UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA, ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA DURABILIDADE E DO TRANSPORTE DE FLUIDOS EM CONCRETOS CONTENDO ADIÇÕES MINERAIS

MARINA AUGUSTA MALAGONI DE ALMEIDA

D0144C16 GOIÂNIA 2016





TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: [x] Dissertação [] Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Nome completo do autor: Marina Augusta Malagoni de Almeida.

Título do trabalho: Contribuição ao estudo da durabilidade e do transporte de fluidos em concretos contendo adições minerais.

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento [x] SIM [] NÃO1

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

Assinatura do (a) autor (a)

Data: 24 / 03 / 2017

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

MARINA AUGUSTA MALAGONI DE ALMEIDA

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA DURABILIDADE E DO TRANSPORTE DE FLUIDOS EM CONCRETOS CONTENDO ADIÇÕES MINERAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre.

Área de concentração: Construção Civil Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Helena Carasek

> D0144C16 GOIÂNIA 2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Almeida , M Contrib em concrei Malagoni d 174 f.	/larina Augusta Malagoni de uição ao estudo da durabilidade e do trans tos contendo adições minerais [manuscrito] e Almeida 2017.	porte de fluidos / Marina Augusta
Orienta Profa. Hele Dissert de Engenh Civil - Geo	dor: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo; co-orienta na Carasek. ação (Mestrado) - Universidade Federal de aria Civil (EEC) , Programa de Pós-Gradua tecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiâr	adora Dra. Goiás, Escola ção em Engenharia iia, 2017.
Inclui a	breviaturas, lista de figuras, lista de tabelas	i.
1. Mec Nanossílica	anismos de transporte. 2. Durabilidade. 3. S a. 5. Metacaulim I. Cascudo, Oswaldo , ori	Sílica ativa. 4. ent. II. Título.
		CDU 624



Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil



Ata de Nº 0144 da sessão de julgamento da Dissertação da aluna Marina Augusta Malagoni da área de concentração Construção Civil do PPG em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil.

Aos 21 dias do mês de setembro de 2016, às 08h30, na sala Caryocar, Bloco A, 2º andar, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computacional da UFG, reuniu-se a banca examinadora designada na forma regimental pela Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil para julgar a Dissertação intitulada "Contribuição ao Estudo da Durabilidade e do Transporte de Fluidos em Concretos Contendo Adições Minerais", apresentada pela aluna Marina Augusta Malagoni, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de MESTRE, área de concentração Construção Civil. A Banca Examinadora foi Presidida pelo Prof. Dr. Oswaldo Cascudo Matos (GECON/UFG), tendo como membros a Prof.ª Dr.ª Tatiana Gondim do Amaral (GECON/UFG) e a Prof.ª Dr.ª Anne Neyre de Mendonça Lopes (Eletrobras – FURNAS). Aberta a sessão pública, a candidata teve a oportunidade de expor o trabalho. Após a exposição, a aluna foi arguida oralmente pelos membros da Banca, os quais concluíram pelos seguintes resultados:

Membro	Instituição	Função	Resultado
Oswaldo Cascudo Matos	GECON/UFG	Presidente APROXAD	Dewer Sparsh Arta
Tatiana Gondim do Amaral	GECON/UFG	Examinadora Interna	APROVADO
Anne Neyre de Mendonça Lopes	Eletrobras – FURNAS	Examinadora Externa	-APROVADO

(Y) Tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela aprovação da candidata sem restrições.

() Não tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **reprovação** da candidata, conforme as seguintes justificativas:

Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-Graduação desta Universidade, foi lavrada a presente ata que, lida e julgada conforme, segue assinada pelos membros da Banca Examinadora e pela candidata.

۸Q atiana Gondim do Amaral Anne Navre de Mendonca PPG-GECON/UFG Eletrobras - FURNAS Oswaldo Cascudo Matos PPG-GECON/UEG tar Malageni. ino Candidata: Marina Augusta Malagoni

Aos meus pais, Augusto e Evanise, pelos bons e maus exemplos, à tia Rosângela, pelo suporte na minha formação pessoal e profissional e ao Alex, pelo companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Augusto e Evanise, por sempre me apoiarem e me motivarem a buscar os meus sonhos.

À minha irmã Mayara, pelo apoio, por mostrar que se importa comigo, pela paciência, pelo exemplo de garra e pela confecção, edição e tratamento das figuras.

À minha tia Rosângela, por me apoiar incondicionalmente nas minhas escolhas, pelo suporte e orientação ao longo da minha formação pessoal e profissional e pelo exemplo de mulher batalhadora.

Aos professores e amigos Oswaldo Cascudo e Helena Carasek pela orientação competente, pelo exemplo de profissionalismo e pela motivação desde os tempos da graduação, de trabalho de conclusão de curso, passando pela iniciação científica, pelo intercâmbio até o mestrado. Muito obrigada por tantas oportunidades maravilhosas.

Aos demais professores do GECON que estiveram presentes ao longo da minha caminhada acadêmica, principalmente ao Marcus Campos e à Maria Carolina Brandstetter, pelo apoio emocional e conselhos amorosos e à professora Tatiana Gondim do Amaral por aceitar o convite e participar da banca.

Aos colegas do mestrado com os quais tive a oportunidade de conviver mais de perto, Cecile, Fausto, Flávio, Gabi, Gustavo, Raquel, Renato Costa, Victor Leandro, Victor Scartezini, Patrícia Gambale, Patrícia Carvalho, e em especial à Aline Crispim, pelas noites mal dormidas de conselhos e desabafos em Rio Verde, ao Rodrigo Teodoro, por ser tão solicito e pelas informações e materiais fornecidos, ao Michael e à Bárbara, pelas experiências de morar em outra cidade e pela oportunidade de trabalharmos juntos como professores.

Aos colegas de mestrado, amigos, parceiros de projeto e da vida, Alex Mizael e Plínio Pires, por carregar/furar/limpar/cortar/guardar/ensaiar/cuidar dos meus concretos, por me escutarem desabafar, pelas caronas, por me aturarem, por me perdoarem, por me ajudarem, por se preocuparem, por tudo.

Ao colega de mestrado, amigo, parceiro de projeto e da vida e namorado, Alex, por segurar na minha mão e não me deixar desistir, mesmo com tantos problemas.

Aos alunos de iniciação científica, Eleude, Guilherme e, em especial, ao Gabriel, pela troca de conhecimentos, pela ajuda no decorrer do programa experimental, da escrita e pela compreensão.

À minha família de modo geral, por compreender a minha ausência e por me querer bem.

Às minhas amigas Cindy e Alessandra, pelos poucos, mas de muita qualidade, momentos de risadas e pelos conselhos jurídicos.

À minha amiga Talita e toda a sua família que, mesmo de longe, sempre me motivou a concluir mais essa etapa na minha vida e a persistir nos meus sonhos.

À Gerência de Pesquisa, Serviços e Inovação Tecnológica de Furnas Centrais Elétricas S.A. pela realização dos ensaios e doação do material necessário à confecção dos corpos de prova e por disponibilizar os laboratórios e o pessoal. Em especial ao Eng. Mestre Alexandre Castro, pelas orientações competentes, pela paciência, por ser tão solicito e também pelos conselhos de vida, e à Eng. Dr^a. Anne Neiry que participou desta pesquisa desde o seu surgimento, por ser tão parceira e compreensiva e também por participar da banca.

À toda equipe de Furnas, pela confecção dos corpos de prova, realização dos ensaios e pelos momentos divertidos, em especial ao Mão de Onça, Jeguinho, Paulo Arcanjo, Fábio, Silvio Cândido, Seu Jorge e Renato Batista, pela análise cuidadosa no MEV, pelo tempo disponibilizado para as discussões, pela paciência, pela compreensão e pelo trabalho competente realizado.

Ao Centro de Gestão do Espaço Físico da UFG (CEGEF), pela confecção cuidadosa das fôrmas e pelo corte e dobra das armaduras.

Ao tio Wellington, por soldar as armaduras.

Ao técnico laboratorista do LABITECC, Vitor, pela inestimável ajuda na condução do programa experimental.

À Votorantim Cimentos pela doação do cimento indispensável à execução do programa experimental.

À Metacaulim do Brasil pela doação dos metacaulins utilizados, em especial ao Eng. Me. Guilherme Gallo.

À Silicon, pelo fornecimento da nanossílica utilizada na pesquisa, em especial ao Eng. Eduardo Cherutti.

À CAPES pelo apoio financeiro indispensável na forma de concessão de bolsa.

Aos meus queridos alunos da UNIRV, por me fazerem companhia, pelas conversas e por compreenderem a loucura que é um mestrado, em especial à Aniele e Amanda.

A Deus, acima de tudo, por ter colocado cada uma dessas pessoas em minha vida e por me abençoar tanto.

"O que escrevo nasce do meu próprio amadurecimento, um trajeto de altos e baixos, pontos luminosos e zona de sombra. Nesse curso entendi que a vida não tece apenas uma teia de perdas mas nos proporciona uma sucessão de ganhos. O equilíbrio da balança depende muito do que soubermos e quisermos enxergar."

RESUMO

A atual crise hídrica brasileira, gerada pelo baixo nível dos reservatórios, tem ameacado a produção energética nacional. Frente a esse problema, as torres eólicas se apresentam como uma solução viável. Sabe-se que essas torres são construídas em regiões de alta agressividade e, portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de concretos de alto desempenho que sejam capazes de resistir às acões ambientais às quais são submetidos de maneira que essas estruturas atinjam a vida útil de projeto previamente definida, garantindo a viabilidade das torres. Nesse sentido, o presente trabalho avalia as propriedades mecânicas e os mecanismos de transporte de massa (permeabilidade e absorção) que ocorrem no interior dos concretos que contêm adições minerais pozolânicas de alto desempenho, com o intuito de avaliar a influência da presença dessas adições nessas propriedades. Foram elaborados três diferentes proporcionamentos de estudo contendo respectivamente, 9% de sílica ativa em composição com 1% de nanossílica, 5% de um metacaulim de elevada finura em composição com 5% de um metacaulim um pouco menos fino, ambos de elevada pozolanicidade e um proporcionamento contendo exclusivamente 10% do metacaulim de maior finura, além de um proporcionamento de referência. São apresentadas análises em microscópio eletrônico de varredura (MEV) visando à caracterização da estrutura interna do material, reconstituição de traco com vistas à análise do teor de agregado/ligante nas regiões do cobrimento e do interior do concreto, análises relacionadas ao transporte de massa: absorção de água por imersão e por capilaridade e permeabilidade ao ar pelo método de Figg. além da caracterização mecânica. Os concretos com incorporação de adição pozolânica apresentaram melhorias significativas na resistência à compressão, no módulo de elasticidade, na permeabilidade ao ar e no refinamento dos poros. Além disso, a avaliação da microestrutura por meio de microscopia eletrônica de varredura mostrou que o uso das adições minerais pode ter causado densificação e melhoria na aderência da zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento. O ensaio de reconstituição de traco mostrou que a região do cobrimento apresenta menor relação agregado/ligante, o que corrobora o resultado do ensaio de absorção capilar, em que se constatou que a região do cobrimento apresentou absorção capilar média inferior à região do interior. Assim, se concluiu que a incorporação das diferentes adições minerais estudadas no presente trabalho alterou significativamente as propriedades do concreto, com destaque positivo para as propriedades associadas à durabilidade, nas quais os benefícios do uso da adição mineral são mais pronunciados e, além disso, também se concluiu que a região do cobrimento se apresenta mais favorável à durabilidade que a região interna.

Palavras-chave: Mecanismos de transporte. Durabilidade. Sílica ativa. Nanossílica. Metacaulim.

ABSTRACT

Brazil's current water crisis, generated by the low level of reservoirs, has threatened the national energy production. Faced with this problem, the wind towers present themselves as a viable solution. It is known that these towers are constructed in regions of high aggressiveness and therefore, it is necessary to develop high performance concretes that are able to withstand environmental action to which they are submitted, so that these structures reach the lifespan previously defined in project, ensuring the viability of the towers. In this sense, the present study evaluates the mass transport mechanisms (permeability and absorption) that takes place inside the concrete containing mineral pozzolanic admixtures of high performance, in order to evaluate the influence of the presence of these additions in these properties. Three different study mixes were prepared containing, respectively, 9% of silica fume in composition with 1% of nanossílica, 5% of a metakaolin with high fineness in composition with 5% of a metakaolin slightly less fine, both with high pozzolanic activity, a mix containing only 10% of the metakaolin with higher fineness, and a reference proportioning. The analysis presented in this work involve the scanning electron microscope (SEM) to characterize the internal structure of the material. the trace reconstruction test to analyze the aggregate/binder ratio in the regions of the cover and the interior of concrete, and the analyzes related to the mass transport: water absorption by immersion and capillarity and the air permeability obtained by the Figg's method, in addition to the mechanical characterization. The concrete with addition of pozzolanic admixtures showed significant improvements in compressive strength, in the modulus of elasticity, in the air permeability and in the refinement of pores. Furthermore, the evaluation of the microstructure by scanning electron microscope showed that the use of mineral admixtures may cause an improvement in the adhesion and in the densification of the transition zone between aggregate and cement paste. The trace reconstitution test showed that the concrete cover has lower ratio aggregate/binder, which corroborates the results of the capillary absorption test in which it was found that the cover of concrete presents a mean capillarity absorption lower than the interior region. Thus, it was concluded that the incorporation of the different mineral admixtures studied in this work significantly alter the properties of concrete, with positive emphasis on the properties related to the durability, in which the benefits of using mineral admixtures is more pronounced and, in addition, it was also concluded that the concrete cover presents itself more favorable to the durability than the interior region.

Keywords: Transport mechanisms. Durability. Silica fume. Nanosilica. Metakaolin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Oferta interna de energia elétrica por fonte em 2013 (EPE, 2014) Figura 1.2 - Situação dos principais reservatórios brasileiros - comparação 2001 x 2014	25
(ONS, 2015)	26
Figura 2.1 - Descrição esquemática do concreto (OLLIVIER; TORRENTI, 2014)	30
Figura 2.2 - Exemplificação da Teoria da percolação (OLLIVIER; TORRENTI, 2014)	32
Figura 2.3 - Variação da fração dos poros interconectados em função de sua probabilidade de ocorrência (DAÏAN; LAURENT, 1993 <i>apud</i> OLLIVIER; TORRENTI, 2014)	.32
Figura 2.4 - Destaque, por porosimetria a mercúrio, dos poros capilares e dos poros dos compostos hidratados de uma pasta de cimento (VERBECK; HELMUTH, 1968 <i>apud</i>	33
Figura 2.5 - Influência da relação ag/lig sobre a evolução porosimétrica de pastas de cimento Portland com idade de 28 dias (MEHTA; MANMOHAN, 1980 <i>apud</i> MEHTA; MONTEIRO, 2014).	34
Figura 2.6 - Interconexão da rede de poros capilares (BENTZ; GARBOCZI, 1991) Figura 2.7 - Estrutura porosa de uma pasta de cimento do tipo CEM I e de uma argamassa preparada com o mesmo cimento (relação ag/lig = 0,4 a 3 meses de idade) (BOURDETTE: RINGOT: OLLIVIER, 1995).	34
Figura 2.8 - Definição da permeabilidade (OLLIVIER; TORRENTI; CARCASSÈS, 2012).	
Figura 2.9 - Representação esquemática das forças que atuam num líquido dentro de um capilar (FERREIRA, 2003)	40
Figura 2.10 - Gráfico típico do acréscimo de massa aparente em função da raiz quadrada do tempo (Gonçalves, 2005).	42
Figura 2.11 - Resistência à compressão das argamassas estudadas por Mardani- Aghabaglou <i>et al.</i> (2014) - modificado pelo autor	47
Figura 2.12 - Absorção de água (%) com respectivo desvio padrão das argamassas estudadas por Mardani-Aghabaglou <i>et al.</i> (2014) - modificado pelo autor	49
Figura 2.13 - Porosimetria por intrusão de mercúrio nos poros entre 0,01 - 0,15 µm x	50
Figura 2.14 - Porosimetria por intrusão de mercúrio nos poros entre 0,003 - 0,01 µm x	50
porosidade total da pasta (CLAISSE; CABRERA; HUNT, 2001) - modificado pelo autor	51

Figura 2.15 - Evolução da porosidade na vizinhança dos agregados, destacando a zona de transição (SCRIVENER; BENTUR; PRATT, 1988 apud OLLIVIER; TORRENTI, Figura 2.16 - Relação entre o tamanho e a área superficial da partícula (SOBOLEV: GUTIÈRREZ, 2005) - modificado pelo autor......53 Figura 2.17 - Resistência à compressão das argamassas contendo nanossílica Figura 2.18 - Resultados de permeabilidade à água segundo Khanzadi et al. (2010). (a) variação da permeabilidade à água com o tempo; (b) coeficientes de permeabilidade (ensaio de absorção de água por capilaridade) para o concreto de referência (OPC) e Figura 2.19 - Micrografias da pasta de cimento (a) sem adição de nanossílica (b) com Figura 2.20 - Perfil típico do coeficiente de permeabilidade para o concreto de referência e para concretos contendo MK incorporado aos 28 dias de cura segundo Gesoğlu et al. (2014) - modificado pelo autor.60 Figura 2.21 - Perfil típico do coeficiente de permeabilidade para o concreto de referência e para concretos contendo MK incorporado aos 90 dias de cura segundo Gesoğlu *et al*. Figura 2.22 - Distribuição do tamanho dos poros para concreto contendo metacaulim Figura 2.23 - Resistência à compressão das argamassas estudadas por Senff et al. (2010) após cura de 7, 28 e 90 dias, com desvio padrão - modificado pelo autor......64 Figura 2.24 - Resistência à compressão dos concretos estudados por Ghafari et al. (2014) com desvio padrão - modificado pelo autor......66 Figura 2.25 - Resultados do ensaio de absortividade dos concretos estudados por Ganesh *et al.* (2016) - modificado pelo autor.68 Figura 2.26 - Regressão linear dos resultados de absorção capilar obtidos por Ghafari et al. (2014) - modificado pelo autor......69 Figura 2.27 - Resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio obtidos por Ghafari et al. (2014) - modificado pelo autor.71 Figura 2.28 - Variação da composição de um concreto nos primeiros milímetros próximos de uma superfície exposta (OLLIVIER; TORRENTI; CARCASSÈS, 2012)......73 Figura 2.29 - Comparação entre os resultados de absortividade no cobrimento e no interior dos concretos auto adensáveis estudados por Aïssoun et al. (2016) - modificado pelo autor......74

Figura 3.1 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo utilizado no programa	
experimental	.83
Figura 3.2 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo utilizado no programa	
experimental	.84
Figura 3.3 - Curvas de dosagens de concretos obtidas pelo método do IPT/EPUSP (LOPES, 2011).	.87
Figura 3.4 - Protótipos de vigas moldados no programa experimental (a) antes e (b)	-
depois da concretagem.	.89
Figura 3.5 - Momento logo após a concretagem dos (a) protótipos de vigas e dos (b)	
corpos de prova cilíndricos	.90
Figura 3.6 - Protótipo de viga e local de extração dos testemunhos de 10 cm de diâmetro	
x 20 cm de altura	.91
Figura 3.7 - Sequência do trabalho realizado desde a retirada do concreto da betoneira	
até a colocação de sacos de aniagem úmidos sobre as formas	.92
Figura 3.8 - Local de armazenamento dos corpos de prova	.93
Figura 3.9 - Corpos de prova prismáticos empregados no ensaio de absorção de água	
por capilaridade a partir de um protótipo de viga	.96
Figura 3.10 - Lados dos corpos de prova ensaiados no ensaio de absorção de água por	
capilaridade para o cobrimento e para a parte interna do concreto	.97
Figura 3.11 - Execução do ensaio de absorção por capilaridade nos prismas para as	
regiões do cobrimento e do interior do concreto.	.97
Figura 3.12 - Extração dos corpos de prova cilíndricos para a realização do ensaio de	
absorção por capilaridade	.98
Figura 3.13 - Execução do ensaio de absorção de água por capilaridade nos	
testemunhos cilíndricos extraídos para a região interna do concreto	.98
Figura 3.14 - (a) Altura do corte e (b) "bolachas" de concreto utilizadas no ensaio de	
reconstituição de traço1	100
Figura 3.15 - Amostras para o ensaio ao MEV1	101
Figura 3.16 - Extração das amostras para o MEV a partir das "bolachas" oriundas dos	
testemunhos cilíndricos1	101
Figura 3.17 - Porta-amostras com as amostras fixadas para execução do ensaio ao MEV.	102
Figura 3.18 - Corpo de prova empregado no ensaio de permeabilidade ao ar pelo	
método de Figg1	104
Figura 3.19 - Rolha de silicone utilizada para vedar os furos no ensaio de permeabilidade	
ao ar pelo método de Figg1	104

Figura 3.20 - Preparação dos furos para a execução do ensaio de permeabilidade ao ar pelo método de Figg: (a) aplicação da rolha de borracha e (b) aplicação do silicone sobre o furo
Figura 3.21 - Execução do ensaio de permeabilidade ao ar pelo método de Figg: (a) visão geral da execução do ensaio e (b) detalhe da vedação dos furos após a inserção das agulhas
Figura 3.22 - Esquema do ensaio de permeabilidade ao ar pelo método de Figg106 Figura 3.23 - Panorama geral dos métodos e corpos de prova do programa experimental
Figura 4.1 - Resistência à compressão em função da idade para os concretos estudados
Figura 4.2 - Resultado da análise pelo teste de Duncan, considerando apenas a relação aq/lig
Figura 4.3 - Valores médios de resistência à compressão para cada tipo de adição mineral utilizada
Figura 4.4 - Valores médios globais de resistência à compressão para cada idade considerada no estudo (com seu desvio padrão), com as linhas tracejadas separando os grupos que se diferem estatisticamente
Figura 4.5 - Comportamento da resistência à compressão em função da idade para os concretos de relação ag/lig 0,4
Figura 4.6 - Comportamento da resistência à compressão com a idade para os concretos de relação ag/lig 0,6
Figura 4.7 - Gráfico das médias globais de módulo de elasticidade (com desvio padrão) em função da relação água/ligante118
Figura 4.8 - Gráfico das médias globais de módulo de elasticidade (com seus desvios- padrão) em função das composições com adições minerais, tendo-se nas linhas
tracejadas as divisões dos grupos que se diferem estatisticamente
Figura 4.10 - Resultados da absorção de água dos concretos estudados (%) em função do traço
Figura 4.11 - Gráfico das médias globais de absorção de água por imersão em função da relação ag/lig e desvios padrão124 Figura 4.12 - Gráfico das médias globais de absorção de água por imersão em função
do tipo de adição mineral empregado e desvios-padrão125

Figura 4.13 - Ajuste bilinear da absortividade das amostras prismáticas referentes ao
cobrimento129
Figura 4.14 - Ajuste bilinear da absortividade das amostras prismáticas referentes ao
interior
Figura 4.15 - Ajuste bilinear da absortividade das amostras cilíndricas referentes ao
interior130
Figura 4.16 - Gráfico das médias globais de absorção por capilaridade (e seus desvios
padrão) em função da relação ag/lig para os CPs prismáticos133
Figura 4.17 - Gráfico das médias globais de absorção por capilaridade em função do
tipo de adição mineral empregado na mistura para os CPs prismáticos134
Figura 4.18 - Gráfico das médias globais de absorção por capilaridade (e seus desvios-
padrão) em função da região de análise para os CPs prismáticos
Figura 4.19 - Gráfico das médias globais de absorção por capilaridade (e seus desvios-
padrão) em função do tipo de corpo de prova136
Figura 4.20 - Gráfico das médias globais de permeabilidade ao ar pelo método de Figg
(com seus desvios-padrão) em função da relação ag/lig138
Figura 4.21 - Gráfico das médias globais de permeabilidade ao ar pelo método de Figg
(com seus desvios padrão) em função do tipo de adição mineral empregado no traço139
Figura 4.22 - Resultados do ensaio de reconstituição de traço140
Figura 4.23 - Micrografias do concreto de referência com relação ag/lig = 0,6142
Figura 4.24 - Micrografias do concreto de referência com relação ag/lig = 0,4143
Figura 4.25 - Comparação da zona de transição do agregado miúdo (AG) para (a) o
concreto de referência e (b) o concreto com adição de SA e NS145
Figura 4.26 - Micrografias da borda do cobrimento: estrutura com aparência de gel de
RAA146
Figura 4.27 - Análise de EDS correspondente à Figura 4.26 (a)146
Figura 4.28 - Análise de EDS correspondente à Figura 4.26 (b)147
Figura 4.29 - Presença de etringita no interior dos poros do concreto contendo adição
de metacaulim HP MAX151
Figura 4.30 - Análise de EDS correspondente à Figura 4.26 (b)151
Figura 5.1 - Correlação entre a permeabilidade ao ar obtida pelo método de Figg e a
Resistência à compressão à idade de 91 dias, denotando a relação direta entre as
variáveis155

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Proporcionamento utilizado no estudo experimental (ALEXANDER;	
MAGEE, 1999) - modificado pelo autor	46
Tabela 2.2 - Índice de permeabilidade ao oxigênio (ALEXANDER; MAGEE, 1999) -	
modificado pelo autor	48
Tabela 2.3 - Proporcionamento dos concretos estudados por Claisse, Cabrera e Hunt	
(2001) – modificado pelo autor.	50
Tabela 2.4 - Absorção por capilaridade (g) (ZAHEDI <i>et al.</i> , 2015) - modificado pelo	
autor	56
Tabela 2.5 - Formulação das argamassas estudadas por Senff <i>et al</i> . (2010) -	
modificado pelo autor	64
Tabela 2.6 - Resistência característica à compressão dos concretos estudados por	
Hussain e Sastry (2014) - modificado pelo autor	65
Tabela 2.7 - Formulação dos concretos estudados por Ghafari <i>et al</i> . (2014) (valores	
em kg/m³ de concreto) - modificado pelo autor	65
Tabela 2.8 - Proporcionamentos dos concretos estudados por Ganesh et al. (2016) -	
modificado pelo autor	67
Tabela 2.9 - Resultados do ensaio de absorção de água dos concretos estudados por	
Ganesh <i>et al.</i> (2016) - modificado pelo autor	67
Tabela 2.10 - Proporcionamentos dos concretos estudados por Said et al. (2012) -	
modificado pelo autor	70
Tabela 2.11 - Resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio dos concretos	
estudados por Said <i>et al</i> . (2012) - modificado pelo autor	70
Tabela 2.12 - Resultados de absorção de água e porosimetria por intrusão de mercúrio	
obtidos por Ghafari et al. (2014) - modificado pelo autor	71
Tabela 3.1 - Adições minerais utilizadas no programa experimental e sua	
nomenclatura	77
Tabela 3.2 - Traços estudados no programa experimental	78
Tabela 3.3 - Nomenclatura dos concretos ensaiados	79
Tabela 3.4 - Ensaios de caracterização física e mecânica do cimento Portland utilizado	
no programa experimental	81
Tabela 3.5 - Análise química do cimento Portland CP II-F-40 empregado na pesquisa	82
Tabela 3.6 - Propriedades do agregado miúdo utilizado no programa experimental	82

Tabela 3.7 - Propriedades do agregado graúdo utilizado no programa experimental83
Tabela 3.8 - Ensaios de caracterização das adições minerais
Tabela 3.9 - Principais características da nanossílica, fornecidas pelo fabricante
Tabela 3.10 - Características dos aditivos utilizados na dosagem. 86
Tabela 3.11 - Proporcionamentos dos concretos desenvolvidos no programa
experimental
Tabela 4.1 - Resistência à compressão média dos concretos nas diferentes idades de
medição
Tabela 4.2 - Resultado da ANOVA realizada para os dados de resistência à
compressão, considerando como variáveis independentes a adição mineral, a relação
ag/lig e a idade dos concretos110
Tabela 4.3 - Teste de Duncan (comparação múltipla de médias) para a resistência à
compressão, considerando-se o efeito das adições minerais112
Tabela 4.4 - Teste de Duncan para a resistência à compressão levando em
consideração o efeito da idade113
Tabela 4.5 - Valores médios de módulo de elasticidade para os diversos concretos
estudados116
Tabela 4.6 - Resultados da ANOVA para os dados de módulo de elasticidade,
considerando como variáveis independentes a adição mineral, relação ag/lig e idade
dos concretos
Tabela 4.7 - Valores médios de absorção de água por imersão dos concretos
estudados120
Tabela 4.8 - Classificação dos concretos segundo o boletim informativo nº 192 do CEB
(1989 apud CASCUDO, 1997)121
Tabela 4.9 - Classificação dos concretos estudados de acordo com o boletim
informativo nº 192 do CEB (1989 apud CASCUDO, 1997)122
Tabela 4.10 - Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de
absorção total por imersão123
Tabela 4.11 - Resultados médios do ensaio de absorção por capilaridade em corpos
d = m m m m m m m m m m m m m m m m m m
de prova prismaticos referentes a região interna do concreto.
de prova prismaticos referentes a região interna do concreto
de prova prismaticos referentes a região interna do concreto
de prova prismaticos referentes a região interna do concreto
 de prova prismaticos referentes a região interna do concreto. Tabela 4.12 - Resultados médios do ensaio de absorção por capilaridade em corpos de prova prismáticos referentes à região do cobrimento do concreto. 126 Tabela 4.13 - Resultados médios do ensaio de absorção por capilaridade em corpos de prova cilíndricos para a região interna do concreto.
de prova prismaticos referentes a região interna do concreto. 126 Tabela 4.12 - Resultados médios do ensaio de absorção por capilaridade em corpos 126 de prova prismáticos referentes à região do cobrimento do concreto. 126 Tabela 4.13 - Resultados médios do ensaio de absorção por capilaridade em corpos 126 de prova cilíndricos para a região interna do concreto. 127 Tabela 4.14 - Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de 127

Tabela 4.15 - Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de	
absorção por capilaridade referentes aos tipos de CPs (CPs cilíndricos e prismáticos	
para a região do interior do concreto)	128
Tabela 4.16 - Comparação entre a absortividade dos concretos estudados no estágio	
de absorção (S1) - CPs prismáticos	131
Tabela 4.17 - Comparação entre a absortividade dos concretos estudados no estágio	
de saturação (S2) - CPs prismáticos	131
Tabela 4.18 - Comparação entre a absortividade dos CPs cilíndricos e prismáticos	
para os estágios de absorção (S1) e de saturação (S2)	132
Tabela 4.19 - Classificação do concreto de acordo com a permeabilidade ao ar	
segundo Cather <i>et al</i> . (1984)	136
Tabela 4.20 - Valores médios obtidos no ensaio de absorção pelo método de Figg	137
Tabela 4.21 - Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de	
permeabilidade ao ar, para as variáveis independentes consideradas no modelo	
estatístico	137
Tabela 4.22 - Resultados do ensaio de reconstituição de traço.	140
Tabela 4.23 - Micrografias do concreto com adição de sílica ativa e nanossílica com	
relação ag/lig = 0,6	148
Tabela 4.24 - Micrografias do concreto com adição de metacaulim HP MAX com	
relação ag/lig = 0,6	149
Tabela 4.25 - Micrografias do concreto com adição de metacaulim HP MAX e HP XW	
com relação ag/lig = 0,6	152

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ag/lig Relação água/ligante (cimento + adição mineral)
- ABEEólica Associação Brasileira de Energia Eólica
- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANEEL Agencia Nacional de Energia Elétrica
- ANOVA Análise estatística de variância
- BET Brunauer, Emmett e Teller método de adsorção de nitrogênio
- CP Corpo de prova
- CP II-F-40 Cimento Portland Composto, com fíler, classe 40
- DCT.C Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas
- DP Desvio Padrão
- DRX Difratometria de raios X ou difração de raios X
- EECA Escola de Engenharia Civil e Ambiental
- EPUSP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
- F_{cal} Parâmetro de Snedecor calculado, na análise de variância
- F_{tab} Parâmetro de Snedecor tabelado, na análise de variância
- GL Graus de liberdade, na análise de variância
- IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas
- LABITECC Laboratório em Inovação Tecnológica em Construção Civil
- MEV Microscopia eletrônica de varredura ou Microscópio eletrônico de varredura
- MQ Média dos quadrados, na análise de variância
- NBR Norma Brasileira Registrada
- ONU Organização das Nações Unidas
- PIM Porosimetria por Intrusão de Mercúrio
- PPG/GECON Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil
- SQ Soma dos quadrados, na análise de variância
- UFG Universidade Federal de Goiás

NOTAÇÃO DA QUÍMICA DO CIMENTO

Tradicionalmente, os compostos relacionados à química do cimento são escritos na forma de soma de óxidos.

