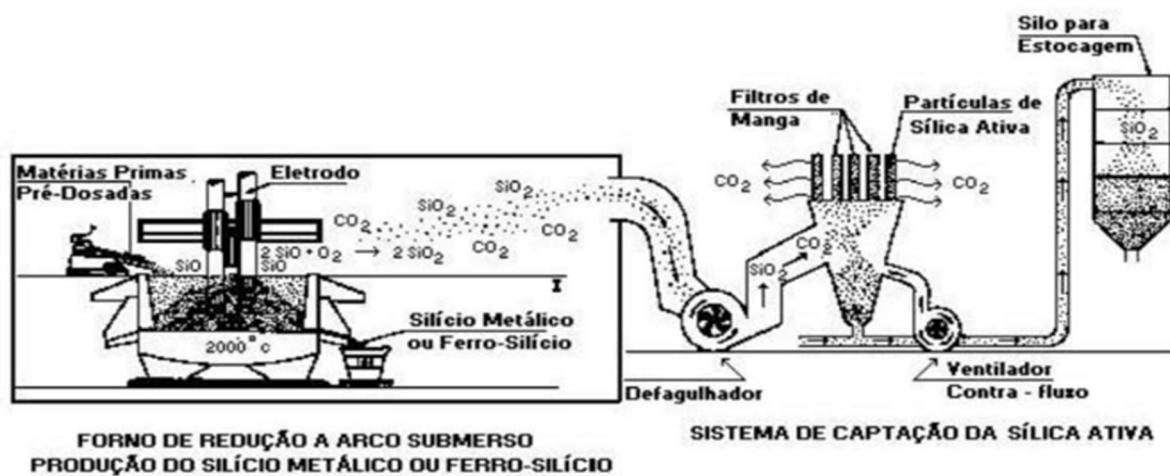
- aumento da resistência à compressão e flexão;
- redução da porosidade e permeabilidade;
- aumento da resistência a sulfatos;
- resistência à difusibilidade de íons e cloreto;
- mitigação da reação álcali-agregado;
- redução da ocorrência de eflorescência;
- aumento da resistividade elétrica.

Durante a produção do silício metálico ou ferro silício em fornos de redução ocorre à formação de uma fumaça densa constituída por gases e pequenas partículas (pó). Este pó, juntamente com o gás carbônico gerado, é muitas vezes lançado ao meio ambiente, constituindo-se em mais uma fonte poluidora. Quando, entretanto, passam por um processo de captação, além do benefício ambiental, originam um material que é hoje reconhecido na construção civil, como “uma adição pozolanica bem estabelecida que possa contribuir de forma ímpar nas propriedades dos produtos de cimento Portland” (Khayat e Aitcin, 1993).

A poeira contida na fumaça é constituída por pequenas partículas de sílica amorfa, contendo, na maioria das vezes, um teor de SiO_2 maior que 85%, as quais são denominadas de sílica ativa. Este subproduto em forma de pó é amplamente utilizado na indústria da construção civil, uma vez que o seu tamanho bastante reduzido (alta superfície específica) e o alto teor de sílica amorfa o tornam um excelente material pozolânico (IKulakowski, 2002).

A Figura 02 apresenta o esquema de produção do silício metálico e a captação da sílica ativa.

Figura 02 – Esquema de produção do silício metálico e captação da sílica ativa



Fonte: Dal Molin, 1995.

O uso inicial da sílica ativa no cimento teve como objetivo redução de custos, substituindo parte do cimento por este resíduo industrial (Maage e Sellevoldo, 1987). Porém, a sílica ativa vem sendo empregada para obtenção concretos com desempenho, durabilidade e propriedades mecânicas mais elevadas, através da sua adição ao concreto em relação à massa de cimento. O uso concomitante de adições de sílica ativa com aditivos superplastificantes e baixas relações água/aglomerante vem contribuindo para melhorar as propriedades do concreto (Malhotra et al., 1982).

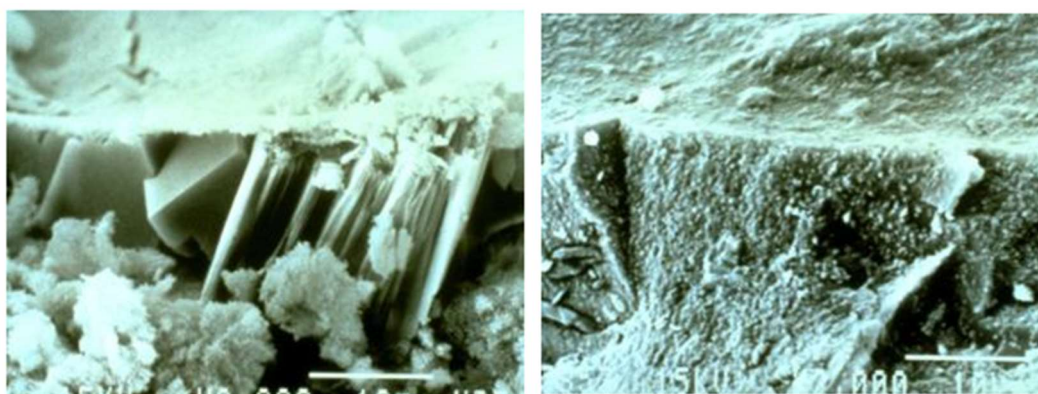
A sílica ativa apresenta um elevado índice de pozolanicidade com o cimento, o qual Mehta (1993) se refere à sílica ativa como sendo uma super pozolana em consequência de sua elevada reatividade e por não sofrer variabilidade na composição e heterogeneidade nas características mineralógicas, quando mantida a mesma fonte de captação. A alta superfície específica da sílica contribui para sua elevada reatividade.

A sílica ativa possui ação química como material pozolânico de alta reatividade, por ser constituída de sílica amorfa e ter grande superfície específica (13.000 a 30.000m²/kg). Reagindo com enorme rapidez com o hidróxido de cálcio formado durante o processo de hidratação do cimento. Esta reação dá origem a um composto

resistente de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), semelhante ao formado pela reação do cimento, que é o maior responsável pela resistência da pasta.

A sílica ativa é capaz de se ligar ao hidróxido de cálcio que é altamente frágil quando em contato com soluções ácidas, formado silicato de cálcio, que além de contribuir para a resistência, todo esse processo fecha os poros do concreto, contribuindo para a resistência a ambientes agressivos. A Figura 03 apresenta um concreto sem sílica ativa e um concreto com sílica ativa respectivamente, demonstrando a diferença de porosidade entre eles.

Figura 03 – Concreto sem e com sílica ativa respectivamente



Fonte: Tecnosil Brasil.

Segundo Kramar e Ducman (2018), a reatividade da sílica ativa é caracterizada por dois parâmetros. O primeiro consiste na quantidade máxima de cal quimicamente fixada pela adição pozolânica, sendo este, influenciado pelos parâmetros químicos do material, como, qualidade, natureza e quantidade de fases ativas presente no material. O segundo parâmetro é a taxa de reatividade do material, sendo este influenciado pelos parâmetros físicos do material, como, tamanho das partículas, área específica superficial, relação água/sólidos e temperatura de cura (Carneiro et al., 2018) e (Ramanathan et al., 2019).

Devido a sua elevada finura e a presença de forças coesivas interparticulares (forças de Van der Waals), a sílica ativa possui uma forte tendência de formar aglomerados com elevada resistência à dispersão. Carneiro et al., (2018) e RÊGO et al., (2019)

observaram, por microscopia eletrônica de varredura (MEV), a aglomeração da sílica ativa formada por partículas menores do material. A presença de aglomerações pode comprometer a reatividade do material e, conseqüentemente, as melhorias propiciadas pela sua incorporação. Com isto, a associação da utilização da sílica ativa juntamente a aditivos superplastificantes, proporciona uma melhor dispersão do material, otimizando seus ganhos.

O seu efeito químico está relacionado com as reações pozolanas, que é a reação da sílica com o hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2 , formando durante a hidratação do cimento Portland, formando produtos cimentante adicional (Silicato de cálcio hidratado – C-S-H).

De acordo com Dal Molin (1995), a sílica ativa apresenta reações rápidas e pouco variáveis o que possibilita períodos de cura mais curtos para atingir as resistências e estrutura de poros desejada, quando são comparadas a outros tipos de materiais pozolânicos.

Neville (2016) observa que o principal efeito da sílica ativa é a redução da penetrabilidade na matriz de cimento hidratado, em função da interrupção na comunicação entre os poros pela ação da sílica ativa, sem que ocorra a redução da porosidade total.

Além dos efeitos químicos nas características do concreto, a sílica ativa exerce também efeitos físicos. O efeito microfíler acontece exatamente pelo tamanho das partículas de sílica ativa, que se introduzem entre os grãos de cimento e se alojam nos interstícios da pasta, reduzindo o espaço disponível para água e atuando como ponto de nucleação. Segundo Amaral (1988), a quantidade de partículas de sílica ativa por partícula de grão de cimento é da ordem de 50.000 para uma adição de 10% de sílica ativa por massa de cimento.

3.5 Aditivos químicos

Aditivos são produtos que adicionados ao concreto, tem como função melhorar o seu desempenho, dentre os inúmeros tipos de aditivos existentes, os mais utilizados são os aditivos plastificantes e superplastificantes (que tornam o concreto mais trabalhável, facilitando o seu adensamento), os aditivos aceleradores e retardadores de pega (que permitem regular o período do manuseio do concreto, acelerando ou retardando o seu endurecimento), os aditivos impermeabilizantes e muitos outros, tais como: agentes redutores de água, incorporadores de ar expansores, ligantes, redutores da reação álcali-agregados, fungicidas, germicidas, inseticidas e colorantes (Ribeiro et al., 2013).

Os aditivos superplastificantes são uma categoria especial dos aditivos redutores de água que permitem grandes reduções na quantidade da água da mistura para se obter um dado abatimento ou permitem o aumento considerável da trabalhabilidade da mistura (Hartmann, 2003; Mehta e Monteiro, 2014).

Estes são os mais recentes e eficientes aditivos redutores de água, normalmente os teores de dosagens são maiores que os redutores de água convencionais e seus efeitos colaterais são reduzidos (Neville, 2016).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) os aditivos superplastificantes são capazes de reduzir o conteúdo de água de três a quatro vezes em relação aos aditivos plastificantes, sem que haja retardamento no tempo de pega.

No início da década de 60 iniciou-se no Japão e na Alemanha a utilização dos aditivos superplastificantes em concretos (Aitcin, 2000. b). As primeiras aplicações de superplastificantes foram como fluidificastes, não com o objetivo de reduzir a água da mistura, mas com o objetivo de facilitar o lançamento do concreto sem risco de segregação. Somente a partir dos anos 80 foi que o superplastificante, utilizado em teores maiores que os recomendados pelos fabricantes, foi usado como um redutor de água de grande efeito.

O aditivo superplastificante atua diretamente sobre as partículas de cimento, caracterizando por sua ação defloculante ou dispersante. O cimento Portland em contato com a água tem uma tendência de flocular devido às forças eletrostáticas e forças de Van de Waals entre as partículas, onde pode ser aprisionada parte da água, ficando indisponível para a hidratação da superfície das partículas e para fluidificação da mesma. Os aditivos atuam no sentido de carregar as partículas de cimento equidirecionalmente, causando conseqüentemente a sua repulsão (Legrand e Wirquin, 1992).

Segundo Neville (2016) o aditivo superplastificante faz com que o cimento se disperse pela ação do ácido sulfônico adsorvido à superfície das partículas de cimento, tornando-as carregadas negativamente e, portanto, mutuamente repelentes. Isso aumenta a trabalhabilidade do concreto sem a necessidade de elevar sua relação água/cimento.

Segundo Melo (2000), as interações do cimento com o aditivo são influenciadas pela temperatura ambiente, da finura e composição do cimento, especialmente em relação aos teores de C_3A , SO_3 e álcalis, que controlam a formação de etringita. A compatibilidade entre o cimento e o aditivo é de fundamental importância. Concretos produzidos com superplastificantes apresentam resistências à compressão maiores se comparados com concretos de referência sem adição de superplastificante, pois as partículas de cimento são dispersas de uma maneira mais eficaz e há uma maior velocidade de hidratação do cimento sob a ação dos superplastificantes.

Os aditivos superplastificantes podem causar efeitos colaterais no concreto, podendo incorporar ar ou retardar a pega reduzindo a resistência à compressão nas primeiras idades, sendo necessários estudos prévios de dosagem. Quando comparados aos plastificantes comuns, os superplastificantes podem ser adicionados em teores mais elevados sem causar exsudação excessiva e retardamento de pega (Mehta e Monteiro, 2014).

Atualmente os principais aditivos empregados para a produção de concretos de alto desempenho são os aditivos a base de policarboxilatos, conhecidos como aditivos de

terceira geração ou hiperplastificantes. Estes aditivos possuem uma maior capacidade de redução de água, sendo esta superior a 25% e mantem a trabalhabilidade por um maior período de tempo em comparação aos aditivos superplastificantes de segunda geração. Alguns destes aditivos causam retardamento de pega conforme a dose empregada, entretanto existem também produtos que não afetam significativamente o tempo de início de pega mesmo com altas dosagens de aditivos (BIANCHINI, 2010).

A adição de sílica ativa no concreto não influencia significativamente a perda de abatimento, entretanto a combinação com aditivo superplastificante pode alterar as características de perda de abatimento do concreto, devendo ser efetuados estudos para avaliar estas características e procurar minimizar as perdas de abatimento (ACI 234R-96, 2005).

Quando se tem o objetivo de obter elevadas resistências para uma determinada trabalhabilidade, o uso de superplastificante pode resultar em uma redução de água na faixa de 25 a 35%. Como consequência, torna-se possível o uso de baixas relações água/cimento, de modo que se obtém concretos com resistências elevadas (Neville, 2016).

3.6 Concreto de alto desempenho

Convencionalmente materiais que apresentam uma maior durabilidade são chamados de produtos de alto desempenho, e este é o caso do (CAD). Pesquisas em laboratórios demonstraram que misturas adequadamente proporcionadas e curadas de concretos com a/c de 0,40 ou menos, demonstram pouca ou nenhuma permeabilidade, que é a propriedade mais desejada para a longa durabilidade das estruturas de concreto (Mehta e Monteiro, 2014).

O termo concreto de alto desempenho foi sugerido por Mehta e Aïtcin (1990) para misturas que possuíssem as três propriedades a seguir: alta trabalhabilidade, alta resistência e alta durabilidade.

Além das propriedades anteriores o ACI define que um concreto de alto desempenho é um concreto no qual certas características são desenvolvidas para aplicações em ambientes específicos, sendo elas: facilidade de aplicação, adensamento sem segregação, resistência nas primeiras idades, permeabilidade, densidade, calor de hidratação, tenacidade, estabilidade de volume e longa vida útil em ambientes agressivos (ACI Committee 211, 1991).

A produção dos concretos de alto desempenho foi facilitada com o desenvolvimento dos aditivos superplastificantes. A utilização de aditivos químicos possibilita a completa dispersão dos grãos de cimento, permitindo a obtenção de misturas mais trabalháveis com baixa relação a/c e, conseqüentemente aumentando significativamente sua resistência e durabilidade (Aïtcin, 2000b).

Além dos aditivos químicos outro grupo de materiais que veio a contribuir com a produção dos concretos de alto desempenho foram as adições minerais, como sílica ativa, cinza da casca de arroz, cinza volante, escoria de alto-forno, metacaulim e filler calcário. Essas adições possuem uma grande área específica e granulometria mais fina que o cimento que, por efeitos físicos e químicos, densificam a zona de transição, produzindo uma microestrutura mais densa e com menor índice de vazios (Silva, 2006). Com isto, de acordo com Mehta e Monteiro (2014) a impermeabilidade e a durabilidade são as principais características que definem o concreto de alto desempenho.

Vieira et al., (2008), verificou que tanto a diminuição da relação água/aglomerante quanto a adição de sílica ativa melhoram consideravelmente a resistência do concreto ante a ação de agentes agressores.

Quando comparado ao concreto convencional o concreto de alto desempenho apresenta uma microestrutura mais densa, homogênea e pouco cristalina, decorrente da melhoria da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado.

Os motivos pelos quais o concreto de alto desempenho apresenta uma melhoria da zona de transição estão relacionados à redução da relação a/c e da incorporação de

partículas com granulometria mais fina que o cimento, como é o caso da sílica ativa (Silva, 2000).

A estrutura da zona de transição, especialmente o volume de vazios e microfissuras presentes têm grande influência sobre a rigidez e módulo de elasticidade do concreto. No material composto a zona de transição serve de ponte entre os dois constituintes: a argamassa matriz e as partículas de agregado graúdo (Mehta e Monteiro, 2014). Um concreto com uma zona de transição mais densificada apresenta maior rigidez e elevado módulo de elasticidade como é o caso do concreto de alto desempenho.

Helene (1993) define que o concreto de alto desempenho é mais indicado para obras industriais sob ação de agentes agressivos como plataformas marítimas, tanques, reservatórios, obras enterradas e pisos sob ação de rejeitos nucleares. Sendo muito utilizados também em pavimentos de rodovias, reparos e recuperação de estruturas, vertedouros e dissipadores de barragem, entre outros tipos de construções.

Devido a sua baixa permeabilidade e alta resistência à compressão o CAD apresenta comportamento satisfatório sob a ação de ácidos. Quando submetido a ambientes ácidos o pH da estrutura apresentou apenas alteração numa faixa próxima à superfície, sem ocasionar queda de resistência à compressão significativa e sem comprometer a durabilidade da estrutura de curto a médio prazo (Santos et al., 2006).

3.7 Resistência mecânica do concreto

Segundo Mehta e Monteiro (2014) a resistência do concreto é a propriedade mais valorizada por projetistas e engenheiros no controle de qualidade. Nos sólidos, como é o caso do concreto, existe uma relação inversa fundamental entre porosidade e resistência.

A resistência de um material pode ser definida como a capacidade para resistir à tensão sem se romper. No concreto, a resistência está relacionada à tensão necessária para causar sua ruptura, sendo definida como a tensão máxima que a amostra de concreto pode suportar (Mehta e Monteiro, 2014).

A porosidade é um fator fundamental atuante sobre a resistência do concreto, porém na prática é uma propriedade difícil de ser calculada ou determinada, por estar relacionado ao grau de hidratação do cimento. Quando parcialmente hidratada a pasta contém um sistema interconectado de poros capilares e a consequência disso é uma menor resistência (Neville, 2016).

De acordo com Neville (2016), outros fatores influenciam na resistência do concreto, sendo eles, a influência do agregado na microfissuração, a relação água cimento, o grau de adensamento, a idade e a temperatura de cura, a relação agregado/cimento, a qualidade do agregado (granulometria, textura superficial, forma, resistência e rigidez), a dimensão máxima e a zona de transição.

A principal característica mecânica do concreto é a resistência à compressão, a qual está diretamente relacionada a dois importantes parâmetros: da relação água/cimento e do grau de adensamento. O valor da resistência à compressão é inversamente proporcional à relação água/cimento, desde que o concreto seja plenamente adensado e tenha recebido o mesmo procedimento de cura, ou seja, a quantidade de cimento ser constante, reduzindo apenas a quantidade de água, obtém-se um concreto com maior resistência à compressão (Brandt, 2008; Mehta e Monteiro 2014).

Segundo Neville (2016), durante o processo de mistura o agregado utiliza parte da água de amassamento para atingir a condição de saturada superfície seca, sendo assim devemos considerar a relação água/cimento efetiva que é calculada a partir da água de amassamento menos a água absorvida pelo agregado.

A NBR 8953:2015 classifica o concreto estrutural por grupos de resistência, sendo dividido em 2 grupos, em função da resistência característica à compressão especificada no projeto estrutural. A Tabela 07 especifica as classes de cada grupo, sendo que os concretos do grupo I considerados estruturais começam com f_{ck} 20MPa e vão até 50 MPa, os concretos do grupo II começam com resistência superior a 50MPa e atingem até 100MPa.

Tabela 09 – Classe de resistência do concreto estrutural

Grupo	Classe de Resistência	Resistência Característica à Compressão (MPa)
I	C20	20
	C25	25
	C30	30
	C35	35
	C40	40
	C45	45
	C50	50
II	C55	55
	C60	60
	C70	70
	C80	80
	C90	90
	C100	100

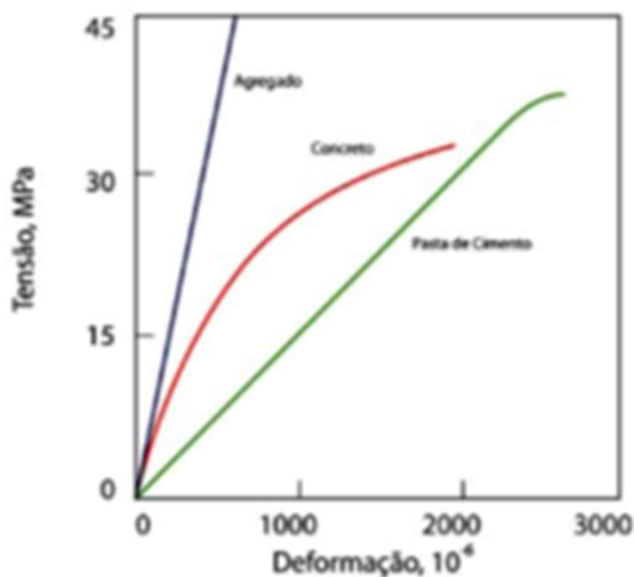
Fonte: ABNT NBR 8953:2015.

A NBR 12655:2022 define que os concretos classificados no grupo II são considerados concretos de alta resistência.

Outra importante característica é o módulo de elasticidade do concreto, sendo ele, um dos parâmetros utilizados nos cálculos estruturais, que relaciona a tensão aplicada à deformação instantânea obtida, conforme a NBR 8522:2021. Sob ação dos carregamentos e forças da natureza, as estruturas de concreto podem apresentar deformações que, por sua vez, podem ter como consequências patologias no elemento estrutural, como por exemplo, a ocorrência de fissuras (Battagin, 2008; Benetti, 2012).

A partir de curvas típicas tensão-deformação para agregado, pasta (cimento e água) endurecida e concreto, carregados e submetidos à compressão uniaxial, Figura 04 torna-se imediatamente aparente a constatação de que, em relação ao agregado e à pasta de cimento, o concreto não é realmente um material elástico (Battagin, 2008).

Figura 04 – Gráfico de tensão-deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto



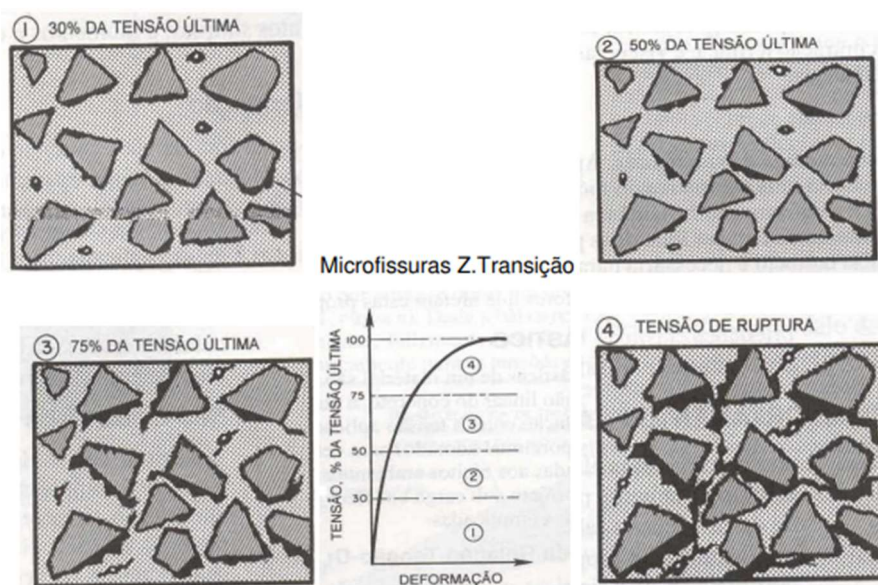
Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2014.

Em materiais heterógenos, como é o caso do concreto, a massa específica, a fração volumétrica e o módulo de deformação dos principais componentes, além das características da zona de transição, determinam o comportamento elástico do compósito. Alterações no módulo de elasticidade do concreto podem interferir na possibilidade de utilização em estruturas, o que deve ser avaliado na etapa de cálculo estrutural do concreto armado (Battagin, 2008; Benetti, 2012).

Sob condições normais de cura, devido às diferenças nos seus módulos de deformação, deformações diferenciais surgirão entre a matriz e o agregado graúdo, causando fissuras na zona de transição. Abaixo de cerca de 30% da carga última, as fissuras da zona de transição permanecem estáveis. Portanto, a curva de tensão-deformação permanece linear e, a partir desse valor, começam a aumentar em comprimento, abertura e quantidade, criando uma interligação e formando um sistema contínuo de fissuras (Mehta, 1994).

A Figura 05 apresenta o comportamento tensão-deformação do concreto sob forças de compressão uniaxial, e como ocorre a propagação das fissuras partindo da zona de transição.

Figura 05 – Representação do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial



Fonte: Mehta, (1994).

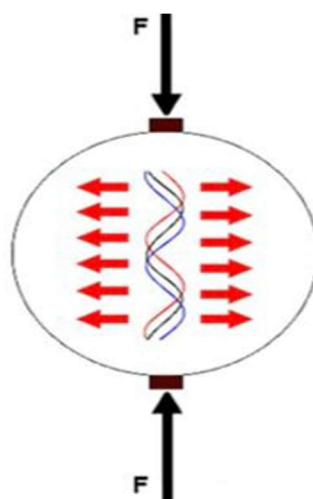
Por fim, mas não menos importante, temos a resistência à tração dos concretos, que é de interesse para o cálculo das estruturas de concreto armado na verificação do estado limite último de ruptura, é necessário conhecer seu valor porque desempenha um papel importante em certos problemas como a fissuração, a deformação, o esforço cortante, a aderência e deslizamento das armaduras etc. Além disso, pode ser um indicador de durabilidade do concreto, uma vez que está relacionada com a microfissuração. A resistência à tração do concreto pode ser obtida através de ensaios de tração por flexão, tração direta e tração por compressão diametral (Chan et al., 2019; Gambhir, 2006).

Segundo Neville (2016), a resistência a tração do concreto é até oito vezes menor que a resistência a compressão, o que pode sugerir uma relação fixa entre as duas resistências. Porém, na realidade, existe uma relação próxima, mas não diretamente proporcional, já que a relação entre as duas resistências vai depender do nível de

resistência do concreto. Em geral, a relação entre as resistências à compressão e tração é menor quanto maior for a resistência à compressão.

Uma maneira de definir a resistência à tração do concreto é por meio do ensaio de tração por compressão diametral, no qual se aplica uma carga de compressão em um corpo de prova cilíndrico posicionado com seu eixo horizontal entre os pratos da prensa (NBR 7222:2011). Esta montagem promove tensões internas de tração que são responsáveis pela ruptura do corpo de prova, conforme demonstrado na Figura 06.

Figura 05 – Ensaio de tração por compressão diametral em corpo de prova cilíndrico



Fonte: Abreu, 2014.

De acordo com Balbo (2013), as resistências à tração em ensaios de compressão diametral costumam ser menores do que as aferidas nos ensaios de flexão. O ensaio de tração por compressão diametral apresenta resultados mais uniformes do que os outros tipos de ensaios de tração. Sendo a resistência obtida neste ensaio, a mais próxima da resistência à tração do concreto.

Os principais fatores que afetam a resistência à tração do concreto é a forma e textura superficial do agregado e a condição de umidade do concreto (Neville, 2016).

3.8 Controle tecnológico do concreto

3.8.1 Dosagem

O processo de dosagem do concreto pode ser definido como a determinação e seleção dos materiais adequados, cimento, agregados, água e, eventualmente aditivos e adições de maneira que o produto final apresente características que atendam as condições de serviço e um menor custo possível (Pinto, 2006; Neville 2016).

Apesar dos métodos de dosagem apresentarem diferenças entre si, certas considerações se aplicam a todos, como, por exemplo, o cálculo da resistência de dosagem, a correlação entre a resistência à compressão com a relação água/cimento para determinado tipo e classe de cimento, a evolução do crescimento da resistência com o tempo, o consumo de água por unidade de volume para obter a trabalhabilidade necessária, ajustes laboratoriais e correções em obra.

Entre os métodos de dosagem disponíveis atualmente, o método do American Concrete Institute (ACI) é o mais tradicional, baseando-se principalmente na relação água/cimento. Além do método ACI outros métodos bastantes conhecidos são: o da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), Instituto Tecnológico do Rio Grande do Sul (ITERS) e o do Instituto Nacional de Tecnologia (INT) (ACI 1973; Val, 2007).

Além dos métodos de dosagem conhecidos, a dosagem experimental pode ser realizada a partir da fixação da relação água/cimento, que depende da resistência de dosagem, das características da obra e da definição dos parâmetros de trabalhabilidade compatível com os materiais e com a utilização do concreto (Ribeiro et al., 2013).

O principal parâmetro utilizado no cálculo da dosagem é a resistência à compressão e que também apresenta um importante papel na qualidade dos concretos. O controle da resistência à compressão do concreto das estruturas é parte integrante da

construção, sendo indispensável à comprovação permanente da resistência que está sendo obtida. Avaliar se o que está sendo produzido corresponde ao que foi adotado previamente, por ocasião do dimensionamento da estrutura, faz parte da própria concepção do processo de construção como um todo (Helene, 1992).

O valor da resistência de dosagem, conhecido como f_{cj} , visa garantir que seja assegurado o valor de f_{ck} previsto em projeto. A NBR 12655:2022 define que a resistência de dosagem é calculada pela Equação 4.

$$f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65 \times s_d \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

f_{cmj} - resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias, em megapascals (normalmente adotado j=28 dias);

f_{ckj} - resistência característica do concreto à compressão, em megapascals;

s_d – desvio padrão;

O desvio padrão varia de acordo com o controle de preparo do concreto e está definido na NBR 12655:2022.

Conforme NBR 12655:2022 a Tabela 10, apresenta os valores do desvio padrão para cada condição de preparo do concreto.

Tabela 10: Condições de preparo do concreto

Condição de preparo do concreto	Desvio-padrão MPa	Condição de preparo do concreto
A	4,0	Aplicável a todas as classes de concreto, o cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados.
B	5,5	Pode ser aplicado às classes C10 e C20, o cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em massa combinada com volume.
C	7,0	Aplicada apenas aos concretos de classe C10 e C15, o cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e a sua quantidade é corrigida em função da estimativa da umidade dos agregados e da determinação da consistência do concreto.

Fonte: NBR 12655:2022.

Após calculada a resistência de dosagem, deve ser adotado um dos métodos de dosagem experimentais, para definir as proporções adequadas de cada material que constituirá o concreto.

A dosagem de concretos de alto desempenho parte de um método de dosagem já conhecido, devem ser observados: menor relação água/cimento, características e finura do agregado miúdo, escolha do agregado com base em sua mineralogia e resistência e por último, o eventual consumo de adições minerais e aditivos. Posteriormente, a partir de um ensaio inicial, adota-se um programa experimental com ajustes da dosagem de água, agregados, até obter-se a resistência desejada, com a trabalhabilidade necessária (Lima, 1997).

Segundo Shah & Ahmad (1994) os diversos exemplos de proporcionamento adotados em várias aplicações de CAD, são baseados em procedimentos empíricos ou a partir de dosagens de aplicações anteriores.

3.8.2 Cura do concreto

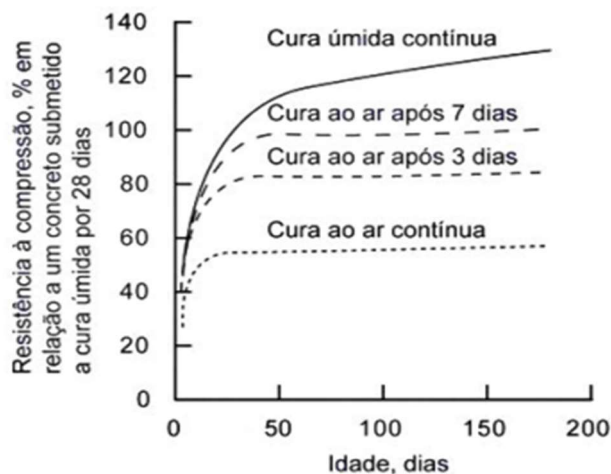
Durante o processo de hidratação do concreto deve-se evitar a evaporação da água necessária para a hidratação do cimento, realizando assim a cura do concreto. As condições de umidade e temperatura têm uma elevada importância nas primeiras idades, a fim de garantir as propriedades do concreto. A saída precoce de água da mistura aumenta o volume de vazios, além de não ser suficiente para hidratar o cimento até que o concreto atinja sua resistência final. (Abreu, 2014).

É recomendado pela NBR 6118:2014 que a superfície do concreto seja umedecida ou protegida por película impermeável por pelo menos durante os 7 primeiros dias após o lançamento do concreto, para que o concreto não perca água. A necessidade de cura é devida ao fato de que a hidratação do cimento só pode ocorrer nos capilares cheios de água. A perda de água vai depender da temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento (Neville, 2016).

A superfície do concreto deve ser protegida, a fim de impedir a perda de água, evitando assim a fissuração superficial, a qual pode ocorrer até mesmo antes da pega. Após a pega do concreto, a cura pode ser feita com aspersão de água. Sendo importante ressaltar que secagens prematuras resultam em camadas superficiais mais porosas e com baixa resistência ao ataque de agentes agressivos (Helene, 1997).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) concretos produzidos com a mesma relação água/cimento e curados por cura úmida contínua durante 180 apresentam resistências três vezes maior do que o concreto curado ao ar, Figura 07.

Figura 07 – Influência das condições de cura sobre a resistência do concreto.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Na prática a cura do concreto pode ser realizada de diversas maneiras, algumas delas são: irrigação periódica, cobertura da superfície com manta úmida e cobertura com materiais impermeáveis.