♦ Óxidos:

C – CaO	F – Fe ₂ O ₃	M – MgO
$S - SiO_2$	$K - K_2O$	$S - SO_3$
$A - AI_2O_3$	Na – Na₂O	$H - H_2O$

• Compostos do clínquer de cimento Portland:

C₃S - 3CaO.SiO₂ – Silicato tricálcico ou Alita C₂S - 2CaO.SiO₂ – Silicato dicálcico ou Belita C₃A - 3CaO.Al₂O₃ – Aluminato tricálcico ou Celita C₄AF - 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ – Ferroaluminato tetracálcico ou Brownmilerita

◆ Principais compostos da hidratação do clínquer e de reações pozolânicas:

C₃AH₆ - 3CaO.Al₂O₃.6H₂O – Aluminato de cálcio hidratado ou Hidrogranada

C₂ASH₈ - 2CaO.Al₂O₃.SiO₂.8H₂O – Silicoaluminato de cálcio hidratado ou gehlenita hidratada ou stratlingita

*A fórmula representa uma composição teórica, de acordo com o balanço estequiométrico da reação de hidratação, a relação Ca/Si pode ser diferente.

SUMÁRIO

CAPÍTU	LO 1 INTRODUÇÃO	23
1.1. C	ONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA	24
1.2. O	BJETIVOS	29
1.3. E	STRUTURA DO TRABALHO	29
CAPÍTU	LO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1. O	CONCRETO ENQUANTO MATERIAL POLIFÁSICO	30
2.1.1.	A estrutura porosa da pasta de cimento	33
2.1.2.	A estrutura porosa do concreto	35
2.2. F	UNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE OS MECANISMOS DE	
TRANSF	PORTE DE MASSA	37
2.2.1.	Permeabilidade	37
2.2.2.	Absorção capilar	39
2.3. IN	NFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS NAS PROPRIEDADES DO	
CONCR	ЕТО	43
2.3.1.	Sílica ativa	45
2.3.1.1.	Resistência à compressão	46
2.3.1.2.	Permeabilidade e absorção	47
2.3.1.3.	Porosidade	49
2.3.2.	Nanossílica	52
2.3.2.1.	Resistência à compressão	54
2.3.2.2.	Permeabilidade e absorção	55
2.3.2.3.	Porosidade	57
2.3.3.	Metacaulim	57
2.3.3.1.	Resistência à compressão	58
2.3.3.2.	Permeabilidade e absorção	59
2.3.3.3.	Porosidade	62
2.3.4.	Composição de Sílica Ativa com Nanossílica	63
2.3.4.1.	Resistência à compressão	63
2.3.4.2.	Permeabilidade e absorção	66
2.3.4.3.	Porosidade	69

2.4.	INFLUÊNCIA DA REGIÃO DE ANÁLISE: COBRIMENTO OU INTERIOR DO	
CONC	RETO7	2
CAPÍTI	JLO 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS7	6
3.1.	VARIÁVEIS ESTUDADAS7	6
3.1.1.	Relação água/ligante7	7
3.1.2.	Tipo/teor de adição mineral7	7
3.1.3.	Região de análise7	9
3.2.	CONDIÇÕES FIXAS DA PESQUISA7	9
3.2.1.	Condições e tempo de cura8	0
3.2.2.	Idade do concreto ensaiado8	0
3.3.	MATERIAIS EMPREGADOS8	0
3.3.1.	Cimento Portland8	0
3.3.2.	Agregados8	2
3.3.3.	Adições minerais8	4
3.3.4.	Aço8	6
3.3.5.	Aditivo superplastificante8	6
3.4.	CONCRETOS ESTUDADOS8	6
3.5.	CORPOS DE PROVA8	9
3.6.	MOLDAGEM, CURA E ARMAZENAMENTO DOS CORPOS DE PROVA9	1
3.7.	MÉTODOS EMPREGADOS NO PROGRAMA EXPERIMENTAL9	3
3.7.1.	Caracterização do concreto no estado fresco9	3
3.7.2.	Avaliação das propriedades mecânicas e de rigidez dos concretos9	4
3.7.2.1	Resistência à compressão9	4
3.7.2.2	Módulo de elasticidade9	4
3.7.3.	Caracterização da estrutura interna e da porosidade dos concretos no	
esta	do endurecido9	4
3.7.3.1	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica9	4
3.7.3.2	Absorção de água por capilaridade9	6
3.7.3.3	Reconstituição de traço9	9
3.7.3.4	Análise da microestrutura dos concretos por microscopia eletrônica de	
varred	dura10	0
3.7.4.	Métodos de permeabilidade ao ar associados à durabilidade10	2
3.7.4.1	Permeabilidade ao ar pelo método de Figg10	2
3.8.	PANORAMA GERAL DO PROGRAMA EXPERIMENTAL10	7
CAPÍTI	JLO 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES10	8

4.1.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	108
4.1.1.	Influência da relação ag/lig	111
4.1.2.	Influência do tipo de adição mineral	112
4.1.3.	Influência da idade	113
4.2.	MÓDULO DE ELASTICIDADE	116
4.2.1.	Influência da relação ag/lig	118
4.2.2.	Influência do tipo de adição mineral	118
4.2.3.	Influência da idade	119
4.3.	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS	120
4.3.1.	Influência da relação ag/lig	123
4.3.2.	Influência do tipo de adição mineral	124
4.4.	ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	125
4.4.1.	Influência da relação ag/lig (CPs prismáticos)	133
4.4.2.	Influência do tipo de adição mineral (CPs prismáticos)	134
4.4.3.	Influência da região de análise (CPs prismáticos)	134
4.4.4.	Influência do tipo de corpo de prova (CPs prismáticos e cilíndricos)	135
4.5.	PERMEABILIDADE AO AR PELO MÉTODO DE FIGG	136
4.5.1.	Influência da relação ag/lig	138
4.5.2.	Influência do tipo de adição mineral	138
4.6.	RECONSTITUIÇÃO DE TRAÇO	139
4.7.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	140
4.7.1.	Concreto de referência	141
4.7.2.	Concreto composto com adição de sílica ativa e nanossílica	145
4.7.3.	Concreto com adição de Metacaulim HP MAX	149
4.7.4.	Concreto composto com adição de Metacaulim HP MAX e Metacaulim	
HP XW152		
4.8.	DISCUSSÃO GLOBAL DOS RESULTADOS	154
CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS157		
5.1.	CONCLUSÕES	157
5.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	158
REFERÊNCIAS159		
APÊNDICES		

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho teve suas origens em um projeto de parceria entre Furnas Centrais Elétricas S.A. e a Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás (UFG), sob orientação dos professores Dr. Oswaldo Cascudo e Dr^a. Helena Carasek e participação dos alunos de mestrado Alex Mizael Martins, Marina Augusta Malagoni de Almeida e Plínio Ferreira Pires. Em sua fase atual, o projeto se divide em três segmentos, que correspondem a três dissertações de mestrado, esta que trata dos mecanismos de transporte de massa (absorção e permeabilidade) que ocorrem no interior do concreto (MALAGONI, 2016), uma que estuda concretos submetidos a quatorze anos de carbonatação natural (PIRES, 2016) e outra que disserta sobre o fenômeno da difusão e penetrabilidade de cloretos na estrutura do concreto, e o efeito deste na corrosão das armaduras (MIZAEL, 2016).

É importante ressaltar que esse projeto de pesquisa se desenvolve há cerca de 15 anos, tendo suas origens em 2001, e apresentando como tema geral à época a durabilidade do concreto de cobrimento e como variáveis as adições minerais (em substituição parcial ao cimento), os procedimentos de cura e a relação água/ligante. Ao todo já foram desenvolvidas 11 dissertações de mestrado ligadas ao projeto cujos temas englobam a influência das condições de moldagem na camada de cobrimento (BRAUN, 2003), a influência das condições de cura nas características do cobrimento (PAULA COUTO, 2003), a influência das adições minerais e seu efeito na corrosão de armaduras induzidas por cloreto (FERREIRA, 2003), a influência das adições minerais das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação (CASTRO, 2003), a avaliação do desempenho de concretos com adições minerais quanto à corrosão das armaduras induzida por cloretos (OLIVEIRA, 2007), a avaliação das propriedades de transporte de massa em concretos contendo adições minerais (MENDES, 2009), a carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição (FERREIRA, 2013) e o desempenho de concretos com metacaulim de alta reatividade (TEODORO, 2016).

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA

A atual matriz energética mundial está baseada em fontes de longo ciclo e que têm sua vida útil (VU) em fase de esgotamento a despeito de precisarem de milhões de anos para serem formadas, como é o caso do petróleo. A preocupação mundial com a escassez de energia tem deflagrado um comportamento ambiental diferenciado e bastante oportuno, mas está longe do nível de cuidado, de ajustes e da operacionalização de políticas públicas que reflitam a real necessidade dos países.

Essas preocupações estão surgindo devido à diminuição progressiva desses recursos além de uma grande pressão para que as emissões de poluentes tóxicos na atmosfera sejam diminuídas. Em novembro de 2014 a Organização das Nações Unidas - ONU divulgou um relatório geral sobre as condições climáticas mundiais (IPCC, 2014) o qual alerta para as mudanças climáticas que estão ocorrendo e suas possíveis consequências. O relatório afirma que as emissões de gases do efeito estufa (principalmente o dióxido de carbono, o metano e os clorofluorcarbonetos) deveriam cair, em nível global, cerca de 40% a 70% entre os anos de 2010 e 2050 e atingir valor nulo até 2100 para que a Terra não sofra com os efeitos irreversíveis do aquecimento global (secas, inundações, aumento do nível do mar, extinção de espécies, deslocamento humano, *etc*.).

No Brasil, conforme apresentado na Figura 1.1, a principal fonte de energia provém de usinas hidrelétricas (70,6% da oferta interna de energia elétrica), as quais se constituem em fontes renováveis e não poluentes. Apesar da eficácia ambiental, outros fatores como a má distribuição das matrizes energéticas, a falta de planejamento no setor, a ausência de investimentos em geração e distribuição de energia e, mais recentemente, o baixo nível dos reservatórios, ameaçam a produção energética nacional. Se observa que a oferta de energia eólica aparece em última posição, com apenas 1,1% da oferta interna de energia elétrica no país (EPE, 2014).



Figura 1.1 - Oferta interna de energia elétrica por fonte em 2013 (EPE, 2014).

³ Inclui lenha, bagaço de cana, lixivia e outras recuperações/ Includes firewood, sugarcane bagasse, black-liquor and other primary sources

No mundo, a popularidade da energia eólica tem oscilado muito mais de acordo com o preço dos combustíveis fósseis do que com os interesses ambientais. Após a Segunda Guerra Mundial, quando houve uma queda no preço dos combustíveis fósseis, o interesse na produção de energia eólica caiu significativamente (CHASTRE; LÚCIO, 2014). Já em 1970, devido à crise gerada pela OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) e o aumento em torno de 400% no preço do barril de petróleo, o interesse mundial nos aerogeradores de turbinas eólicas aumentou significativamente. Foi após o embargo do petróleo em 1970 que o interesse mundial, a investigação e desenvolvimento em aerogeradores permitiram refinar ideias antigas e introduzir novas formas de converter energia eólica em energia útil (MELO, 2014).

Já no Brasil, foi a partir da crise energética de 2001, também conhecido como ano do apagão, causada justamente pelo baixo nível dos reservatórios, que o governo começou a investir em fontes alternativas de energia elétrica. Inicialmente o país investiu na ativação de usinas movidas a carvão, óleo e gás.

Recentemente, a crise hídrica brasileira atingiu proporções inéditas, dos 28 principais reservatórios do país, 17 estão com níveis de água inferiores aos de março de 2014 e em 9 deles a água não ocupa nem 20% do volume máximo das represas (CERQUEIRA *et al.*, 2015). Quando comparados os volumes dos reservatórios apresentados anteriormente em dezembro de 2001, ano do apagão, e 2014, é possível observar-se que a situação atual é ainda mais preocupante, com níveis de água inferiores, conforme apresentado na Figura 1.2.



Figura 1.2 - Situação dos principais reservatórios brasileiros - comparação 2001 x 2014 (ONS, 2015).

Tal situação fez com que o governo federal adotasse algumas medidas para que o abastecimento energético não ficasse prejudicado, principalmente nos meses secos de 2015 (a partir de abril), dentre as quais se destaca um pacote que previu a manutenção das termoelétricas em sua disponibilidade máxima de operação, o que gerou, além do aumento do lançamento de poluentes na atmosfera, aumento no preço da energia elétrica para o consumidor final.

É nesse contexto que a produção de energia eólica se justifica, tanto no Brasil como no mundo. Além de ser uma fonte não emissora de poluentes e inesgotável, gera energia a preços acessíveis e ainda pode ajudar a compensar as emissões provenientes de outras fontes. A título de exemplo, no período de novembro de 2013 a outubro de 2014 a geração de energia eólica evitou a emissão de cerca de 2,6 milhões de toneladas de CO₂ no Brasil (ABEEólica, 2015).

Uma pesquisa organizada em parceria do Global Wind Energy Council e do Greenpeace (GWEC; GREENPEACE, 2014) mostrou que a energia eólica pode suprir, até o ano de 2030, cerca de 19% da demanda global de energia elétrica, o que corresponderia a um crescimento de aproximadamente 530% da capacidade mundial instalada. O estudo identificou o Brasil, o México e a África do Sul como regiões potenciais ao desenvolvimento da energia eólica.

No Brasil esse desenvolvimento já está em curso, de acordo com Chastre e Lúcio (2014), o crescimento em produção de energia eólica mais significativo nos últimos anos ocorreu no país, com um aumento de 1,1GW de nova capacidade de potência instalada. No ano de 2014,

o BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) investiu R\$ 6,6 bilhões em novos projetos de geração eólica, o que corresponde a um aumento de 83% em relação ao ano anterior (PORTAL BRASIL, 2015), mas ainda faltam investimentos em linhas de transmissão para as torres implantadas a fim de que a população possa usufruir da energia elétrica produzida.

Estima-se ainda que, até o ano de 2017, a produção de energia eólica apresente um crescimento de aproximadamente 381%. O Brasil apresenta uma região costeira de cerca de 7300 km de extensão, ideal à implantação de torres, e potencial eólico relevante mesmo em regiões não litorâneas (*onshore*) cujo potencial é de 300 GW (MELO, 2014). Mas para que essa expansão da oferta energética ocorra é preciso, além das condições ambientais favoráveis, que se invista na construção de torres mais duráveis e que atendam a uma vida útil de projeto (VUP) mínima exigida.

No mercado mundial atual, as torres mais utilizadas são as metálicas, de aço, com VUP em torno de 20 anos. No Brasil, esse tipo de torre está se tornando financeiramente inviável, pois o BNDES (Banco Nacional do Desenvolvimento) exige que sejam empregados materiais de construção nacionais para financiar a construção de parques eólicos e o preço do aço brasileiro não é competitivo, sendo maior cerca de 30% e 50% que o preço do aço europeu e chinês, respectivamente (LULA, 2013).

Na tentativa de reduzir os custos de produção das torres eólicas no Brasil, tem-se utilizado o concreto em substituição ao aço e essa estratégia tem se mostrado muito viável. Nos últimos dez anos houve uma queda de quase 50% no valor médio de investimento para a construção dos parques eólicos brasileiros (MELO, 2014). Essa redução se justifica em grande parte pelo desenvolvimento da tecnologia e também pela entrada de diversos fabricantes de aerogeradores no país, devido à crise econômica mundial.

Em diversos outros aspectos as torres de concreto estão se mostrando uma alternativa acessível e vantajosa. A quantidade de CO₂ emitida durante o seu processo de fabricação é cerca de 55% a 60% da emitida durante a fabricação das torres de aço equivalentes (MENDIZABAL, 2014); são capazes de atingir alturas superiores às torres de aço com melhor comportamento dinâmico e fundações mais econômicas; apresentam menor necessidade de manutenção; maior durabilidade, entre outras (CHASTRE; LÚCIO, 2014).

Apesar de as torres de concreto apresentarem elevada durabilidade, sabe-se que as regiões costeiras são altamente agressivas a esse material devido à alta concentração de sais presentes na água do mar, a qual é responsável pela degradação do concreto; à presença de íons cloro, os quais atacam as armaduras e à própria ação do vento, o qual atua

principalmente no transporte de íons, mas também age como um catalisador nos ciclos de molhagem e secagem das estruturas, favorecendo a precipitação de sais.

Diante do elevado grau de agressividade dessas regiões, faz-se necessário o desenvolvimento de concretos de alto desempenho que sejam capazes de resistir aos esforços ambientais e estruturais aos quais são submetidos de maneira que essas estruturas atinjam a VUP previamente definida, garantindo a viabilidade das torres. Além disso, faz-se necessário determinar os fatores intervenientes na sua durabilidade, gerando bases teóricas às equações de previsão de vida útil, de tal modo que se possa simular a realidade em estudos de viabilidade de implantação de parques eólicos.

As metodologias aplicadas a fim de controlar-se a durabilidade e VUP das obras de concreto podem conter quatro níveis de complexidade: o nível 1 corresponde a uma previsão prescritiva; o nível 2 se baseia no uso de indicadores de durabilidade ou de ensaios de desempenho (porém sem quantificar a VU); o nível 3 implica na utilização de modelos determinísticos de previsão de VU e, por fim, o nível 4 corresponde à utilização de modelos probabilísticos (ANDRADE, 2006).

No Brasil, a abordagem de durabilidade das estruturas é prescritiva (nível 1), e restringe-se às especificações contidas na NBR 6118 (ABNT, 2014) relativas ao cobrimento e à relação água/ligante, de acordo com a classe de agressividade ambiental prevista em projeto. Na Europa, de acordo com Barochel-Bouny *et al.* (2014), estão sendo desenvolvidos novos métodos que seguem uma abordagem baseada no desempenho quanto à durabilidade e que permitem levar em consideração todos os aspectos técnico-econômicos específicos de cada obra, com previsões que se baseiam em novos conceitos e novas ferramentas, tais como indicadores de durabilidade, ensaios de previsão e caracterização.

A fim de criar bases teóricas que sejam capazes de aproximar a abordagem de desempenho de estruturas de concreto atualmente empregada no Brasil da abordagem de nível 2, muito praticada na Europa, é necessário que se conheça a estrutura do material concreto de forma aprofundada e, principalmente, a maneira como os agentes agressivos permeiam seu interior. Portanto, esse trabalho busca analisar os mecanismos de transporte que ocorrem no interior do concreto contendo adições minerais pozolânicas, em especial a absorção e a permeabilidade.

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência da presença de adições minerais pozolânicas de alto desempenho (sílica ativa, nanossílica, metacaulim e composições destas) nas propriedades mecânicas e nos mecanismos de transporte que ocorrem no interior do material concreto. Também podem ser listados como objetivos específicos do trabalho:

- avaliar as propriedades relacionadas à durabilidade nas regiões do interior e do cobrimento do concreto;
- obter parâmetros de desempenho dos concretos associados à durabilidade das torres eólicas para ambientes *onshore* e *offshore* que contribuam com a implantação de parques eólicos no Brasil.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi estruturado em cinco capítulos. No Capítulo 1, Introdução, apresentase a contextualização do tema e justificativa, os objetivos do trabalho e, também, a estrutura do mesmo.

O Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, abrange os temas relacionados à estrutura porosa do concreto, aos mecanismos de transporte no interior desse material e ao efeito do acréscimo das adições minerais estudadas tanto na região do cobrimento como na região interna do concreto.

Já no Capítulo 3, Programa Experimental, apresentam-se a metodologia de pesquisa aplicada no trabalho, os proporcionamentos estudados, os modelos dos corpos de prova e os ensaios realizados bem como os métodos de caracterização da estrutura interna e da porosidade do concreto.

No Capítulo 4, Resultados e Discussões, são apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa, além da análise estatística à qual os dados foram submetidos e as respectivas discussões.

No capítulo 5, Discussão global dos resultados, apresenta-se uma discussão global dos resultados obtidos e as principais correlações obtidas.

Por fim, no Capítulo 6, Considerações Finais, são apresentadas as conclusões e as considerações finais do trabalho bem como sugestões para novas pesquisas desenvolvidas acerca do tema em estudo.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo é apresentada uma revisão sobre a microestrutura do material concreto, sobre a fundamentação teórica que envolve os mecanismos de transporte que ocorrem no interior desse material e os efeitos sobre a microestrutura e propriedades de transporte causados pelo acréscimo de adições minerais pozolânicas, tendo em vista os objetivos do trabalho.

2.1. O CONCRETO ENQUANTO MATERIAL POLIFÁSICO

Segundo Diamond (2007), a durabilidade do concreto pode ser atribuída, em grande parte, à dificuldade de penetração dos agentes agressivos em sua rede de poros. A interação desse material com meio externo está intimamente relacionada às características de sua estrutura porosa e também à natureza das fases presentes (íons ou dióxido de carbono, por exemplo), por isso, faz-se necessário conhecer o seu arranjo poroso e as propriedades a ele associadas.

É necessário ter em mente que, ao nível macro, o concreto é constituído por duas fases, a pasta de cimento e os agregados. Já ao nível micro, o concreto é um material poroso composto por três fases, uma fase sólida constituída pelos agregados, pelos compostos hidratados e pelas fases anidras do cimento; uma fase líquida, composta pela solução intersticial, e uma fase gasosa, constituída por uma mistura de ar e vapor de água (OLLIVIER; TORRENTI, 2014; MEHTA; MONTEIRO, 2014; OLLIVIER *et al.*, 2012). Esquematicamente esse material pode ser representado conforme mostra a Figura 2.1.



Figura 2.1 - Descrição esquemática do concreto (OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

31

A durabilidade dos concretos é associada, principalmente, à porosidade aberta interconectada (relação entre o volume dos poros abertos e interconectados e o volume aparente) desse material, pois ela permite a entrada dos agentes agressivos externos para o seu interior. Quando se fala em porosidade aberta interconectada ($p_{ab,i}$), três conceitos básicos são utilizados para caracterizar-se macroscopicamente a geometria da rede porosa de um material, a saber: a tortuosidade (T), a constrictividade (δ) e o fator de formação (F) (OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

Uma definição clássica de tortuosidade (T) é dada pela razão entre a distância média efetiva (L_e) percorrida por um fluido ou partícula elétrica, dentro de um corpo poroso, e a menor distância possível de ser percorrida (L) pelo fluido, conforme a Equação 2.1.

$$T = \frac{L_e}{L} \tag{2.1}$$

Já a constrictividade (δ) é um parâmetro que leva em conta, qualitativamente, a variação de seção que ocorre nos poros durante o escoamento. Ela é definida como sendo a relação entre a maior e a menor seção transversal (OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

O fator de formação (F), por sua vez, é definido como sendo a razão entre a condutividade elétrica da solução intersticial contida nos poros do concreto (σ) e a condutividade elétrica do meio poroso (concreto) saturado por esta solução (σ_e), conforme se apresenta na Equação 2.2.

$$F = \frac{\sigma}{\sigma_e} \tag{2.2}$$

Além da porosidade, as propriedades de transporte no interior do concreto também são influenciadas pelo tamanho e pela conexão entre eles (OLLIVIER; TORRENTI, 2014). De acordo com Mehta e Monteiro (2014), não é a porosidade total, mas sim a distribuição de tamanho dos poros que realmente controla a resistência, a permeabilidade e as alterações volumétricas na pasta de cimento endurecida. Uma importante ferramenta utilizada na descrição da conexão dos poros do concreto é a teoria da percolação. Essa teoria propõe um modelo probabilístico de fluxo de um fluido com a aleatoriedade associada ao meio poroso. O meio é modelado por uma rede geométrica regular. A título de exemplo, Ollivier e Torrenti (2014) descrevem uma estrutura 2D quadrada, apresentada na Figura 2.2. Os elementos do espaço (sítios) são ocupados aleatoriamente com uma probabilidade (p).



Figura 2.2 - Exemplificação da Teoria da percolação (OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

No caso apresentado na figura anterior a probabilidade de presença dos poros é de 0,2 (5 em 25). Ao ultrapassar certa probabilidade (p_c), denominada limiar de percolação, um aglomerado contínuo de conexões se forma na rede do concreto. A proporção dos elementos pertencentes a esse aglomerado contínuo, ou seja, a fração dos poros interconectados (γ_p) é apresentada na Figura 2.3.





Abaixo do limiar de percolação não existem aglomerados contínuos de conexões e, por isso, o transporte de fluidos através dos poros do material não é possível. Portanto, o limiar de percolação corresponde ao ponto de passagem de uma rede não condutora para uma rede macroscopicamente condutora. Acima do limiar de percolação, a fração de poros pertencentes ao aglomerado contínuo varia segundo a relação ($\gamma_p = p - p_c$)^{β}. O valor do limiar de percolação depende da geometria da rede de conexões (quanto mais ela é interconectada, mais baixo é o limiar), mas o expoente β é independente dessa geometria. Ele depende apenas da fração do espaço ocupada pelos vazios condutores (OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

² DAÏAN, J. F.; LAURENT, J. P. **Structure poreuse et transport d'humidité dans les roches**. Cours européen sciences et matériaux du patrimoine culturel, 1ere session, pp. 83-112, Ravello/Rome, 13-20 Avril 1993, R. A. Lefebvre Ed., Instituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Libreria dello Stato, Rome.

2.1.1. A estrutura porosa da pasta de cimento

De acordo com o Modelo de Powers, a microestrutura porosa de uma pasta de cimento pode ser descrita distinguindo-se duas famílias de poros, os poros capilares e os poros dos produtos hidratados, conforme apresentado na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Destaque, por porosimetria a mercúrio, dos poros capilares e dos poros dos compostos hidratados de uma pasta de cimento (VERBECK; HELMUTH, 1968₃ apud OLLIVIER; TORRENTI, 2014).



Os poros capilares são gerados durante o processo de hidratação do cimento, os espaços intergranulares, inicialmente repletos de água, são responsáveis pela formação desses poros. Já os poros dos produtos hidratados, menores que os poros descritos anteriormente, formamse no interior desses produtos e são característicos de sua geometria, como o espaço interlamelar do C-S-H, por exemplo.

Diversos fatores influenciam a estrutura porosa da pasta de cimento, os principais e mais consolidados na literatura são a relação água/ligante (ag/lig), a idade da pasta, as condições de hidratação e as adições minerais (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Sabe-se que, na medida em que se reduz a relação água/ligante, há uma diminuição da porosidade aberta e do tamanho máximo dos poros. Essa relação pode ser observada na Figura 2.5. Nota-se que, aos 28 dias, os poros capilares de dimensão superior a 100 nm ocorrem apenas nas pastas de relação ag/lig igual ou superior a 0,70 (MEHTA; MONTEIRO, 2014; OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

³ VERBECK, G. J.; HELMUTH, R. H. Structures and Physical Properties of Hardened Cement paste. 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1968, 3, 7-1, 1-11.





Bentz e Garboczi (1991) mostraram que a interconectividade dos poros da pasta de cimento também é um parâmetro que em muito influencia os mecanismos de transporte no interior do concreto. Os autores analisaram valores de interconectividade da rede de poros capilares em função do grau de hidratação da pasta de cimento e também em função da porosidade capilar. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 2.6.



Figura 2.6 - Interconexão da rede de poros capilares (BENTZ; GARBOCZI, 1991).

Nota-se que quanto maior a relação ag/lig, maior será a fração interconectada dos poros da pasta de cimento e que para relações ag/lig superiores a 0,7, a porosidade capilar está sempre interconectada. Como esperado, quanto maior a porosidade capilar de uma pasta de cimento, maior será a fração interconectada dos poros. De maneira geral, uma pasta de cimento mais

⁴ MEHTA, P. K.; MANMOHAN, D. **Pore size distribution and permeability of hardened cement paste**, 7eme Congrès International de la Chimie des Ciments, Paris, 1980, 3, 7.1, pp. 1-11.
densa e compacta, ou seja, com relação ag/lig baixa, apresentará maior durabilidade frente aos mecanismos de transporte.

Com relação às condições de hidratação do cimento, sabe-se que a formação dos seus produtos é responsável pela colmatação dos poros da pasta de cimento, logo, é importante manter as condições de umidade favoráveis a esse processo, geralmente por meio da cura úmida (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Também é nesse sentido que a idade da pasta influencia a sua estrutura porosa, quanto mais velha for a pasta, mais os poros estarão colmatados, justamente devido ao processo de hidratação dos grãos anidros de cimento. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a permeabilidade de uma pasta completamente hidratada pode ser da ordem de 106 vezes menor do que uma pasta jovem.

As adições minerais, segundo Ollivier e Torrenti (2014), propiciam um aumento da porosidade e do tamanho dos poros nas idades iniciais, decorrentes de uma quantidade mais baixa de produtos hidratados. A reatividade das adições, que se processa após algumas semanas, reforça os efeitos da hidratação do clínquer, conduzindo, em longo prazo, a uma porosidade da mesma ordem de grandeza, porém, diminui o tamanho dos poros maiores. É importante ressaltar que esses resultados dependem fortemente da reatividade das adições, da temperatura e também da duração da cura.

2.1.2. A estrutura porosa do concreto

No concreto, o arranjo dos grãos de cimento é perturbado pelas superfícies dos grãos de areia e de pedra, e a pasta de cimento é confinada em espaços reduzidos. Nesse material os espaços entre os grãos de cimento são, então, muito mais variáveis do que em uma pasta, e, se globalmente a relação ag/lig é definida da mesma maneira em uma pasta e em um concreto, neste último podem existir variações locais no teor de água. Na interface dos agregados com a pasta tem-se a formação da chamada zona de transição (ZT) (MEHTA; MONTEIRO, 2014; OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

A zona de transição se constitui em um outro nível de heterogeneidade do concreto. Segundo Ollivier, Torrenti e Carcassès (2012) ela pode ser distinguida como sendo uma área mais porosa que se localiza no contorno dos agregados e sua espessura é da ordem de algumas dúzias de micrômetros. Ainda segundo Mehta e Monteiro (2014), a zona de transição é considerada como a fase limitante da resistência no concreto. Segundo os autores, no material compósito, a zona de transição atua como uma ponte entre a matriz de argamassa e as partículas de agregado graúdo. Mesmo quando os componentes individuais apresentam

alta rigidez, a rigidez do compósito é reduzida em função das zonas fragilizadas (vazios e microfissuras da zona de transição), que não permitem transferência de tensão.

Bourdette, Ringot e Ollivier (1995) constataram o surgimento de uma nova família de poros (compreendida entre 0,1 µm e 0,4 µm) de dimensão comparável àquela dos capilares e oriunda da interconexão das zonas de transição, a qual pode ser verificada por meio de ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, conforme apresentado na Figura 2.7. Esse resultado mostra a percolação através das zonas de transição, que é possível quando a espessura e a quantidade dessas zonas são suficientes.

Figura 2.7 - Estrutura porosa de uma pasta de cimento do tipo CEM I₅ e de uma argamassa preparada com o mesmo cimento (relação ag/lig = 0,4 a 3 meses de idade) (BOURDETTE; RINGOT; OLLIVIER, 1995).



Bem como nas pastas de cimento, a idade também influencia a porosidade dos concretos. Essa influência gera correlações idênticas às obtidas nas pastas, ou seja, a porosidade diminui à medida que o concreto envelhece, refinando os poros, e concretos que contenham adições minerais apresentam inicialmente um aumento na porosidade, o qual diminui com a idade, em condições ideais de cura (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Alguns autores também consideram as fissuras como componentes da microestrutura do material concreto que lhe conferem heterogeneidade. De acordo com Ollivier, Torrenti e Carcassès (2012), a extensão das fissuras pode ser um forte indicador da intensidade de deterioração do concreto. Essas fissuras também podem representar uma orientação preferencial sob o efeito de cargas mecânicas.

⁵ Os cimentos do tipo CEM I correspondem aos cimentos brasileiros que não contêm adições minerais (CP I, CP I S e CP V ARI).

Outra característica importante dos concretos consiste no seu cobrimento, camada que se constitui na primeira defesa do material em relação aos agentes agressivos, a qual será mais detalhadamente apresentada no item 2.4.

2.2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE OS MECANISMOS DE TRANSPORTE DE MASSA

O movimento de gases, líquidos e íons através do concreto é de suma importância para sua durabilidade, devido à interação destes com os constituintes do concreto ou com a água dos poros, podendo levar direta ou indiretamente à deterioração da estrutura. Estes movimentos, geralmente chamados de penetração, ocorrem devido a várias combinações de pressões diferenciais de ar ou água, umidades diferenciais ou diferenças de temperatura ou concentração de soluções. Dependendo da força motriz do processo e da natureza da matéria transportada, distinguem-se diferentes processos de transporte para substâncias deletérias através do concreto, tais como: difusão, absorção e permeabilidade (BASHEER *et al.*, 2001).

Os principais mecanismos de transporte que ocorrem no interior do concreto são a permeabilidade (água e ar), a absorção capilar, a difusão iônica e a migração iônica. Nesse tópico serão abordadas apenas a permeabilidade e a absorção capilar, tratadas no decorrer do programa experimental. Os demais mecanismos serão objeto de estudo de uma pesquisa desenvolvida em paralelo a esta, intitulada "Transporte de cloretos em concretos com adições minerais e o desempenho em relação à corrosão das armaduras".6

2.2.1. Permeabilidade

A permeabilidade (k) de um material é definida pela aptidão deste em permitir a passagem de um fluído, quando sujeito a um gradiente de pressão. Essa propriedade é afetada pela conectividade, distribuição e tamanho dos poros (NEVILLE, 2016; BASHEER *et al.*, 2001; OLLIVIER; TORRENTI, 2014). Trata-se, portanto, de uma propriedade macroscópica dos materiais porosos que contêm uma porosidade aberta interconectada (OLLIVIER, TORRENTI, 2014), conforme discutido no item 2.1. Ela é definida pela relação de Darcy, que expressa a vazão volumétrica (Q) de um fluído de viscosidade (μ) que atravessa uma espessura (dx) de um material de seção aparente (A), sob uma diferença de pressão (dp), conforme mostrado na Figura 2.8.

⁶ MARTINS, A. M. Transporte de cloretos em concretos com adições minerais e o desempenho em relação à corrosão das armaduras. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Goiás. Goiânia. Em fase de elaboração.



Figura 2.8 - Definição da permeabilidade (OLLIVIER; TORRENTI; CARCASSÈS, 2012).

Portanto, a Equação 2.3 representa a permeabilidade do concreto:

$$Q = \frac{k}{\mu} A \frac{dp}{dx}$$
(2.3)

Nota-se que essa grandeza é uma característica do material e, portanto, é independente da natureza do fluido utilizado para a sua medida, assim como independe do gradiente de pressão dentro do limite de validade da lei de Darcy. Cabe ressaltar que essa relação supõe que o regime de escoamento no interior dos poros do concreto é laminar e que o fluido é inerte em relação ao material. A condição de fluido estacionário só será observada rapidamente se a porosidade do concreto for acentuada, caso contrário o estabelecimento deste estado de fluxo pode demorar algumas semanas (FERREIRA, 2000).

Quando o fluido que escoa através do material é a água, o usual é o emprego de uma outra grandeza, denominada coeficiente de permeabilidade (K_w). Esse parâmetro também é oriundo da relação de Darcy: expressa-se a velocidade aparente da água (u_a), a relação entre a vazão volumétrica e a seção aparente do material, e introduz-se o gradiente hidráulico (dh/dx), de maneira que K_w passa a ser definido conforme a Equação 2.4, na qual ρ_{água} representa a massa específica da água (OLIVIER; TORRENTI, 2014).

$$u_a = \frac{Q}{A} = \frac{k \cdot \rho_{\dot{a}gua} \cdot g}{\mu_{\dot{a}gua}} \cdot \frac{dh}{dx} = K_W \cdot \frac{dh}{dx}$$
(2.4)

O K_w é homogêneo para dada velocidade, sendo expresso em m/s no sistema internacional. Ele não é uma grandeza intrínseca, uma vez que ele depende tanto do material quanto das características da água. Como, geralmente, os concretos são meios de baixa permeabilidade, a medida desse parâmetro é mais comumente realizada por meio de gases, pois são fluidos de baixa viscosidade. É importante ressaltar que a permeabilidade a líquidos sob pressão será tanto mais acentuada quanto maior for o diâmetro dos poros capilares, além, obviamente, da comunicação entre eles; isto na prática é obtido por meio de relações água/ligante relativamente altas (acima de 0,6, por exemplo). Por sua vez, à medida que se reduz essa relação, obtêm-se estruturas cada vez mais compactas, com poros capilares mais "estreitos". Isto, apesar de favorecer uma maior absorção capilar, pelas forças de sucção aumentadas devido à redução no diâmetro dos capilares, é desejável que aconteça porque diminui de fato a absorção total e a permeabilidade. Esse fato justifica-se, pois, com uma estrutura de pasta mais compacta, a despeito do favorecimento no acréscimo das pressões capilares, haverá sempre uma queda significativa na porosidade capilar e na interconexão ou comunicação entre os poros (CASCUDO, 1997).

2.2.2. Absorção capilar

Absorção capilar é o transporte de líquidos nos poros devido à tensão superficial que atua nos capilares do concreto. Este fenômeno está relacionado à estrutura dos poros, às características do líquido: viscosidade, densidade e tensão superficial; e também às características do sólido poroso: raio, tortuosidade, continuidade dos poros e energia superficial (BAUER, 1995; LARA, 2003; OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

Quanto mais elevada for a tensão superficial no interior dos poros maior será a ascensão capilar, e quando os líquidos são altamente viscosos torna-se maior a dificuldade de penetração destes nos poros do concreto (CASCUDO, 1997). Dentro de um poro capilar a pressão de vapor sobre o líquido é menor do que a pressão de saturação, causando então a evaporação da água no interior do poro e, devido à diferença de pressão, surge o menisco, como se vê na Figura 2.9 (FERREIRA, 2003).





Na Figura 2.9 é mostrado um líquido que ascende à altura h_c em um capilar de raio r aberto para a pressão atmosférica no topo. A força que mantém a ascensão do líquido é a componente vertical da força F, ou seja, F.cos α . Sendo o comprimento do anel de contato igual a $2\pi r$, F = $2\pi r T_s$ e a componente vertical de F igual a $2\pi r T_s \cos \alpha$, em que T_s é a tensão superficial do líquido. O volume do líquido no capilar é $\pi r^2 h_c$.

Fazendo a força resultante para cima igual ao peso, tem-se a Equação 2.5:

$$2\pi r T_s \cos\alpha = \pi r^2 h_c \gamma_w \tag{2.5}$$

E considerando α = 0 (menisco semiesférico), tem-se o apresentado na Equação 2.6:

$$h_c = \frac{2 T_s}{\gamma_w r}$$
(2.6)

Em que:

h_c é a altura de sucção (m);

T_s é a tensão superficial do líquido (N/m);

 γ_w é a densidade do líquido (kg/m³); e

r é o raio do capilar.

Se cada poro capilar do concreto for individualizado é possível aplicar as leis de Jurin (Equação 2.6) e Poiseuille (Equação 2.7) (AZEVEDO, 2002; MENDES, 2009).

$$\mathbf{v} = \frac{r^2 \rho}{8\eta h_c} \tag{2.7}$$

Em que:

v = velocidade de ascensão capilar;

ρ = pressão de ascensão capilar (g/mm²);

η = viscosidade do líquido (g.s/mm²);

r = raio do capilar (mm);

 $h_c = altura de sucção (mm).$

Como v = h_c/t, sendo t o tempo de sucção capilar em segundos, e para a água $T_s = 75 \times 10^{-4} \text{ g/mm e} \eta = 13 \times 10^{-8} \text{ g.s/mm}^2$, obtém-se a Equação 2.8.

$$h_c \simeq 120\sqrt{t r} \tag{2.8}$$

Em que:

```
h<sub>c</sub> = altura de sucção (mm);
```

t = tempo (s);

r = raio do capilar (mm).

Assim, é possível demonstrar que a ascensão capilar é proporcional à raiz quadrada do tempo e do raio capilar. Na prática, não é possível analisar os poros capilares individualmente pelo fato de estes estarem dispostos de uma forma irregular e formarem um emaranhado de pequenos canais, de secção extraordinariamente variável, extremamente complexos e numerosos. Neste contexto, a capilaridade do concreto deve ser considerada como um todo, recorrendo a ensaios que assim a considerem e que consistem em medir a velocidade de absorção de água pelo concreto não saturado e imerso numa altura de água, em geral, de 2 mm a 5 mm (AZEVEDO, 2002).

Quando a absorção de água ocorre unidirecionalmente, ela é chamada de absortividade. A absortividade apresenta-se como uma propriedade adequada para avaliação da durabilidade

dos materiais a base de cimento, uma vez que baixos valores de absortividade representam concretos de melhor qualidade (HO *et al.*, 1986⁷ *apud* GONÇALVES, 2005).

Hall (1989), baseado na teoria de fluxo capilar em material não saturado, observou que o ganho acumulativo de água varia em função da raiz quadrada do tempo, conforme a Equação 2.9.

$$\frac{W}{A} = S \cdot t^{0,5} + S_0$$
 (2.9)

Em que W é o ganho acumulativo de massa de água, A é a área do CP em contato com a água, S é a absortividade, obtida por meio da inclinação da reta entre o ganho de massa de água em função da raiz quadrada do tempo e S_o é uma constante relacionada com a absorção inicial. A absortividade pode ser expressa em g/cm².h^{1/2} ou cm³/cm².h^{1/2} ou cm/h^{1/2} (GONÇALVES, 2005).

Segundo Hall (1989), Martys e Ferraris (1997) e Gonçalves (2005) a absorção por capilaridade pode ser dividida em dois estágios, conforme apresentado na Figura 2.10.



Figura 2.10 - Gráfico típico do acréscimo de massa aparente em função da raiz quadrada do tempo (Gonçalves, 2005).

O estágio 1 (S1) é caracterizado pelo período de absorção com um comportamento de ganho de massa em função do tempo. Nesse estágio, o fluxo de água acontece nos poros aprisionados (gerados durante a moldagem) e capilares maiores. Já o estágio 2 (S2) é

⁷ HO, D. W. S., HINCZAK, I., CONTROY, J. J., LEWIS, R. K. Influence of slag cement on the water sorptivity of concrete. In: International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete – **Proceedings...**, v. 2, p. 1463-1473 (ACI Special Publication, 91), Spain, 1986.

caracterizado pela mudança da inclinação da reta, chamado de período de saturação, nesse período a taxa de absorção é reduzida, provavelmente porque o fluxo de água ocorre em poros capilares menores. O ponto de passagem do estágio de absorção para o estágio de saturação pode ser chamado de "ponto de transição" (Pt). Portanto, uma mesma mistura analisada poderá ter duas taxas de absorção (absortividades, determinadas pelas declividades das retas) distintas, a da fase de absorção e a da fase de saturação, sendo a segunda bem menor do que a primeira.

2.3. INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

As adições minerais têm sido utilizadas como insumo para a construção civil de forma cada vez mais intensa nas últimas décadas pois são de baixo custo e substituem um material nobre que necessita de muita energia para ser obtido, o cimento Portland. Algumas adições possuem atividade hidráulica (cimentante), tal como a escória de alto-forno, outras possuem atividade pozolânica, como a cinza volante, a cinza de casca de arroz, e as tratadas neste trabalho, a sílica ativa, a nanossílica e o metacaulim (SILVA, 2010).

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014a), pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que, por si só, possui pouca ou nenhuma característica aglomerante, mas, quando finamente dividida e na presença de água, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio (CH) em temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. As pozolanas podem ser classificadas em pozolanas naturais e artificiais. Dentre as pozolanas naturais conhecidas, destacam-se os vidros vulcânicos, tufos vulcânicos, argilas ou folhelhos calcinados e as terras diatomáceas⁸. Dentre as pozolanas artificiais, os subprodutos mais conhecidos são a cinza volante, a cinza de casca de arroz, a sílica ativa e o metacaulim.

As adições minerais, via de regra, proporcionam ao concreto no estado fresco menor calor de hidratação, melhoria da trabalhabilidade e redução do teor de água para uma dada consistência (exceto para adições com área superficial muito alta, como a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim), uma redução considerável da tendência de exsudação e da segregação e melhoria na coesão e no acabamento, quando comparados com concretos sem adições (MEHTA, 1989; SENSALE; DAL MOLIN, 1999; SILVA, 2010; NEVILLE, 2016). No caso das adições com alta superfície específica, principalmente as superpozolanas,

⁸ Terras diatomáceas são solos originados a partir da decomposição de organismos fotossintetizadores, chamados diatomáceos, que se revestem de uma carapaça ou frústula de sílica não cristalina.

usualmente é necessária uma elevada dosagem de superplastificante, uma vez que esses materiais exigem uma maior quantidade de água (MALHOTRA, 1998).

No estado endurecido, normalmente a utilização de adições minerais propicia ao concreto um aumento da resistência mecânica última, uma maior estabilidade volumétrica (aumento do módulo de elasticidade e redução da fluência e da retração por secagem), um aumento da resistência a ataques químicos e uma redução da permeabilidade por refinamento dos poros. Além disso, aumentam a resistência às águas e solos agressivos, reduzem o ingresso de cloretos, consequentemente elevando a sua durabilidade (DAL MOLIN, 1994; SENSALE; DAL MOLIN, 1999; AÏTCIN, 2000; FERREIRA, 2003; SILVA, 2010).

Bentz e Garboczi (1991) estudaram a microestrutura da interface pasta/agregado em concretos contendo pozolanas com diferentes graus de pozolanicidade, e concluíram que as adições minerais reduzem, mas não eliminam, o gradiente de porosidade capilar na zona de interface, reduzem o teor de CH tanto na interface quanto na matriz da pasta de cimento do concreto e melhoram as ligações na interface pelo aumento de C-S-H próximo ao agregado. A melhoria da microestrutura da interface e da matriz é devida tanto ao tamanho dos grãos quanto à reatividade da pozolana utilizada, como é o caso da sílica ativa, por exemplo, que apresenta uma pequena dimensão dos seus grãos e uma grande reatividade. Mahdi *et al.* (2013) concluíram de sua pesquisa que a utilização de adições minerais é mais eficiente para se alcançar a durabilidade dos concretos do que a própria diminuição da relação ag/lig, amplamente difundida pela literatura.

De acordo com Mehta e Aïtcin (1990), a substituição parcial do cimento Portland por adições minerais pozolânicas tem por objetivo melhorar a microestrutura do concreto e atuam segundo três diferentes mecanismos:

- As partículas pozolânicas segmentam os canais de percolação da água na pasta de cimento, reduzindo a exsudação e a segregação, causas primárias da falta de homogeneidade estrutural do concreto;
- As pequenas partículas de pozolana, por serem menos reativas que o cimento, ao serem dispersas na pasta, promovem inúmeros locais de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação, tornando a pasta mais homogênea em termos de distribuição de poros finos (efeito dispersor);
- Por efeito físico, as partículas pequenas propiciam um maior empacotamento com o cimento e diminuem o efeito parede da zona de transição, promovendo o aumento da resistência do concreto.

Além disso, Goldman e Bentur (1993) afirmam que o efeito fíler das adições minerais pode ser ainda mais importante do que a sua atividade pozolânica. Os autores ensaiaram concretos com adição de sílica ativa e com um tipo de fíler não reativo (fuligem), além do concreto de referência, na mesma relação ag/lig. Eles concluíram que grande parte do aumento na resistência do concreto foi devido ao efeito físico das partículas das adições, e outra parcela menor em razão da reação pozolânica. O efeito químico das adições minerais não somente depende do efeito físico, como esse também enaltece e catalisa as reações pozolânicas (ISAIA; GASTALDINI; MORAES, 2003).

A seguir são apresentados resultados de outras pesquisas que envolvem a utilização de adições minerais pozolânicas e os efeitos causados nos mecanismos de transporte (permeabilidade e absorção), na estrutura interna (porosidade) e na resistência à compressão do concreto. São abordadas apenas as adições minerais utilizadas no programa experimental desta pesquisa, a saber, nanossílica, sílica ativa e metacaulim.

É importante ressaltar que também são apresentados resultados de resistência à compressão pois este parâmetro, segundo Mehta e Monteiro (2014) e Neville (2016), está intimamente relacionado à permeabilidade dos concretos. De acordo com os autores, tanto a resistência à compressão quanto a permeabilidade são propriedades que estão estreitamente relacionadas à porosidade capilar. Em concretos com maior porosidade capilar, a permeabilidade será maior e, consequentemente, a resistência à compressão será menor. Além disso, quando se avalia as equações de previsão/simulação de VUP das estruturas, grande parte delas utiliza a resistência à compressão como parâmetro primordial.

2.3.1. Sílica ativa

A sílica ativa é um subproduto da fabricação de silício metálico ou de ligas de ferro silício a partir de quartzo de elevada pureza e carvão em fornos a arco e de indução. A redução de quartzo a silício em temperaturas de até 2000°C produz vapor de SiO que oxida e condensa em zonas de baixa temperatura, na forma de partículas esféricas minúsculas constituídas de sílica amorfa (SiO₂); estas partículas são removidas por filtração dos gases de exaustão em filtros manga (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

As partículas de sílica ativa são extremamente finas, e a maior parte delas tem diâmetro entre 0,03 e 0,3 µm, com diâmetro médio geralmente menor do que 0,1 µm. Como o seu manuseio é difícil e caro, justamente por ser extremamente fina, ela é disponibilizada densificada, na forma de micropéletes, que são aglomerados de partículas individuais produzidos por aeração com massa unitária entre 500 e 700 kg/m³ (NEVILLE, 2016).

De modo geral, a introdução de sílica ativa eleva a resistência à compressão do concreto. Ferreira (2003) obteve um acréscimo médio de 33% na resistência à compressão aos 28 dias de um concreto com adição de 10% de sílica ativa quando comparado ao concreto de referência (sem adição), para três diferentes relações água/ligante, a saber, 0,40; 0,55 e 0,70.

Alexander e Magee (1999) estudaram concretos elaborados com cimento do tipo CEM I contendo sílica ativa (SA) em substituição de 5% e 10%, em massa, ao Cimento Portland e um concreto com 10% de adição de sílica ativa. Os autores obtiveram, para todas as relações ag/lig analisadas (apresentadas na Tabela 2.1), resistências mais significativas para os concretos com adição de 10% de SA. Também é importante ressaltar que tanto a adição quanto a substituição de cimento Portland, por sílica ativa, geraram ganhos na resistência à compressão. Os resultados da pesquisa são apresentados mais detalhadamente na Tabela 2.1.

Materiais constituintes do estudo experimental (kg/m³)									
-	Aglomerantes			á.	Agregados				Resistência à
Traço	Cimento Portland	Sílica ativa	Total	Agua	Miúdo	Graúdo	ag/lig	SP*	28 dias (MPa)
	265	-	265	175	923	1040	0,66	-	31,0
Referência	315	-	315	175	880	1040	0,56	I	39,0
	360	-	360	175	842	1040	0,49	0,15	51,0
	252	13	265	175	917	1040	0,66	0,30	38,0
5% SA substituicão	300	15	315	175	874	1040	0,56	0,45	48,5
	342	18	360	175	835	1040	0,49	0,55	55,0
	238	27	265	175	911	1040	0,66	0,55	44,5
10% SA substituicão	283	32	315	175	867	1040	0,56	0,70	57,0
	324	36	360	175	827	1040	0,49	0,95	64,0
	265	25	290	175	891	1040	0,60	0,80	56,0
10% SA adicão	315	30	345	175	843	1040	0,50	1,00	67,0
auiçao	360	35	395	175	798	1040	0,44	1,25	75,0

Tabela 2.1 - Proporcionamento utilizado no estudo experimental (ALEXANDER; MAGEE, 1999) - modificado pelo autor.

* SP = Aditivo superplastificante: dosagens dadas em percentual (em massa) do total de aglomerante

Mardani-Aghabaglou *et al.* (2014) estudaram argamassas contendo 10% de sílica ativa, 10% de metacaulim e 10% de cinza volante (substituição em massa), com relação ag/lig constante e igual a 0,485. O ensaio de resistência à compressão foi feito em corpos de prova cúbicos, com 50 mm de aresta. Os corpos de prova contendo sílica ativa obtiveram os maiores valores

de resistência à compressão para todas as idades analisadas, a saber, 7, 28, 90, 180 e 300 dias. Os resultados dessa pesquisa são apresentados na Figura 2.11.



Figura 2.11 - Resistência à compressão das argamassas estudadas por Mardani-Aghabaglou *et al.* (2014) - modificado pelo autor.

Observa-se que, mesmo em idades inferiores a 50 dias, as argamassas contendo 10% de metacaulim e sílica ativa apresentaram resistências superiores à argamassa de referência. Os autores obtiveram resistências cerca de 5%, 10% e 20% superiores à resistência da argamassa de referência aos 300 dias de idade para as argamassas contendo sílica ativa, metacaulim e cinza volante, respectivamente.

Inúmeros outros pesquisadores também observaram o incremento na resistência à compressão de concretos contendo sílica ativa, podendo ser citados os trabalhos de Slanička (1991), Ferreira (2003), Poon *et al.* (2006), Hassan *et al.* (2012), Güneyisi *et al.*, (2012), Valipour *et al.* (2013), Neville (2016), entre outros.

2.3.1.2. Permeabilidade e absorção

De acordo com Dal Molin (2005) a sílica ativa (SA) é considerada uma superpozolana, pois apresenta alta reatividade e grande superfície específica, gerando, desta forma, reações rápidas. Além do efeito pozolânico, a sílica ativa também possui efeito fíler, proporcionando uma reorganização interna dos vazios. Diante disso, há uma redução considerável do tamanho dos poros e, ocasionalmente, também a sua obstrução, impedindo a passagem de fluidos (FURQUIM, 2006).

Alexander e Magee (1999) analisaram o índice de permeabilidade ao oxigênio de concretos contendo SA em diferentes proporções (Tabela 2.1) por meio de um permeâmetro de carga variável. Esse índice é definido como sendo o logaritmo negativo do coeficiente de

permeabilidade do material. Os resultados obtidos pelos autores são apresentados na Tabela 2.2.

	Índice de permeabilidade ao oxigênio						
		Relação ag/lig					
Traço	0,66	0,66 0,56					
Referência	9,71	9,71 9,97					
5% SA Substituição	10,03 10,28		10,36				
10% SA Substituição	10,19	10,42	10,43				
10% SA Adição	10,30	10,34	10,34				

Tabela 2.2 - Índice de permeabilidade ao oxigênio (ALEXANDER; MAGEE, 1999) - modificado pelo autor.

Nota-se que o uso de diferentes combinações de adições afeta significativamente o índice de permeabilidade ao oxigênio do concreto. Comparando apenas os concretos com relação ag/lig = 0,56 (por uma questão de simplificação, visto que os índices seguem a mesma tendência), o acréscimo de 5% e 10% em substituição de SA, em massa, elevou o índice de permeabilidade de 9,97 no concreto de referência, para 10,28 e 10,42 respectivamente, em uma escala logarítmica. Para os concretos com adição de 10% de SA os autores obtiveram índices de permeabilidade mais baixos, o que pode ser explicado pelo fato de o ensaio apresentar baixa sensibilidade ao teste aplicado para valores superiores a 10,30. Para todos os teores de adição de SA foram obtidos concretos de excelente performance, considerando que apenas para a relação ag/lig = 0,49 o concreto de referência alcançou o mesmo nível de performance (ALEXANDER; MAGEE, 1999).

Estudando outros mecanismos de transporte, Güneyisi *et al.*, (2012) avaliaram a absorção de água em concretos com sílica ativa e metacaulim, com relação ag/lig de 0,25 e 0,35. Eles observaram influência positiva de ambas as adições na redução da absorção, com redução de aproximadamente 70% em relação às amostras de referência. Contudo, o teor de 15% de sílica ativa apresentou resultados um pouco melhores que os resultados do metacaulim.

Mardani-Aghabaglou *et al.* (2014) ensaiaram cilindros de 100 x 50 mm de argamassa, contendo 10% de substituição em massa de cinza volante, metacaulim e sílica ativa, conforme

discutido no subitem 2.3.1.1. Pode ser observado na Figura 2.12 que a absorção de água foi reduzida em cerca de 60% devido à incorporação da sílica ativa.





2.3.1.3. Porosidade

O bom desempenho dos concretos com sílica ativa também é destacado por Hassan *et al.* (2000); em suas pesquisas, a substituição de 10% do cimento por sílica ativa elevou a resistência à compressão para todas as idades, de 1 a 365 dias. Alguns autores afirmam que o bom desempenho da sílica ativa é ainda mais pronunciado nas primeiras idades, dentre eles Ramezanianpour e Malhotra (1995) e Türkmen *et al.* (2002).