A cura adequada do concreto favorece a durabilidade do concreto, além das suas propriedades, como resistência mecânica, permeabilidade e conseqüentemente sua resistência contra ataques (Abreu, 2014).

3.9 Durabilidade do Concreto

3.9.1 Permeabilidade e absorção

Permeabilidade é a facilidade com a qual líquidos ou gases podem se movimentar através do concreto. Essa propriedade é de interesse para a estanqueidade da estrutura e para a resistência ao ataque químico (Neville, 2016).

A permeabilidade do concreto em grande parte é determinada pela sua relação água/cimento, pois a saída da água do concreto deixa vazios, outro fator é a incorporação de ar durante a mistura dos seus materiais constituintes. Os vazios

interconectados tornam o concreto permeável à água, ou seja, quanto maior a resistência da pasta, menor e a sua permeabilidade (Petrucci, 1980).

Outro fator que influencia na permeabilidade e absorção do concreto está relacionado a distribuição e tamanho dos poros, na microestrutura do concreto existem os poros capilares e os poros do gel, sendo os poros capilares muito maiores que os poros do gel (Neville, 2019).

Segundo Neville (2016) antes de atingir um grau de hidratação satisfatório, a pasta contém um sistema de poros capilares interconectados, ocasionando em uma menor resistência e maior vulnerabilidade a penetração de agentes externos. Estes problemas podem ser evitados se o grau de hidratação é suficientemente alto para que o sistema de poros capilares seja interrompido por bloqueios parciais devido ao desenvolvimento do gel de cimento. Neste caso os poros capilares estão interconectados somente pelos poros de gel, de dimensões bem menores, praticamente impermeáveis.

Uma indicação do período mínimo de cura necessário à interrupção dos poros capilares é dada na Tabela 11. No entanto, deve ser destacado que quanto mais fino o cimento, menor o período de cura necessário para produzir um determinado grau de hidratação para relações água/cimento mais baixas, o período de cura necessário para a obtenção de concretos duráveis é menor. Essas misturas, naturalmente, têm maior resistência devido à menor porosidade (Neville, 2016).

Tabela 11: Período mínimo de cura necessário a interrupção dos poros capilares

Relação água/cimento, em massa	Grau de hidratação (%)	Período de cura necessário
0,40	50	3 dias
0,45	60	7 dias
0,50	70	14 dias
0,60	92	6 meses
0,70	100	1 ano
acima de 0,70	100	impossível

Fonte: Neville, 2016.

De acordo com Neville (2016) a grande influência da segmentação dos poros capilares na permeabilidade ilustra o fato de que a permeabilidade não é uma simples função da porosidade. É possível que dois corpos porosos tenham porosidade semelhantes, mas permeabilidade diferente.

Do ponto de vista da durabilidade, é importante a obtenção de uma baixa permeabilidade o mais rápido possível. Conseqüentemente, uma mistura com baixa relação água/cimento é vantajosa por alcançar o estágio de segmentação dos poros após um curto período de cura úmida (Neville, 2016).

O processo físico pelo qual o concreto retém água em seus poros e condutos capilares e denominado de absorção e é medida, normalmente, secando uma amostra até a constância de massa, imergindo-a, em seguida, em água e determinando o acréscimo de massa expressa em porcentagem de massa seca (NBR 9788:09). A absorção de água não pode ser usada como medida da qualidade um concreto, porém a maioria dos concretos de boa qualidade possui absorção abaixo de 10%. Portanto, um concreto durável tem que ser impermeável, dificultando a penetração de substâncias agressivas (Beushausen, 2019; Frigione e Lettieri, 2018; Neville e Brooks, 2013).

De acordo com Abreu (2020) a absorção e a permeabilidade são propriedades determinantes para a durabilidade de um concreto que sofre ataques ácidos externos. Ensaios realizados com concretos submetidos a ataques ácidos demonstram que o processo de degradação é mais significativo em concretos com maior taxa de absorção e permeabilidade. Além disso, a degradação promove a diminuição da resistência à compressão, aumento das perdas de massa e amplia ainda mais as taxas de absorção e permeabilidade, tornando o composto cada vez menos resistente mecanicamente e mais vulnerável a ataques externos sequentes.

3.9.2 Durabilidade do concreto

De acordo com Medeiros (2011) o conceito de durabilidade é o resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente e as condições de uso, de operação e de manutenção.

Um concreto durável é aquele que resiste às condições para o qual foi projetado, sem deterioração, por muitos anos. As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas no projeto e quando utilizadas corretamente, conservem sua segurança e estabilidade em serviço durante um período mínimo de 50 anos, sem exigir medidas extras de manutenções e reparo (NBR 15575:2013; Neville, 2016).

É importante assinalar que a deterioração do concreto raramente é uma causa isolada. Um concreto pode, muitas vezes, ser satisfatório, apesar de alguns aspectos desfavoráveis, mas um único fator adverso suplementar pode provocar a sua deterioração (Ribeiro et al., 2012; Vasconcelos, 1996).

O desempenho das estruturas pode ser abordado em diversos momentos da vida útil e para diferentes finalidades, incluindo concepção, especificação, técnicas executivas e por fim, a durabilidade.

O ambiente em que a estrutura está inserida é outro fator importante que deve ser considerado. A NBR 6118:2014 destaca que a agressividade do meio ambiente está

relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto. Nos projetos das estruturas de concreto, a agressividade ambiental deve ser classificada de acordo com as classificações da Tabela 12, podendo ser avaliada segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes.

Tabela 12 – 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 ^(a,b)	Pequeno
III	Forte	Marinha ^(a) Industrial ^(a,b)	Grande
IV	Muito Forte	Industrial ^(a,c) Respingo de maré	Elevado

^(a) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^(b) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^(c) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 6118:2023; ABNT NBR 12655:2022.

Além de classificar os ambientes, a NBR 6118:2014 também apresenta algumas medidas que buscam garantir a durabilidade dos elementos de concreto para cada meio analisado, como os valores mínimos para a relação água/cimento e as classes de concreto quanto à resistência como pode ser visto na Tabela 13.

Tabela 13 – Relação água/cimento correspondente a cada classe de agressividade

Concreto	Classe de Agressividade				
	TIPO	I	II	III	IV
Relação a/c em massa	Concreto Armado	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
	Concreto Protendido	≤0,60	≤0,55	≤0,50	≤0,45
Classe de Concreto (NBR 8953)	Concreto Armado	≥C20	≥C25	≥C30	≥C40
	Concreto Protendido	≥C25	≥C30	≥C35	≥C40

Fonte: ABNT NBR 6118:2023.

As maiores ressalvas da norma brasileira em relação à durabilidade das estruturas de concreto armado estão relacionadas a ambientes com possível presença de cloretos. Em uma abordagem racional, o concreto deve ser julgado pelo seu desempenho e não por sua composição, o que não limita estudos adicionais com adições que modificam a composição do concreto, favorecendo métodos que podem sugerir resultados positivos surpreendentes do ponto de vista de durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado (Lopez et al., 2019). Uma importante abordagem para aumentar essa durabilidade é o emprego de novos materiais na constituição deste compósito (Neville, 2016).

3.10 Concreto submetido à ataques

Durante sua vida útil o concreto pode estar sujeito a ataques químicos provenientes do ambiente externo, os ataques ao concreto são reações químicas que deterioram este material reduzindo suas propriedades e conseqüentemente a sua durabilidade. A Tabela 14 caracteriza alguns dos tipos de ataques ácidos.

Tabela 14 – Tipos de ataques ácidos

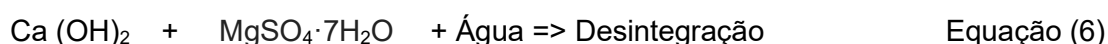
Ataques ácidos	Caracterização
Industrial	Na indústria petrolífera é observado o ataque das soluções ácidas, utilizadas na acidificação dos poços de petróleo para aumento da produção, sobre as áreas cimentadas.
Chuva ácida	Apresenta um pH entre 4,5 e 2,2 (a chuva normal possui pH igual a 5) devido à presença de compostos agressivos, e é resultante da combinação dos gases presentes na poluição atmosférica, entre eles o óxido de enxofre que reage com o vapor de água produzindo o (H ₂ SO ₄).
Águas Subterrâneas	Presença de ácido sulfúrico como resultado da oxidação de sulfetos de pirita (FeS ₂) e marcassita (sulfeto de ferro) presença que é catalisado pela presença de um tipo de bactéria aeróbica.
Bactérias	Liberam ácido sulfídrico, o qual em contato com a água é agressivo.

Fonte: Repette, 1998.

Os ataques por sulfatos podem ocorrer de duas formas no concreto, por expansão do concreto provocando fissuração e aumentando a permeabilidade e pela perda

progressiva de massa, reduzindo sua resistência e causando perda de coesão dos produtos.

As reações químicas 5 e 6 representam estes dois tipos de ataques por sulfatos.



Segundo Neville (2016), nenhum cimento Portland é resistente ao ataque por ácidos, em ambientes úmidos, o dióxido de enxofre (SO₂) e o dióxido de carbono (CO₂), bem como outros gases presentes na atmosfera, formam ácidos que atacam o concreto, dissolvendo e removendo parte da pasta de cimento hidratada, deixando uma massa friável e de resistência muito baixa. Essa forma de ataque é encontrada em vários ambientes industriais.

Na prática o grau de ataque aumenta com o aumento da acidez. O ataque ocorre em valores de pH menores que 6,5, sendo que um pH menor que 4,5 origina um ataque severo. A velocidade do ataque depende também da facilidade de difusão dos íons de hidrogênio no gel de cimento (C-S-H) após a dissolução e lixiviação do Ca(OH)₂ (Neville, 2016).

De acordo com Neville (2016), tratamentos superficiais à base de alcatrão, pinturas emborrachadas ou betuminosas, resinas epóxi e outros agentes têm sido utilizados com sucesso na proteção de estruturas. O grau de proteção resultante de cada tratamento varia, mas em todos os casos é essencial que a camada de proteção esteja bem aderida ao concreto e permaneça intacta aos agentes mecânicos.

3.11 Sistema de proteção superficial

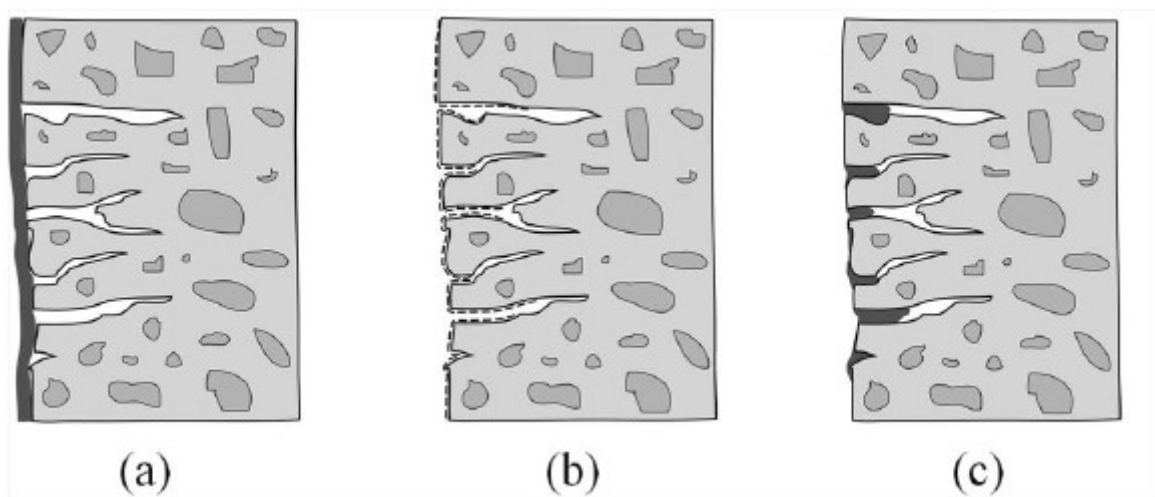
O uso de proteção de superfície no concreto é uma possibilidade de se aumentar a vida útil de estruturas expostas a ambientes agressivos. Esse tipo de proteção inibe a

penetração de agentes agressivos por difusão, migração e absorção por capilaridade (Keer, 1992).

Os avanços ocorridos na química nos últimos anos, vêm possibilitando o desenvolvimento de inúmeros tipos de proteção que permitem garantir a durabilidade através da redução da absorção de água, da penetração de sais e de gases agressivos, desde que as proteções propostas sejam periodicamente inspecionadas para verificação da necessidade de renovação, a fim de continuarem mantendo sua funcionalidade (Pinto, 2006).

Os materiais de proteção de superfície para concreto podem ser classificados em três grupos principais, sendo eles, hidrofugantes (repelem a água), bloqueadores de poros (reagem com alguns componentes solúveis do concreto e formam produtos insolúveis) e formadores de película (formam um filme contínuo na superfície do concreto). A Figura 08 ilustra esses três grupos de proteção de superfície (Keer, 1992).

Figura 08 - Grupos de tratamento de superfície para concreto: (a) formadores de película (b) bloqueadores de poros (c) hidrofugantes de superfície



Fonte: Adaptado de Keer, 1992.

Os formadores de película apresentam a vantagem de prover uma barreira física na superfície do concreto, que o isola de agentes agressivos do ambiente externo. Esses

produtos exigem um substrato homogêneo e liso com poros de dimensão máxima igual a 0,1 mm. Isso significa que são capazes de cobrir fissuras de até 0,1 mm. No entanto, a película rompe se o concreto fissurar depois de ter sido realizada a pintura.

Além disso, se o concreto estiver com elevada umidade interna antes da aplicação, a película não permite que o concreto seque. Isso pode deteriorar o filme de proteção, causando a formação de bolhas devido à pressão de vapor da umidade interna. Pelo ponto de vista arquitetônico, esse grupo de tratamentos de superfície modifica a estética da estrutura adicionando brilho ou cor à superfície do concreto, que algumas vezes é desejada e outras não (Helene, 2000).

Esse grupo de tratamento de superfície (formador de película) foi intensamente estudado nos últimos vinte anos. Delucchi et al., (1998) estudaram a importância dos parâmetros físicos na aderência da película. Seneviratne et al., (2000), utilizando análise termo-mecânica, sugeriram que a película de maior sucesso é aquela com capacidade de manter suas propriedades elastoméricas ao longo do período necessário de exposição e sobre uma ampla gama de temperaturas operacionais. Al-Zahrani et al., (2002) mostraram que os sistemas de proteção por formação de película apresentam eficiência de inibição da corrosão acelerada coerente aos resultados obtidos das propriedades físicas, em particular, absorção de água, permeabilidade e penetração de íons cloreto.

Os formadores de película são provavelmente os mais utilizados na indústria da construção e essa deve ser a razão para serem extensamente estudados em comparação aos demais sistemas de proteção de superfície (Medeiros et al., 2015).

4. METODOLOGIA

A metodologia proposta consistiu na dosagem, verificação e comparação das características físicas de concretos de alto desempenho com e sem adição de sílica ativa submetidos a meio agressivo ácido, a fim de avaliar seu potencial quanto aos quesitos de resistência e durabilidade.

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Cimento e Agregados

O cimento utilizado nas dosagens dos concretos foi o CPV- ARI, que por possuir um elevado teor de clínquer e uma maior finura comparada aos outros tipos de cimento é o cimento mais recomendado para a produção de concretos de alto desempenho devido a sua maior reatividade.

A caracterização física e química do cimento foi realizada e fornecida pelo próprio fabricante, Companhia Nacional de Cimento em sua unidade fabril localizada em Sete Lagoas/MG, sendo os ensaios realizados conforme o preconizado nas seguintes normas:

- Resíduo Insolúvel – NBR NM 15:2012;
- Perda ao Fogo – NBR NM 18:2012;
- Área Específica (Blaine) – NBR 16372:2015;
- Massa Específica – NBR 16605:2017;
- Início de pega – NBR 16607:2018;
- Fim de pega – NBR 16607:2018;
- Resistência à compressão – NBR 7215:1996.

Por ser facilmente encontrado na região metropolitana de Belo Horizonte/MG, o agregado miúdo utilizado é denominado de areia industrial grossa proveniente da extração e britagem de rochas gnaisse.

A caracterização física do agregado miúdo foi realizada conforme o preconizado nas seguintes normas:

- Massa específica e Absorção – NBR 16916:2021;
- Material pulverulento – NBR 16973:2021;
- Massa unitária seca e solta – NBR 16972:2021;
- Modulo de finura e Dimensão máxima característica – NBR 17054:2022;
- Análise granulométrica – NBR 17054:2022.

O agregado graúdo utilizado é proveniente da extração e britagem de rochas gnaisse e classificado como brita 0, sendo encontrado facilmente na região metropolitana de Belo Horizonte/MG.

A caracterização física do agregado graúdo foi realizada conforme o preconizado nas seguintes normas:

- Massa específica e Absorção – NBR 16917:2021;
- Material pulverulento – NBR 16973:2021;
- Massa unitária seca e solta – NBR 16972:2021;
- Modulo de finura e Dimensão máxima característica – NBR 17054:2022;
- Análise granulométrica – NBR 17054:2022.