Claisse, Cabrera e Hunt (2001) estudaram três diferentes tipos de ensaios de avaliação da porosidade em concretos contendo SA: porosimetria por intrusão de gás hélio, porosimetria por intrusão de mercúrio e perda de massa. Os traços estudados pelos autores são apresentados na Tabela 2.3, a seguir.

Traço	Α	В	С	D
Cimento (kg/m ³)	344	430	252	315
Sílica ativa (kg/m³)	86	0	63	0
ag/lig	0,3	0,3	0,46	0,46
Superplastificante (% do teor de lig)	1,4	1,4	1,9	1,9
5-20 mm agregado/lig	3	3	4	4
Agregado miúdo/lig	1,5	1,5	2,3	2,3

Tabela 2.3 - Proporcionamento dos concretos estudados por Claisse, Cabrera e Hunt (2001) – modificado pelo autor.

A Figura 2.13 apresenta a correlação entre a porosidade medida nos poros entre 0,15 e 10 micrômetros e a porosidade total da pasta para os traços contendo sílica ativa (SA) e cimento Portland (CP), e a Figura 2.14 apresenta a correlação entre a porosidade medida nos poros entre 0,003 e 0,01 micrômetros e a porosidade total da pasta obtida no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Figura 2.13 - Porosimetria por intrusão de mercúrio nos poros entre 0,01 - 0,15 µm x porosidade total da pasta (CLAISSE; CABRERA; HUNT, 2001) - modificado pelo autor.



Pela Figura 2.13 nota-se que os concretos que contém adição de sílica ativa apresentaram uma redução significativa na porosidade considerando o intervalo de poros analisado e a relação entre o intervalo de porosidade analisado apresentou correlação diferente daquela observada para concretos contendo apenas cimento Portland.

Já a Figura 2.14, para o intervalo entre 0,003 e 0,01 µm, mostra a amplitude do refinamento dos poros causado pela adição de SA, as correlações com a porosidade total do concreto não são significativas, mas o efeito da SA fica bastante evidenciado.



Figura 2.14 - Porosimetria por intrusão de mercúrio nos poros entre 0,003 - 0,01 µm x porosidade total da pasta (CLAISSE; CABRERA; HUNT, 2001) - modificado pelo autor.

É importante ressaltar que Claisse, Cabrera e Hunt (2001) também concluíram que, quando se avalia a porosidade como um fator de predição das propriedades de transporte do concreto, é igualmente válido utilizar medidas em amostras de pasta de cimento ou de concreto em si.

Kumar e Roy (1986) desenvolveram uma pesquisa na qual avaliaram o valor médio do raio dos poros do concreto no intervalo entre 0,002 e 7,5 µm como medida do efeito da incorporação de SA. Os autores utilizaram concretos com 28 dias de cura a 60°C e encontraram, para um concreto com 10% de substituição de SA, raios médios cerca de 40% menores que os encontrados na pasta sem adição, comprovando o efeito de colmatação dos poros causado pela adição de sílica ativa.

A Figura 2.15 apresenta os resultados de um estudo desenvolvido por Scrivener, Bentur e Pratt (19889 *apud* OLLIVIER; TORRENTI, 2014) no qual é evidenciado o efeito da presença de sílica ativa no concreto em relação à zona de transição. Nota-se que, no caso dos concretos do tipo CEM I, a porosidade, determinada por análise de imagens, aumenta na vizinhança dos agregados. Com o tempo, a porosidade diminui, mas permanece elevada na vizinhança do agregado. A zona de transição tem uma espessura de 25 µm. Com a sílica ativa, a porosidade diminui notadamente, em especial na vizinhança dos agregados: não se observa mais a zona de transição (ou, então, sua espessura é inferior a 5 µm) (OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

⁹ SCRIVENER, K. L.; BENTUR, A.; PRATT, P. L. Quantitative characterization of the transition zone in highstrength concrete. Advances in Cement Research. 1988, vol. 1, n. 4, pp. 230-237.

Figura 2.15 - Evolução da porosidade na vizinhança dos agregados, destacando a zona de transição (SCRIVENER; BENTUR; PRATT, 1988 *apud* OLLIVIER; TORRENTI, 2014).



2.3.2. Nanossílica

Nos últimos anos vem crescendo o número de pesquisas sobre o uso da nanotecnologia aplicada ao concreto. Uma dessas tecnologias é o uso de nanopartículas de sílica, ou nanossílica, como tem sido denominada. Este material se propõe a ser uma adição mineral de desempenho superior, sobretudo em razão de sua elevada finura, aliada à sua composição química essencialmente silicosa e alto grau de amorficidade. Já é possível encontrá-la no mercado na forma de dispersão aquosa. O processo de obtenção da nanossílica é consideravelmente mais caro do que o da sílica ativa. Enquanto essa é um subproduto do processo de produção de ligas de silício metálico, aquela é obtida a partir de um processo sintético de precipitação de soluções de silicato de sódio (KONTOLEONTOS *et al.*, 2012).

As nanopartículas de SiO₂ podem ser obtidas por processos diversos e, dependendo desse processo e das condições de obtenção podem variar as propriedades da nanossílica como tamanho de partícula e reatividade, refletindo assim na sua eficiência.

A nanossílica coloidal, por exemplo, corresponde a uma dispersão estável de sílica amorfa em escala nanométrica (geralmente entre 1 e 100 nm), não porosa e partículas normalmente esféricas. Uma dispersão estável de partículas de partículas coloidais nesse caso significa que as partículas sólidas não se aglomeram e não sofrem sedimentação a uma taxa significativa (BERGNA, 2006).

As dispersões de nanossílica são possíveis pois na superfície da partícula de nanossílica existem hidroxilas que lhe conferem polaridade e fazem com que seja possível estabelecer ligações de hidrogênio com a água. Um dos aspectos relevantes para a estabilidade das nanocargas no meio aquoso da solução coloidal é o pH da suspensão. As hidroxilas do meio básico abstraem o hidrogênio do grupo silanol (Si-OH), formando água, a superfície da nanocargas apresenta grupos Si-O- com carga negativa, que evitam a aglomeração e precipitação das nanopartículas.

As nanopartículas possuem uma grande área de superfície quando comparadas com as matérias-primas tradicionais, conforme mostrado na Figura 2.16. Essa característica é responsável pela alteração das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido quando comparado com as adições convencionais. Nesse sentido, a adição de nanopartículas em substituição parcial do cimento tem adquirido atenção crescente nos últimos anos (SOBOLEV; GUTIÉRREZ, 2005).



Figura 2.16 - Relação entre o tamanho e a área superficial da partícula (SOBOLEV; GUTIÉRREZ, 2005) - modificado pelo autor.

A nanossílica é considerada uma adição pozolânica altamente reativa que, em substituição ao cimento, tem demonstrado que ocorre uma melhoria na resistência dos materiais cimentícios e o aumento da resistência à penetração de água, o que influencia fortemente na durabilidade. Segundo Gleize (2011), a nanossílica demostra ser mais eficiente no ganho de resistência do que a sílica ativa, ou microssílica. Além de proporcionar o efeito fíler para melhorar a microestrutura de concretos, também funciona como um ativador para a reação pozolânica, além de proporcionar a formação de pontos de nucleação, contribuindo para a hidratação do cimento. Esse comportamento leva a uma melhora na microestrutura com refinamento dos poros, consequentemente melhorando as propriedades mecânicas do concreto, conforme é discutido nos itens a seguir.

2.3.2.1. Resistência à compressão

Muito tem sido estudado sobre as propriedades mecânicas de concretos com adição de nanossílica. Singh *et al.* (2012) estudaram pastas de cimento contendo diferentes teores de nanossílica, a saber, 0,25%, 0,5%, 1,0%, 2,5% e 5,0%. Os autores concluíram que a resistência à compressão (avaliada aos 1, 3, 7 e 28 dias) das pastas aumenta na medida em que se aumenta o teor da adição. Para as pastas contendo 5% de nanossílica, a resistência à compressão obtida foi 64% maior para as pastas analisadas com 1 dia e 35% maior para as pastas analisadas aos 28 dias em relação à pasta de referência (sem adições).

Outros autores também observaram incrementos na resistência à compressão em concretos com incorporação de nanossílica. Khanzadi *et al.* (2010) obtiveram maiores valores de resistência à compressão (7, 28 e 91 dias) para concretos com substituição de cerca de 1,5% de nanossílica. Aos 91 dias, o concreto de referência apresentou resistência de aproximadamente 49 MPa, enquanto que o concreto com adição apresentou resistência de cerca de 56 MPa, aproximadamente 14% maiores.

Seguindo a mesma linha de pesquisa, Zahedi *et al.* (2015) estudaram argamassas contendo adição de dois tipos diferentes de nanossílica. O primeiro tipo (100/40) apresenta área específica de 100 m²/g, diâmetro médio das partículas igual a 36,2 nm e 40% de concentração em massa na dispersão de nanossílica. Já o segundo tipo (300/25) apresenta área específica de 300 m²/g, diâmetro médio das partículas igual a 12,9 nm e 25% de concentração em massa. Todas as misturas estudadas por esses pesquisadores apresentaram relação ag/lig constante e igual a 0,485. Os autores formularam, para cada tipo de nanossílica utilizado, dois proporcionamentos distintos, sendo um com 2,5% de substituição em massa, e o outro com 5%, perfazendo um total de quatro misturas estudadas, sendo elas: 2.5L100, 2.5L300, 5L100 e 5L300, nas quais o número que antecede a letra "L" representa a porcentagem de nanossílica, e o último número representa o tipo de nanossílica que foi empregado. O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 3, 7, 28 e 90 dias de idade e para cada idade analisada foram rompidos três corpos de prova cúbicos de 50 cm de aresta. Na Figura 2.17 são apresentados os resultados obtidos, em relação ao proporcionamento de referência (sem incorporação de nanossílica).



Figura 2.17 - Resistência à compressão das argamassas contendo nanossílica estudadas por Zahedi *et al.* (2015) - modificado pelo autor.

Observa-se na Figura 2.17 que todos os proporcionamentos com incorporação de nanossílica apresentaram resistências à compressão superiores ao proporcionamento de referência. O elevado aprimoramento obtido nas argamassas contendo a mesma proporção de substituição em nanossílica do tipo 300/25 em relação à 100/40 é devido à sua elevada superfície específica e reatividade. O rápido consumo de portlandita, especialmente nas idades iniciais, melhorou bastante a resistência das argamassas com incorporação de nanossílica 300/25. Entretanto, com o progresso da hidratação, o incremento de resistência devido à incorporação dessas nanopartículas é diminuído e as argamassas com incorporação de nanossílica 100/40 acabam sendo mais eficientes em idades avançadas.

2.3.2.2. Permeabilidade e absorção

Khanzadi *et al.* (2010) avaliaram a influência da adição de partículas de nanossílica (aproximadamente 1,5 % de substituição em massa) na absorção de água de concretos. Os autores concluíram que os concretos contendo nanossílica apresentam maior resistência à permeabilidade quando comparados aos concretos de referência (Figura 2.18).

Figura 2.18 - Resultados de permeabilidade à água segundo Khanzadi *et al.* (2010). (a) variação da permeabilidade à água com o tempo; (b) coeficientes de permeabilidade (ensaio de absorção de água por capilaridade) para o concreto de referência (OPC) e contendo adição de nanossílica (NANO) - modificado pelo autor.



ZAHEDI *et al.* (2015), conforme explicado no subitem anterior (2.3.2.1), estudaram argamassas contendo dois diferentes tipos de nanossílica. O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado aos 7 e 28 dias de idade, e para cada idade analisada foram feitas medições a cada 3, 6, 24 e 72 horas após o contato do corpo de prova com a água. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.4.

	Absorção por capilaridade (g)								
Proporcionamento	7 dias				28 dias				
	3h	6h	24h	72h	3h	6h	24h	72h	
Referência	10,5	12,4	19	21,3	9,7	11,8	17,5	19,9	
2.5L100	9,7	11,6	18,5	20,6	8,5	10,2	16	18,1	
2.5L300	8,8	11	17,4	19,8	9,1	10,8	16,7	19	
5L100	7,5	10,2	15,5	17,1	6,5	8,8	13,7	15,1	
5L300	7	10	14,7	16	6,9	9,2	15,7	17,2	

Tabela 2.4 - Absorção por capilaridade (g) (ZAHEDI et al., 2015) - modificado pelo autor.

Como pode ser observado, a incorporação de nanossílica reduziu consideravelmente a absorção capilar e, além disso, à medida em que se eleva o teor de substituição, a absorção é reduzida. Como mencionado anteriormente, o acréscimo de nanossílica gera melhorias nas idades iniciais da argamassa, devido à sua elevada superfície específica e, portanto, o menor índice de absorção por capilaridade foi obtido pela argamassa com incorporação de 5% da nanossílica do tipo 300/25.

2.3.2.3. Porosidade

Singh *et al.* (2012) também avaliaram o efeito da adição de nanossílica em pastas de cimento por meio de micrografias obtidas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV). A Figura 2.19 apresenta as micrografias obtidas aos 28 dias para (a) uma amostra de referência (PC28) e para (b) uma amostra contendo 5% de nanossílica (NS28).

Figura 2.19 - Micrografias da pasta de cimento (a) sem adição de nanossílica (b) com adição de 5% de nanossílica segundo Singh *et al.* (2012) - modificado pelo autor.



Nota-se que na microestrutura da pasta de referência, o gel de C-S-H está presente juntamente com o CH em forma de agulhas e de placas. O CH depositado ao redor do gel de C-S-H está uniformemente distribuído em toda a pasta. No entanto, a microestrutura da pasta contendo adição de nanossílica mostrou que a formação dos produtos de hidratação é significativamente mais densa e não apresenta os cristais hexagonais de CH, o que reduz a porosidade do sistema. O mesmo efeito também foi observado por Isfahani *et al.* (2016), Tobón *et al.* (2015) e Quercia *et al.* (2014).

2.3.3. Metacaulim

O metacaulim é uma pozolana de alta reatividade obtida a partir da calcinação de argilas essencialmente constituídas por caulinita. Basicamente, existem duas fontes de matéria-prima para a obtenção da caulinita, uma delas é a extração de depósitos de argilas cauliníticas e/ou de caulins de alta pureza, a outra é por meio da utilização dos resíduos cauliníticos da indústria de branqueamento de papel, que, por sua vez, utiliza o caulim como matéria-prima.

Em linhas gerais, qualquer argila caulinítica calcinada pode ser designada como metacaulim. No entanto, existem metacaulins de diferentes reatividades, que dependem de sua composição química, mineralogia e características físicas (DAL MOLIN, 2011).

2.3.3.1. Resistência à compressão

É consenso geral entre as pesquisas que a resistência à compressão é aumentada com a adição de metacaulim, sobretudo em idades mais avançadas. No entanto, também é possível conseguir um aumento na resistência nas primeiras idades com o seu uso (SABIR; WILD; BAI, 2001).

Teodoro *et al.* (2016a) e Teodoro *et al.* (2016b) estudaram concretos contendo 10% de substituição em massa de Metacaulim HP XW (MX) e Metacaulim HP MAX (MM). O Metacaulim HP XW é uma adição mineral mais grossa, em termos da dimensão dos grãos e da finura, porém apresenta baixo teor de impurezas químicas. Já o Metacaulim HP MAX é uma adição extremamente fina, propondo-se ser altamente reativa. Os autores encontraram incrementos da ordem de 17,8% e 20,6%, respectivamente, em relação ao concreto de referência considerando-se globalmente todas as idades analisadas em ambas as relações ag/lig estudadas, a saber: 0,40 e 0,60.

Em um estudo realizado por Li e Ding (2003), o concreto de relação ag/lig 0,44 e 10% de substituição em massa do cimento por metacaulim, alcançou resistência, aos 28 dias, superior ao concreto de referência em cerca de 8 MPa (equivalente a 14,5%). No programa experimental desenvolvido pelos autores a adição de metacaulim elevou consideravelmente a resistência à compressão do concreto, do mesmo modo, outros pesquisadores já relataram comportamento semelhante, dentre eles Bai e Wild (2002) e Caldarone *et al.* (1994).

Souza (2003) analisou concretos contendo de 5% a 20 % de metacaulim, aos 28 dias de idade, e obteve ganhos de cerca de 15% na resistência à compressão com relação ao concreto de referência, sendo que os ganhos foram maiores com o aumento do teor da adição. Nos concretos analisados por Oliveira (2007) a resistência também aumentou em cerca de 15%, de acordo com o aumento do teor de metacaulim, no entanto essa observação só é válida para as idades de 28 e 91 dias. Para as idades de 3, 7 e 14 dias ocorreu o oposto, fazendo com que a resistência diminuísse com o aumento do teor de metacaulim.

Na pesquisa de Wild, Khatib e Jones (1996), os concretos com teores de 20, 25 e 30% de metacaulim obtiveram uma menor resistência à compressão com 1 dia de idade, por outro lado, com 90 dias de idade o concreto com 5% de metacaulim obteve uma resistência à compressão menor que a do concreto de referência. Nos estudos de Güneyisi *et al.* (2012), em concretos com 5% e 15% da adição mineral, os resultados nas primeiras idades foram superiores ao concreto de referência e ao concreto com sílica ativa com os mesmos teores. Nos estudos desenvolvidos por Poon, Kou e Lam (2006) a resistência à compressão dos

concretos com 5%, 10% e 20% de metacaulim foi superior ao concreto referência em todas as idades: 3, 7, 28 e 90 dias.

Hassan *et al.* (2012) estudaram a influência da adição de metacaulim em concretos autoadensáveis. Os autores concluíram que a resistência à compressão desses concretos aumenta na medida em que o teor de metacaulim é incrementado em teores entre 0% e 25% em substituição parcial do cimento. A título de comparação os autores também analisaram concretos autoadensáveis contendo sílica ativa cuja resistência máxima foi obtida para teores de substituição de 8%. Nesse estudo, as resistências dos concretos contendo 8% de sílica ativa e 8% de metacaulim foram similares, ambas aumentaram em torno de 14% em relação ao traço de referência (sem adições). Porém, ao elevar-se o teor de metacaulim de 8% para 25%, a resistência à compressão aumentou apenas 7%.

Paiva *et al.* (2012) obtiveram aumentos na resistência à compressão de concretos com adição de 10%, 20% e 30% de metacaulim na presença de aditivos superplastificantes. É importante ressaltar que os autores também analisaram traços sem aditivo dispersante e, nesses casos, a resistência dos concretos foi reduzida na medida em que se elevou o teor da adição. Essa redução é atribuída ao fato de as partículas de metacaulim serem muito pequenas e com elevada energia superficial o que faz com elas tendam a se aglomerarem. Essas aglomerações de partículas apresentam baixa reatividade, justificando a redução da resistência, além disso, há um aumento da quantidade de água na mistura quando da adição de metacaulim.

Ferreira (2003) obteve acréscimos médios de 28% na resistência à compressão de concretos contendo 10% de metacaulim, para as seguintes relações água aglomerante: 0,40; 0,55 e 0,70.

De maneira geral, o aumento do teor de metacaulim de alta reatividade, é seguido de um aumento na resistência à compressão do concreto. No entanto, deve-se ressaltar que como o metacaulim de alta reatividade é um material muito fino, maiores teores irão demandar um aumento significativo na quantidade de água e/ou aditivo para que o abatimento seja mantido.

2.3.3.2. Permeabilidade e absorção

Gesoğlu *et al.* (2014) estudaram a permeabilidade de concretos contendo metacaulim de alta reatividade (MK) e metacaulim impuro calcinado (MC). Na formulação dos concretos (relação ag/lig = 0,40) o cimento foi substituído em 5%, 10%, 15% e 20% em massa pelas duas adições. Os autores executaram o ensaio de permeabilidade ao ar pelo método CEMBUREAU ao final de 28 e 90 dias de cura das amostras. Os resultados mostraram que os concretos

com incorporação de diferentes tipos de caulins calcinados apresentam performance em permeabilidade comparável à performance dos concretos com incorporação de metacaulim de alta resistividade, dependendo principalmente do tipo e da quantidade de adição mineral utilizada. Além disso, também mostraram que todos os concretos com adição de MK e MC apresentaram permeabilidade menor que concretos sem adições incorporadas, independentemente do teor de adição. A Figura 2.20 e a Figura 2.21 apresentam a variação do coeficiente de permeabilidade para 28 e 90 dias de cura em relação à pressão de entrada do gás, respectivamente.

Figura 2.20 - Perfil típico do coeficiente de permeabilidade para o concreto de referência e para concretos contendo MK incorporado aos 28 dias de cura segundo Gesoğlu *et al.* (2014) - modificado pelo autor.



Figura 2.21 - Perfil típico do coeficiente de permeabilidade para o concreto de referência e para concretos contendo MK incorporado aos 90 dias de cura segundo Gesoğlu *et al.* (2014) - modificado pelo autor.



Nota-se que os concretos com incorporação de metacaulim apresentam coeficiente de permeabilidade ao oxigênio menores que o concreto de referência, e também que quanto maior o teor dessa adição, menor a permeabilidade do concreto. Além disso, os concretos analisados aos 90 dias de cura apresentaram menores valores de permeabilidade que os analisados aos 28 dias, o que comprova a atuação lenta da reação pozolânica, colmatando os poros do material.

Teodoro *et al.* (2016a) e Teodoro *et al.* (2016b) também realizaram o ensaio de absorção de água por capilaridade nos concretos contendo 10% de MX e MM. Os autores apresentaram uma análise múltipla de médias (ANOVA) em relação à variável raio do capilar, obtida por meio das equações Jurin e Poiseuille (Mendes, 2009) em que foram avaliados os efeitos da relação ag/lig e do tipo de metacaulim.

Na referida pesquisa ambas as variáveis resultaram significativas na definição da dimensão do raio médio do poro, porém, o efeito combinado das duas variáveis não se mostrou significativo, o que demonstra que o tipo de metacaulim causa influência importante na concepção dimensional do raio médio do capilar, independentemente da relação água/ligante (e vice-versa). Os autores observaram que os concretos com adição de MX e MM apresentaram um raio médio do capilar menor em relação ao concreto de referência, o que representa um desempenho superior.

Diversos pesquisadores também estudaram as propriedades mecânicas e de transporte de massa em concretos com adição de metacaulim. Shekarchi *et al.* (2010), por exemplo, estudaram concretos contendo diferentes teores de metacaulim, os autores concluíram que a 15% de substituição (em massa) a resistência à compressão dos concretos teve aumento de cerca de 20%, enquanto a permeabilidade à água, permeabilidade ao oxigênio e absorção de água apresentaram melhorias de 50%, 37% e 28%, respectivamente.

Valores de permeabilidade ao gás reduzidos para concretos contendo metacaulim em comparação a concretos sem adição também foram observados por Badogiannis e Tsivilis (2009). Os valores obtidos na pesquisa variaram entre 1,35 e 1,85 x 10^{-6} m² para os concretos contendo metacaulim (teores estudados: 10% e 20% em substituição ao cimento e os mesmos teores em substituição à areia) enquanto que o concreto de referência apresentou permeabilidade igual a 2,95 x 10^{-6} m².

Mardani-Aghabaglou *et al.* (2014), conforme apresentado nos subitens 2.3.1.1 e 2.3.1.2, obtiveram reduções significativas na absorção de água de argamassas com 10% de metacaulim (substituição em massa), cerca de 35% em relação à amostra de referência.

Porém, os resultados obtidos por meio da incorporação de sílica ativa foram superiores, tendo a absorção reduzido cerca de 60% no caso dessa adição.

2.3.3.3. Porosidade

Paiva *et al.* (2012) realizaram ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio em amostras de argamassas extraídas de concretos com adição de metacaulim. Como dito anteriormente, os autores analisaram concretos contendo 10%, 20% e 30% de adição, com e sem aditivo superplastificante. Observou-se que para os concretos sem aditivos dispersantes, a porosidade aos 7 e aos 28 dias aumentou, em relação ao concreto de referência. Porém, quando da incorporação desses aditivos, a porosidade total diminui com o aumento do teor da adição. Isso acontece, conforme já explicado no item 2.3.3.1, devido à aglomeração das partículas de metacaulim, o que conduz a uma baixa reatividade.

A redução na porosidade de concretos contendo metacaulim, em relação a concretos sem adição também foi observada por Badogiannis e Tsivilis (2009). Os autores observaram porosidades totais que variaram entre 7,2% e 11,2% nos concretos contendo a adição enquanto que no concreto de referência a porosidade total medida foi de 11,1%. É importante observar que, nos concretos contendo as adições, os maiores valores de porosidade foram obtidos para metacaulins com baixo teor de caulinita encontrados na Grécia, por isso algumas medidas se aproximaram do valor obtido no concreto de referência.

A redução no tamanho dos poros de concretos contendo metacaulim também foi observada por Badogiannis e Tsivilis (2009). Para os concretos com adição de metacaulim esse tamanho variou entre 55 nm e 74 nm, enquanto que para o concreto de referência foi obtido raio médio igual a 96 nm. A Figura 2.22 apresenta a variação do volume dos poros do concreto em função da variação do tamanho dos poros. São avaliados o concreto de referência (PC), concretos com substituição de 10% e 20% em relação à massa de areia (SR10 e SR20, respectivamente) e concretos com substituição de 10% e 20% em relação à massa de cimento (CR10 e CR20, respectivamente).



Figura 2.22 - Distribuição do tamanho dos poros para concreto contendo metacaulim segundo Badogiannis e Tsivilis (2009) - modificado pelo autor.

Nota-se que as curvas referentes aos concretos contendo metacaulim são deslocadas para a esquerda da curva referente ao concreto de referência (PC), o que resulta em concretos mais compactos e menos porosos. De maneira geral pode-se concluir que a adição de metacaulim ao concreto refina o seu sistema de poros levando à redução de sua porosidade.

Com relação à porosidade dos concretos com incorporação de metacaulim, fica evidenciada a importância dessa adição mineral no refinamento dos poros, destacando-se o papel primordial dos aditivos dispersantes, visto que esta adição é extremamente fina, tendendo a aglomerar-se.

2.3.4. Composição de Sílica Ativa com Nanossílica

Poucos estudos já foram desenvolvidos no sentido de avaliar-se a ação conjunta da nanossílica com a sílica ativa. A seguir são apresentados os resultados de algumas pesquisas que buscaram melhorar as propriedades mecânicas e de transporte de fluidos em concretos por meio da composição dessas adições.

2.3.4.1. Resistência à compressão

A atuação conjunta da nanossílica (NS) e da sílica ativa (SA) foi estudada por Senff *et al.* (2010). Os autores estudaram argamassas (ag/lig = 0,35) de cimento Portland do tipo CEM I e, para isso, desenvolveram os traços que são apresentados na Tabela 2.5.

Troop	Componentes							
Traço	Água (mL)	Cimento (g)	Areia (g)	SA (g)	NS (g)	Aditivo (g)		
SA (0)	203	580	1160	-	-	7		
SA (10)	203	522	1160	58	-	7		
SA (20)	203	464	1160	116	-	7		
NS (3,5)	203	559,7	1160	-	20,3	17,4		
NS + SA (0 +12,2)	203	509,2	1160	70,8	-	7		
NS + SA (2 +12,2)	203	509,2	1160	59,2	11,6	7		

Tabela 2.5 - Formulação das argamassas estudadas por Senff et al. (2010) - modificado pelo autor.

Os resultados dessa pesquisa são apresentados na Figura 2.23.

Figura 2.23 - Resistência à compressão das argamassas estudadas por Senff *et al.* (2010) após cura de 7, 28 e 90 dias, com desvio padrão - modificado pelo autor.



Nota-se que a combinação das duas adições minerais resultou em resistências mais elevadas para as argamassas, com exceção apenas da argamassa contendo 20% de SA aos 7 dias, quando comparadas com a amostra de referência: SA (0). Também se observa que a argamassa contendo adição de NS+SA apresentou melhores resultados que aquelas contendo as adições individualmente: NS (3,5), SA (10) e SA (20), o que sugere uma ação combinada dos efeitos fíler e químico (pozolânico).

Hussain e Sastry (2014) avaliaram a resistência à compressão aos 28 dias de concretos contendo sílica ativa (7,5%) e nanossílica (2%). Foram elaborados dois traços de concreto com resistências características de 40 MPa e 50 MPa. Para cada traço estudado variou-se o teor de sílica ativa (5%, 7,5%, 10% e 15%) e de nanossílica (1%, 1,5%, 2%, 2,5%), a fim de se estudar a influência de cada adição separadamente. Por último a combinação das duas adições foi analisada. A Tabela 2.6 apresenta os resultados obtidos.

Toor do cílico	Toor do	Resistência à cor	npressão (N/mm²)	
ativa (%)	nanossílica (%)	Traço 40 MPa	Traço 50 MPa	
0	0	49,56	57,04	
5	0	57,19	61,00	
7,5	0	61,24	69,89	
10	0	48,74	44,58	
15	0	46,22	42,07	
0	1	54,11	62,27	
0	1,5	55,25	65,79	
0	2	59,61	69,72	
0	2,5	47,00	51,42	
7,5	2	62,25	71,50	

Tabela 2.6 - Resistência característica à compressão dos concretos estudados por Hussain e Sastry (2014) - modificado pelo autor.

Nota- se que a combinação das duas adições gerou maiores resistências à compressão nos concretos. Além disso, também pode-se concluir que teores de adição de nanossílica acima de 2% e de sílica ativa acima de 10%, levam à uma redução da resistência à compressão dos concretos.