4.2 Composição de métodos de dosagem

O estudo de dosagem do concreto foi realizado com base nos dados obtidos na caracterização dos materiais empregados, principalmente o tipo de cimento e a qualidade dos agregados, avaliando a sua composição granulométrica e teor de material pulverulento.

Utilizando os resultados obtidos na caracterização dos materiais e dos métodos de dosagem do American Concrete Institute (ACI) e do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), foi possível realizar a dosagem de um concreto de qualidade, posteriormente foi realizada a transformação de um concreto convencional para um concreto de alto desempenho a partir da utilização de um aditivo superplastificante e redução da relação água/cimento.

A dosagem do concreto com adição de sílica ativa foi feita a partir da adição de 10% de sílica ativa sobre a massa de cimento, para compensar o aumento no teor de finos presente no concreto o consumo de aditivo foi aumentado, compensando assim a perda de trabalhabilidade causada pela sílica ativa, sem que seja necessário o aumento do consumo de água.

4.3 Produção dos concretos

Os concretos foram produzidos com base nos resultados obtidos no estudo de dosagem e utilizando os equipamentos disponíveis no Laboratório de Concreto da Precon Engenharia em Pedro Leopoldo/MG. Sendo a produção correspondente aos processos de mistura dos materiais constituintes, moldagem e cura dos corpos de prova, fatores que são fundamentais para garantir a obtenção de concretos resistentes e duráveis.

A mistura dos materiais constituintes foi realizada com auxílio de uma betoneira, em um tempo de mistura de aproximadamente cinco minutos, o qual foi suficiente para garantir a correta homogeneização dos materiais e a completa dispersão do aditivo superplastificante para garantir o seu correto funcionamento.

A moldagem dos corpos-de-prova de dimensões de 10 x 20 cm foi realizada em camadas e o adensamento foi realizado utilizando uma haste de metal para eliminar o máximo de vazios da massa.

Após a moldagem os corpos-de-prova foram cobertos com lona e ficaram à temperatura ambiente durante as primeiras 24 horas, após este período os corpos de-

de-prova foram desmoldados e acondicionados em tanque para cura úmida, onde ficaram até a data dos ensaios.

4.4 Análise dos concretos no estado fresco

O ensaio de espalhamento é amplamente utilizado em testes no laboratório, durante a fase de dosagem, como em obras que se utilizam concretos fluidos, por sua facilidade e agilidade de execução.

A avaliação do concreto no estado fresco foi feito por meio do ensaio de espalhamento, normatizado pela NBR 15823:2017 Parte 2, o ensaio consiste no preenchimento por completo do Cone de Abrams sem adensamento e de forma contínua e uniforme, após o preenchimento o molde deve ser levantado na direção vertical em tempo não superior a 5 segundos, sem realizar movimentos de torção lateral.



Fonte: NBR 15823-2:2017.

O resultado do ensaio é o espalhamento da massa de concreto, obtido pela média aritmética de duas medidas perpendiculares do diâmetro realizadas em milímetros.

4.5 Análise dos concretos no estado endurecido

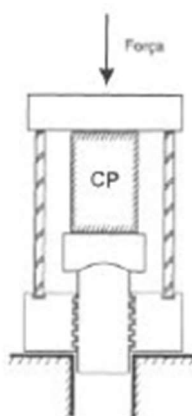
4.5.1 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm foram moldados de acordo com o a norma NBR 5738:2015, 24 horas após a moldagem, os corpos-de-prova foram desmoldados, identificados e colocados em cura úmida até a data dos ensaios.

Após a moldagem os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, sendo este o ensaio mais utilizado para o concreto na construção civil, por ser uma das características mais importantes para estrutura e por ser uma característica relacionada qualitativamente a outras desejadas (Neville, 2016).

Os ensaios de resistência à compressão foi realizado conforme o preconizado na NBR 5739:2018. Foram rompidos corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm, nas idades de 7 e 28 dias, utilizando a prensa hidráulica, Figura 10.

Figura 10 – Ensaio de resistência à compressão do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Além da resistência à compressão, também foi realizada a determinação da resistência à tração por compressão diametral, o ensaio foi realizado conforme a NBR 7222:2011, sendo que para cada traço foram ensaiadas duas amostras.

Outra maneira de determinar o comportamento mecânico do concreto é por ensaio de módulo de elasticidade, o qual foi realizado na idade de 28 dias, para isto, foram moldados cinco corpos de prova. O ensaio foi realizado de acordo com NBR 8522:2021.

A avaliação da capacidade do concreto de absorver água pode ser feita basicamente por meio de dois métodos de ensaio normatizados, sendo: por imersão, conforme a NBR 9778:2005 e por capilaridade, de acordo com a NBR 9779:2012. Para o presente estudo foram utilizados ambos os ensaios, após o período de 28 dias de cura os corpos de prova foram secos em estufa a uma temperatura de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$, durante um período de 72 horas, após este período foi determinado a massa das amostras. Em seguida duas amostras de cada traço foram imersas em água a uma temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ para a realização do ensaio de absorção de água por imersão. Outras duas amostras foram posicionadas em um recipiente com água de maneira que o nível de água permaneça constante a (5 ± 1) mm acima de sua face inferior, por um período de 72 horas. Por último, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, conforme a NBR 7222:2011, de modo a permitir a anotação da distribuição de água no seu interior.

4.6 Ataque por ácido aos concretos

Com o intuito de simular um ambiente agressivo no qual o concreto estaria exposto, foi realizado ataque nos concretos em solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 2,5%, por imersão durante sete dias. O ataque realizado teve como principal objetivo, simular uma deterioração acelerada de ambos os concretos, para permitir uma comparação com os efeitos decorrentes de meios agressivos.

4.7 Perdas de massa

Uma maneira de avaliar a degradação dos concretos é através das perdas de massa em corpos de prova de concreto, antes e após ataque químico. Este ensaio permite avaliar as perdas de massa (PM) do concreto através de uma

abordagem quantitativa que correlaciona a massa do corpo de prova de concreto antes (M_s) e após o ataque por ácido (M_f) segundo a equação (7):

$$PM = \frac{M_f - M_s}{M_s} * 100 \quad \text{Equação (7)}$$

Onde,

PM – Perdas de massa (%);

M_s – Massa seca antes do ataque (g);

M_f – Massa seca após o ataque (g).

4.8 Sistema de proteção superficial

Para este estudo em específico foi utilizado um sistema de proteção superficial composto por um verniz de poliuretano transparente, de alto desempenho, resistente aos raios UV e que garantem uma alta proteção da estrutura.

Este material tem sua eficiência comprovada baseada nos requisitos da norma europeia para sistema de proteção EN 1504 – Parte 2: 2009. O requisito de permeabilidade à difusão de CO_2 , é um parâmetro essencial determinado pela norma europeia para sistemas de proteção com alta resistência contra o ingresso de substâncias agressivas.

De acordo com o documento CT 2021 (MC-Bauchemie Brasil 2021), o valor encontrado para um consumo de $495g/m^2$ de deste material (equivalente a uma espessura de $200 \mu m$), quando comparado ao coeficiente de difusão equivalente do concreto, representa no quesito “proteção contra o ingresso” um cobrimento equivalente de 100 cm de concreto para esta espessura de produto. Ou seja $200 \mu m$ deste material, equivale a 100 cm de concreto. A Figura 11 representa essa equivalência.

Figura 11 – Equivalência de cobrimento, sistema de proteção superficial e concreto de cobrimento



Fonte: CT 2021 – MC-Bauchemie Brasil (2021).

Após terminado o período de cura dos corpos de prova eles foram limpos e secos, posteriormente foram pintados com auxílio de uma trincha, em duas demãos, garantindo uma película uniforme em toda sua superfície. O tempo de secagem entre as demãos foi de 8 horas, já o tempo de secagem final foi de 7 dias, garantindo assim a secagem por completo. Finalizado o processo de cura, os corpos de prova foram imersos em uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 2,5%, por sete dias.

5. RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais componentes do concreto, e os resultados obtidos nos ensaios realizados com o concreto no estado fresco e endurecido.

5.1 Materiais Constituintes

Foram realizados ensaios de caracterização dos agregados envolvidos na produção do concreto, para o cimento, sílica ativa e o aditivo superplastificante foram consideradas as informações fornecidas pelos fabricantes.

5.1.1 Cimento e Agregados

As características físico-química do cimento CPV-ARI utilizado na produção dos concretos estão apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15: Características do Cimento

Ensaio Químico	Resultado	Limites
Resíduo Insolúvel (%) - NBR NM 15:2012	0,62	≤ 3,5
Perda ao Fogo (%) - NBR NM 18:2012	4,34	≤ 6,5
Ensaio Físico	Resultado	Limites
Área Específica – Blaine (cm ² /g) - NBR 16372:2015	4.507	N. A
Massa Específica (g/cm ³) – NBR 16605:2017	3,11	N. A
Início de pega (min) – NBR 16607:2018	152	≥ 60
Fim de pega (min) – NBR 16607:2018	212	≤ 600
Ensaio Mecânico	Resultado	Limites
Resist. à Compressão - 1 Dia (MPa) – NBR 7215:1996	28,0	≥ 14,0
Resist. à Compressão - 3 Dias (MPa) – NBR 7215:1996	39,3	≥ 24,0
Resist. à Compressão - 7 Dias (MPa) – NBR 7215:1996	46,1	≥ 34,0
Resist. à Compressão - 28 Dias (MPa) – NBR 7215:1996	56,6	N.A

Fonte: Companhia Nacional de Cimento.

As Tabelas 16 e 17 apresentam o resultado dos ensaios de caracterização realizados para a areia industrial proveniente da britagem de rochas Gnaisse.

Tabela 16: % Retida Acumuladas Peneiras ABNT Areia industrial Gnaisse

Peneira Abertura (mm)	Material		
	Areia industrial grossa		
	Massa Retida (g)	Retida (%)	Retida Acum. (%)
4,8	0,40	0%	0%
2,4	118,85	16%	16%
1,2	130,90	20%	36%
0,6	78,74	17%	54%
0,3	65,78	14%	67%
0,15	64,70	13%	80%
Fundo	104,88	20%	100%
Total	564,24		

A figura 12 apresenta a curva granulométrica da areia industrial gnaisse.

Figura 12: Curva Granulométrica Areia Industrial Gnaisse

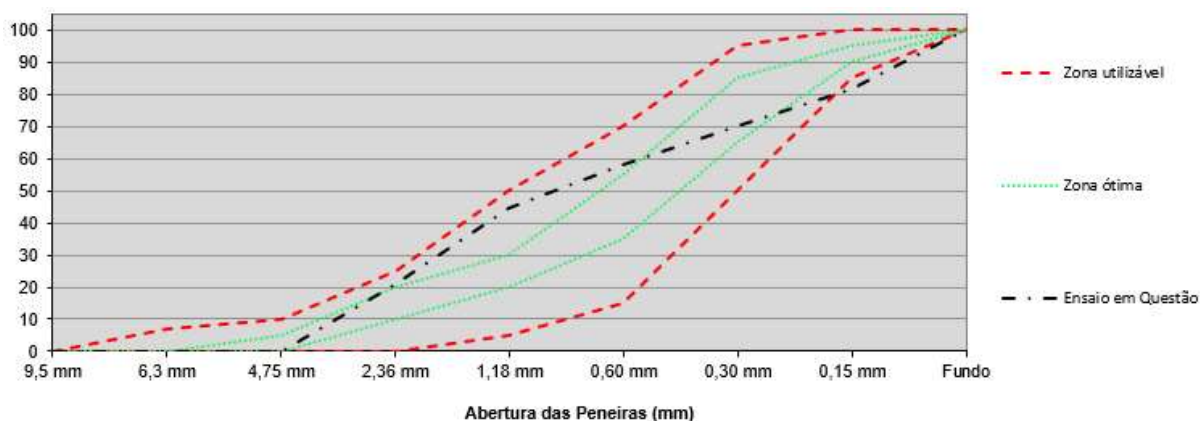


Tabela 17: Resultado Ensaio de Caracterização Areia industrial Gnaisse

Ensaio	Material	
	Areia Industrial Gnaisse Resultado	Limites
Massa Específica (g/cm ³) - NBR 16916:2021	2,61	N. A
Material Pulverulento (%) - NBR 16973:2021	8,3	10,0
Absorção (%) - NBR 16916:2021	1,3	> 0,0
Massa unit. Seca e solta (g/cm ³) - NBR 16972:2021	1,53	N.A
Módulo de Finura - NBR 17054:2022	2,75	1,55 a 3,50
Dimensão Máxima Característica (mm) - NBR 17054:2022	4,75	4,75

As Tabelas 18 e 19 apresentam o resultado dos ensaios de caracterização realizados para a brita utilizada. A figura 13 apresenta a curva granulométrica da Brita 0 Gnaise utilizada.

Tabela 18: % Retida Acumuladas Peneiras ABNT Brita 0 Gnaise

Peneira Abertura (mm)	Brita 0 Gnaise		
	Massa Retida (g)		
	4,99	Retida (%)	Retida Acum. (%)
12,5	637,16	0%	0%
9,5	1712,44	20%	21%
6,3	480,92	55%	75%
4,8	213,74	15%	91%
2,4	75,93	7%	98%
Fundo	3125,20	2%	100%

Figura 13: Curva Granulométrica da Brita 0 Gnaise

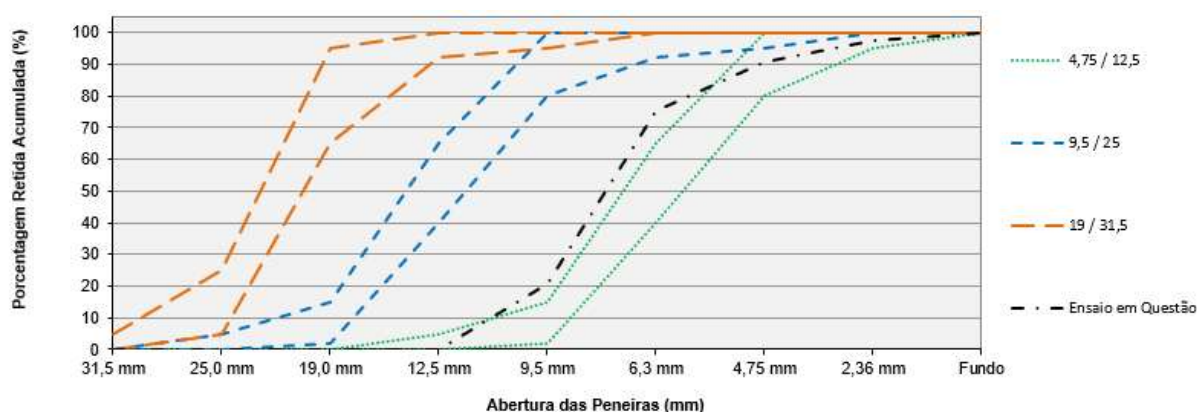


Tabela 19: Resultado Ensaio de Caracterização Brita 0 Gnaise

Ensaio	Material	
	Brita 0 Gnaise	
	Resultados	Limites
Massa Específica (g/cm ³) - NBR 16917:2021	2,70	N. A
Material Pulverulento (%) - NBR 16973:2021	1,80	2,0
Absorção (%) - NBR 16917:2021	0,30	> 0,0
Massa unit. Seca e solta (g/cm ³) - NBR 16972:2021	1,45	N. A
Módulo de Finura - NBR 17054:2022	5,86	5,77 a 6,15
Dimensão Máxima Característica (mm) - NBR 17054:2022	12,50	12,50

5.1.2 Sílica Ativa

Como adição ao concreto utilizou-se uma sílica ativa, a qual atende os requisitos da NBR 13956:2012, apresentando um teor mínimo de SiO₂ superior a 85%. As informações da sílica ativa estão apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20: Características da Sílica Ativa

Ensaio Químico	Resultado	Limites
Teor de SiO₂ (%)	94,71%	≥ 85,0
Umidade (%)	0,60%	≤ 3,0
Perda ao Fogo	2,40%	≤ 6,0
Eq. Alcalino (Na₂O)	0,43%	N. A
Ensaio Físico	Resultado	
Resíduo na Peneira 45 µm (%)	0,25%	≤ 10,0
Massa Específica (kg/m³)	638 kg/m ³	≥ 350
Atividade Pozolônica (%)	112,91%	≥ 105

Fonte: Elkem Materials South America Ltda.

5.1.3 Aditivo

Para produção dos concretos, utilizou-se aditivo superplastificante de pega normal, composto por policarboxilatos, especialmente desenvolvido para a fabricação de concretos de cimento Portland, podendo sua dosagem variar de 0,1% a 1,5% em relação ao peso de cimento, conforme orientações do fabricante. Suas características estão apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21: Características do Aditivo

Característica	Resultado	Limites
Base química	Solução de policarboxilatos	N. A
Aspecto	Líquido	N. A
Cor	Levemente amarela	Amarelo claro a Castanho
Massa específica	1,070 g/cm ³	≅ 1,065
pH	5,7	≅ 5,7
Teor de cloretos	Não contém adição de cloretos	N. A

Fonte: Viapol Ltda.

5.1.4 Água

A água utilizada nos ensaios é proveniente da companhia sanitária da região de Belo Horizonte/MG - Brasil, e por se tratar de uma água potável, atende os requisitos normativos para a produção de concreto.