Ghafari *et al.* (2014) estudaram concretos contendo adição combinada de sílica ativa (SA) e nanossílica (NS) em concretos com relação ag/lig igual a 0,16 conforme apresentado na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Formulação dos concretos estudados por Ghafari *et al.* (2014) (valores em kg/m³ de concreto) - modificado pelo autor

Amostra	Cimento	SA	NS	Areia	Água	SP	
M0 (referência)	950	255	-	873	189	31	
M1	941,5	255	9,5	873	189	31	
M2	932	255	19	873	189	31	
M3	921,5	255	28,5	873	189	31	
M4	912	255	38	873	189	31	
* Aditivo Superplastificante							

Os resultados do ensaio de resistência à compressão obtidos pelos referidos autores estão apresentados na Figura 2.24.



Figura 2.24 - Resistência à compressão dos concretos estudados por Ghafari *et al.* (2014) com desvio padrão - modificado pelo autor.

Observa-se que a adição de 3% de nanossílica resultou no aumento em cerca de 24% aos 7 dias da resistência à compressão, o que corresponde à uma resistência 40% maior que a observada no concreto de referência. O aumento na resistência à compressão é devido à elevada reatividade das nanopartículas na presença de CH, tornando a microestrutura mais densa. Além disso, a incorporação de partículas de NS acelera o processo de hidratação do C₃S do clínquer devido à sua elevada superfície específica. Nota-se que o efeito da adição de nanossílica e sílica ativa é mais modesto quando se avalia as idades de 28 e 90 dias, esse comportamento comprova que a maior parte da reatividade pozolânica da nanossílica se processa nas idades iniciais conforme discutido por Madani *et al.* (2012), Jo *et al.* (2007), Pourjavadi *et al.* (2012) e também por Ghafari *et al.* (2014).

2.3.4.2. Permeabilidade e absorção

Ganesh *et al.* (2016) estudaram concretos contendo adição de nanossílica e sílica ativa. Os proporcionamentos estudados pelos autores são apresentados na Tabela 2.8.

Traço	Cimento (kg/m³)	Sílica ativa (kg/m³)	Areia de quartzo (kg/m ³)	Pó de quartzo (kg/m ³)	Água (kg/m³)	Nanossílica (kg/m³)	SP (%)*
H-0	730,0	183	1095	-	292	-	0,4
H-1	722,7	183	1095	-	292	7,3	0,4
H-2	715,4	183	1095	-	292	14,6	0,4
U-0	730,0	193	803	292	292	-	0,6
U-1	722,7	183	803	292	292	7,3	0,6
U-2	715,4	183	803	292	292	14,6	0,6

Tabela 2.8 - Proporcionamentos dos concretos estudados por Ganesh et al. (2016) - modificado pelo autor.

* SP = Superplastificante: (% em massa de aglomerante no traço)

Com o intuito de avaliar a durabilidade dos concretos produzidos, os autores realizaram os ensaios de absorção de água por imersão e por capilaridade nos concretos que apresentaram melhor desempenho mecânico, a saber os traços U-0 e U-2, com substituição em massa de 0 e 2% de nanossílica, respectivamente. Os resultados obtidos pelos autores no ensaio de absorção são apresentados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Resultados do ensaio de absorção de água dos concretos estudados por Ganesh *et al.* (2016) - modificado pelo autor.

Concreto	Absorção (%)	Vazios (%)
U-0 amostra 1	2,85	5,71
U-0 amostra 2	2,88	5,87
U-0 amostra 3	2,84	5,75
Média U-0	2,86	5,78
U-2 amostra 1	2,48	4,98
U-2 amostra 2	2,44	4,88
U-2 amostra 3	2,45	4,80
Média U-2	2,46	4,89

O ensaio de absorção de água foi realizado aos 28 de dias de idade. Pode-se observar que a absorção média de água dos concretos U-2 (contendo 2% de nanossílica) foi menor (cerca de 16%) que a absorção média dos concretos sem essa adição. Além disso, o índice de vazios nos concretos U-2 foi cerca de 18% menor que nos concretos U-0, indicando que os concretos com adição de nanossílica são mais densamente compactos.

Os resultados do ensaio de absorção por capilaridade (absortividade) são apresentados na Figura 2.25.



Figura 2.25 - Resultados do ensaio de absortividade dos concretos estudados por Ganesh *et al.* (2016) - modificado pelo autor.

De acordo com os referidos autores, quando o volume cumulativo de água absorvida por unidade de área de exposição (S) é plotado em relação à raiz quadrada do tempo de exposição, o gráfico resultante pode ser aproximado por uma reta que passa pela origem. Os resultados de absortividade apresentados na Figura 2.25 mostram que o concreto do tipo U-0 absorveu mais água que o concreto do tipo U-2. Conclui-se que a presença de nanossílica retarda a absortividade, o que pode ser devido ao seu efeito fíler.

Ghafari *et al.* (2014), conforme apresentado anteriormente, estudaram concretos contendo adição combinada de sílica ativa (SA) e nanossílica (NS) em concretos com relação ag/lig igual a 0,16 (Tabela 2.7). Os autores realizaram o ensaio de absorção por capilaridade e os resultados estão apresentados na Figura 2.26.





Observa-se que a incorporação de SA e NS reduziu a absortividade dos concretos estudados pelos autores quando comparados com o concreto de referência, com adição unicamente de SA. O mesmo comportamento também foi observado na permeabilidade ao gás, tendo sido o ensaio executado por meio do método CEMBUREAU.

2.3.4.3. Porosidade

Poucos trabalhos estudaram a ação conjunta da nanossílica com a sílica ativa em termos da avaliação da porosidade dos concretos. Puentes *et al.* (2015) avaliaram a porosidade de pastas contendo nanossílica e sílica ativa separadamente, com relação ag/lig igual a 0,36, por meio da técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio. Os autores obtiveram um refinamento dos poros mais significativo para as amostras com adição de nanossílica.

Outras composições são mais facilmente encontradas na literatura, como por exemplo o trabalho de Said *et al.* (2012), no qual os autores analisaram a influência da ação conjunta da nanossílica com a cinza volante. Neste trabalho foi mantida uma relação ag/lig igual a 0,3 e a quantidade de material cimentício foi fixada em 390 kg/m³. Os proporcionamentos por metro cúbico dos concretos estudados são apresentados na Tabela 2.10. Como pode ser observado, os traços A-0 e B-0 não apresentam adição de nanossílica, os traços A-1 e B-1 apresentam 3% de adição de nanossílica, e os traços A-2 e B-2 apresentam 6% dessa adição.

Traço	Cimento (kg)	Cinza volante (kg)	Nanossílica (kg)	Água* (kg)	SP (mL/100 kg de aglomerante)	Agregado graúdo (kg)	Agregado miúdo (kg)
A-0	390,0	-	-	156,0	326	1184	789
A-1	390,0	-	23,4	144,3	457	1175	783
A-2	390,0	-	46,8	132,6	914	1162	774
B-0	273,0	117	-	156,0	261	1163	775
B-1	273,0	117	23,4	144,3	326	1154	769
B-2	273,00	117	46,8	132,6	653	1143	762

Tabela 2.10 - Proporcionamentos dos concretos estudados por Said et al. (2012) - modificado pelo autor.

* A quantidade de água do concreto foi ajustada pela quantidade de água presente na solução da nanossílica

Para a análise da porosidade dos concretos os autores utilizaram a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio e obtiveram os resultados que estão apresentados na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 - Resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio dos concretos estudados por Said *et al.* (2012) - modificado pelo autor.

Traço	Porosidade total aparente (%)	Diâmetro máximo do poro (μm)	Porcentagem de poros pequenos (<0,1 μm) (%)
A-0	10,13	0,10	69,31
A-1	6,91	0,075	75,39
A-2	6,44	0,060	72,16
B-0	12,56	0,144	73,41
B-1	9,30	0,092	79,69
B-2	8,21	0,075	77,34

Observa-se que a porosidade total diminui à medida em que se adiciona nanossílica. Além disso, o diâmetro máximo dos poros dos concretos contendo nanossílica foi menor que o diâmetro máximo das amostras de referência com e sem cinza volante (A-0 e B-0). Os autores concluíram que a performance do concreto é melhorada com a adição de nanossílica, na presença ou não de outras adições, no caso a cinza volante. O refinamento máximo dos poros do concreto foi obtido para amostras que continham 6% de adição de nanossílica.

Ghafari *et al.* (2014), estudaram concretos com adição de NS e SA, conforme apresentado no subitem 2.3.4.1. Na Figura 2.27 estão apresentados os resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio realizado pelos autores, o qual avalia poros entre 400 µm e 5 nm.
Figura 2.27 - Resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio obtidos por Ghafari *et al.* (2014) - modificado pelo autor.



É possível observar-se que todos os proporcionamentos com incorporação de nanossílica (M1 a M4) apresentaram poros menores em relação ao proporcionamento de referência (M0), uma vez que os gráficos destes estão sempre posicionados abaixo daqueles, especialmente em relação aos poros entre 0,3 e 40 µm, que correspondem aos poros capilares. Nesse intervalo crítico, o traço M0 apresentou maior volume cumulativo dos poros enquanto que o proporcionamento M3 apresentou o menor volume acumulado. Além disso, todas as amostras apresentaram maior quantidade de poros variando entre 0,0006 e 0,03 µm, o que corresponde aos poros do gel.

Os resultados do volume total de poros e também do ensaio de absorção total realizados pelos autores está apresentado na Tabela 2.12.

_	Absorcão de	PIM			
Iraço	água (%)	Porosidade total (%)	Poros capilares (%)		
M-0	1,212	6,35	2,65		
M-1	1,110	4,74	2,56		
M-2	0,95	4,66	2,44		
M-3	0,808	4,30	1,72		
M-4	0,856	4,80	2,33		

Tabela 2.12 - Resultados de absorção de água e porosimetria por intrusão de mercúrio obtidos por Ghafari *et al.* (2014) - modificado pelo autor.

Os resultados mostram que a estrutura de poros dos traços M1 a M4 é mais refinada que a estrutura de poros do traço de referência. Pode-se observar que aumentando-se o teor de nanossílica, o volume de poros capilares sempre é reduzido, o que mostra que a densidade

do concreto é aumentada e a estrutura de poros refinada. A incorporação de nanossílica conduziu à uma redução da porosidade total em cerca de 25,3%, 26,7%, 32,1% e 24,5% para os traços M1, M2, M3 e M4, respectivamente.

2.4. INFLUÊNCIA DA REGIÃO DE ANÁLISE: COBRIMENTO OU INTERIOR DO CONCRETO

Segundo Ollivier e Torrenti (2014), a estrutura dos primeiros centímetros de concreto na proximidade de suas faces externas (paredes) é modificada em função de diversos fatores associados aos processos executivos e à cura do concreto, como: influência das fôrmas, segregação, evaporação, fissuração excessiva, *etc.* O esqueleto granular do concreto fresco é menos compacto na vizinhança das fôrmas, devido a um efeito de parede. Este efeito resulta na heterogeneidade do concreto, caracterizada por um aumento no teor de pasta de cimento e, consequentemente, por um aumento da porosidade na parte externa dos concretos. A Figura 2.28 apresenta o perfil de um concreto de cobrimento mantido exposto ao ar por 7 dias, nota-se que há a formação de uma camada superficial porosa, rica em pasta (maior porosidade, maior densidade e maior absorção de água nos primeiros milímetros de espessura) e, além disso, com maior concentração de grãos finos (diminuição do módulo de finura do agregado e da relação agregado/ligante).



Figura 2.28 - Variação da composição de um concreto nos primeiros milímetros próximos de uma superfície exposta (OLLIVIER; TORRENTI; CARCASSÈS, 2012).

É sabido que o concreto de cobrimento é um elemento fundamental para a conservação das peças de concreto armado, por ser responsável, em primeira instância, pelos mecanismos de transporte que levam líquidos, íons e gases para o interior do material. Para muitos autores a região do cobrimento é considerada a camada de defesa do concreto aos agentes agressivos (NEVILLE, 2016).

Como a quantidade de água de amassamento no concreto é maior que a necessária para a hidratação do cimento, excesso esse necessário para obtenção de trabalhabilidade, acreditase que ocorre o aumento da porosidade e, consequentemente, o aumento da permeabilidade do concreto principalmente da superfície, devido à migração da água na vibração. Devido ao efeito parede, existirão diferenças de relação água/ligante e na porosidade entre a camada superfícial e a massa interna do concreto (BRAUN, 2003).

As propriedades do cobrimento e da região interna do concreto vêm sendo estudadas por diversos pesquisadores e existem controvérsias a respeito da qualidade dessas duas camadas.

Na Universidade Federal de Goiás tem-se desenvolvido um estudo ao longo de mais de 15 anos, sobre as características do concreto de cobrimento e o seu papel na durabilidade das estruturas de concreto armado. Diversas pesquisas foram feitas em relação ao tema e os resultados obtidos têm se mostrado antagônicos em relação à literatura consagrada.

Mendes (2009) constatou que as regiões do cobrimento e do interior do concreto diferem significativamente em relação à absorção capilar, à absorção de água sob pressão e à penetrabilidade de cloretos. O autor obteve resultados que mostraram que a região do cobrimento apresenta melhor desempenho em relação à região interna do concreto. Isto contraria, em princípio, a literatura, que considera o cobrimento como sendo uma região mais porosa devido ao efeito-parede, à maior relação ag/lig e aos efeitos da segregação do concreto durante as operações de lançamento e adensamento do concreto, conforme dito anteriormente.

Por outro lado, Aïssoun *et al.* (2016) estudaram a absortividade de concretos auto adensáveis com a mesma relação ag/lig e compararam valores obtidos tanto no interior como no cobrimento das amostras. Como resultado os autores mostraram que as absortividades obtidas nas duas regiões apresentam valores muito similares, conforme apresentado na Figura 2.29.





Como pode ser observado, os valores da absortividade das amostras de cobrimento são menores que aqueles do interior do concreto, exceto para 4 traços (conforme regressão linear) os quais apresentaram absortividades cerca de 8 a 11% maiores em relação às amostras do interior do concreto para as medições nos intervalos iniciais (de 0 a 1 h de ensaio). É

importante ressaltar que os autores obtiveram valores de absortividade no cobrimento menores para todos os demais intervalos de tempo de realização do ensaio, a saber, de 1 a 6h, de 6 a 24h e de 24 a 72h de ensaio. Para explicar o comportamento observado, os autores consideraram que a superfície de cobrimento do concreto auto adensável em contato com as fôrmas apresenta alguns defeitos, como bolhas de ar, fixando mais água que o concreto do interior, ou seja, para os referidos autores, a absortividade nas regiões de cobrimento e interior do concreto dependem mais da reologia do mesmo do que do efeito parede propriamente dito.

Kreijger (1984) considera que a durabilidade do concreto está intimamente e unicamente relacionada à camada do cobrimento. O autor separa essa camada em três regiões distintas, a saber, uma camada de pasta de cimento (cerca de 0,5 mm de espessura), uma camada de argamassa (cerca de 5 mm) e, finalmente, uma camada de concreto (cerca de 30 mm). A formação dessas camadas é devida ao efeito parede, à sedimentação e segregação como resultado do efeito da gravidade, dos métodos de compactação e também devida à evaporação e permeação da água dentro e fora do concreto.

Um cuidado especial deve ser tomado em relação à análise do cobrimento pois a carbonatação do concreto também pode causar refinamento de poros e diminuição da porosidade total dos concretos, conforme discutido por diversos autores, entre eles Holly *et al.* (1983), Bier (1987), Ngala (1997), Castro (2003), Mendes (2009), Phung *et al.* (2015).

CAPÍTULO 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental desta dissertação foi realizado nos laboratórios do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A. e no Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil (LABITECC) da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Ele foi elaborado com o intuito de verificar o comportamento do concreto (região interna e região de cobrimento) com adições minerais pozolânicas de elevado desempenho (sílica ativa, nanossílica, metacaulim e composições destas) quanto à durabilidade, mais especificamente quanto aos mecanismos de transporte.

Com o intuito de melhor representar o concreto de elementos estruturais, os corpos de prova foram idealizados de forma que suas dimensões, características das fôrmas, armaduras e procedimentos de moldagem (lançamento e adensamento) propiciassem ao concreto características similares, na medida do possível, às de elementos reais em concreto armado moldados em obra.

A metodologia envolveu ensaios de caracterização do concreto no estado fresco e endurecido, determinação da absorção total e por capilaridade, permeabilidade ao ar pelo método de Figg, reconstituição de traço e, por fim, a observação de alguns aspectos da microestrutura do concreto por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Este capítulo apresenta a metodologia desenvolvida no trabalho, expondo as suas variáveis, a forma como foram elaborados os corpos de prova, os materiais utilizados e os métodos de avaliação dos mecanismos de transporte de massa adotados, bem como os métodos de caracterização da estrutura interna e da porosidade do concreto.

3.1. VARIÁVEIS ESTUDADAS

Neste tópico são apresentadas as variáveis independentes estabelecidas na pesquisa experimental, a saber: a relação água/ligante, o tipo e teor de adição mineral empregada e a região de análise (cobrimento e interior do concreto).

3.1.1. Relação água/ligante

Foram utilizadas duas relações ag/lig, a saber, 0,4 e 0,6. Tais valores foram definidos por considerar-se duas situações opostas. No caso da relação ag/lig 0,4, a intenção foi a de poder analisar concretos de alto desempenho, com estrutura interna densa e compacta. Já no caso da relação ag/lig 0,6, o objetivo foi poder analisar concretos usuais no mercado da construção civil, que estão no limite dos parâmetros para a classe de agressividade ambiental II (CAA II), representativa das atmosferas urbanas, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), como, por exemplo, o ambiente da cidade de Goiânia. Neste contexto, os concretos com e sem adição mineral serão comparados sob uma mesma relação ag/lig, assim como se avaliará o efeito desta variável nos concretos com e sem adições minerais pozolânicas.

3.1.2. Tipo/teor de adição mineral

Para o desenvolvimento do programa experimental foram elaboradas misturas binárias e ternárias, além de um traço de referência. As adições foram utilizadas em substituição parcial ao cimento Portland, com teores percentuais em massa. Os teores de substituição foram embasados tanto pela literatura quanto pelas recomendações dos produtores de adições minerais.

As adições minerais pozolânicas utilizadas no programa experimental e a respectiva nomenclatura utilizada, doravante, no presente trabalho, são apresentadas na Tabela 3.1.

Adição Mineral	Código de chamada
Sílica Ativa	SA
Nanossílica	NS
Metacaulim HP MAX	MM
Metacaulim HP XW	MX

Tabela 3.1 - Adições minerais utilizadas no programa experimental e sua nomenclatura.

O Metacaulim HP MAX apresenta área específica cerca de cinco vezes mais elevada que o Metacaulim HP XW. Apesar de as características físicas serem de grande relevância para a atividade pozolânica das adições minerais, bem como para sua ação como fíler, outras características irão também contribuir para a consolidação do alto desempenho que se espera para esses materiais. Ambos os metacaulins estudados apresentam teores de sílica da ordem de 50%, além disso, o metacaulim HP MAX apresenta maior índice de atividade pozolânica (1440 mg Ca(OH)₂ / g) em relação ao Metacaulim HP XW (1027 mg Ca(OH)₂ / g).

Foi estudada a influência de três tipos de substituições que, somadas ao traço de referência, constituem quatro diferentes traços de estudo por relação água/ligante, conforme apresentado na Tabela 3.2.

Concreto	ad/lig	Código	SA	NS	ММ	МХ			
	99	j-		Teor de substituição (%)					
Referência		REF4	0	0	0	0			
SA+NS	0.4	SAN4	9	1	0	0			
MM	0,4	MM4	0	0	10	0			
MM+MX		MMX4	0	0	5	5			
Referência		REF6	0	0	0	0			
SA+NS		SAN6	9	1	0	0			
MM	0,6	MM6	0	0	10	0			
MM+MX		MMX6	0	0	5	5			

Tabela 3.2 - Traços estudados no programa experimental.

Os teores utilizados nesta pesquisa foram tomados de acordo com dados obtidos na literatura e apresentados anteriormente. Teores de 10% de sílica ativa são muito comuns, já para a nanossílica foram encontrados teores que variaram de 1% a 4%. O teor definido neste trabalho se deu, pois, nos estudos de dosagem, feitos nos laboratórios de FURNAS, teores acima de 1% causaram excessiva exsudação no concreto devido à presença de aditivo superplastificante em sua composição, portanto, o teor de 1% foi definido por proporcionar desempenho adequado ao concreto no estado fresco. Já para o metacaulim, teores que variam de 10% a 30% são bastante comuns na literatura; assim, por ser utilizado nesta pesquisa um metacaulim de desempenho superior (maior finura e índice de pozolanicidade), foi utilizado um teor total desta adição igual a 10%, seja em composição ternária, tendo-se o cimento e os Metacaulins HP MAX e HP XW (estes em proporções iguais a 5% e 5%, respectivamente).

É importante ressaltar que a análise combinada dos Metacaulins HP XW e MAX foi proposta com o intuito de melhorar a estrutura interna do concreto por meio de duas adições minerais altamente pozolânicas, porém, com granulometrias diferentes, o que contribui para o refinamento dos poros do concreto por meio do efeito fíler (granulometria contínua), visto que as propriedades de concretos contendo adição unicamente de Metacaulim HP Max já foi estudada no contexto da durabilidade por Teodoro (2016).

3.1.3. Região de análise

Para cada traço desenvolvido na pesquisa são analisadas duas regiões distintas, a saber, a região do cobrimento e a região interna.

Conforme explicado anteriormente, as características do concreto de cobrimento são diferentes das do concreto confinado no interior das peças estruturais. Estas diferenças se dão principalmente pela absorção das fôrmas, evaporação de água para o ambiente e efeito parede. Dessa forma, estudos para a caracterização desta região são muito importantes a fim de serem determinados parâmetros de desempenho e de vida útil das estruturas, visto que o cobrimento corresponde à região de proteção do concreto, por onde os agentes agressivos iniciam seu ataque às estruturas.

Com o intuito de tornar simples e objetiva a identificação das oito situações de estudo (tipo de adição e região de análise), é utilizada uma codificação que apresenta de forma sintética as principais características dos concretos estudados. Esta codificação é mostrada na Tabela 3.3.

Concreto	ad/lid	Código de chamada			
Concreto	aging	Cobrimento	Interior		
Referência		REF4C	REF4I		
SA+NS	0,4	SAN4C	SAN4I		
MM		MM4C	MM4I		
MM+MX		MMX4C	MMX4I		
Referência		REF6C	REF6I		
SA+NS	0.6	SAN6C	SAN6I		
MM	0,6	MM6C	MM6I		
MM+MX		MMX6C	MMX6I		

Tabela 3.3 - Nomenclatura dos concretos ensaiados.

3.2. CONDIÇÕES FIXAS DA PESQUISA

Com o intuito de focar a análise apenas nas alterações causadas pela presença das adições minerais nos mecanismos de transporte de massa do concreto e de eliminar o maior número possível de influências nos resultados, fixou-se as seguintes condições de ensaio:

- condições e tempo de cura;
- idade do concreto ensaiado.

3.2.1. Condições e tempo de cura

Os corpos de prova (CPs) foram submetidos à cura úmida durante 28 dias, seguidos de cura em ambiente externo abrigado até completarem a idade de 91 dias. Até 24 horas após a moldagem dos CPs, estes foram mantidos em ambiente de laboratório e cobertos com sacos de aniagem umedecidos. Após esse período, os CPs foram desmoldados e levados à câmara úmida, com umidade relativa acima de 95% e temperatura de (23 ± 2) °C, conforme recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015a), onde foram mantidos até os 28 dias de idade.

Após os 28 dias de idade, os corpos de prova foram retirados e acondicionados em local sob condições de umidade e temperatura ambientes, porém protegidos de intempéries como a chuva. Os CPs permaneceram nesse local até os 91 dias de idade, período em que começaram os ensaios.

3.2.2. Idade do concreto ensaiado

Os ensaios de durabilidade se iniciaram com os concretos a partir da idade de 91 dias. Dada a extensão e complexidade do programa experimental, não foi possível realizar todos os ensaios simultaneamente, mas se cuidou para que cada ensaio individualmente fosse realizado na mesma idade (o que coloca todos os concretos em comparação na mesma idade e em igual condição de análise). Por serem concretos com adições minerais pozolânicas, a influência da idade nas propriedades ligadas à durabilidade após os 91 dias de idade pode ser desprezada, conforme evidenciado nos estudos de Massazza (1993), Dal Molin (2011) e Neville (2016), entre outros.

3.3. MATERIAIS EMPREGADOS

Para a realização desta pesquisa foram utilizados materiais disponíveis no mercado da região metropolitana de Goiânia, Estado de Goiás. Nos itens seguintes estes materiais estão discriminados, sendo a sua caracterização também apresentada.

3.3.1. Cimento Portland

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizado um CP II-F-40 (ABNT NBR 11578:1997) fabricado pela Votorantim Cimentos em Sobradinho, Distrito Federal. O CP II-F-40 é um cimento Portland composto com fíler calcário, em cuja composição têm-se o clínquer e o sulfato de cálcio (gipsita) encontrados em teores que variam de 90% a 94%, além do material carbonático (fíler calcário) variando de 6% a 10%. Decidiu-se adotar este cimento por ele ser

o mais utilizado e o mais disponível na região onde foi executado o programa experimental, acrescentando-se o fato dele não possuir adições pozolânicas em sua constituição e de ser um cimento, dentro da categoria de cimento Portland composto, que contém o menor teor de adições.

A Tabela 3.4 apresenta os ensaios de caracterização física e mecânica que foram realizados no cimento Portland utilizado nesta pesquisa.

Propriedades determinadas		Teor (%)	Limites da NBR 11578/91 (%)
Massa específica (kg/dm3)		3,13	-
	Retido na # 200 (%)	0,01	≤ 10
Finura	Retido na # 325 (%)	0,7	-
	Área esp. Blaine (cm²/g)	5720	≥ 2800
	3 dias	32,8	≥ 15,0
Resistência à	7 dias	41,6	≥ 25,0
compressão (MPa)	28 dias	45,5	≥ 40,0
	90 dias	47,7	-

Tabela 3.4 - Ensaios de caracterização física e mecânica do cimento Portland utilizado no programa experimental.

Também foi realizada a caracterização química do cimento Portland, pela técnica de espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX). O resultado da análise química está apresentado na Tabela 3.5.

Óxidos		Resultado (%)	Requisitos da NBR 11578 (%)
Perda ao fogo		3,85	≤ 6,5
Resíduo insolúv	el	1,14	≤ 2,5
Trióxido de enxo	ofre (SO ₃)	3,51	≤ 4,0
Óxido de magné	esio (MgO)	4,64	≤ 6,5
Dióxido de silício	o (SiO ₂)	18,8	-
Óxido de ferro (l	=e ₂ O ₃)	2,92	-
Óxido de alumír	io (Al ₂ O ₃)	4,26	-
Óxido de cálcio	(CaO)	59,5	-
Óxido de cálcio	livre (CaO)	1,38	-
	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,26	-
Álcalis totais	Óxido de potássio (K ₂ O)	1,18	-
	Equivalente alcalino em Na2O	1,04	-
Sulfato de cálcio (CaSO4)		5,97	-

Tabela 3.5 - Análise química do cimento Portland CP II-F-40 empregado na pesquisa.

3.3.2. Agregados

O agregado miúdo utilizado na confecção dos CPs foi uma areia natural, de natureza essencialmente quartzosa, proveniente de leito de rio. Sua composição granulométrica remonta um agregado geral de zona utilizável, mas parte dos grãos se enquadra na faixa de zona ótima. As principais características deste agregado estão apresentadas na Tabela 3.6 e a distribuição granulométrica está apresentada na Figura 3.1.

Tabela 3.6 - Propriedades do agregado miúdo utilizado no programa experimental.

Propriedade analisada	Método de ensaio	Resultado
Massa específica (g/cm3)	NBR NM 52	2,64
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248	2,36
Módulo de finura	NBR NM 248	2,40
Zona granulométrica	NBR 7211	Zona utilizável*

*Zona granulométrica que mais se aproxima



Figura 3.1 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo utilizado no programa experimental.

Já os agregados graúdos foram obtidos pela britagem de rocha granítica, sendo classificados pela NBR 7211 (ABNT, 2009c) como pertencentes à segunda zona granulométrica (d/D = 9,5/25), o que corresponde à brita 1 na antiga classificação da NBR 7211. As principais características deste agregado estão apresentadas na Tabela 3.7 e sua granulometria é descrita na Figura 3.2.

Tabela 3.7 - Propriedades do agregado graúdo utilizado no programa experimental.

Propriedade analisada	Método de ensaio	Resultado
Massa específica (g/m ³)	NBR NM 53	2,72
Absorção de água (%)	NBR NM 53	0,6
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248	19
Módulo de finura	NBR NM 248	6,57
Zona granulométrica (d/D)	NBR 7211	9,5/25



Figura 3.2 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo utilizado no programa experimental.

3.3.3. Adições minerais

As adições minerais empregadas nesta pesquisa experimental foram uma sílica ativa, uma nanossílica e dois metacaulins, comercialmente conhecidos como metacaulim HP MAX e HP XW. Os resultados das análises físicas e químicas destes materiais, exceto da nanossílica, são apresentados na Tabela 3.8.