5.2 Dosagem

Com base nos resultados obtidos a partir dos estudos de dosagens foi selecionando um concreto produzido com um relação água/cimento de 0,35, o qual vai fornecer ao concreto uma baixa permeabilidade e conseqüentemente uma elevada resistência, fatores fundamentais para a durabilidade de concretos sujeitos a ambientes altamente agressivos.

O concreto de referência foi produzido com 514kg/m³ de cimento CPV – ARI, relação água/cimento de 0,35 e aditivo superplastificante em um teor de 0,85% sobre a massa de cimento, o aditivo superplastificante foi utilizado com intuito de melhorar sua trabalhabilidade no estado fresco. A produção dos concretos com adição de sílica ativa foi a partir da adição de 6%, 10% e 14% de sílica ativa sobre a massa de cimento do concreto referência, totalizando 31kg/m³, 51kg/m³ e 72kg/m³ de sílica ativa respectivamente. Para definir o consumo de aditivo dos traços com adição de sílica ativa, foi considerado o teor de aditivo sobre a massa total de material aglomerante (cimento + sílica ativa), para minimizar os efeitos negativos da sílica na trabalhabilidade do concreto no estado fresco devido ao aumento do teor de finos do traço.

5.3 Resistência Mecânica do Concreto

Todos os concretos foram submetidos a ensaios de resistência mecânica, ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 7 e 28 dias de cura, ensaios de resistência à tração por compressão diametral e modulo de elasticidade foram realizados aos 28 dias de cura. Em todo o período de cura, os CP's foram mantidos submersos em água saturada com cal a uma temperatura média de 25°C.

Os corpos de prova foram destinados ao ensaio de ruptura por compressão aos 7 e 28 dias de idade. Sendo o ensaio realizado conforme preconizado na NBR 5739:2018 e os resultados estão apresentados nas Tabelas 22 e 23.

Tabela 22: Resistência à compressão aos 7 dias dos concretos de alto desempenho com e sem adição de sílica ativa

Concreto	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Consumo de Sílica Ativa (kg/m ³)	Relação água/cimento	Espalhamento (FlowTest)	Resistência à Compressão 7 dias (MPa)
Referência	514 kg/m ³	0 kg/m ³	0,35	730 mm	47,4
Sílica Ativa 6%	514 kg/m ³	31 kg/m ³	0,35	710 mm	51,1
Sílica Ativa 10%	514 kg/m ³	51 kg/m ³	0,35	720 mm	53,1
Sílica Ativa 14%	514 kg/m ³	72 kg/m ³	0,35	730 mm	54,3

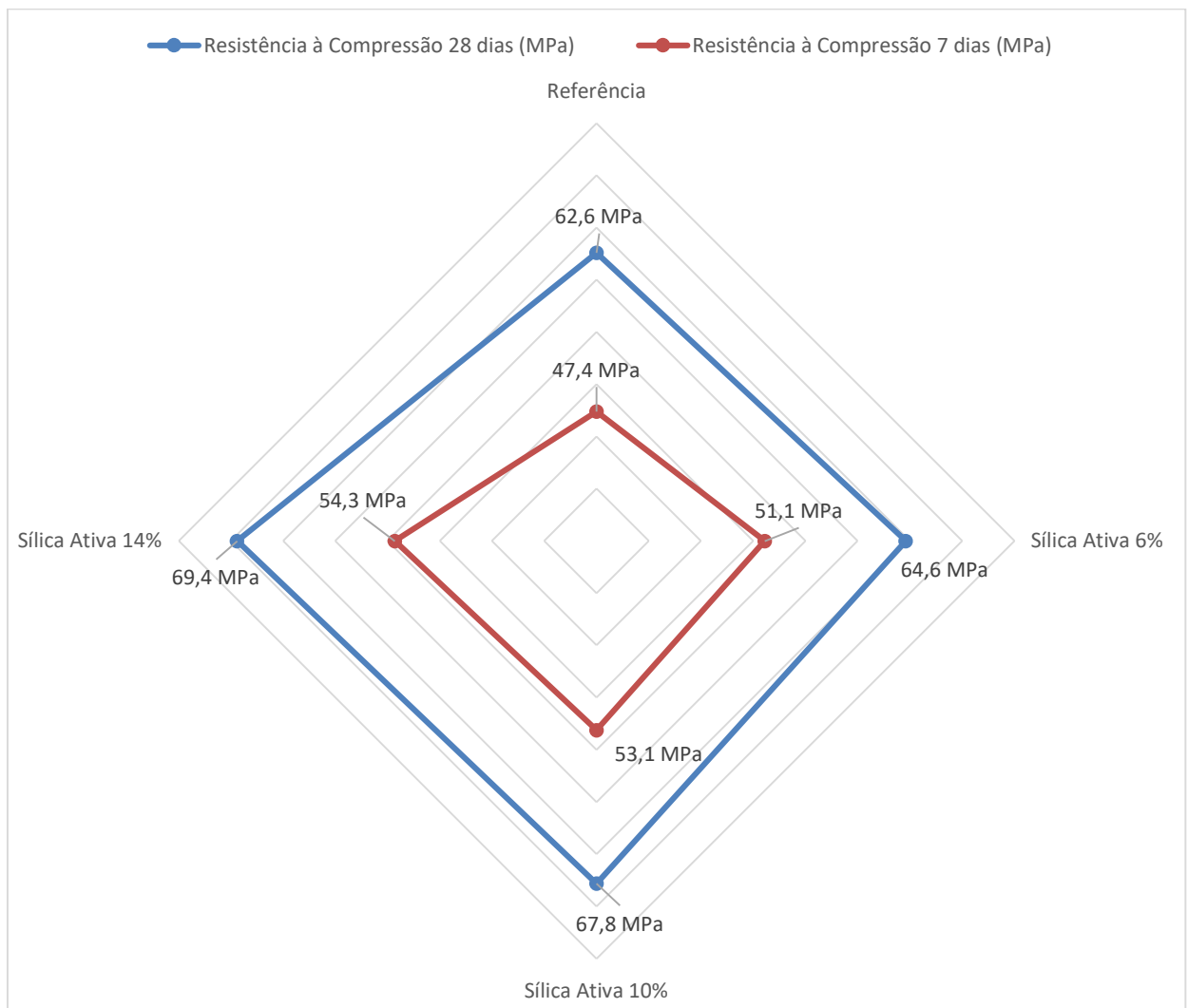
Para a realização do ensaio de resistência à compressão aos 28d foram rompidos 5 corpos de prova, a partir dos resultados obtidos foi verificado a resistência média dos concretos, desvio padrão e posteriormente o f_{ck} estimado conforme ABNT NBR 12655:2022, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Resistência à compressão aos 28 dias dos concretos de alto desempenho com e sem adição de sílica ativa - análise estatística

Concreto	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Consumo de Sílica Ativa (kg/m ³)	Relação água/cimento	Espalhamento (FlowTest)	Resistência à Compressão 28 dias (MPa)		
					Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	F_{ck} Estimado (MPa)
Referência	514 kg/m ³	0 kg/m ³	0,35	730 mm	63,8MPa	0,7MPa	62,6MPa
Sílica Ativa 6%	514 kg/m ³	31 kg/m ³	0,35	710 mm	65,7MPa	0,7MPa	64,6MPa
Sílica Ativa 10%	514 kg/m ³	51 kg/m ³	0,35	720 mm	69,0MPa	0,7MPa	67,8MPa
Sílica Ativa 14%	514 kg/m ³	72 kg/m ³	0,35	730 mm	71,1MPa	1,1MPa	69,4MPa

A análise estatística dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias permite observar que todos os concretos atendem os requisitos prescritos pela ABNT NBR 1265:2022, o desvio padrão ficou em 0,7MPa para os concretos com 0%, 6% e 10% de sílica ativa e para o concreto com 14% o desvio padrão foi de 1,1MPa, com base na análise estatística é possível observar que não houve uma dispersão entre os resultados para um mesmo teor de sílica ativa, validando os resultados obtidos.

Figura 14 – Resistência à compressão aos 7 e 28 dias



Comparando-se os resultados à compressão na idade de 28 dias, observa-se um ganho crescente na medida em que se aumenta o teor de adição de sílica ativa, sendo que ao se comparar o concreto referência e o concreto com adição de 14% de sílica ativa observa-se um ganho de 6,8MPa o que equivale a 9,79%. Para os teores

intermediários de 6% e 10% o ganho foi de 2,0MPa equivalente a 3,09% e 5,2MPa equivalente a 7,66% respectivamente.

Alguns autores afirmam que quanto maior for a relação água/cimento maior é o efeito da adição de sílica ativa, devido a maior presença de poros e vazios em sua matriz cimentícia (Fornasier, 1995). Para o presente estudo foram produzidos concretos com relação água/cimento de 0,35, os quais já apresentam originalmente uma baixa porosidade. O que pode ter contribuído para a não obtenção de ganhos expressivos de resistência à compressão ao se adicionar sílica ativa no concreto de alto desempenho.

Outro importante ponto a ser observado é a limitação de resistência devido ao rompimento do agregado graúdo, durante os ensaios ambos os concretos apresentaram uma ruptura frágil com um elevado percentual de ruptura dos agregados (Figura 15), indicando que os agregados graúdos se tornem um elo fraco na microestrutura do concreto.

Figura 15 – Rompimento do agregado graúdo



Por ocupar cerca de 60 a 70% do total do volume do concreto, os agregados compõem uma porção de grande influência sobre as propriedades do concreto, suas características influenciam principalmente na resistência à compressão, devido sua resistência mecânica e aderência a pasta (Freitas, 2005).

Metha e Monteiro (2008, p. 26) declaram que a dimensão e a forma do agregado graúdo podem afetar a resistência do concreto de forma indireta. Os autores explicam que quanto maior o tamanho do agregado no concreto e quanto maior a proporção de partículas alongadas e achatadas, maior será a tendência de acúmulo de água junto à superfície do agregado, enfraquecendo assim a zona de transição na interface pasta-agregado, esse fenômeno é chamado exsudação.

Em concretos com baixas relações a/c e resistências à compressão elevada como é o caso dos concretos de alto desempenho, a pasta de cimento e a zona de transição se tornam tão resistentes que a fase dos agregados pode-se tornar o elo mais fraco da mistura (Aïtcin, 2000).

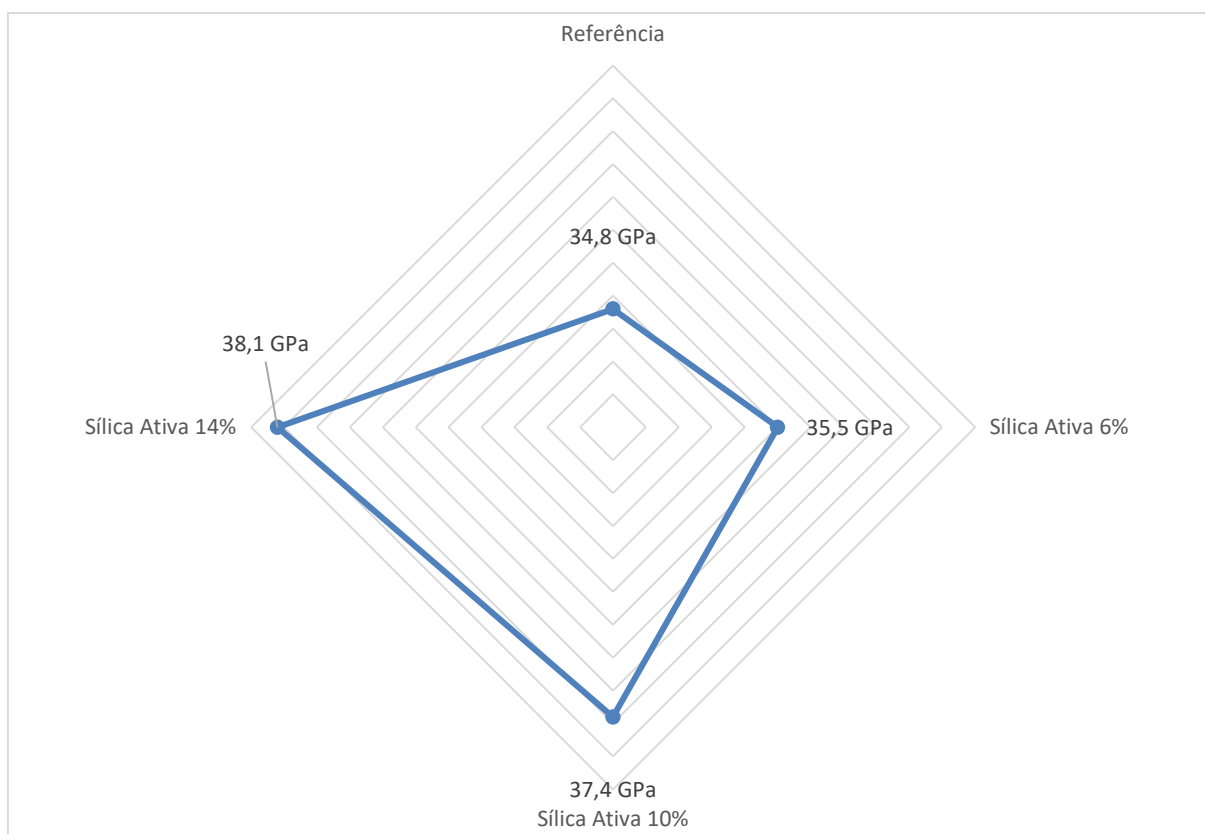
Por último é possível destacar que os concretos com adição de sílica apresentaram um considerável ganho de resistência à compressão, a adição de sílica ativa pode proporcionar uma redução no consumo de cimento, produzindo um concreto com uma menor consumo de cimento, porém com o mesmo desempenho quando comparado ao concreto referência. A redução no consumo de cimento resulta em ganhos ambientais, a produção de cimento gera um alto impacto ambiental durante seu processo, principalmente quando comparado ao processo produtivo da sílica ativa.

Após o ensaio de resistência à compressão, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de módulo de elasticidade, o qual foi realizado de acordo com NBR 8522:2021 estão apresentados na tabela 24 e na Figura 16.

Tabela 24: Módulo de elasticidade do concreto de alto desempenho com e sem adição de sílica ativa

Concreto	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Consumo de Sílica Ativa (kg/m ³)	Relação água/cimento	Módulo de Elasticidade 28 dias (GPa)
Referência	514 kg/m ³	0 kg/m ³	0,35	34,8
Sílica Ativa 6%	514 kg/m ³	31 kg/m ³	0,35	35,5
Sílica Ativa 10%	514 kg/m ³	51 kg/m ³	0,35	37,4
Sílica Ativa 14%	514 kg/m ³	72 kg/m ³	0,35	38,1

Figura 16 – Módulo de elasticidade 28 dias (GPa).



Os resultados obtidos nos ensaios de módulo de elasticidade foram satisfatórios, alcançado resultados relativamente altos. O concreto com adição de 14% de sílica ativa apresentou um ganho de 3,3GPa que equivale a 9,48%. Para as adições de 6% e 10% observam-se ganhos de 0,7GPa equivalente a 2,01% e 2,6GPa que equivale a 7,47% respectivamente. O ganho mais expressivo foi obtido com a adição de 10%,

sendo que, entre a adição de 6% e 10% existem um ganho de 5,46% e entre os concretos produzidos com adição de 10% e 14% o ganho foi de 2,01%. Indicando uma estabilização do ganho conforme aumentou a adição de sílica ativa.

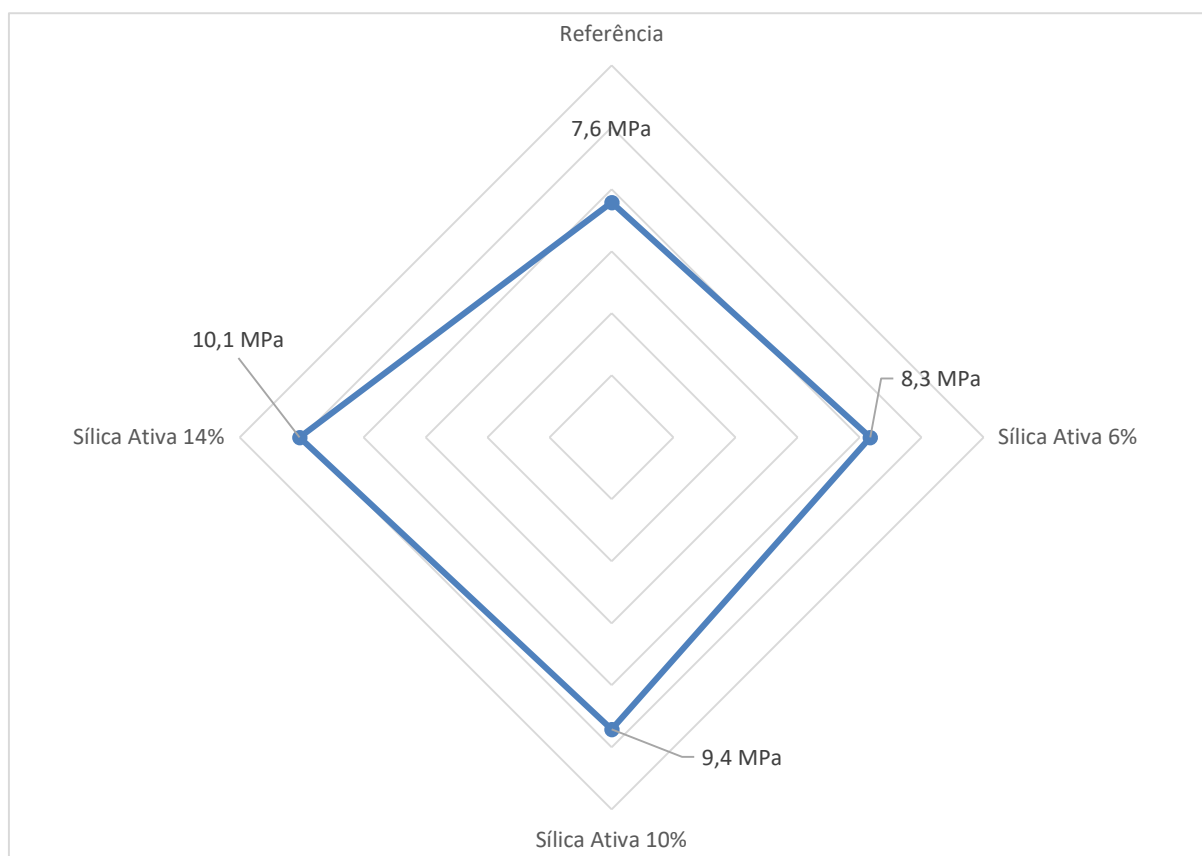
Os resultados indicam que a adição de sílica ativa ao concreto é benéfica para o aumento do módulo de elasticidade do concreto, o que conseqüentemente aumenta a durabilidade deste material, uma vez que concretos com elevado módulo podem cumprir suas funções estruturais por mais tempo, minimizando a microfissuração do concreto armado, preservando a proteção das armaduras e garantindo a vida útil da estrutura.

Por fim, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral conforme ABNT NBR 7222:2011, conforme Mendes (2002) dentre os três métodos de ensaio existentes (tração direta, tração por compressão diametral e tração na flexão), o ensaio de tração por compressão diametral é o que apresenta maior vantagem, pois além de ser facilmente executado também permite o uso do mesmo tipo de corpo de prova, sendo que os valores obtidos nos ensaios estão apresentados na Tabela 25 e na Figura 17.

Tabela 25: Resistência à tração por compressão diametral do concreto de alto desempenho com e sem adição de sílica ativa

Concreto	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Consumo de Sílica Ativa (kg/m ³)	Relação água/cimento	Resistência à Tração por Compressão Diametral 28 dias (MPa)
Referência	514 kg/m ³	0 kg/m ³	0,35	7,58
Sílica Ativa 6%	514 kg/m ³	31 kg/m ³	0,35	8,34
Sílica Ativa 10%	514 kg/m ³	51 kg/m ³	0,35	9,42
Sílica Ativa 14%	514 kg/m ³	72 kg/m ³	0,35	10,07

Figura 17 – Resistência à tração por compressão diametral.



Os resultados do ensaio de resistência a tração por compressão diametral apresentaram ganhos expressivos, comparando o concreto sem adição com o concreto com adição, a adição de 14% promoveu um ganho de 2,46MPa o qual equivale a 32,85%, para os teores intermediários de adição de 6% e 10% de sílica ativa, os ganhos foram de 0,76MPa equivalente a 10,03% e 1,84MPa que equivale a 24,27% respectivamente. Sendo que o ganho mais expressivo se teve para o concreto com adição de 10%, entre os teores de 6% e 10% observa-se um ganho de 1,08MPa representando 14,24% e entre as adições de 10% e 14% o ganho foi de 0,65MPa o que equivale a 8,58%.

Conforme Simões (1997) embora a resistência a tração do concreto seja extremamente baixa e por isso não seja levada em conta nos cálculos estruturais, esse é um ensaio extremamente importante, pois baseado nessa resistência, tem-se um melhor controle sobre comportamento do concreto no que se refere à fissuração,

previsão de deformações e durabilidade do mesmo, além de ser um dos parâmetros necessários para a verificação da aderência entre o concreto e a armadura.

O concreto de alto desempenho apresenta uma resistência superior quando comparado ao concreto convencional, sendo que a resistência à tração dos concretos está relacionada a sua resistência a compressão, segundo Neville e Brooks (2010) a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão varia entre 7% e 11%, dependendo da classe de resistência do concreto. Para Alves (2000) o crescimento da resistência à tração ocorre até os 14 dias de idade diferentemente da resistência à compressão, que mesmo após esse período continua crescendo.

Uma justificativa para tais resultados é o fato da resistência à tração do concreto estar diretamente relacionada à resistência de sua zona de transição, devido à adição de sílica ativa no concreto e seu efeito pozolânico se tem uma maior concentração de C-S-H na região da zona de transição (Monteiro, 1985), o que ocasiona uma melhor aderência pasta-agregado, além de garantir uma redução significativa na espessura da zona de transição, o que contribui para sua homogeneização e resistência (Monteiro 1993), tais fatores justificam o expressivo aumento de resistência à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com adição de sílica ativa.

5.4 Permeabilidade e Índice de Vazios

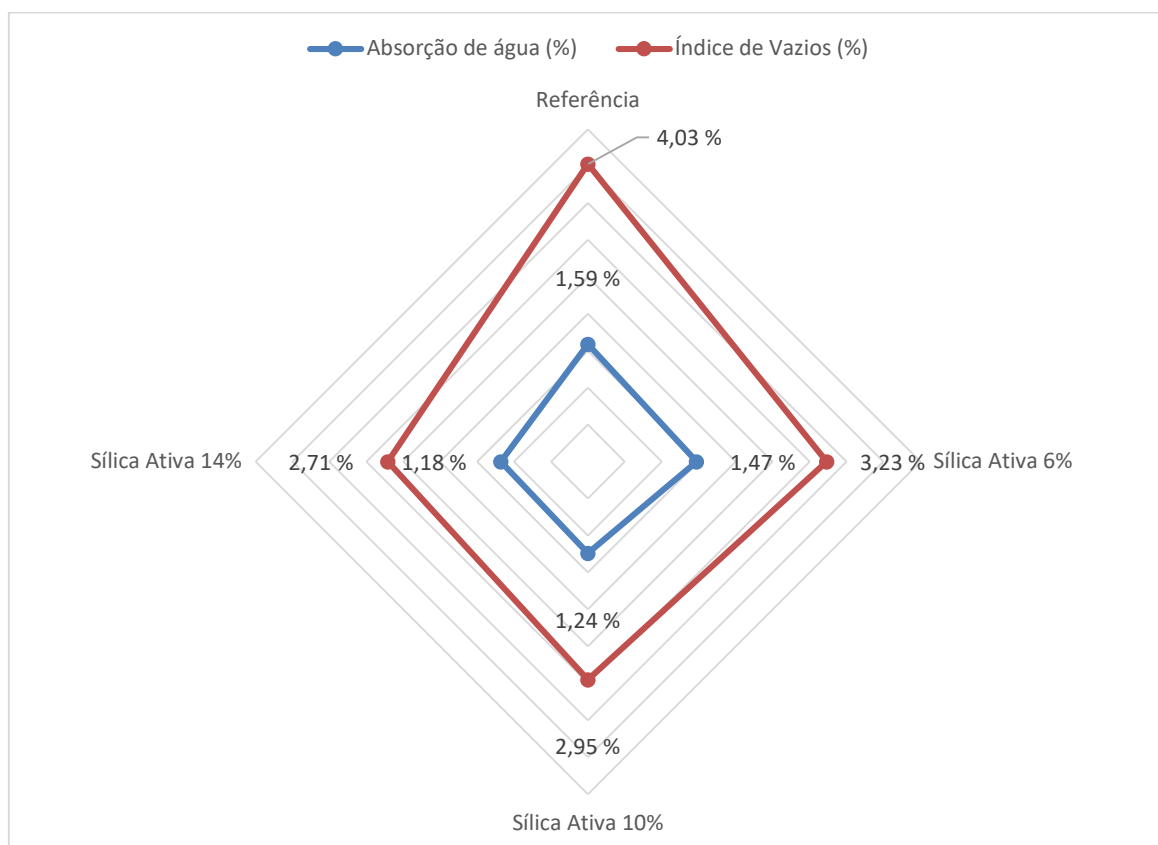
Nas estruturas de concreto armado, é de fundamental importância o estudo dos mecanismos de transporte de fluidos em seu interior. Desta forma, pode-se avaliar da melhor forma as condições de durabilidade às quais elas estarão submetidas, uma vez que segundo o ACI 201[43] “a durabilidade do concreto é definida como sua capacidade de resistir a ações das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração”.

O ensaio de absorção de água e índice de vazios pode fornecer dados importantes para avaliar qualitativamente a qualidade do concreto, com isto, foram realizados ensaios de absorção de água e índice de vazios para os concretos com e sem adição de sílica ativa. Os resultados estão apresentados nas Tabela 26 e Figura 18.

Tabela 26: Absorção de água e índice de vazios do concreto de alto desempenho com e sem adição de sílica ativa

Concreto	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Consumo de Sílica Ativa (kg/m ³)	Relação água/cimento	Absorção de água (%)	Índice de Vazios (%)
Referência	514 kg/m ³	0 kg/m ³	0,35	1,59	4,03
Sílica Ativa 6%	514 kg/m ³	31 kg/m ³	0,35	1,47	3,23
Sílica Ativa 10%	514 kg/m ³	51 kg/m ³	0,35	1,24	2,95
Sílica Ativa 14%	514 kg/m ³	72 kg/m ³	0,35	1,18	2,71

Figura 18 – Absorção de água e índice de vazios



De acordo com os resultados obtidos no ensaio de absorção de água e índice de vazios, observa-se que o concreto que possuía em sua composição a adição de 14% de sílica ativa apresentou absorção 32,75% menor quando comparado ao concreto sem adição de sílica ativa. Quando avaliados os resultados referentes ao ensaio de índice de vazios, o concreto com 14% de adição de sílica ativa também apresenta uma redução no valor encontrado, sendo 25,79% inferior quando comparado ao concreto sem adição de sílica ativa.

Helene (1993), propõem uma análise qualitativa dos concretos com base em sua absorção de água e índice de vazios, onde, concretos que apresentam índice de vazios menor que 10% e absorção de água menor que 4,2%, são consideráveis como concretos duráveis. A Tabela 27 apresenta os parâmetros de classificação do concreto com base no índice de vazios e absorção de água.

Tabela 27 – Análise qualitativa do índice de vazios e absorção de água

Concreto	Absorção de água (%)	Absorção de água - Proposto por Helene (1993) (%)	Índice de Vazios (%)	Índice de Vazios - Proposto por Helene (1993) (%)
Referência	1,59	< 4,2%	4,03	< 10%
Sílica Ativa 6%	1,47	< 4,2%	3,23	< 10%
Sílica Ativa 10%	1,24	< 4,2%	2,95	< 10%
Sílica Ativa 14%	1,18	< 4,2%	2,71	< 10%

Fonte: Adaptado de Helene (1993).

Diante da análise qualitativa proposta por Helene (1993), verifica-se que mesmo o concreto sem adição de sílica ativa em sua composição pode ser classificado sendo um concreto durável, por apresentar absorção de água de 1,59% e índice de vazios de 4,03. Já o concreto com 14% de sílica ativa apresenta resultado ainda mais satisfatório, com absorção de água de 1,18% e índice de vazios de 2,71%.

Sendo assim, ao estudar a permeabilidade e porosidade do concreto, acredita-se estar acrescentando dados para que possa ser feita uma estimativa de maior

relevância na determinação da vida útil do concreto, pois a água é um agente primário, tanto para sua criação, quanto para sua destruição. No que se relaciona a sólidos porosos como o concreto, a água tem papel de destaque como agente de deterioração não só devido aos inúmeros processos físicos de degradação, como, também, pela possibilidade de tornar-se um veículo de transporte de íons agressivos, que geram também processos químicos de deterioração. Sabe-se que o concreto é um material básico, composto por alcalinos de cálcio, daí a clara tendência de águas ácidas serem prejudiciais ao concreto

Os resultados indicam que mesmo em concretos que apresentam uma baixa porosidade e capacidade de absorção de água, a adição de sílica ativa contribuiu ainda na redução da permeabilidade do concreto.

Com intuito de avaliar a ascensão capilar da água no corpo de prova foi realizado o ensaio de água por capilaridade, o ensaio foi realizado conforme ABNT NBR 9779:2012, os corpos de prova foram secos em estufa e em seguida mantidos em uma camada de água em sua base de 0,5cm (Figura 19) por 72 horas.

Figura 19 – Corpos de prova em contato com a água



Passado este período, as suas massas foram medidas e submetidos a compressão diametral. Após rompido foi avaliado visualmente a ascensão capilar (Figura 20), por fim, foi realizado a medição da ascensão capilar.

Figura 20 – Avaliação visual da ascensão capilar

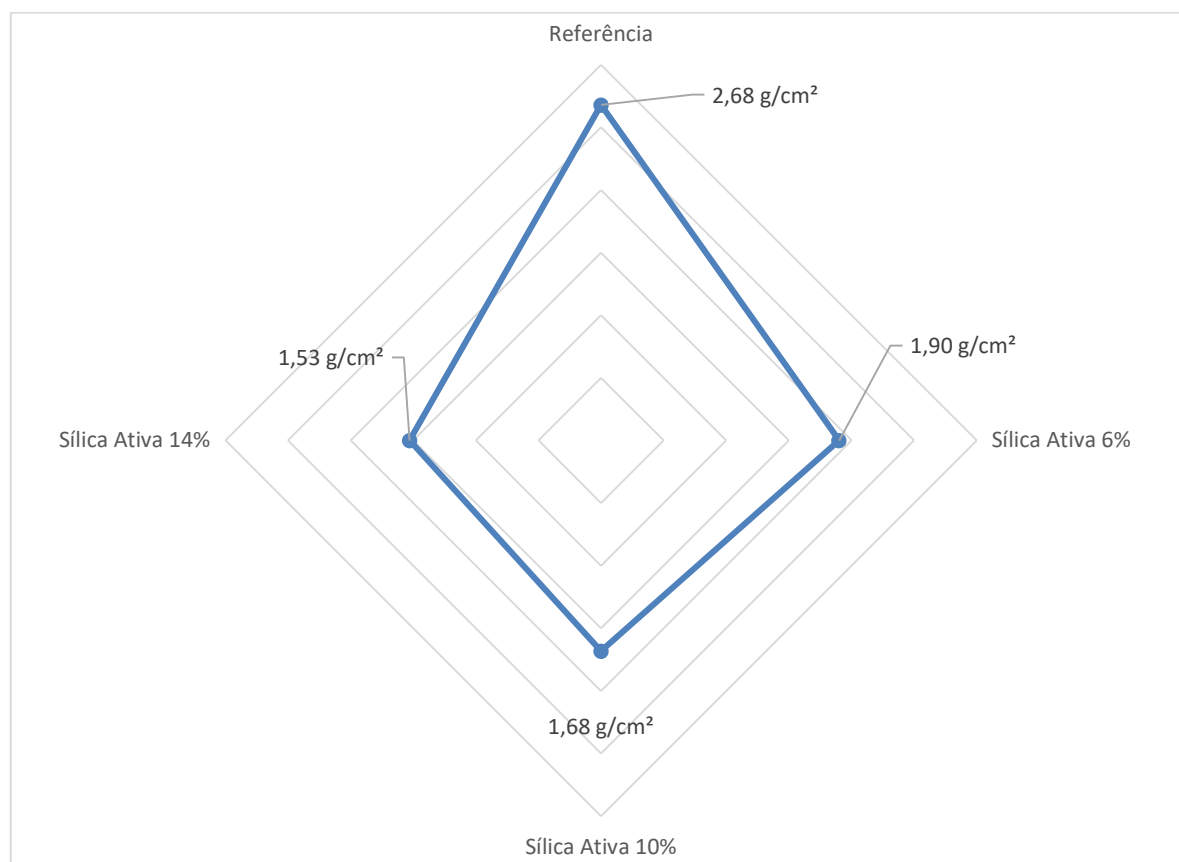


A Tabela 28 e a Figura 21 apresentam os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade.

Tabela 28: Absorção de água por capilaridade do concreto de alto desempenho com e sem adição de sílica ativa

Concreto	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Consumo de Sílica Ativa (kg/m ³)	Relação água/cimento	Absorção de Água por Capilaridade
Referência	514 kg/m ³	0 kg/m ³	0,35	2,68 g/cm ²
Sílica Ativa 6%	514 kg/m ³	31 kg/m ³	0,35	1,90 g/cm ²
Sílica Ativa 10%	514 kg/m ³	51 kg/m ³	0,35	1,68 g/cm ²
Sílica Ativa 14%	514 kg/m ³	72 kg/m ³	0,35	1,53 g/cm ²

Figura 21 – Absorção de água por capilaridade



A absorção capilar é caracterizada pelo transporte de líquidos gerados por uma tensão superficial que atua nos poros capilares do concreto. Concretos produzidos com uma baixa relação água/cimento, em geral, apresentam poros capilares com menores diâmetros e com uma intercomunicação capilar entre eles reduzida, promovendo ao concreto uma menor profundidade de penetração e quantidade de fluidos absorvidos, o grau de hidratação do concreto influencia diretamente na absorção de água por capilaridade Neville (2016).