Propriedades determinadas			R	esultade	5	Método de	
			мм	МХ	SA	ensaio	Limites
Massa específica (g/cm³)			2,56	2,53	2,25	IT.QA.115*	-
Ároa ospocífica - B			30,99	8,13		ASTM C-1069	≥ 15,0
Alea específica - D	.∟.ı. (m-/g)			19,5	ASTM C-1069	$15,0 \leq \text{B.E.T} \leq 30,0$
Diâmetro médio do	s grãos (D	50) (µm)	0,61	12,42	-	Sedigrafia	-
	Dordo oo f	000	1,86	2,46		NBR NM 18	≤ 4,0
	Perua ao r	Ugu			2,65	NBR 13956-2	≤ 6,0
	Óxido de n	nagnésio (MgO)	0,81	0,22	0,32		-
	Dióxido de	48,21	48,37	95,1		-	
	Óxido de f	1,67	0,33	0,18	П.QA.101	-	
Constituintes	Óxido de a	40,58	42,54	0,61		-	
Quimicos (%)	Óxido de c	0,22	0,03	0,54		-	
	Álcalis totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,41	0,09	0,17	IT.QA.105	-
		Óxido de potássio (K ₂ O)	1,33	0,1	0,59		-
		Equivalente alcalino em Na ₂ O	1,23	0,03	0,56		-
	$SiO_2 + Al_2O$	$D_3 + Fe_2O_3$	90,46	91,24	95,89	-	> 70,0
	Com a cal	(MPa)	16,57	12,3	8,2	NBR 5751	≥ 6,0
,	Com o cirr	nento (%) (7 dias)	103,4	91,5	107,8	NBR 5752	≥ 75,0
Indice de atividade	Com o cirr	nento (%) (28 dias)	132,4	110,4	125,4	NBR 5752	≥ 75,0
pozoianica	Chapèlle		4.4.40	4007			> 750
(mg Ca(OH) ₂ / g)		1440	1027	-	NBR 15895	2750	
*IT. QA: Instrução d	de Trabalho	da Química Analítica (Procedim	ento FU	RNAS)			•
** Via úmida (de ac Parte 3: Determina	ordo com l ção da finu	NBR 15894 - Metacaulim para us ra por meio da peneira 45 μm)	so com c	imento P	ortland e	em concreto, argar	massa e pasta.

Tabela 3.8 -	Ensaios	de	caracterizad	า กลัง	las :	adicões	minerai	6
	LIISalus	ue	caracterizaç	au c	ias (aulçues	mineral	5.

Não foi possível proceder à caracterização da nanossílica da mesma maneira que foram conduzidos os ensaios de caracterização das demais adições minerais. Isso aconteceu devido à dificuldade de se separar a nanossílica do restante dos sólidos que também vêm estabilizados na solução. Portanto, as características conhecidas da nanossílica estabilizada são as provenientes do fabricante e estão apresentadas na Tabela 3.9.

Também é importante destacar-se que o ensaio de determinação da finura por meio da peneira 45 µm foi executado, porém, como não apresentou resultados satisfatórios para as adições empregadas no presente trabalho, os resultados obtidos não serão apresentados.

86

Nome comercial	Silicon ns plus 200	Silicon ns plus 200				
Classificação	Adição mineral pozolânica dispersa em aditivo de alta redução de água, aditivo superplastificante tipo II (SP-II N) e aditivo neutro					
	REQUISITOS GERAIS					
PROPRIEDADES	ESPECIFICAÇÕES	VALOR				
Homogeneidade/cor	Mel	Mel				
Densidade relativa (g/cm3)	$1,07 \pm 0,02$	1,07				
Teor de sólidos convencional (%)	$36,0 \pm 0,1$	35,9				
Valor de pH	$3,0 \pm 1,5$	2,9				
Teor de cloretos (%)	< 0,01	< 0,01				
Teor de álcalis	N.D.	N.D.				
Obs.: os requisitos gerais/específicos estão de acordo com a NBR 11768						

Tabela 3.9 - Principais ca	aracterísticas da nano	ossílica, fornecidas	pelo fabricante.
----------------------------	------------------------	----------------------	------------------

3.3.4. Aço

Foram utilizados aço CA-50 com diâmetro nominal de 10 mm e aço CA-60 com 5 mm de diâmetro nominal para a confecção das armaduras.

3.3.5. Aditivo superplastificante

Na dosagem dos concretos foram utilizados três tipos de aditivos diferentes: um superplastificante, um plastificante de pega normal e um incorporador de ar. A Tabela 3.10 apresenta as principais características destes aditivos.

Nome comercial do aditivo	Categoria	рН	Densidade (g/cm³)	Sólidos Totais (%)	
Viscocrete	Superplastificante	3,68	1,122	49,38	
Sikament RM 310	Plastificante	5,51	1,214	46,05	
Sika AER	Incorporador de ar	12,46	1,029	10,01	

Tabela 3.10 - Características dos aditivos utilizados na dosagem.

É importante ressaltar que nas dosagens que envolveram o uso de nanossílica foram tomados os cuidados necessários com o incremento dos aditivos citados, uma vez que essa adição mineral já é estabilizada com aditivo superplastificante.

3.4. CONCRETOS ESTUDADOS

O proporcionamento dos concretos estudados foi realizado segundo a metodologia adotada no trabalho de Silva (2007) e posteriormente utilizada no trabalho de Lopes (2011), por meio

do método de dosagem do IPT/EPUSP. Foram feitas pequenas alterações no que concerne os tipos/teores das adições minerais e dos aditivos utilizados.

Este método de dosagem pressupõe que o melhor proporcionamento entre os agregados é aquele que resulta no menor consumo de água para um abatimento definido. Como resultado deste método tem-se um diagrama, como o mostrado na Figura 3.3. Tal diagrama se baseia em três diferentes leis de comportamento: na lei de Abrams, a qual estabelece que a resistência à compressão é função da relação ag/lig; na lei de Lyse, que estabelece que, mantida a consistência do concreto, a relação "agregados secos/cimento" em massa (m) é diretamente proporcional à relação ag/lig; e na lei de Molinari, que estabelece que o consumo de cimento se relaciona de modo não linear com o valor da relação "agregados secos/cimento" (m).





Lopes (2011) trabalhou com resistências à compressão fixas e abatimento também fixo, de (200 ± 20) mm, conforme apresentado no quarto quadrante da Figura 3.3, correspondente à lei de Lyse. No presente trabalho utilizou-se a relação obtida no trabalho de Lopes (2011) para definir o traço dos concretos estudados a partir das relações ag/lig pré-fixadas, 0,4 e 0,6. A partir das relações ag/lig determinadas e do teor de argamassa seca (0,55), foram obtidos os traços em massa de material seco dos diversos concretos estudados.

Vale ressaltar que, uma vez que não foi mantido um abatimento fixo, foram realizadas dosagens preliminares em que foram efetuados ajustes nas quantidades de aditivo utilizadas,

a fim de garantir que não houvesse segregação, exsudação e que os concretos apresentassem consistência adequada para serem bombeáveis, sendo estes os mais utilizados na indústria da construção civil.

Na Tabela 3.11 estão apresentados os proporcionamentos dos oito tipos de concreto estudados nesta pesquisa, sendo eles separados por relação ag/lig e por tipo de adição mineral.

Concreto	Adição	Teor ag/li (%)	ag/lig	Consumo de cimento (kg/m³)	Traço em massa (cimento:adição:areia:brita)	Teor de argamassa seca (%)	Teor de aditivos (% em relação ao cimento, em massa)		
							IA	Р	SP
REF4	-	0	- 0,4	365	1: 2,37: 2,76	55	0,005	0.6	0,9
	-	0						0,0	
SAN4	SA	9	- 0,4	325,5	0,9: 0,096: 0,004: 2,35: 2,74	55	0,005	0.6	0,3
	NS	1						0,0	
MM4	MM	10	- 0,4	330	0,9: 0,1: 2,36: 2,75	55	-	0.6	1,2
	-	0						0,0	
MMX4	MM	5	0,4	325,5	0,9: 0,05: 0,05: 2,36: 2,75	55	-		1,2
	MX	5						0,6	
REF6	-	0	- 0,6	260	1: 3,55: 3,73	55	-	0.6	0,6
	-	0						0,0	
SAN6	SA	9	- 0,6	234	0,9: 0,096: 0,004: 3,53: 3,71	55	0,005		-
	NS	1						-	
MM6	MM	10	- 0,6	236	0,9: 0,1: 3,54: 3,72	55	-	0.6	1,2
	-	0						0,6	
MMX6	MM	5	- 0,6	238,5	0,9: 0,05: 0,05: 3,54: 3,72	55		0.6	1.2
	MX	5					-	0,0	1,∠

Tabela 3.11 - Proporcionamentos dos concretos desenvolvidos no programa experimental.

Observa-se na Tabela 3.11 que a proporção de material seco no traço sofre pequenas variações; por exemplo, o traço REF6 apresenta uma proporção de 7,28 de agregados secos para 1 de cimento, em massa, já o traço de SAN6 apresenta a relação de 7,24 de agregados secos para 1 de material ligante (cimento, sílica ativa e nanossílica). Isso acontece devido à diferença de massa específica dos materiais ligantes utilizados nas diversas misturas. De modo a manter o volume de concreto em 1 m³, após o proporcionamento dos materiais, tornase necessária a correção volumétrica de cada composição (traço). Essa diferença foi corrigida nos materiais inertes (agregados), pois, assim, manteve-se fixa a quantidade de ligante (em massa) dos concretos, quais sejam: 365 kg/m³ para a relação ag/lig 0,4 e 260 kg/m³ para a relação ag/lig 0,6.

3.5. CORPOS DE PROVA

Para a realização do programa experimental foram moldados três tipos de corpos de prova, a saber: protótipos de vigas, cilindros de 10 cm x 20 cm e cilindros de 15 cm x 30 cm. Os protótipos de vigas apresentam dimensões (largura x altura x comprimento) de 20 cm x 20 cm x 50 cm, e foram armados com 4 barras de aço CA-50 de 10 mm de diâmetro nominal (armadura longitudinal) e 4 estribos de aço CA-60 de 5 mm, conforme metodologia já utilizada nos trabalhos de Braun (2003), Ferreira (2003), Couto (2003), Castro (2003) e Mendes (2009). Para garantir a distância entre a armadura e a superfície da fôrma (cobrimento), foram utilizados espaçadores plásticos de 2,5 cm. Antes da moldagem, foi aplicado desmoldante nas superfícies internas de todas as fôrmas. A Figura 3.4 apresenta os protótipos moldados (a) antes e (b) depois da concretagem.

Figura 3.4 - Protótipos de vigas moldados no programa experimental (a) antes e (b) depois da concretagem.



Optou-se pelos protótipos de viga a fim de simular-se o adensamento real das estruturas de concreto, obtendo-se com isso um concreto com características similares às situações comuns da construção civil, especialmente no que tange o lançamento e o adensamento, além do fato do protótipo ser armado e de ser produzido por meio de uma fôrma usual em chapa de madeira compensada.

Os corpos de prova cilíndricos moldados de 10 cm x 20 cm foram usados na execução dos ensaios de resistência à compressão e absorção total (moldados), e os cilíndricos de 15 cm x 30 cm foram empregados na execução dos ensaios de módulo de elasticidade (moldados). A Figura 3.5 representa a concretagem típica tanto dos protótipos de vigas, quanto dos corpos de prova cilíndricos.



Figura 3.5 - Momento logo após a concretagem dos (a) protótipos de vigas e dos (b) corpos de prova cilíndricos.

É importante destacar-se que a nomenclatura dos corpos de prova utilizada doravante neste trabalho faz referência a esses três tipos de CPs, a saber: os <u>protótipos de viga</u> (20 cm x 20 cm x 50 cm), os <u>cilindros moldados</u> e os <u>testemunhos cilíndricos</u>, extraídos dos protótipos de viga.

Em seu trabalho, Braun (2003) encontrou diferenças significativas entre os concretos moldados em cilindros normalizados e os concretos obtidos por extração dos protótipos de viga (testemunhos cilíndricos), tanto nos ensaios de resistência à compressão, quanto nos ensaios de absorção de água por capilaridade. Para a absorção total, a influência do tipo de corpo de prova não foi significativa. Dado o grande número de corpos de prova necessários à realização do ensaio de resistência à compressão e a dificuldade prática de extração dos testemunhos de concreto dos protótipos de viga, optou-se por realizar a caracterização mecânica (resistência à compressão e módulo de elasticidade) dos concretos estudados por meio dos cilindros moldados. Para a realização dos demais ensaios, relacionados à durabilidade, exceto o ensaio de absorção total, optou-se por corpos de prova extraídos dos protótipos. Todos os corpos de prova (protótipos de viga e cilindros) foram moldados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015a).

Os testemunhos cilíndricos (10 cm de diâmetro por 20 cm de altura) foram extraídos perpendicularmente à face lateral dos protótipos de viga, de forma que as bases desses corpos de prova sempre correspondiam às faces em contato com a fôrma de madeira, uma vez que esta é a região mais representativa das condições reais de exposição desses elementos estruturais (vigas, pilares e fundo de laje), nas situações de serviço. As operações de extração foram realizadas sempre no dia anterior à realização dos ensaios, a fim de evitar-se as influências da carbonatação do concreto extraído, por meio do uso de extratora rotativa com coroa diamantada para corte úmido, seguindo as recomendações da NBR 7680 (ABNT, 2015b).

A Figura 3.6 representa o local e a direção de extração dos testemunhos cilíndricos, bem como o protótipo de viga que foi confeccionado.

Figura 3.6 - Protótipo de viga e local de extração dos testemunhos de 10 cm de diâmetro x 20 cm de altura.



A obtenção de cada corpo de prova variou de acordo com o ensaio realizado. Uma descrição mais detalhada dos tipos de corpo de prova e amostras é feita no item 3.8.

3.6. MOLDAGEM, CURA E ARMAZENAMENTO DOS CORPOS DE PROVA

As misturas dos concretos foram realizadas em betoneira basculante da marca CSM, com capacidade nominal de 600 litros. As betonadas foram realizadas no laboratório do bloco 22 do Centro Tecnológico de Furnas Centrais Elétricas, que possui ambiente arejado e com temperatura ambiente.

A sequência de introdução dos materiais na betoneira e o tempo de amassamento do concreto seguiram os procedimentos recomendados pelo Laboratório de Concreto de Furnas, obedecendo à seguinte ordem e detalhamento:

 primeiramente, foi imprimada a betoneira com um pouco de pasta de cimento de mesma relação ag/lig do concreto a ser produzido;

 com a betoneira parada e previamente umedecida, foram adicionados os agregados graúdo e miúdo (material seco) e parte da água;

• ligou-se a betoneira por um minuto a fim de homogeneizar-se os materiais;

 com a betoneira parada, foi introduzido o cimento. Para os traços com adição mineral, esta era introduzida juntamente com o cimento;

· ligou-se a betoneira por um período de três minutos;

 imediatamente após a betoneira entrar em movimento, foi adicionado o restante da água, deixando somente uma pequena quantidade para se lavar o becker com o aditivo superplastificante, o qual foi adicionado diretamente no concreto, com a betoneira em movimento, durante o início do segundo minuto de amassamento do concreto;

após a inserção de todos os materiais e a movimentação da betoneira por três minutos, fezse uma parada intermediária de três minutos e, posteriormente, ligou-se a betoneira por mais três minutos.

Durante a parada intermediária e também após o término da mistura, verificou-se a consistência do concreto mediante a determinação do abatimento do tronco de cone. Ao final desse processo, a descarga do concreto fresco foi feita diretamente em carrinho de mão, sendo, posteriormente, colocado dentro dos moldes com auxílio de conchas e adensado com a utilização de vibrador elétrico de imersão (vibrador agulha). Esse procedimento é apresentado na sequência de fotos da Figura 3.7. A moldagem e o adensamento de todos os corpos de prova seguiram as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015a).

Figura 3.7 - Sequência do trabalho realizado desde a retirada do concreto da betoneira até a colocação de sacos de aniagem úmidos sobre as formas.



Após a concretagem, procedeu-se à cura úmida nos corpos de prova durante 24 horas, por meio de cobertura com sacos de aniagem saturados de água. Depois desse período, os CPs foram conduzidos até uma câmara úmida (com temperatura média de (23 ± 2) °C e umidade relativa maior ou igual a 95% conforme recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015a)), onde ficaram por 27 dias, totalizando, assim, 28 dias de cura úmida. Em seguida, eles foram

retirados da câmara úmida e levados para um ambiente natural, sob uma tenda, onde permaneceram por mais 63 dias protegidos das intempéries (em ambiente externo abrigado). A Figura 3.8 mostra o armazenamento dos CPs na tenda.



Figura 3.8 - Local de armazenamento dos corpos de prova.

3.7. MÉTODOS EMPREGADOS NO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A seguir, apresentam-se os métodos principais constituintes do programa experimental, iniciando-se pelos ensaios de caracterização do concreto no estado fresco. Na sequência, têm-se a caracterização dos concretos no estado endurecido (resistência à compressão e módulo de elasticidade), os ensaios que avaliam a porosidade e estrutura interna dos concretos e, por último, os métodos associados à durabilidade, que avaliam os mecanismos de transporte e de permeabilidade ao ar.

É importante salientar que à exceção das avaliações no estado fresco e das avaliações da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, cujas idades de análise foram variadas (o módulo tendo sido determinado aos 3, 7, 28 e 91 dias), as demais propriedades ocorreram com os concretos na idade de 91 dias ou superior a isto, de modo a se considerar que parte majoritária das reações de hidratação do cimento já tenham ocorrido, assim como as reações pozolânicas decorrentes das adições minerais presentes.

3.7.1. Caracterização do concreto no estado fresco

Para a caracterização dos concretos empregados na moldagem dos corpos de prova, no estado fresco, foram realizados os ensaios de determinação da massa específica (ABNT NBR

9833:2008a) e do teor de ar (ABNT NBR NM 47:2002). A consistência dos concretos foi determinada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67:1998).

3.7.2. Avaliação das propriedades mecânicas e de rigidez dos concretos

Os concretos foram caracterizados mecanicamente, no estado endurecido, pela sua resistência à compressão. A avaliação da rigidez se deu por meio da determinação do módulo de elasticidade. A seguir, têm-se detalhes e informações sobre essas análises.

3.7.2.1. Resistência à compressão

No estado endurecido, os concretos foram caracterizados nas idades de 3, 7, 28, e 91 dias quanto à resistência à compressão (ABNT NBR 5739:2007), fazendo-se uso de corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm de diâmetro x 20 cm de altura.

Foram analisados três corpos de prova por traço estudado, por idade, perfazendo um total de 96 CPs moldados para esta propriedade.

3.7.2.2. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade à compressão ou módulo de deformação tangente inicial dos concretos foi obtido por meio do procedimento prescrito na ASTM C 469:02 (ASTM, 2002). O ensaio foi realizado em três corpos de prova de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, para cada concreto, nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias, perfazendo um total de 96 CPs. Os equipamentos utilizados foram uma prensa hidráulica automatizada com capacidade de 2000 kN, além de extensômetros digitais para micro deformações com precisão de 0,0001 mm.

3.7.3. Caracterização da estrutura interna e da porosidade dos concretos no estado endurecido

Com o intuito de avaliar a estrutura interna e a porosidade dos concretos formulados neste programa experimental, foram realizados os ensaios descritos a seguir.

3.7.3.1. Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

O ensaio de absorção de água em concretos tem por objetivo determinar o índice de vazios do concreto e a massa específica no estado endurecido. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009).

O método de ensaio consiste inicialmente em colocar os corpos de prova (três amostras por concreto estudado) em estufa e mantê-los à temperatura de $(105 \pm 5)^{\circ}$ C por um período de 72 h, determinando assim a sua massa seca (m_s). Em seguida os corpos de prova são imersos em água a $(23 \pm 2)^{\circ}$ C durante 72 h e, completada a saturação, eles são progressivamente levados à ebulição, em recipiente apropriado, e mantidos nessa condição durante um período de 5 h, mantendo-se o nível de água aproximadamente constante. Em seguida, deixa-se a água esfriar naturalmente até a temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}$ C e é registrada a massa com auxílio de balança hidrostática (m_i) e, também, é registrada a massa da amostra saturada após imersão e fervura (m_{sat}).

Os resultados do ensaio correspondem à média das três determinações realizadas. A absorção (A) do concreto, em porcentagem, é determinada por meio da Equação 3.1.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \ge 100$$
 (%) (3.1)

Já o índice de vazios (I_v), em porcentagem, é determinado por meio da equação 3.2.

$$I_{v} = \frac{m_{sat} - m_{s}}{m_{sat} - m_{i}} \times 100$$
 (%) (3.2)

Por sua vez, a massa específica da amostra seca (ρ_s) é calculada por meio da equação 3.3.

$$\rho_{\rm s} = \frac{m_{\rm s}}{m_{\rm sat} - m_{\rm i}} \quad (\text{kg/dm}^3) \tag{3.3}$$

A massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}) é calculada por meio da equação 3.4.

$$\rho_{s} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_{i}} \quad (kg/dm^{3})$$
(3.4)

E, por último, a massa específica real da amostra (p_r) é calculada por meio da equação 3.5.

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (kg/dm^3)$$
(3.5)

Para a realização deste ensaio foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos moldados para cada traço estudado, perfazendo um total de 24 corpos de prova. Os ensaios foram executados à idade de 91 dias.

95

3.7.3.2. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade foi executado conforme regulamentado pela NBR 9779 (ABNT, 2012), com algumas adaptações. Para cada concreto, foram moldados dois protótipos de viga sem armaduras unicamente destinados a este ensaio (cada um com as dimensões de 20 cm x 20 cm x 50 cm), conforme metodologia utilizada por Mendes (2009).

O ensaio envolve a secagem dos corpos de prova em estufa a $(105 \pm 5)^{\circ}$ C até a constância de massa e, posteriormente, procede-se à sua imersão parcial. Os CPs são posicionados sobre suportes e o nível da água é mantido constante a (5 ± 1) mm da face inferior do CP, evitando-se a molhagem de outras superfícies. São feitas medidas da massa do CP no decorrer do tempo com 3, 6, 24, 48 e 72 h de ensaio.

Para a realização deste ensaio foram cortados 3 corpos de prova prismáticos (16 cm x 20 cm x 20 cm) a partir de cada protótipo de viga, conforme apresentado na Figura 3.9.

Figura 3.9 - Corpos de prova prismáticos empregados no ensaio de absorção de água por capilaridade a partir de um protótipo de viga.



Cada protótipo de viga destinado a este ensaio gerou dois prismas de concreto referentes ao cobrimento (prismas dos extremos com faces em contato com a fôrma) e um prisma referente à parte interna do concreto, conforme esquematizado na Figura 3.10.



Figura 3.10 - Lados dos corpos de prova ensaiados no ensaio de absorção de água por capilaridade para o cobrimento e para a parte interna do concreto.

A Figura 3.11 apresenta a realização do ensaio nos prismas referentes ao cobrimento e ao interior do concreto.



Figura 3.11 - Execução do ensaio de absorção por capilaridade nos prismas para as regiões do cobrimento e do interior do concreto.

Para os fins do ensaio, foram utilizados um prisma referente à parte do cobrimento e um prisma referente à parte interna do concreto (por protótipo), ensaiando-se, dessa forma, quatro prismas para cada traço estudado, dois do cobrimento e dois da parte interna do concreto, oriundos dos dois protótipos de viga originais, concretados sem armaduras. Dos dois prismas restantes, referentes ao cobrimento, extraiu-se um testemunho cilíndrico de 15 cm de diâmetro por aproximadamente 16 cm de altura, conforme apresentado na Figura 3.12.



Figura 3.12 - Extração dos corpos de prova cilíndricos para a realização do ensaio de absorção por capilaridade.

A Figura 3.13 apresenta a realização do ensaio nos testemunhos cilíndricos referentes ao interior do concreto.





O resultado do ensaio é expresso em g/cm² e é dado pela razão entre a diferença da massa do CP úmido e do CP seco, pela área da seção transversal em contato com a água.

Além dos resultados tradicionais de absorção de água, também foi avaliada a absortividade/coeficiente de absorção capilar (g/cm².min^{0,5}) dos CPs. Por meio da altura de ascensão capilar (um dos resultados do ensaio) e pelas equações de *Poiseuille* e *Jurin*, como bem discutido por Mendes (2009) e Teodoro (2016), é possível estimar o raio médio dos poros capilares, que é um parâmetro físico da pasta de cimento e do sistema de poros, enfim, da estrutura interna do concreto.

3.7.3.3. Reconstituição de traço

A realização do ensaio de reconstituição de traço teve por objetivo determinar a relação agregado/ligante nas regiões do cobrimento e do interior do concreto, a fim de correlacionála com as propriedades dos concretos, principalmente com aquelas relacionadas à durabilidade e ao transporte de massa.

Existem diferentes métodos de ensaio para a reconstituição de traço. Aqui se apresenta o método preconizado pelo IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica), utilizado no programa experimental desta pesquisa. Este método se baseia no princípio de que o concreto, ao ser atacado com ácido clorídrico, dá origem a duas frações distintas: uma insolúvel e outra solúvel. Para os concretos convencionais de cimento Portland, adições, agregado miúdo quartzoso e agregado graúdo oriundo de rocha ígnea ou metamórfica, a fração solúvel é composta essencialmente pelos aglomerantes e a fração insolúvel é constituída pelos agregados. Tem-se, ainda, uma terceira fração volátil, que permite quantificar as reações ocorridas após a concretagem.

Assim sendo, o método prevê as determinações quantitativas do agregado na forma de resíduo insolúvel (RI) e dos aglomerantes na forma de seus íons principais e comuns solubilizados, cujos resultados são expressos na forma dos óxidos correspondentes: anidrido silícico (SiO₂), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e óxidos de ferro e alumínio (R₂O₃). Na fração volátil determina-se a umidade (UM), perda ao fogo (PF) e anidrido carbônico (CO₂).

Foram utilizadas 3 amostras para a realização do ensaio de reconstituição de traço, tendo sido obtidas de um único protótipo de viga. Foram avaliadas amostras do cobrimento e da parte interna dos concretos com relação ag/lig = 0,6, perfazendo duas amostras por traço estudado, gerando um total de 24 amostras (3 amostras x 4 traços de estudo x 2 regiões de análise).

A obtenção das amostras é apresentada na Figura 3.14. Para cada testemunho cilíndrico extraído foram retiradas duas "bolachas" de 2 cm de espessura, sendo uma delas referente ao cobrimento (2 cm iniciais) e a outra referente à parte interna do concreto (2 cm na altura média da amostra).



Figura 3.14 - (a) Altura do corte e (b) "bolachas" de concreto utilizadas no ensaio de reconstituição de traço.

(a)

3.7.3.4. Análise da microestrutura dos concretos por microscopia eletrônica de varredura

As amostras destinadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) foram selecionadas das regiões de interesse, cobrimento e interior dos concretos em estudo, e sofreram preparação prévia adequada para permitirem a condutividade elétrica necessária às análises. As amostras receberam metalização com uma camada de ouro e foram aterradas ao portaamostras de alumínio por meio de tinta de prata, formando assim um circuito fechado de energia.

O MEV possibilita a observação e análise da superfície de amostras espessas por meio de imagens tridimensionais, quando em amostras de fratura, associada à alta resolução que pode ser atingida de até 2 nm e à grande profundidade de foco, da ordem de até um milhão de vezes. Para as análises foi utilizado o MEV do Laboratório de Mecânica das Rochas de FURNAS, da marca Tescan, modelo VEGA3, de vácuo variável (alto e baixo), com sistema duplo de espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS) da Oxford, para auxílio na identificação química e mineralógica das fases presentes. Para realização das análises foi utilizado detector de elétrons secundários (SE) para formação de imagens e informações topológicas e de morfologia das amostras.

Para o ensaio foram utilizadas amostras fraturadas com idade superior a 91 dias, conforme ilustrado na Figura 3.15. Foram analisadas duas amostras por traço de concreto, sendo uma amostra referente à região do cobrimento e outra referente à parte interna do concreto. As amostras foram obtidas da mesma maneira que para o ensaio de reconstituição de traço,

conforme apresentado na Figura 3.14. A Figura 3.16 ilustra o processo de extração das amostras para o ensaio a partir das "bolachas" extraídas dos testemunhos cilíndricos.



Figura 3.15 - Amostras para o ensaio ao MEV.

Figura 3.16 - Extração das amostras para o MEV a partir das "bolachas" oriundas dos testemunhos cilíndricos.



As amostras foram analisadas em ampliações de aproximadamente 100, 500, 1000 e 5000 vezes no equipamento, com pequenas variações devidas ao ajuste de foco, com o intuito de verificar aspectos gerais da microestrutura do concreto e da interface pasta/agregado, além de identificar fases hidratadas e neo-compostos formados na pasta por ação pozolânica, confrontando essas verificações e análises às propriedades estudadas no presente trabalho.

A tensão utilizada foi de 20 kV e a distância de trabalho variou entre 10 mm e 18 mm, dependendo da espessura da amostra e do nível de ampliação desejado. Para efeito das análises, foram consideradas três regiões de estudo, a saber: a <u>borda do cobrimento</u> (2 mm a 3 mm de espessura), o <u>interior do cobrimento</u> (cerca de 2 cm de espessura) e o <u>interior do concreto</u>, conforme mostrado na Figura 3.17.



Figura 3.17 - Porta-amostras com as amostras fixadas para execução do ensaio ao MEV.

3.7.4. Métodos de permeabilidade ao ar associados à durabilidade

Neste subitem é descrito o método utilizado para mensurar as propriedades de transporte de massa de permeabilidade dos concretos, a permeabilidade ao ar (método de Figg).

3.7.4.1. Permeabilidade ao ar pelo método de Figg

O ensaio de permeabilidade ao ar pelo método de Figg foi executado de acordo com as propostas de Figg (1973), Cather *et al.* (1984) e LNEC E413 (1993). Para a realização do ensaio foi utilizado um protótipo de viga não armado para cada traço estudado.

O método de Figg (1973) consiste em fazer um furo de 5,5 mm de diâmetro por 30 mm de profundidade na superfície do concreto. Os 20 mm superficiais são vedados com uma rolha e silicone, de forma a produzir uma pequena câmara no interior do furo no concreto. O método foi aperfeiçoado posteriormente por Figg e, também, por outros pesquisadores (CATHER *et al.*,1984), os quais sugeriram um diâmetro de furo de 10 mm por 40 mm de profundidade, mantendo a vedação no decorrer dos 20 mm superficiais. Essas alterações

foram propostas pois as novas dimensões de furo reduziam as variações dos resultados entre os furos de um mesmo corpo de prova.