Os concretos produzidos apresentam uma baixa relação água/cimento 0,35, justificando assim a baixa absorção capilar encontrada durante os ensaios, mesmo para o concreto sem adição de sílica ativa. Analisando os resultados observa-se que mesmo com a baixa capacidade de absorção capilar do concreto sem adição de sílica ativa, as amostras ensaiadas com adição de 14% de sílica ativa apresentaram uma capacidade de absorção capilar ainda menor, uma redução aproximada de 42,91%, indicando um refinamento dos poros capilares decorrente das reações químicas entre

a sílica ativa e os compostos do cimento, a sua capacidade de promover a nucleação das partículas de cimento e devido ao seu efeito filler.

A adição de 10% de sílica ativa promoveu uma redução de 37,31% da absorção capilar do concreto, quando comparado ao concreto referência, um valor 6,21% maior, quando comparado ao concreto com adição de 6% de sílica e 5,5% menor quando comparado ao concreto com adição de 14% de sílica ativa. Arruda et al., (2018), encontraram valores aproximados ao obtido no presente estudo, sendo que na ocasião a adição de 10% de sílica ativa resultou na redução da absorção de água por capilaridade de 35,61%.

5.5 Perdas de massa e inspeção visual dos concretos após o ataque por ácido

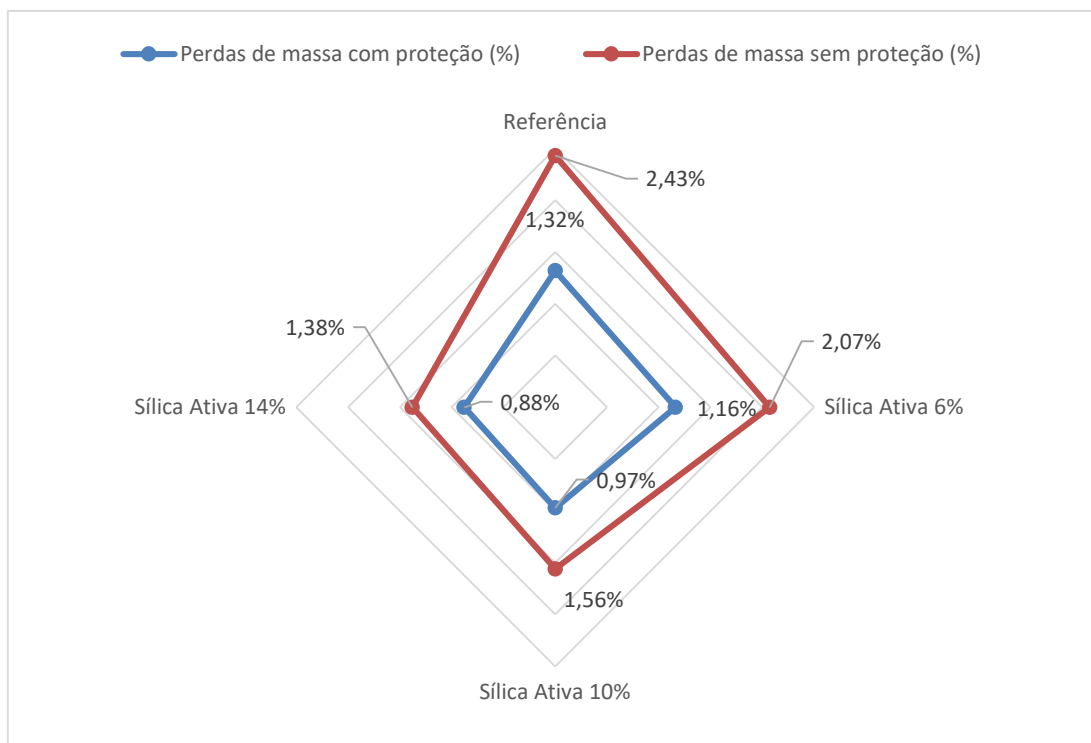
O ataque químico do concreto resulta, essencialmente, de reações de dissolução/precipitação que ocorrem quando os elementos agressivos, por difusão ou por permeação entram em contato com o hidróxido de cálcio do cimento, resultado na degradação da microestrutura do concreto.

Para avaliar a capacidade do concreto resistir a agentes agressivos externos, os corpos de prova foram imersos em ácido por um período de sete dias, passado os sete dias os concretos foram retirados e mantidos em temperatura ambiente por dois dias, após este período os mesmos foram secos em estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, durante um período de 72 horas, sendo sua massa registrada. A Tabela 29 e a Figura 22 apresenta os resultados obtidos no ensaio de perda de massa dos concretos.

Tabela 29: Perdas de Massa dos concretos após o ataque ácido

Concreto	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Consumo de Sílica Ativa (kg/m ³)	Relação água/cimento	Massas (g)		
				Antes do ataque (ms)	Após o ataque (mf)	Perdas de massa (%)
Referência				3785,22	3693,24	2,43
Referência com proteção	514 kg/m ³	0 kg/m ³	0,35	3794,37	3744,28	1,32
Sílica Ativa 6%				3795,21	3716,65	2,07
Sílica Ativa 6% com proteção	514 kg/m ³	31 kg/m ³	0,35	3801,62	3757,52	1,16
Sílica Ativa 10%				3811,34	3751,88	1,56
Sílica Ativa 10% com proteção	514 kg/m ³	51 kg/m ³	0,35	3820,06	3783,01	0,97
Sílica Ativa 14%				3821,43	3768,69	1,38
Sílica Ativa 14% com proteção	514 kg/m ³	72 kg/m ³	0,35	3827,12	3793,44	0,88

Figura 22 – Perdas de massa



Os resultados obtidos nos ensaios de perdas de massa, demonstram que a sílica ativa foi capaz de promover uma redução significativa na perda de massa dos concretos, devido a sua capacidade de refinamento dos poros e redução permeabilidade do concreto, a sílica ativa dificulta a penetração do ácido, promovendo assim a diminuição da degradação superficial do concreto. O concreto referência teve uma perda de sua massa de aproximadamente 2,43%, valor 42,31% menor quando comparado ao concreto com adição de 14% de sílica ativa, que teve uma redução de 1,38%. Os concretos com adição de 6% e 10% tiveram perdas de 2,07% e 1,56% respectivamente. Tais resultados demonstram a eficiência da sílica ativa na durabilidade de concretos submetidos a meio agressivo ácido.

O efeito da adição da sílica ativa também foi verificado por Dal Molin et al., (1996). A maior perda de massa para o ensaio de resistência ao ataque ácido, foi para a maior relação a/c e para o traço sem adição de sílica ativa.

Avaliando os concretos com o sistema de proteção superficial composto por um verniz de poliuretano, é possível observar que ele se mostrou eficaz na proteção dos concretos em ambientes agressivos, ele foi capaz de reduzir as perdas de massa dos concretos em aproximadamente 20%, o concreto referência, sem a adição de sílica ativa em sua composição teve a perdas de massa reduzida em 23,98%, já o concreto com adição de 14% de sílica ativa, a sua perda de massa foi reduzida em 15,97%. Os concretos com adição de 6% e 10% de sílica ativa, a redução foi 21,05% e 16,42% respectivamente.

A maior eficiência do sistema de proteção superficial de poliuretano foi para os concretos com menores teores de sílica ativa, ou seja, concretos que já estavam sujeitos a perder uma quantidade de massa devido ao processo corrosivo do ácido.

A degradação superficial do concreto foi avaliada por meio da inspeção visual de corpos de prova, sendo este processo realizado antes e após o ataque ácido. A Figura 23 apresentam os corpos de prova após o ataque ácido.

Figura 23 – Deterioração superficial do concreto após o ataque ácido



Observando as imagens é possível observar que os concretos sofreram processo de deterioração em sua camada superficial expondo grande parte dos agregados, indicando a decomposição da pasta de cimento presente na superfície. Além disto, observa-se que com a medida em que se aumenta o teor de sílica, apresenta-se uma leve redução no desgaste superficial.

Segundo Andrade et al., (2003), a degradação do concreto por origem ácida não mantém uma relação direta com a resistência mecânica, mas a relação água/cimento (a/c) e o processo de cura são fatores de influência contra o ataque de agentes agressores no concreto. Já as adições minerais podem ser benéficas aos ataques químicos devido à melhor fixação do Ca(OH)_2 , produto mais vulnerável na pasta de cimento.

Os concretos nos quais foi aplicado o sistema de proteção superficial composto por um verniz de poliuretano não foi possível observar a degradação visual expressiva, como foi o caso dos concretos sem proteção, a Figura 24 apresenta os corpos de prova com proteção superficial de poliuretano após imersão em ácido por 7 dias.

Figura 24 – Corpos de prova com proteção superficial após o ataque ácido



Com base nos resultados obtidos, o sistema de proteção superficial a base de poliuretano se mostrou eficaz quando utilizado em meios altamente agressivos.

A Figura 25 apresenta um corpo de prova de um concreto que não possuía a adição de sílica ativa, no qual, em sua metade foi aplicado o sistema de proteção superficial a base de poliuretano, e na outra metade não foi aplicado.

Figura 25 – Corpo de prova com aplicação do sistema de proteção superficial em sua metade



Observa-se a degradação superficial no lado esquerdo do concreto, a qual, não tinha o sistema de proteção superficial composto por um verniz de poliuretano, evidenciando a eficiência do sistema de proteção superficial em concretos submetidos a meios agressivos.

5.6 Resistência à compressão dos concretos após o ataque

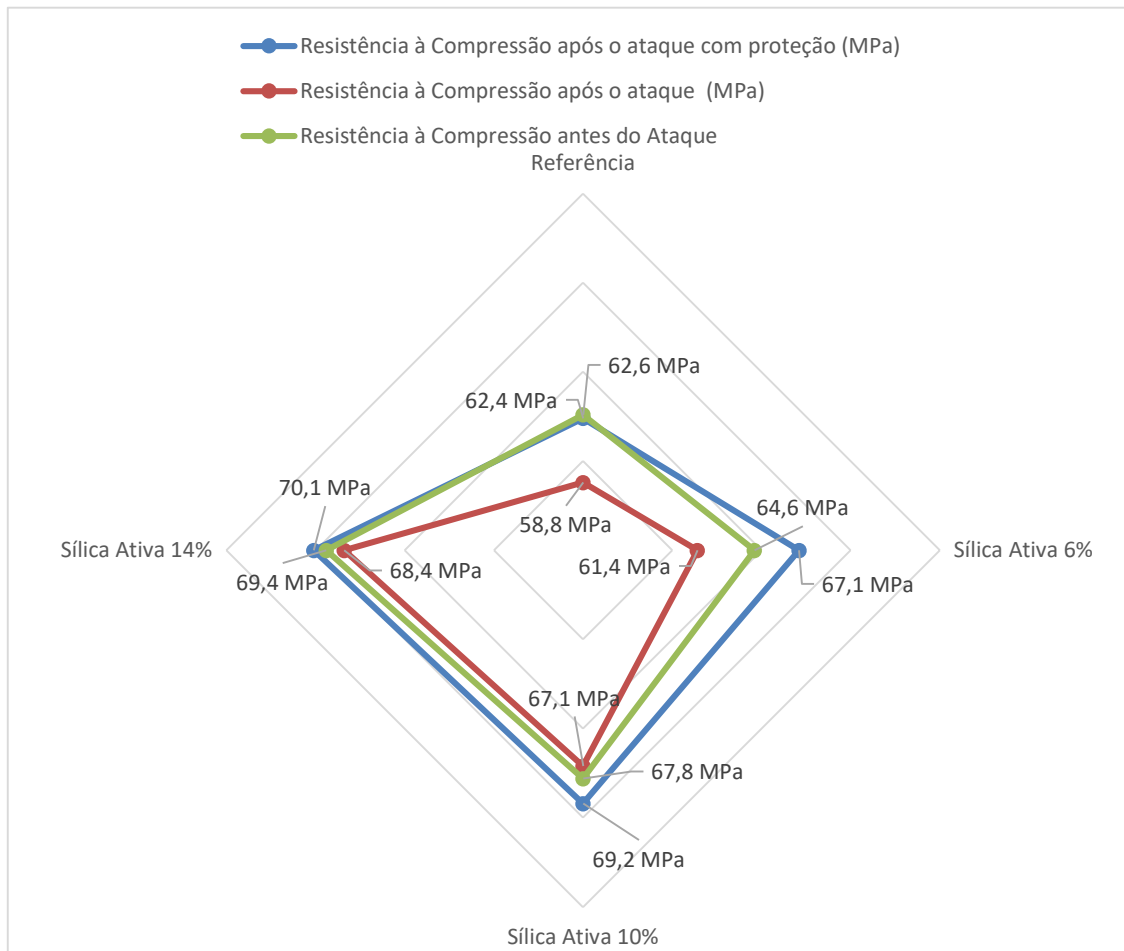
Os resultados obtidos de resistência à compressão do concreto de referência e do concreto com adição de sílica ativa antes e após ataque por ácido sulfúrico são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30: Resistência à compressão dos concretos antes e após o ataque por ácido sulfúrico

Concreto	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Consumo de Sílica Ativa (kg/m ³)	Relação água/cimento	Resistência à Compressão antes do ataque (MPa)	Resistência à Compressão após o ataque (MPa)	Resistência à Compressão após o ataque Com Proteção (MPa)
Referência	514 kg/m ³	0 kg/m ³	0,35	64,7	58,8 (-9,12%)	62,4 (-3,55%)
Sílica Ativa 6%	514 kg/m ³	31 kg/m ³	0,35	66,3	61,4 (-7,39%)	67,1 (1,21%)
Sílica Ativa 10%	514 kg/m ³	51 kg/m ³	0,35	69,8	67,1 (-3,87%)	69,2 (-0,86%)
Sílica Ativa 14%	514 kg/m ³	72 kg/m ³	0,35	71,4	68,4 (-4,20%)	70,1 (-1,82%)

A Figura 26 apresenta o comparativo do ganho ou perda de resistência dos concretos antes e após o ataque ácido.

Figura 26 – Resistência à compressão antes e após o ataque



Ensaio de compressão demonstram que a adição de sílica ativa contribuiu para manter as características originais dos concreto, comparando o concreto referência sem adição de sílica ativa com os concretos com adição de sílica ativa, observa-se que a sílica ativa foi capaz de reduzir em até 33,44% a perda da resistência à compressão dos concretos, onde o concreto referência teve uma redução de 9,12% de sua resistência a compressão, o concreto com 10% de sílica ativa apresentou o melhor resultado 3,87%, os concretos com 6% e 14% tiveram uma redução da resistência à compressão de 7,39% e 4,20% respectivamente.

A sílica ativa tem uma enorme capacidade de reduzir a porosidade capilar do concreto, o que garante um material mais impermeável capaz de reduzir a migração do ácido para seu interior preservando a sua microestrutura original, diminuindo assim perda de resistência dos concretos.

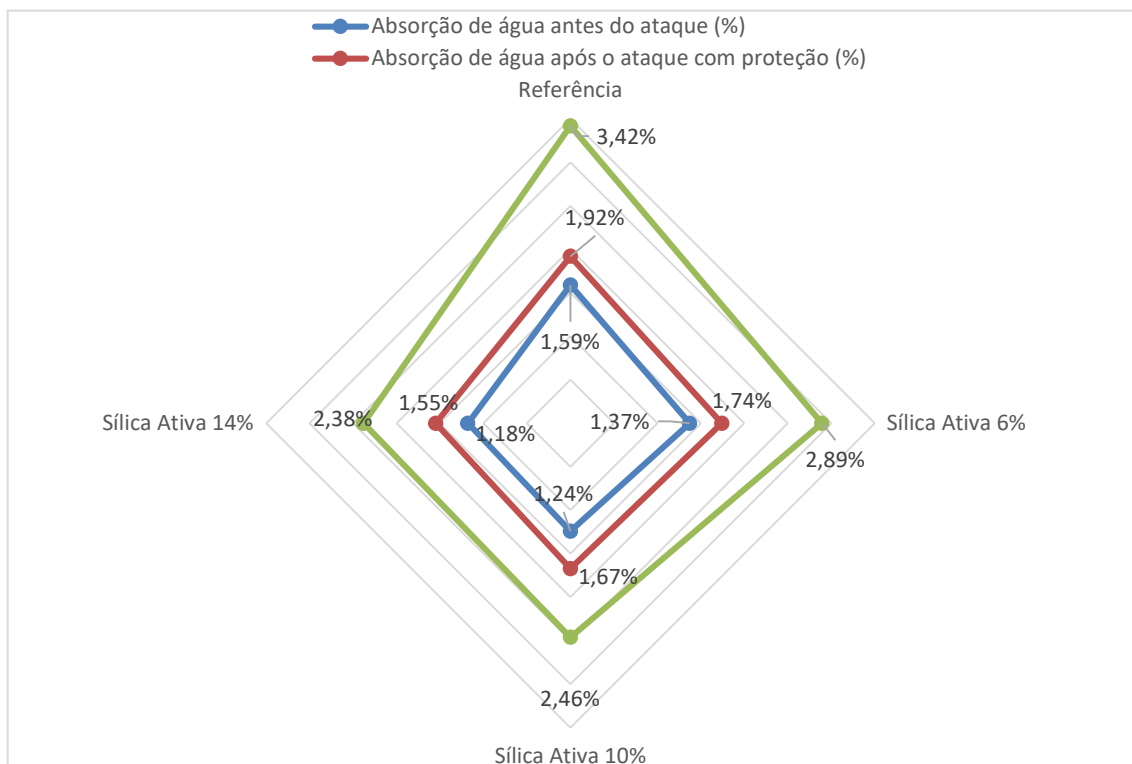
5.7 Influência da absorção de água dos concretos antes e após ataque ácido

Os resultados obtidos nos ensaios de absorção do concreto de referência e do concreto com adição de sílica ativa, antes e após ataque por ácido sulfúrico, são apresentados na Tabela 31 e na Figura 27.

Tabela 31: Absorção de água dos concretos após o ataque ácido

Concreto	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Consumo de Sílica Ativa (kg/m ³)	Relação água/cimento	Absorção de água antes do ataque	Absorção de água após o ataque	Absorção de água após o ataque Com Proteção
Referência	514 kg/m ³	0 kg/m ³	0,35	1,59	3,42 (115,05%)	1,92 (20,75%)
Sílica Ativa 6%	514 kg/m ³	31 kg/m ³	0,35	1,37	2,89 (110,95%)	1,74 (27,01%)
Sílica Ativa 10%	514 kg/m ³	51 kg/m ³	0,35	1,24	2,46 (98,39%)	1,67 (34,68%)
Sílica Ativa 14%	514 kg/m ³	72 kg/m ³	0,35	1,18	2,38 (101,69%)	1,55 (31,36%)

Figura 27 – Absorção de água antes e após o ataque



Avaliando os resultados de absorção antes e após o ataque ácido, Observa-se um aumento considerável nos valores médios de absorção de água dos concretos, onde o concreto sem adição teve um aumento de 115,09% e o concreto com adição 10% de sílica ativa apresentou o melhor resultado, sendo um aumento de 98,39%. Para os concretos com adição de 6% e 14% o aumento foi de 110,95% e 101,67% respectivamente.

Grande parte deste aumento está relacionada a decomposição da camada superficial de pasta cimento, criando uma superfície porosa e de poros interconectados.

Mesmo os concretos após o ataque apresentando um aumento considerável na taxa de absorção de água, os valores ainda estão bem abaixo de 4,2%, uma característica primordial para garantir a durabilidade do concreto e a vida útil da estrutura.

O sistema de proteção superficial a base de poliuretano se mostrou eficiente quando submetido ao ataque ácido evitando a degradação dos concretos e reduzindo a sua absorção de água quando comparado aos concretos sem proteção. O concreto referência teve uma absorção 60,57% menor quando aplicado o sistema de proteção superficial de poliuretano, para os concretos com teores de 6%, 10% e 14% tiveram reduções de 60,20%, 67,88% e 65,12% respectivamente. A camada protetora foi capaz de reduzir a absorção de água dos concretos após o ataque em aproximadamente 60%.

6. CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho destacaram os benefícios da adição de sílica ativa em concretos de alto desempenho. Com base na revisão bibliográfica e nos estudos de dosagens foi possível concluir que a adição de sílica ativa em teores de 6% a 14% proporciona benefícios consideráveis ao concreto. Além de aumentar a resistência mecânica e reduzir a porosidade, a sílica ativa demonstrou a capacidade de melhorar a durabilidade do concreto, especialmente em ambientes agressivos. É importante observar que a eficácia da sílica ativa foi evidenciada em teores específicos.

Os estudos compararam concretos de alto desempenho sem adição de sílica ativa e concretos contendo em sua composição a adição 6%, 10% e 14% de sílica ativa, mantendo a relação água/cimento e a proporção dos materiais constituintes iguais. O objetivo de desenvolver concretos com resistência superior a 60MPa foi alcançado. Os concretos com adição de 6%, 10% e 14% de sílica ativa apresentaram respectivamente resistências à compressão aos 28 dias de 64,6MPa, 67,8MPa e 69,4MPa, valores superiores ao concreto referência que, aos 28 dias, apresentou resistência à compressão de 62,6MPa.

Os ensaios apresentaram melhorias notáveis no módulo de elasticidade e na resistência à tração por compressão diametral, indicando uma microestrutura mais robusta do concreto, especialmente na zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado. Concretos com sílica ativa em sua composição tiveram um aumento do módulo de elasticidade em 9,48%. Quanto à resistência à tração por compressão diametral, houve um incremento de 32,85% para o concreto com 14% de sílica ativa.

A permeabilidade do concreto também foi reduzida, conforme demonstrado pelos ensaios de absorção de água, destacando-se a eficácia da sílica ativa em tornar o concreto mais impermeável. O índice de vazios do concreto com adição de 14% de sílica ativa foi reduzido em 32,75%, já a absorção do concreto com 14% de sílica ativa foi reduzida em aproximadamente 25,79% em comparação com o concreto sem adição de sílica ativa.

Além disso, com intuito de simular ambientes agressivos este trabalho apresentou ensaios de resistência após a exposição dos concretos a ácido sulfúrico. O concreto com sílica ativa apresentou uma resistência consideravelmente maior e uma menor degradação superficial em comparação com o concreto sem adição. Após o ataque ácido, os concretos foram submetidos a ensaios de resistência à compressão e absorção, com o concreto com sílica ativa mostrando uma redução menor dessas características em comparação com o concreto sem adição.

A adição de sílica ativa é capaz de produzir concretos com desempenho superior quando comparados a concretos sem sílica ativa. Com base nas melhorias promovidas pela adição de sílica ativa é possível concluir que é possível produzir concretos com resultados similares ou superiores e ainda realizar uma redução no consumo de cimento. A redução do consumo de cimento é possível pelo fato de que a sílica ativa atua como uma pozolona, aumentando a quantidade de silicato de cálcio hidratado e, portanto, fortalecendo a microestrutura do concreto. Tal redução, pode promover ganhos ambientais, sendo que, a produção de cimento é muito mais agressiva ao meio ambiente, quando comparada a produção de sílica ativa.

Além dos ganhos ambientais, a redução de cimento pode promover alguns benefícios ao concreto, como redução da fissuração por retração e a diminuição do efeito térmico em concretagens de grandes volumes, o efeito térmico do concreto pode contribuir para a fissuração e para a formação de etringita tardia.

Assim, a adição de sílica ativa apresenta-se como uma alternativa viável para melhorar a durabilidade e a resistência de concretos de alto desempenho em aplicações em ambientes extremamente agressivos.

REFERÊNCIAS

ABREU F. S., RIBEIRO C. C., PINTO J. D. S., NSUMBU, T. M., BUONO V. T. L., Influence of adding discontinuous and dispersed carbon fiber waste on concrete performance. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v.273, n.122920, 10p. jul. 2020a

ABREU, F. S. Análise da durabilidade de concreto leve de argila expandida com camada protetora submetido a meio agressivo ácido. Belo Horizonte: UFMG, 2014. 71p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).

AÏTCIN, P. C. Concreto de Alto Desempenho. Tradução Geraldo Serra. Pini. São Paulo, 2000 b.

AMARAL FILHO, E.M. Concreto de alta resistência. São Paulo, 1988. Texto datilografado.

AMARAL, E. M. F. Concreto de alta resistência, Ibracon, ano II, nº 4, p. 40-49, 1992.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Manual of concrete practice. Part I. 1973

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committe 211, *ACI Mat. J.*, Vol. 89, No. 5, 1991.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 234R-96. Guide for the use of silica fume in concrete. *ACI Manual of Concrete Practice 2005*. ACI, Detroit (USA), 2001. 51 p.

ANDRADE, Jairo José de Oliveira et al., Avaliação das Características do Concreto Quando Submetido à Degradação de Origem Química. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 45., 2003, Vitória. Anais... São Paulo: Ibracon, 2003. 1 CD-ROM.

ARRUDA Flávia Favacho et al., Absorção por capilaridade em concretos produzidos com adição de sílica ativa. CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E AGRONOMIA, Maceió/AL, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015, 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de Compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2023. 242p

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, 2021, 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação, Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021, 24p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13956: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Rio de Janeiro, 2012, 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021, 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16917: Agregado Graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: Agregados: Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16973: Agregados – Determinação do amaterial fino que passa pela peneira de 75 μm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022, 5p.

BALBO J. T. Relação entre resistências à tração indireta e à tração na flexão em concreto secos e plásticos. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, São Paulo, v.6, n.6, p. 854-874, dez. 2013.

BATTAGIN, I. L. S. Módulo de Elasticidade do Concreto - Normalização, fatores de influência e interface com o pré-moldado. Concrete Show, 2008, São Paulo.

BENETTI, J. K. Avaliação do Módulo de Elasticidade Dinâmico de Concreto Produzido com Agregado Graúdo Reciclado de Concreto. São Leopoldo: Universidade Vale do Rio dos Sinos, 2012. 85p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).

BEUSHAUSEN H., TORRENT R., ALEXANDER M. G., Performance-based approaches for concrete durability: State of the art and future research needs. Cement and concrete Research, Amsterdam, v.119, n. 1, p. 11-20, mai, 2019.

BHATTACHARYA, M., HARISH, K.V. "An integrated approach for studying the hydration of portland cement systems containing silica fume," *Construction and Building Materials*, v. 188, pp. 1179–1192, 2018.

BIANCHINI, M. Análise da influência dos teores de sílica ativa na produção de concretos de alta resistência em central dosadora de concreto. Curitiba: UFPR, 2010. 148p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).

CARNEIRO, L.R.S., GARCIA, D.C.S., COSTA, M.C.F., et al., "Evaluation of the pozzolanicity of nanostructured sol-gel silica and silica fume by electrical conductivity measurement," *Construction and Building Materials*, v. 160, pp. 252–257, 2018.

CHA, N R., SANTANA M. A, ODA A. M., PANIGUEL R. C., VIEIRA L. B., FIGUEIREDO A. D., GALOBARDES L., Analysis of potential use of fibre reinforced recycled aggregate concrete for sustainable pavements. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v.218, p. 183-191, mai, 2019.

CORDEIRO, G. C. "Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto." Tese de Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

DAL MOLIN, D. C. Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microsilica. Tese de doutorado, DCC/EPUSP, 1995.

FORNASIER, R. S. Porosidade e permeabilidade do concreto de alto desempenho com microsilica. Porto Alegre, 1995. 163p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).

FRIGIONE M., LETTIERI M., Durability Issues and Challenges for Material Advancements in FRP Employed in the Construction Industry. *Polymers*, Basel, v.247, n.1, p. 1-15, fev. 2018.

GAMBHIR, M. L. *Concrete Technology*. 3 ed., Nova Délhi: Tata McGraw-Hill Education, 2006. 658p.

GAVA, G.P. et al., *Concreto de normal e alta resistência – definição do teor de aditivo de água e dosagem para materiais da região oeste do Paraná*. IBRACON, 2001.

GAMBHIR, M. L. *Concrete Technology*. 3 ed., Nova Délhi: Tata McGraw-Hill Education, 2006. 658p.

HARTMANN, C. Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

HELENE, P.R. L. Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto, 2ª ed. São Paulo: Editora Pini Ltda, 213p., 1992.

HELENE, P.R.L. Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto. Ambiente construído, ANTAC, São Paulo, vol. 1, nº 2, p. 45-57, 1997.

HELENE, P.R.L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

KANTRO, D. L., Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test, Cement, Concrete and Aggregates. V. 2, n. 2, 1980. p. 95-102.

KHAYAT, K.H.; AITCIN, P.C. Silica fume in concrete - an overview. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4., 1992, Istanbul, Turkey. Proceedings... Detroit: American Concrete Institute, 1993. v2, p.835-872 (ACI Special Publication, 132).

KRAMAR, S., DUCMAN, V. "Evaluation of ash pozzolanic activity by means of the strength activity index test, frattini test and DTA/TG analysis," Tehnicki Vjesnik, v. 25, n. 6, pp. 1746–1752, 2018.

KULAKOWSKI, M.P. Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa. Dissertação (mestrado em engenharia de minas, metalurgia e de materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre: 2002. 180 p.

LAWRENCE, P., CYR, M., RINGOT, E., 2003, "Mineral admixtures in mortars – Effect of inert materials on short-term hydration", Cement and Concrete Research, v. 33, n. 12, pp. 1939-1947, 2003.

LEGRAN, C.; WIRQVIN, E. Effects of the initial structure of the cement paste in fresh concrete on the first development of strength. Influence of superplasticizer. In: 9th INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT. New Delhi. v. 5, p. 95-101, 1992.

LIMA, F.B. Pilares de concreto de alto desempenho: fundamentos e experimentação. Tese (doutorado em engenharia de estruturas) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia, São Carlos: 1997. 170 p.

MEHTA, P.K. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais, São Paulo: Editora Pini Ltda, 573p, 1994.

MALHOTRA, V. M.; CARETTE, G. .G Silica Fume: a pozzolan of new Interest for use in some concretes. Concrete Construction, 1982.

MELO, A. B. Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland. Tese (Doutorado) - Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais IFSC – IQSC – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

MONTEIRO, P. J. M. Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties. Berkeley, Cal: University of California, 1985. 153p. Tese de Doutorado.

MONTEIRO, P. J. M. Caracterização da microestrutura do concreto: fases e interfaces; aspectos de durabilidade e de microfissuração. São Paulo, 1993^a. 138p. Tese de Professor Livre Docente do Departamento de Engenharia de Construção Civil da USP.

NEITHALATH, N., PERSUN, J., HOSSAIN, A. "Hydration in high-performance cementitious systems containing vitreous calcium aluminosilicate or silica fume," *Cement and Concrete Research*, v. 39, n. 6, pp. 473-481, 2009.

NEVILLE, AM.. *Propriedades do Concreto*, 5^a ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888p.

NEVILLE, A.M; BROOKS, J.J. *Tecnologia do concreto*. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448p.

OLIVEIRA, M. P. de, BARBOSA, N. P.. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. V. 10,2006. Disponível em Acessado em nove. 2014.

PAPADAKIS, V.G. "Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete," *Cement and Concrete Research*, v. 29, pp. 79–86, 1999.

PETRUCCI; E. G. R; *Concreto de Cimento Portland*. 7 ed. GLOBO,1980. 1 v. 307 p.

RÊGO, J.H.S., ROJAS, M.F., TERRADES, A.M., et al., "Effect of partial substitution of highly reactive mineral additions by Nanosilica in cement pastes," *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 31, n. 1, pp. 1-11, 2019.

RIBEIRO, C. C., PINTO, J. S., SATARLING, T. *Materiais de Construção Civil*. 4. ed. Editora UFMG, 2013. 1 v. 212 p.

SANTOS, G. R. S. et al., Avaliação da Intensidade de Deterioração de uma Estrutura de Concreto Armado Localizada em Ambiente Marinho e Exposta à Ação de Solução Ácida: estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48., 2006, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: Ibracon, 2006. 1 CD ROM.

SANJUÁN, M.Á., ARGIZ, C., GÁLVEZ, J.C., et al., "Effect of silica fume fineness on the improvement of Portland cement strength performance," *Construction and Building Materials*, vol. 96, pp. 55–64, 2015.

RAMANATHAN, S., MOON, H., CROLY, M., et al., "Predicting the degree of reaction of supplementary cementitious materials in cementitious pastes using a pozzolanic test," *Construction and Building Materials*, v. 204, pp. 621–630, 2019.

SHAH, S. P.; AHMAD, S. H. (1994) *High performance concretes and applications*. London, Edward Arnold, 402 p.

SILVA F. G. Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos. Tese (Doutorado em ciência e engenharia dos materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos: 2006. 220 p.

SILVA, I, J. Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura. Tese (Doutorado em ciência e engenharia dos materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos: 2000.

SPONHOLZ, I., PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R, STEIL, R. Estudo comparativo de diferentes metodologias para a seleção de aditivos de água para o concreto de alto desempenho. IBRACON, 1998.

VAL, J.G. Avaliação do desempenho de camada protetora em concreto submetido a meio quimicamente agressivo. Dissertação (mestrado em construção civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte: 2007. 85 p.

VIEIRA, F. P. et al., Estudos de Durabilidade em Concretos e Argamassas com Adição de Microssílica. Disponível em:<www.allquimica.com.br/arquivos/websites/artigos/WS_Durabilidade200612261066>.

WANG, X., HUANG, J., DAI, S., et al., “Effect of silica fume particle dispersion and distribution on the performance of cementitious materials: A theoretical analysis of optimal sonication treatment time,” *Construction and Building Materials*, v. 212, pp. 549–560, 2019.

ZELIČ, J., RUŠIČ, D., VEŽA, D., et al., “Role of silica fume in the kinetics and mechanisms during the early stage of cement hydration,” *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 10, pp. 1655–1662, 2000.