É importante salientar que o método de Figg para avaliar a permeabilidade ao ar é também prescrito pela norma LNEC E413 (1993). O princípio do método é a medida do tempo que o ar leva para penetrar através do cobrimento do concreto e diminuir o vácuo imposto na cavidade de -55 KPa a -50 KPa (t₁). Como alternativa, a norma sugere o cálculo do coeficiente de permeabilidade ao ar, designado por AER (velocidade de exclusão do ar), por meio da Equação 3.4.

$$AER = \frac{t_1}{\left(\frac{55}{50} - V\right) \cdot \frac{52.5}{100}}$$
(3.6)

Em que:

AER = coeficiente de permeabilidade ao ar (s/cm³);

V = volume do furo do ensaio (cm³);

t₁ = tempo que o ar leva para penetrar através do cobrimento do concreto e diminuir o vácuo imposto na cavidade de -55 KPa a -50 KPa.

Em sua pesquisa, Figg (1973) constatou que corpos de prova de concreto armazenados em uma temperatura de 20°C e 90% de umidade relativa, tiveram seu tempo de permeabilidade ao ar dez vezes maior do que os corpos de prova de mesmo traço armazenados em um ambiente de 20°C e 40% de umidade relativa, ou seja, a presença de umidade nos poros do concreto dificulta a passagem dos gases. Além disso, alguns gases podem reagir com os produtos da hidratação, modificando a estrutura dos poros como, por exemplo, o dióxido de carbono que leva à carbonatação da pasta de cimento hidratada (FEITOSA, 2000).

Para a realização deste ensaio foi utilizado um protótipo de viga (20 cm x 20 cm x 50 cm) para cada traço, perfazendo um total de 8 corpos de prova (2 relações ag/lig x 4 traços de estudo). Foram feitos 3 furos alinhados em cada viga, distantes cerca de 10 cm entre si. Os furos tinham 10 mm de diâmetro e 40 mm de profundidade. A Figura 3.18 ilustra o protótipo de viga e o posicionamento dos furos realizados.

Capítulo 3



Figura 3.18 - Corpo de prova empregado no ensaio de permeabilidade ao ar pelo método de Figg.

Para se aplicar o vácuo nos furos, inicialmente foi necessário prepará-los da seguinte maneira:

- removeu-se o pó de dentro de cada furo soprando-se um jato de ar;
- vedou-se a abertura de cada furo com uma rolha de silicone, conforme apresentado na Figura 3.19. A rolha apresenta 10 mm de diâmetro e 20 mm de altura e, para melhorar sua aderência à parede lateral do furo, aplicou-se silicone em toda a sua superfície lateral;

Figura 3.19 - Rolha de silicone utilizada para vedar os furos no ensaio de permeabilidade ao ar pelo método de Figg.



 ajustou-se a altura da rolha rente à superfície do corpo de prova e aplicou-se uma camada de silicone sobre o furo com o intuito de consolidar a vedação dele, conforme apresentado na Figura 3.20; Figura 3.20 - Preparação dos furos para a execução do ensaio de permeabilidade ao ar pelo método de Figg: (a) aplicação da rolha de borracha e (b) aplicação do silicone sobre o furo.



- após 24 h da aplicação do silicone, inseriu-se as agulhas nos furos cuidando-se para que não ocorresse o entupimento desses furos, e procedeu-se à execução do ensaio, conforme apresentado na Figura 3.21;
- Figura 3.21 Execução do ensaio de permeabilidade ao ar pelo método de Figg: (a) visão geral da execução do ensaio e (b) detalhe da vedação dos furos após a inserção das agulhas.







A execução do ensaio, propriamente dita, seguiu o procedimento constante nos tópicos abaixo:

- inseriu-se a mangueira ligada à bomba de vácuo no canhão de uma das agulhas preparadas no corpo de prova. É importante destacar-se que foi aplicado silicone na lateral do canhão da agulha para promover melhor vedação ao conjunto;
- acionou-se a bomba de vácuo (com a válvula do vacuômetro aberta) e aguardou-se que o vacuômetro medisse a menor pressão possível;
- fechou-se a válvula do vacuômetro e, em seguida, desligou-se a bomba;
- abriu-se um pouco a válvula para que a pressão se elevasse até um valor próximo a -55 kPa (-412,5 mm Hg) e, em seguida, a válvula foi fechada. A partir do momento em que ela é fechada, inicia-se a cronometragem;
- encerrou-se a medição do tempo (término da cronometragem), quando o vacuômetro indicou a pressão de -50 kPa (-375 mmHg);
- repetiu-se os dois últimos passos, caso a diferença entre os tempos de permeabilidade apresentasse valor maior, em módulo, a 2%;
- depois de completada a medição do tempo de permeabilidade ao ar dos três furos contidos no protótipo de viga, fez-se a média dos tempos de permeabilidade dos furos, sendo, portanto, considerado o resultado final do ensaio.

Na Figura 3.22, apresenta-se um esquema da realização do ensaio.




3.8. PANORAMA GERAL DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Descritas as variáveis, as condições fixas da pesquisa e os métodos empregados, apresenta-se abaixo (Figura 3.23) o fluxograma/panorama geral do programa experimental.



Figura 3.23 - Panorama geral dos métodos e tipos de corpos de prova do programa experimental

CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos no programa experimental desta dissertação. Primeiramente são discutidos os resultados do ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade e em seguida analisadas as propriedades relacionadas aos mecanismos de transporte e à durabilidade de modo geral, a saber: absorção de água por imersão e por capilaridade e permeabilidade ao ar pelo método de Figg. Estes resultados foram submetidos à análise de variâncias (ANOVA), para verificação da influência dos fatores considerados na avaliação. Todos os valores calculados do parâmetro de Fisher ($F_{calculado}$) foram comparados com valores tabelados para um nível de significância de 5% ($F_{tabelado} = F_{\alpha=0,05(v1, v2)}$), onde v1, v2 são os graus de liberdade do efeito avaliado e do resíduo, respectivamente.

É importante ressaltar que, antes dos dados terem sido submetidos à análise de variâncias, foi verificada neles a presença de *outliers*, por meio do teste de Dixon. O valor Q de Dixon é definido como a relação entre a diferença existente entre o valor suspeito de ser *outlier* e o valor mais próximo a este e a diferença entre o maior e o menor valor do conjunto de medidas. O valor de Q calculado foi comparado com o valor de Q tabelado, para o nível de confiança de 95%. Caso o valor de Q calculado não fosse superior ao tabelado, o valor suspeito era mantido, e caso contrário era rejeitado.

Por último são apresentados os resultados das análises das características microestruturais dos concretos por meio da microscopia eletrônica de varredura e os resultados do ensaio de reconstituição de traço. Estes estudos visaram à caracterização microestrutural do concreto de cobrimento quando comparado ao concreto do interior do protótipo de viga.

4.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão é uma das propriedades do concreto de suma importância na engenharia. Ela está relacionada com vários fatores, tais como: relação ag/lig, tipo de cimento, presença de adições minerais, idade, entre outros (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A combinação desses fatores determina, por exemplo, a porosidade do concreto, o grau de densificação da matriz cimentícia e as características da zona de transição pasta-agregado, tudo isso determinando a resistência mecânica do concreto.

No presente trabalho, a resistência à compressão foi medida em quatro idades diferentes (3, 7, 28 e 91 dias) e para cada idade foram realizadas três medidas (ensaios realizados em triplicata). É importante ressaltar que as resistências aos 3 e 7 dias dos concretos de referência (REF4 e REF6) foram obtidas por meio do método de regressão não-linear. Esse procedimento foi necessário visto que não foi possível obter-se as medidas nos dias programados. A Tabela 4.1 apresenta um resumo das médias, por idade, da resistência à compressão dos concretos estudados. Já a Figura 4.1 apresenta um gráfico que expressa esses valores médios de resistência ao longo do tempo, considerando os resultados para as duas relações ag/lig estudadas. Os resultados individuais de resistência à compressão constam nos apêndices do presente trabalho.

Constatos	Relação	Resistência à compressão (MPa)					
Concretos	ag/lig	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias		
REF4		39,6	46,0	49,9	68,3		
SAN4	0.4	44,8	48,3	61,9	68,3		
MM4	0,4	41,4	64,0	65,6	65,2		
MMX4		37,8	55,1	58,6	61,2		
REF6		26,0	29,9	34,9	41,1		
SAN6	0.6	22,4	27,4	40,2	46,4		
MM6	0,0	25,6	35,9	37,4	47,2		
MMX6		24,2	36,6	36,0	43,6		

Tabela 4.1 - Resistência à compressão média dos concretos nas diferentes idades de medição.

Figura 4.1 - Resistência à compressão em função da idade para os concretos estudados.



Observa-se na Tabela 4.1 e na Figura 4.1 que a maior resistência obtida foi de 68,3 MPa, registrada para os concretos de sílica ativa com nanossílica (SAN4) e referência (REF4), ambos na relação ag/lig igual a 0,4, aos 91 dias. Contudo, o primeiro obteve maiores resistências em idades mais precoces. Ghafari *et al.* (2014) também observaram comportamento semelhante, em que a adição de sílica ativa e nanossílica ao concreto resultou em resistências elevadas já nas primeiras idades. Ao analisar-se apenas os dados coletados aos 28 dias, nota-se que a maior resistência foi observada para o concreto com metacaulim HP MAX na relação ag/lig 0,4 (MM4), atingindo 65,6 MPa, enquanto o concreto SAN4 atingiu 61,9 MPa e o concreto com a composição metacaulim HP MAX + metacaulim HP XW na relação 0,4 (MMX4) atingiu 58,6 MPa.

Conforme esperado, a menor resistência registrada aos 91 dias foi de 41,1 MPa, obtida pelo concreto de referência na relação ag/lig 0,6 (REF6), seguida pela resistência do concreto com a combinação de metacaulins na relação 0,6 (MMX6), que foi de 43,6 MPa. Vale lembrar que essas resistências resultaram da média, e, além disso, de dados que foram tratados estatisticamente, em que dados muito discrepantes foram eliminados. Isso significa que valores de resistência maiores que a média foram observados, assim como valores abaixo dela.

O comportamento da resistência à compressão é influenciado por diversos fatores, que no caso desta pesquisa são: adição mineral, relação ag/lig e a idade dos concretos. Os dados individuais de resistência à compressão foram submetidos à uma análise de variância (ANOVA), para analisar a influência que as variáveis anteriormente referidas exercem sobre essa propriedade do concreto. A Tabela 4.2 apresenta o resultado da ANOVA para a resistência à compressão.

	SQ	GL	MQ	Fcal	F_{tab}	Resultado
MODELO	175432,4	1	175432,4	15743,26	4,006873	Significativo
Adição Mineral	380,7	3	126,9	11,39	2,763552	Significativo
ag/lig	8847,1	1	8847,1	793,94	4,006873	Significativo
Idade	6002,4	3	2000,8	179,55	2,763552	Significativo
Adição Mineral*ag/lig	94,0	3	31,3	2,81	2,763552	Significativo
Adição Mineral*Idade	629,7	9	70,0	6,28	2,045801	Significativo
ag/lig*ldade	106,6	3	35,5	3,19	2,763552	Significativo
Adição Mineral*ag/lig*ldade	287,3	9	31,9	2,86	2,045801	Significativo
Erro (resíduo)	646,3	58	11,1			

Tabela 4.2 - Resultado da ANOVA realizada para os dados de resistência à compressão, considerando como variáveis independentes a adição mineral, a relação ag/lig e a idade dos concretos.

Depreende-se da Tabela 4.2 que cada variável independente exerce um efeito individual na resistência à compressão. O mesmo acontece quando se observa a interação dupla e tripla dessas variáveis. Esses resultados comprovam a teoria de que o tipo de adição mineral, a relação ag/lig e a idade são determinantes para a resistência à compressão. Nos itens subsequentes será apresentado o efeito que cada variável exerce individualmente na resistência à compressão do concreto.

4.1.1. Influência da relação ag/lig

A relação ag/lig é uma variável fundamental para as propriedades mecânicas, especialmente para a resistência à compressão. É sabido que quanto mais baixa a relação ag/lig melhor é o desempenho dos concretos no tocante à resistência à compressão. Isso se deve à menor quantidade de água na mistura, o que resulta em um índice de vazios reduzido no concreto endurecido. Neste trabalho os concretos seguiram este padrão, ou seja, os concretos com relação ag/lig 0,4 apresentaram resistências à compressão maiores que os concretos com relação ag/lig 0,6.

A análise desta propriedade pelo teste de Duncan, considerando apenas a relação ag/lig, resultou em dois grupos distintos, sendo um grupo relacionado à relação ag/lig 0,4 e outro relacionado à relação 0,6. A Figura 4.2 apresenta o resultado do referido teste.



Figura 4.2 - Resultado da análise pelo teste de Duncan, considerando apenas a relação ag/lig.

Observa-se na Figura 4.2 que o valor médio para a relação ag/lig 0,4 foi de aproximadamente 55 MPa, já para a relação ag/lig 0,6 foi de aproximadamente 35 MPa. Isso mostra que os concretos de relação ag/lig 0,4 apresentaram resistências à compressão cerca de 57% maiores que os concretos com relação ag/lig igual a 0,6, considerando-se todas as adições minerais estudadas.

4.1.2. Influência do tipo de adição mineral

Como já mostrado anteriormente, a adição mineral é um fator determinante na resistência à compressão. A análise pelo teste de Duncan, pelo agrupamento de médias, mostrou que os resultados de resistência à compressão separam-se em três grupos distintos, quando considera-se apenas a influência das adições minerais. A Tabela 4.3 apresenta os resultados deste teste.

Tabela 4.3 - Teste de Duncan	comparação múltipla de	médias) para	a resistência à	compressão,	considerando-
	se o efeito das	adições minera	ais.		

Adição Mineral	Resistência à compressão (MPa)	Agrı	ıpam	ento
		1	2	3
REF	42,0	****		
SAN	45,2		****	
MMX	45,4		****	
MM	47,5			****

A Figura 4.3 apresenta um gráfico com os valores médios das resistências à compressão e desvios-padrão de todos os concretos, considerando-se apenas o efeito das adições minerais, oriundos da Tabela 4.3, e as linhas tracejadas demarcam os grupos estatisticamente semelhantes. Observa-se que os concretos MM apresentaram melhor desempenho, seguidos pelos concretos SAN e MMX, e, por último, os concretos REF.

Figura 4.3 - Valores médios de resistência à compressão para cada tipo de adição mineral utilizada.



Os concretos do grupo 2 (SAN e MMX) obtiveram, respectivamente, resistências 7,6% e 8,1% maiores que o REF, em média. Já os concretos do grupo 3 (MM) obtiveram, em média, resistência 13,1% maior que os concretos REF. Esses resultados mostram que as substituições parciais do cimento pelas adições minerais resultam em um incremento na resistência à compressão.

Os resultados de resistência à compressão dos concretos com sílica ativa e nanossílica (SAN) corroboram os resultados de Ghafari *et al.* (2014) e Du *et al.* (2015), os quais também estudaram concretos contendo nanossílica e encontraram que a substituição parcial do cimento por esta adição produz sempre melhores resultados de resistência à compressão. Já os resultados dos concretos que levam em sua composição algum tipo de metacaulim vão ao encontro dos resultados encontrados por Teodoro (2016), em que os concretos MM ou MMX foram invariavelmente melhores que os concretos de referência, no que se refere às propriedades mecânicas.

4.1.3. Influência da idade

A idade de um concreto é um fator importante para a resistência à compressão, uma vez que os compostos oriundos da hidratação do cimento e também das reações pozolânicas se formam de forma gradativa ao longo do tempo. Isso explica o fato de os concretos com idades mais avançadas apresentarem resistências à compressão maiores que os concretos com idades precoces. A Tabela 4.4 mostra os resultados da comparação múltipla de médias, obtidos por meio do teste de Duncan, para todos os tipos de concretos estudados neste trabalho, considerando apenas a influência da idade.

Idade	Resistência à	Agrupamento				
(dias)	(MPa)	1	2	3	4	
3	33,1	****				
7	43,2		****			
28	48,1			****		
91	55,8				****	

Tabela 4.4 - Teste de Duncan para a resistência à compressão levando em consideração o efeito da idade.

Observa-se na Tabela 4.4, que o teste de Duncan separou as resistências à compressão, considerando o efeito da idade, em quatro grupos distintos, um para cada idade. Esses grupos mostram uma ordem crescente de resistências a partir da idade de 3 dias. Para esta idade a resistência média foi igual a 33,1 MPa, já para a idade de 91 dias a resistência média foi 55,8

MPa, ou seja, um valor 68% superior à idade inicial. Os valores médios globais de resistência à compressão, por idade, bem como a indicação dos grupos estatisticamente diferentes, estão apresentados graficamente na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Valores médios globais de resistência à compressão para cada idade considerada no estudo (com seu desvio padrão), com as linhas tracejadas separando os grupos que se diferem estatisticamente.



A Figura 4.4 apresenta a separação por grupos obtida por meio do teste de Duncan, na qual nota-se que o primeiro grupo é formado pelas resistências obtidas aos 3 dias, o segundo pelas obtidas aos 7 dias, o terceiro pelas resistências de 28 dias e o último pelas resistências aos 91 dias.

Na Figura 4.5 é apresentado um gráfico de comportamento da resistência à compressão em função da idade, para cada um dos quatro tipos de concreto, para a relação ag/lig igual a 0,4. Na Figura 4.6, o mesmo gráfico foi construído considerando-se a relação ag/lig igual a 0,6.



Figura 4.5 - Comportamento da resistência à compressão em função da idade para os concretos de relação ag/lig 0,4.



Figura 4.6 - Comportamento da resistência à compressão com a idade para os concretos de relação ag/lig 0,6.

Observa-se que para a relação ag/lig 0,4 a atuação das adições minerais pozolânicas fica mais evidenciada, pois os concretos apresentaram ganho na resistência à compressão mais significativo na medida em que o concreto envelheceu. Além disso, também é possível observar-se que, no intervalo de tempo entre 3 e 7 dias, os concretos com adição de MM ganham resistência mais rapidamente que os demais (inclinação da reta), acompanhados de perto pelos concretos com adição combinada de MM e MX. Apesar do ganho de resistência do concreto com adição de SA e NS ter ocorrido mais lentamente, em termos de resistências finais esse concreto apresentou desempenho superior. Tais constatações estão evidenciadas nas duas relações ag/lig apresentadas, porém se apresentam de maneira evidente mais para a relação ag/lig 0,4.

O elevado ganho de resistência dos concretos contendo MM e dos concretos contendo a combinação de MM e MX pode ser explicado pelo arranjo ótimo de partículas muito finas, em combinação com as partículas de agregado dos concretos, produzindo maior empacotamento e efeito fíler pronunciado. Esta ação física já se mostra desde o princípio, produzindo refinamento de poros, maior densificação da pasta e maior compacidade da zona de transição, independente da ação pozolânica que vem a posteriori, agregando ainda mais valor nas idades mais avançadas. Os concretos de referência apresentam apenas o cimento como material aglomerante, enquanto os outros concretos possuem uma ou duas adições minerais pozolânicas em sua composição. A reações de hidratação do cimento, que formam o C-S-H em maior quantidade e o CH em menor quantidade, acontecem de forma muito mais rápida do que as reações pozolânicas, pois estas se dão com o consumo do CH formado. E o fato de que os concretos com adições pozolânicas alcançam resistência maiores em idades mais avançadas é explicado pelas reações pozolânicas que, ao consumirem o CH dão origem a mais C-S-H, além dagueles oriundos da própria hidratação do cimento. Sendo esses produtos

mais resistentes e menos solúveis que o CH, consequentemente as resistências à compressão também serão maiores (NEVILLE, 2016; MEHTA; MONTEIRO, 2014; DAL MOLIN, 2011). Além disso, as adições minerais empregadas neste programa experimental apresentam elevada finura, sendo o MM mais fino que a própria SA, conforme discutido no item 3.4.3.

4.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade foi medido em quatro idades diferentes (3, 7, 28 e 91 dias), com o intuito de se observar o comportamento dessa propriedade ao longo do tempo. Para cada idade foram realizadas três medidas (ensaios realizados em triplicata). Depois que se obteve todos os dados de módulo, procedeu-se ao tratamento estatístico, como exposto no início deste capítulo. Cabe ressaltar, também, que os valores de módulo aos 3 e 7 dias, dos concretos de referência, foram obtidos por meio do método de regressão não-linear. Esse procedimento foi necessário porque não foi possível obter essas medidas nos dias programados. Os valores do módulo de elasticidade das demais idades dos concretos de referência não precisaram ser corrigidos. A Tabela 4.5 apresenta um resumo das médias, por idade, do módulo de elasticidade dos diversos tipos de concretos estudados. Os resultados individuais de módulo de elasticidade constam nos apêndices do presente trabalho.

Concretos	Relação	Módulo de elasticidade - Ec (GPa)					
Concretos	ag/lig	3 dias	7dias	28 dias	91 dias		
REF4		27,5	30,3	42,7	45,3		
SAN4	0.4	38,5	40,5	48,0	45,5		
MM4	0,4	43,0	45,5	47,0	48,0		
MMX4		39,5	47,1	47,3	39,0		
REF6		21,1	27,7	30,2	43,4		
SAN6	0.6	32,5	34,9	37,5	38,1		
MM6	0,6	31,1	43,8	43,9	44,1		
MMX6		35,5	44,4	46,1	36,9		

Os resultados de módulo de elasticidade mostraram a influência que as adições minerais, a relação ag/lig e a idade dos concretos exercem sobre essa propriedade.

Nota-se, na Tabela 4.5, que todos os concretos com relação ag/lig 0,4 apresentaram valores médios de módulo maiores que os concretos com relação ag/lig 0,6. Isso é observado em todas as idades. Observa-se, também, que há uma tendência de crescimento do módulo de elasticidade com o aumento da idade. Esse comportamento é observado para praticamente

todos os concretos estudados, exceto para os concretos MMX4 e MMX6, os quais, aos 91 dias de idade, apresentam módulos menores que os medidos aos 28 dias. Também percebese que as adições minerais exercem influência na propriedade analisada, especialmente nas idades mais precoces quando o ganho do concreto MM4, por exemplo, chega a mais de 50% em relação ao REF4.

A influência das variáveis citadas foi comprovada por meio da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de módulo de elasticidade, levando-se em consideração a influência das adições minerais empregadas, da relação ag/lig e da idade. Os dados desta análise estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resultados da ANOVA para os dados de módulo de elasticidade, considerando como variáveis independentes a adição mineral, relação ag/lig e idade dos concretos.

	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	Resultado		
MODELO	128482,0	1	128482,0	26321,43	4,01620	Significativo		
Adição Mineral	625,7	1	625,7	128,19	4,01620	Significativo		
ag/lig	1122,6	3	374,2	76,66	2,7725	Significativo		
Idade	1190,8	3	396,9	81,32	2,7725	Significativo		
Adição Mineral*ag/lig	51,6	3	17,2	3,53	2,7725	Significativo		
Adição Mineral*Idade	50,1	3	16,7	3,42	2,7725	Significativo		
ag/lig*ldade	805,1	9	89,5	18,33	2,05516	Significativo		
Adição Mineral*ag/lig*ldade	155,4	9	17,3	3,54	2,05516	Significativo		
Erro (resíduo)	268,5	55	4,9					
Total	86	4140,1						
		R2=0),93					
R=0,97								

SQ=Soma dos quadrados; GL=Grau de liberdade; MQ=Média dos quadrados;

F=Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

R²=Coeficiente de determinação do modelo;

R=coeficiente de correlação.

Verifica-se na Tabela 4.6, que todas a variáveis (relação ag/lig, idade e adição mineral) foram significativas para o módulo de elasticidade. Isso também pode ser observado para as combinações entre essas variáveis. Ressalta-se, contudo, neste caso, a proeminência do efeito das adições minerais em relação às outras variáveis, já que o parâmetro de Fisher (F_{calc}) para as adições minerais foi maior em relação àqueles referentes à relação ag/lig e à idade.

4.2.1. Influência da relação ag/lig

A Figura 4.7 apresenta um gráfico com os valores médios do módulo de elasticidade de todos os concretos estudados. A linha tracejada indica a separação de grupos estatisticamente semelhantes. Observa-se, então, que concretos com relação ag/lig igual a 0,4 apresentaram módulo de elasticidade significativamente mais altos, quando comparados a concretos de relação ag/lig igual a 0,6, conforme esperado.





Observa-se que, de fato, a relação ag/lig influenciou de maneira significativa o módulo de elasticidade, como comentado anteriormente. O módulo de elasticidade possui uma relação direta com a porosidade da matriz cimentícia e, portanto, com a relação ag/lig. O módulo de elasticidade expressa uma medida da rigidez dos concretos, o que significa que quanto menor a porosidade, mais compacto e rígido é o concreto, traduzindo isto em maiores valores de módulo. Assim, o comportamento esperado é de que o módulo seja maior para um concreto com relação ag/lig menor (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

4.2.2. Influência do tipo de adição mineral

De igual modo foi verificado o efeito do tipo de adição mineral no módulo de elasticidade do concreto. Como comentado anteriormente, a ANOVA identificou o fator adição mineral como o mais significativo dentre os três avaliados, no que tange o efeito sobre o módulo de elasticidade. A comparação múltipla de médias, por meio do teste de Duncan, apontou a ocorrência de três grupos estatisticamente diferentes, como se pode ver na Figura 4.8.





Nota-se que, no caso do módulo de elasticidade, os concretos foram agrupados de maneira levemente diferente da resistência à compressão. A sequência de resultados globais é a mesma, mas o agrupamento de médias mudou. No caso, os concretos REF apresentaram resultados mais baixos de módulo (estatisticamente), seguidos pelos concretos SAN, e os concretos MM e MMX apresentaram resultados mais altos, estatisticamente superiores aos outros dois (ver divisão dos grupos pela linha tracejada na vertical). Ressalta-se que tanto para os resultados de resistência à compressão, quanto para os resultados de módulo de elasticidade, os concretos MM e MMX apresentaram valores superiores aos demais, seguidos pelo concreto SAN. Este resultado mostra a alta eficiência das adições minerais, em especial do metacaulim, nas transformações físicas da pasta de cimento em favor das propriedades mecânicas.

4.2.3. Influência da idade

A Figura 4.9 apresenta o gráfico das médias globais de módulo de elasticidade em função da idade analisada. Nota-se que, conforme esperado, os valores de módulo aos 3 dias foram inferiores aos valores obtidos aos 7 dias. Um dado interessante é que, para o caso do módulo, não houve diferença significativa entre as idades de 28 e 91, ou seja, nessas idades, os resultados de módulo não são estatisticamente diferentes entre si.



Figura 4.9 - Gráfico das médias globais de módulo de elasticidade (com seus desvios-padrão) em função da idade analisada. As linhas tracejadas demarcam os grupos que se diferem estatisticamente.

4.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS

O ensaio de absorção total de água por imersão e, por consequência, o índice de vazios dos concretos, propiciam um bom indicador para avaliação da porosidade aberta acessível à água desse material. Os resultados médios de absorção de água por imersão e índice de vazios obtidos neste trabalho são apresentados na Tabela 4.7.

Relação ag/lig	Concreto	Absorção total média (%)	Índice de vazios (%)
	REF	4,26	9,90
0.4	SAN	5,05	11,68
0,4	MM	4,56	10,65
	MMX	4,65	10,81
	REF	5,13	11,68
0,6	SAN	5,87	13,23
	MM	5,76	13,09
	MMX	4,51	10,35

Tabela 4.7 - Valores médios de absorção de água por imersão dos concretos estudados.

Com o intuito de facilitar a análise dos dados, os valores de absorção total média foram registrados em função do tipo de adição mineral e da relação ag/lig, conforme apresentado na Figura 4.10.



Figura 4.10 - Resultados da absorção de água dos concretos estudados (%) em função do traço.

Com o intuito de realizar-se uma análise mais prática dos dados obtidos, no campo dos requisitos efetivos para engenharia, utilizou-se os critérios do boletim informativo nº 192 do CEB (198910 *apud* CASCUDO, 1997) apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Classificação dos concretos segundo o boletim informativo nº 192 do CEB (1989 *apud* CASCUDO, 1997).

Absorção (%)	Absorção do concreto	Qualidade do concreto
< 3,0	Baixa	Boa
3,0 a 5,0	Média	Média
> 5,0	Alta	Pobre

Segundo esses critérios, valores de absorção mais baixos do que 3% traduzem uma qualidade boa do concreto, entre 3% e 5% traduzem uma qualidade média e para valores maiores do que 5% a qualidade é pobre. Na Tabela 4.9 é feita uma classificação dos concretos estudados de acordo com os critérios apresentados.

¹⁰ COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETÓN (CEB). Bulletin d'Information, n. 192, Paris, 1989.

Relação ag/lig	Concreto	Qualidade do concreto		
	REF	Média		
0.4	0,4 SAN MM MMX	Pobre		
0,4	MM	Média		
	MMX	Média		
	REF	Pobre		
0.6	SAN	Pobre		
0,6	MM	Pobre		
	0,4	Média		

Tabela 4.9 - Classificação dos concretos estudados de acordo com o boletim informativo nº 192 do CEB (1989 apud CASCUDO, 1997).

Nota-se que os critérios apresentados são controversos, pois os concretos SAN4 apresentam boa qualidade, comprovada pelos vários parâmetros de desempenho avaliados nesta pesquisa, apesar de aqui serem classificados como concretos de qualidade pobre; além disso, para a classificação proposta, o concreto MMX6, com elevada relação ag/lig, apresentou qualidade igual a de concretos com relação ag/lig igual a 0,4, o que não é esperado e também não foi validado nos demais ensaios de durabilidade. Contudo, fica o registro de que esses valores, embora possam ser submetidos a análises comparativas, na realidade são relativamente próximos entre si (amplitude de valores de 4,26% a 5,87%). Uma questão que pode ser levantada para essa linha não muito coerente entre os resultados de absorção obtidos com os critérios do CEB pode ser o método empregado no Brasil (NBR 9778). Enquanto na Europa, o método de ensaio de absorção de água prevê a absorção máxima obtida em meio aquoso com aplicação de vácuo (sem fervura), no Brasil, o ensaio prevê absorção plena sendo obtida por meio de imersão e fervura. A fervura pode produzir dilatação e microfissuração no concreto, o que concorre para um aumento dos valores de absorção, produzindo distanciamento dos parâmetros internacionais.

Os resultados obtidos foram submetidos à análise estatística de variância (ANOVA) com o intuito de observar-se as diferenças estatisticamente significativas. A análise está apresentada na Tabela 4.10. Como os resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios possuem alta correlação, optou-se por analisar somente o primeiro, uma vez que se trata de um resultado direto do ensaio.

	GL	SQ	MQ	F _{cal}	F_{tab}	Resultado		
Modelo	1	593,8160	593,8160	17767,84	4,49	Significativo		
Relação ag/lig	1	2,8428	2,8428	85,06	10,58	Significativo		
Adição mineral	3	3,0275	1,0092	30,20	6,30	Significativo		
Relação ag/lig*Adição mineral	3	1,4892	0,4964	14,85	6,30	Significativo		
Erro	16	0,5347	0,0334					
Total	23	7,8942						
R=0,97								
R ² =0,93								

Tabela 4.10 - Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de absorção total por imersão.

O modelo da análise de variância foi significativo, com coeficiente de determinação igual a 0,93. Dos resultados, tem-se que todas as variáveis são estatisticamente significativas (F_{cal}>F_{tab}), para um nível de confiança de 95%. Ou seja, todas as variáveis exercem influência nos resultados de absorção de água por imersão, sendo a relação ag/lig o fator mais influente. A interação entre as duas variáveis é, igualmente, significativa, denotando haver sinergia entre elas. Em outras palavras, o efeito que a relação ag/lig exerce sobre a absorção é alterado pelo tipo de concreto (adição mineral) e vice-versa.

4.3.1. Influência da relação ag/lig

O efeito da relação água/ligante na absorção de água por imersão foi significativo, segundo a análise de variância. O gráfico da Figura 4.11 apresenta as médias globais, para as duas situações: relações ag/lig iguais a 0,40 e 0,60, bem como a segregação em grupos estatisticamente iguais (tracejado vermelho), com base na comparação múltipla de médias (teste de Duncan).



Figura 4.11 - Gráfico das médias globais de absorção de água por imersão em função da relação ag/lig e desvios padrão.

Observa-se que os concretos de relação ag/lig igual a 0,40 apresentaram uma menor absorção e, consequentemente, um menor índice de vazios quando comparados com os concretos de relação ag/lig igual a 0,60. Este resultado é absolutamente esperado, uma vez que a relação ag/lig é determinante na porosidade do concreto, sendo considerado o principal parâmetro controlador dessa propriedade no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Contudo, como comentado no início deste subitem, apesar das diferenças significativas de absorção em função da variação da relação ag/lig, os valores em termos práticos (no campo da engenharia) não são tão afastados.

4.3.2. Influência do tipo de adição mineral

Na Figura 4.12 são mostrados os valores médios globais de absorção total para cada tipo de concreto (adição), com seus desvios-padrão. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente obtidos por meio do teste de Duncan.



Figura 4.12 - Gráfico das médias globais de absorção de água por imersão em função do tipo de adição mineral empregado e desvios-padrão.

Observa-se que os concretos de referência (REF) e os compostos com metacaulins (MMX) apresentaram absorção total inferior aos concretos com adição de Metacaulim HP MAX (MM), bem como inferior aos concretos com adição de sílica ativa e nanossílica, estes últimos situando-se em grupos separados, contendo os valores mais altos de absorção de água.

4.4. ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi executado em dois tipos de corpos de prova, a saber, cilíndricos e prismáticos, extraídos dos protótipos de vigas. Além disso, avaliou-se a absorção por capilaridade tanto do cobrimento (CPs prismáticos) quanto da região interna do concreto (CPs prismáticos e cilíndricos).

Na Tabela 4.11 são apresentados os resultados obtidos no ensaio para os corpos de prova prismáticos referentes à região interna do concreto. Também são apresentados os valores do raio médio do capilar, calculado pela equação de Jurin₁₁ e da absortividade nos estágios 1 e 2, obtidas por meio de regressão bilinear.

¹¹ Considerando a tensão superficial da água igual a 0,073 N/m² a 20°C.

Concreto	ag/lig	Região de análise	Absorção média (g/cm²)	Altura capilar média (cm)	Raio médio do capilar (mm)*	S1 (kg/m².h ^{0,5})	S2 (kg/m².h ^{0,5})		
REF			0,55	7,6	1,92E-08	0,87	0,46		
SAN	0.4	- Interior	0,63	7,1	2,06E-08	0,89	0,58		
MM	0,4		0,94	10,0	1,46E-08	1,30	0,91		
MMX			1,00	11,3	1,30E-08	1,44	0,96		
REF			0,85	9,7	1,51E-08	1,24	0,78		
SAN	0.6		0,80	7,7	1,90E-08	1,09	0,79		
MM	0,6		0,90	9,0	1,62E-08	1,19	0,86		
MMX			0,94	10,4	1,40E-08	1,09	1,02		
*Calculado	*Calculado pela equação de Jurin								

Tabela 4.11 - Resultados médios do ensaio de absorção por capilaridade em corpos de prova prismáticos referentes à região interna do concreto.

Já na Tabela 4.12 são apresentados os resultados obtidos para os corpos de prova prismáticos referentes à região do cobrimento.

Tabela 4.12 - Resultados médios do ensaio de absorção por capilaridade em corpos de prova prismáticos referentes à região do cobrimento do concreto.

Concreto	ag/lig	Região de análise	Absorção média (g/cm²)	Altura capilar média (cm)	Raio médio do capilar (mm)*	S1 (kg/m².h ^{0,5})	S2 (kg/m².h ^{0,5})
REF			0,44	6,8	2,15E-08	0,83	0,30
SAN	0.4	Cobrimonto	0,55	6,4	2,28E-08	0,82	0,47
MM	0,4		0,63	8,1	1,80E-08	0,85	0,60
MMX			0,77	9,1	1,62E-08	1,03	0,77
REF		Coprimento	0,78	9,7	1,51E-08	1,16	0,68
SAN	0.6		0,75	7,7	1,92E-08	1,11	0,68
MM	0,6		0,87	8,6	1,70E-08	1,16	0,83
MMX			0,83	8,9	1,66E-08	1,04	0,89
*Calculad	o pela	equação de J	urin			· ·	· ·

E, por último, na Tabela 4.13, são apresentados os resultados do ensaio de absorção por capilaridade obtidos para os CPs cilíndricos, referentes à região interna do concreto.

Concreto	ag/lig	Região de análise	Absorção média (g/cm²)	Altura capilar média (cm)	Raio médio do capilar (mm)*	S1 (kg/m².h ^{0,5})	S2 (kg/m².h ^{0,5})		
REF			0,60	7,4	1,98E-08	0,86	0,55		
SAN	0.4	Interior	0,46	5,7	2,56E-08	0,71	0,37		
MM	0,4		0,89	9,7	1,51E-08	1,17	0,85		
MMX			0,71	8,7	1,69E-08	0,99	0,66		
REF			1,19	12,4	1,18E-08	1,52	1,21		
SAN	0.6		0,81	7,7	1,90E-08	1,30	0,67		
MM	0,6	Л, б	1,22	11,4	1,29E-08	1,47	1,25		
MMX			1,17	11,8	1,24E-08	1,42	1,22		
*Calculado	*Calculado pela equação de Jurin								

Tabela 4.13 - Resultados médios do ensaio de absorção por capilaridade em corpos de prova cilíndricos para a região interna do concreto.

Observa-se que, para todas as regiões de análise e todos os tipos de CP, à medida em que a altura capilar média aumenta, o raio médio do capilar diminui, como esperado. Isso acontece porque as reduções de seção no raio do capilar geram aumento da força de sucção, conforme discutido no item 2.2.2. Além disso, nota-se também que, em geral, para a região do cobrimento, os valores obtidos para o raio médio capilar são superiores aos valores obtidos para a região interna, isso acontece porque a altura capilar média nessa região foi menor, ou seja, a região do cobrimento apresenta poros com maiores diâmetros, menos capazes de exercer sucção capilar quando comparados aos poros da região do interior.

Quanto à influência da adição mineral empregada, nota-se que, de maneira geral, a incorporação desses materiais gerou redução no diâmetro médio dos poros do concreto, ou seja, aumentou a força de sucção capilar e, consequentemente, a absorção média, efeito este que ficou mais pronunciado nos traços MM e MMX.

Os resultados obtidos foram submetidos à análise estatística de variância (ANOVA) com o intuito de observar-se as diferenças estatisticamente significativas. A análise referente aos CPs prismáticos está apresentada na Tabela 4.14 e a análise referente aos CPs cilíndricos está apresentada na Tabela 4.15. Como os resultados de absorção de água por capilaridade e raio do capilar possuem alta correlação, optou-se por analisar somente o primeiro (considerando os resultados em g/cm²), uma vez que se trata de um resultado direto do ensaio.

127

	GL	SQ	MQ	F _{cal}	F _{tab}	Resultado
Modelo	1	18,55928	18,55928	12245,30	4,4939985	Significativo
ag/lig	1	0,18758	0,18758	123,76	4,4939985	Significativo
Adição mineral	3	0,30423	0,10141	66,91	3,2388715	Significativo
Região de análise	1	0,12375	0,12375	81,65	4,4939985	Significativo
ag/lig*Adição Mineral	3	0,10673	0,03558	23,47	3,2388715	Significativo
ag/lig*Região de análise	1	0,02703	0,02703	17,83	4,4939985	Significativo
Adição Mineral*Região de análise	3	0,01821	0,00607	4,00	3,2388715	Significativo
ag/lig*Adição Mineral*Região de análise	3	0,01923	0,00641	4,23	3,2388715	Significativo
Erro	16	0,02425	0,00152			
Total	31	0,81102				
		R=0,98				
		R ² =0.97				

Tabela 4.14 - Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de absorção por capilaridade referentes aos CPs prismáticos (cobrimento e interior).

Tabela 4.15 - Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de absorção por capilaridade referentes aos tipos de CPs (CPs cilíndricos e prismáticos para a região do interior do concreto).

	GL	SQ	MQ	Fcal	F _{tab}	Resultado
Modelo	1	23,15401	23,15401	15764,43	4,4939985	Significativo
ag/lig	1	0,55125	0,55125	375,32	4,4939985	Significativo
Adição Mineral	3	0,50696	0,16899	115,06	3,2388715	Significativo
Tipo de CP	1	0,02311	0,02311	15,74	4,4939985	Significativo
ag/lig*Adição Mineral	3	0,10093	0,03364	22,90	3,2388715	Significativo
ag/lig*Tipo de CP	1	0,22445	0,22445	152,82	4,4939985	Significativo
Adição Mineral*Tipo de CP	3	0,10346	0,03449	23,48	3,2388715	Significativo
ag/lig*Adição Mineral*Tipo de CP	3	0,02853	0,00951	6,47	3,2388715	Significativo
Erro	16	0,02350	0,00147			
Total	31	1,56219				
		R=0,99				
		R ² =0,98				

Observa-se que todos os parâmetros em estudo se mostraram significativos e que, para a análise referente aos CPs prismáticos, os fatores que mais exercem influência no modelo, em ordem crescente, são a relação ag/lig, a região de análise e o tipo de adição mineral, respectivamente. Já para a análise que leva em conta todos os tipos de CPs, os fatores são a relação ag/lig, o fator combinado ag/lig*Tipo de CP e o tipo de adição mineral, o que comprova a grande influência do tipo de CP nos resultados desse ensaio.

Além disso, avaliou-se a absortividade das amostras, conforme apresentado na Figura 4.13, com o intuito de obter-se dados da cinética de absorção, ou seja, do comportamento da absorção em função do tempo. A absortividade foi obtida por meio da inclinação das retas (S1 e S2), que correlacionam o ganho de massa de água (kg/m²) e a raiz quadrada do tempo. A absortividade foi expressa em kg/m².h^{1/2} e o ganho de massa foi avaliado nos três pontos

iniciais de cada curva para o estágio 1 e nos três pontos finais de cada curva para o estágio 2. Nestes intervalos, o comportamento pode ser descrito como linear, portanto, as curvas apresentadas correspondem a dois ajustes lineares, um para o intervalo de tempo entre 0 e 6 horas de ensaio, e o outro para o intervalo entre 24 e 72 horas.

Na Figura 4.14 o mesmo ajuste descrito anteriormente foi feito, porém para os CPs prismáticos referentes à região interna do concreto, e na Figura 4.15 para os CPs cilíndricos referentes à região do interior dos protótipos de viga.



Figura 4.13 - Ajuste bilinear da absortividade das amostras prismáticas referentes ao cobrimento.



Figura 4.14 - Ajuste bilinear da absortividade das amostras prismáticas referentes ao interior.

Figura 4.15 - Ajuste bilinear da absortividade das amostras cilíndricas referentes ao interior.



Observa-se das figuras apresentadas que no primeiro estágio de absorção, também chamado de período de absorção, a velocidade de entrada de água no interior do concreto é maior que para o segundo estágio (período de saturação), além disso, quando se compara a absortividade entre as regiões do cobrimento e do interior (Figura 4.13 e Figura 4.14), observa-se que, para o período de absorção (S1), a região do cobrimento apresentou menores valores de S1 em relação à região interior, exceto para o concreto SAN6, apesar de os valores apresentados para as duas regiões deste traço estarem muito próximos entre si. Para facilitar o entendimento, os referidos dados estão apresentados na Tabela 4.16.

Concreto	Relação ag/lig	S1 cobrimento (kg/m².h ^{0,5})	S1 interior (kg/m².h ^{0,5})
REF		0,83	0,87
SAN	0,4	0,82	0,89
MM		0,85	1,30
MMX		1,03	1,44
REF		1,16	1,24
SAN	0.0	1,11	1,09
MM	0,0	1,16	1,19
MMX		1,04	1,09

Tabela 4.16 - Comparação entre a absortividade dos concretos estudados no estágio de absorção (S1) - CPs prismáticos.

A mesma análise foi feita para o período de saturação. Com o intuito de facilitar o entendimento, os valores estão apresentados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Comparação entre a absortividade dos concretos estudados no estágio de saturação (S2) - CPs prismáticos.

Concreto	Relação ag/lig	S2 cobrimento (kg/m².h ^{0,5})	S2 interior (kg/m².h ^{0,5})
REF	0,4	0,30	0,46
SAN		0,47	0,58
MM		0,60	0,91
MMX		0,77	0,96
REF		0,68	0,78
SAN	0.6	0,68	0,79
MM	0,6	0,83	0,86
MMX		0,89	1,02

Observa-se que, do mesmo modo que para o período de absorção, no período de saturação a região do cobrimento apresentou menores valores de S2 em relação à região interior. Tal

fato pode justificado pela maior presença de argamassa na região do cobrimento, e menor quantidade de agregados graúdos, o que diminui a quantidade de zonas de transição (ZTs). Tal fato será melhor explicado no tópico 4.6, ao apresentar-se os resultados do ensaio de reconstituição de traço para as duas regiões analisadas.

Das considerações anteriores, pode-se, então, afirmar que a região do cobrimento apresentou menores taxas de absorção de água ao se comparar com a região interna do concreto. Esta conclusão reforça a tese de que, de fato, os concretos do cobrimento e do interior são diferentes.

Com o intuito de analisar as absortividades obtidas para a região interna do concreto, tanto para os CPs prismáticos, quanto para os CPs cilíndricos, apresentam-se os referidos dados na Tabela 4.18.

Concreto	Relação ag/lig	S1 prisma (kg/m².h ^{0,5})	S1 cilindro (kg/m².h ^{0,5})	S2 prisma (kg/m².h ^{0,5})	S2 cilindro (kg/m².h ^{0,5})
REF		0,87	0,86	0,46	0,55
SAN	0,4	0,89	0,71	0,58	0,37
MM		1,30	1,17	0,91	0,85
MMX		1,44	0,99	0,96	0,66
REF		1,24	1,52	0,78	1,21
SAN	0,6	1,09	1,30	0,79	0,67
MM		1,19	1,47	0,86	1,25
MMX		1,09	1,42	1,02	1,22

Tabela 4.18 - Comparação entre a absortividade dos CPs cilíndricos e prismáticos para os estágios de absorção
(S1) e de saturação (S2).

Observa-se que, contrariamente ao que foi observado para os CPs prismáticos, não há uma tendência específica nos valores de absortividade para nenhuma das duas fases (absorção e saturação), o que confirma que não há uma correlação entre os valores obtidos, ou ainda, que o efeito do tipo de corpo de prova seja significativo na análise de variância, conforme será discutido adiante.

O ensaio de avaliação da absorção de água por capilaridade nos materiais cimentícios, por si só, não prevê com precisão a vida útil destes materiais. Porém, como os processos de deterioração dos concretos envolvem o transporte de fluido e íons agressivos pela rede de poros, a absortividade pode ser um indicativo de qualidade desses materiais (GONÇALVES, 2005).

Dessa forma, a absortividade pode ser correlacionada com a probabilidade de degradação, pois materiais com elevados valores de absortividade, dentro das mesmas condições ambientais, terão maior probabilidade de serem deteriorados, devido à penetração de agentes agressivos e, consequentemente, ocorrer uma diminuição no tempo de vida útil.

4.4.1. Influência da relação ag/lig (CPs prismáticos)

O efeito da relação água/ligante na absorção de água por capilaridade foi significativo, segundo a análise de variância. O gráfico da Figura 4.16 apresenta as médias globais, para as duas situações: relações ag/lig iguais a 0,40 e 0,60, bem como a segregação em grupos estatisticamente iguais (tracejado vermelho), com base na comparação múltipla de médias (teste de Duncan).



Figura 4.16 - Gráfico das médias globais de absorção por capilaridade (e seus desvios padrão) em função da relação ag/lig para os CPs prismáticos.

Como esperado e em conformidade com os resultados do ensaio de absorção total por imersão, observa-se que os concretos com relação ag/lig igual a 0,4 apresentaram menores valores de absorção por capilaridade quando comparados aos concretos de relação ag/lig igual a 0,6.

4.4.2. Influência do tipo de adição mineral (CPs prismáticos)

O efeito do tipo de adição mineral empregado está apresentado na Figura 4.17.



Figura 4.17 - Gráfico das médias globais de absorção por capilaridade em função do tipo de adição mineral empregado na mistura para os CPs prismáticos.

Observa-se que, tanto os concretos de referência quanto os com adição de SA e NS apresentaram as menores absorções totais por capilaridade, compondo o primeiro grupo estatisticamente semelhante; posteriormente vêm os concretos com adição de MM e, por último, com o maior índice de absorção, encontram-se os concretos com adição de MM e MX. Esse mesmo comportamento é observado quando analisa-se a absortividade dos concretos, merecendo destaque os concretos SAN4 e REF4, os quais apresentaram desempenho superior aos demais. No entanto, é preciso algum cuidado nessa análise. Como os concretos com metacaulim obtiveram ótimos resultados nas análises realizadas até o momento, é preciso salientar que muito provavelmente os "piores" resultados de absorção por capilaridade desses concretos são resultado de uma maior força de sucção capilar de poros menores, dado o maior grau de refinamento que o metacaulim introduz na pasta de cimento. Pela Lei de Jurin, poros menores implicam maior força capilar, o que, dependendo da interconexão de poros, pode representar maior valor de absorção de água. Isto, contudo, não significa, necessariamente, um pior resultado.

4.4.3. Influência da região de análise (CPs prismáticos)

A Figura 4.18 apresenta a influência da região de análise (cobrimento e interior) para os CPs prismáticos. Observa-se, conforme discutido anteriormente, que, contrariamente à literatura específica da área, para o ensaio de absorção por capilaridade, a região do cobrimento do

concreto mostrou-se superior à região interna. Claro, considerando as ressalvas que esse resultado carrega, conforme comentado anteriormente.



Figura 4.18 - Gráfico das médias globais de absorção por capilaridade (e seus desvios-padrão) em função da região de análise para os CPs prismáticos.

Tal resultado pode ser explicado pela menor relação agregado/ligante na região do cobrimento, causada por diversos fatores associados aos processos executivos e à cura do concreto, tais como: influência das fôrmas, segregação, evaporação, fissuração excessiva, *etc.* Ao contrário do que parte da literatura descreve, verifica-se neste trabalho que por ser caracterizada por um aumento no teor de pasta de cimento, a região do cobrimento não sofre um aumento da porosidade na parte externa dos concretos; pelo contrário, a não existência dos agregados graúdos e suas zonas de transição faz com que essa região absorva menores teores de água, sendo, portanto, uma região mais compacta e densa (como se discutirá mais à frente).

4.4.4. Influência do tipo de corpo de prova (CPs prismáticos e cilíndricos)

Quando são analisados os valores obtidos para a região interna do concreto, comparando-se os corpos de prova prismáticos e cilíndricos, observa-se que os CPs prismáticos apresentaram valores estatisticamente menores em relação aos CPs cilíndricos, conforme apresentado na Figura 4.19. Para os valores da absortividade, conforme discutido anteriormente, não foi obtida nenhuma correlação.

É importante destacar-se que os CPs prismáticos apresentaram desvio padrão consideravelmente menor que os CPs cilíndricos normalizados, indicando haver maior

dispersão e variabilidade dos resultados nos corpos de prova do ensaio normalizado, por isso, as análises estatísticas referentes aos CPs cilíndrico não serão aqui apresentadas.



Figura 4.19 - Gráfico das médias globais de absorção por capilaridade (e seus desvios-padrão) em função do tipo de corpo de prova.

4.5. PERMEABILIDADE AO AR PELO MÉTODO DE FIGG

O ensaio de permeabilidade ao ar pelo método de Figg foi executado em protótipos de vigas, conforme descrito no Capítulo 3. É importante ressaltar-se o caráter artesanal desse ensaio e que, portanto, observou-se considerável variabilidade nos valores obtidos. Na Tabela 4.19 é apresentada uma classificação proposta por Cather *et al.* (1984) para os materiais submetidos a esse ensaio. Embora as condições de ensaio empregadas para a elaboração da proposta de classificação sugerida pelo autor não tenham sido rigidamente adotadas neste programa experimental, a adoção dessa classificação não deixa de ser interessante, pois nela se tem uma noção aproximada da qualidade dos concretos estudados.

Categoria de qualidade	Tempo (s)	Interpretação	Tipo de material
0	<30	Pobre	Argamassa porosa
1	30-100	Moderado	Concreto com resistência à compressão de 20 N/mm ²
2	100-300	Satisfatório	Concreto com resistência à compressão de 50 N/mm ²
3	300-1000	Bom	Concreto adensado e bem curado
4	>1000	Excelente	Concreto com polímeros

Tabela 4.19 - Classificação do concreto de acordo com a permeabilidade ao ar segundo Cather et al. (1984).

	Relação	Conorato		Classificação		
	ag/lig	Concreto	rempo (s)	Categoria	Interpretação	
		REF	536	3	Bom	
	0,4	SAN	719	3	Bom	
		MM	676	3	Bom	
		MMX	582	3	Bom	
		REF	146	2	Satisfatório	
	0.6	SAN	277	2	Satisfatório	
	0,0	MM	178	2	Satisfatório	
		MMX	183	2	Satisfatório	

Tabela 4.20 - Valores médios obtidos no ensaio de absorção pelo método de Figg.

Observa-se que os concretos contendo SA e NS apresentaram desempenho superior aos demais, posteriormente os concretos com adição de MM e MMX e, por último, os concretos REF, conforme esperado.

Na Tabela 4.21 estão apresentados os resultados obtidos na análise estatística de variância (ANOVA) dos valores de permeabilidade ao ar pelo método de Figg (tempo em segundos), salientando-se que, para este estudo, não está considerada a variável região do concreto, uma vez que todos os ensaios de permeabilidade ao ar foram executados sobre os protótipos de viga. Pode-se observar que o modelo fatorial considerado foi significativo, assim como as duas variáveis do estudo e a sua interação (mostrando a interdependência das influências individuais).

Tabela 4.21 - Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de permeabilidade ao ar, para as variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.

	GL	SQ	MQ	F _{cal}	\mathbf{F}_{tab}	Resultado		
Modelo	1	2732409	2732409	30192,36	5,317655	Significativo		
Relação ag/lig	1	749956	749956	8286,81	5,317655	Significativo		
Adição mineral	3	55449	18483	204,23	4,066181	Significativo		
Relação ag/lig*Adição mineral	3	4000	1334	14,73	4,066181	Significativo		
Erro	8	724	90					
Total	15	810129						
R=0,99								
	R ² =0,99							

4.5.1. Influência da relação ag/lig

Como esperado, os concretos com relação ag/lig igual a 0,4 apresentaram melhores desempenhos em relação àqueles de relação ag/lig igual a 0,6, conforme apresentado na Figura 4.20. O efeito da relação ag/lig foi bem mais pronunciado do que o da adição mineral, como se pode ver pelo parâmetro de Fisher (F_{calc}) na Tabela 4.21. Esse efeito destacado é notório na Figura 4.20, na qual se pode ver a grande diferença dos valores médios para cada uma das relações ag/lig.

Figura 4.20 - Gráfico das médias globais de permeabilidade ao ar pelo método de Figg (com seus desviospadrão) em função da relação ag/lig.



4.5.2. Influência do tipo de adição mineral

A influência do tipo de adição mineral nos resultados de permeabilidade ao ar pelo método de Figg foi significativa, conforme comentado anteriormente (Tabela 4.21). Os resultados médios globais por tipo de concreto (adição), bem como a separação dos grupos estatisticamente diferentes, estão apresentados na Figura 4.21.



Figura 4.21 - Gráfico das médias globais de permeabilidade ao ar pelo método de Figg (com seus desvios padrão) em função do tipo de adição mineral empregado no traço.

Observa-se que, para este ensaio, houve a formação de quatro grupos estatisticamente diferentes, sendo que os concretos com adição de SA e NS apresentaram o melhor desempenho no ensaio, seguidos pelos concretos com adição de MM, dos concretos com adição de MM e MX e, por último, os concretos de referência. Os resultados comprovam que a incorporação de adições minerais pozolânicas refina os poros do concreto e, consequentemente, aumenta o tempo que o ar leva para permear esse material.

4.6. RECONSTITUIÇÃO DE TRAÇO

O ensaio de reconstituição de traço foi realizado em corpos de prova cilíndricos, aqui denominados de "bolachas", conforme apresentado no item 3.8.3.3. Foram analisadas duas regiões distintas de cada CP, a saber, o cobrimento e o interior, e para cada traço de estudo foram analisados três CPs distintos (ensaios em triplicata).

Na Tabela 4.22 e na Figura 4.22 são apresentados os resultados médios obtidos no ensaio. É importante destacar-se que o ensaio foi executado apenas nos concretos de relação ag/lig = 0,6. Os resultados individuais estão apresentados no Apêndice do presente trabalho.

Região de análise	Traço	Perda ao fogo (%)	Resíduo insolúvel (%)	Ligante (%)	Agregado (%)	Traço (agregado/ligante)
Interior	REF6I	6,16	81,8	12,9	87,1	6,8
	SAN6I	6,16	83,0	11,6	88,4	7,6
	MM6I	6,48	81,7	12,6	87,4	6,9
	MMX6I	6,47	82,1	12,2	87,8	7,2
Cobrimento	REF6C	5,73	82,2	12,9	87,1	6,8
	SAN6C	6,33	81,6	12,9	87,1	6,8
	MM6C	6,81	79,6	14,6	85,4	5,8
	MMX6C	6,52	81,2	13,1	86,9	6,6

Tabela 4.22 - Resultados do ensaio de reconstituição de traço.

Figura 4.22 - Resultados do ensaio de reconstituição de traço.



Observa-se que para o traço REF, as regiões interna e do cobrimento apresentaram a mesma relação agregado/ligante. Para os demais traços, a região do interior apresentou maior relação agregado/ligante, ou seja, na região do interior há a presença de maior quantidade de agregados em relação à quantidade de material ligante.

4.7. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Foram submetidas à microscopia eletrônica de varredura amostras fraturadas provenientes do cobrimento e do interior dos concretos moldados sob a forma de protótipos de viga com relação ag/lig = 0,60, (8 amostras) e duas amostras referentes ao concreto de referência com relação ag/lig = 0,40, perfazendo um total de 10 amostras. A superfície de cada amostra foi varrida em toda extensão visando à identificação das características topográficas e

morfológicas dos compostos provenientes da hidratação dos ligantes e as análises apresentadas são baseadas nessa varredura mais ampla, sendo as imagens contidas nesse trabalho representativas das características globais da amostra. Também, visando contribuir para a identificação dos compostos observados, foram realizadas microanálises qualitativas em pontos localizados por meio do detector de raios X por espectrômetro de dispersão de energia (EDS).

A seguir são analisadas as micrografias e microanálises obtidas para cada tipo de concreto estudado individualmente. As figuras colocadas lado a lado apresentam a mesma ampliação e cada linha da tabela representa uma ampliação diferente, conforme explicitado anteriormente. As ampliações feitas são de aproximadamente 100, 500, 1000 e 5000 vezes, no equipamento, apresentadas respectivamente nas linhas 1, 2, 3 e 4 das tabelas.

4.7.1. Concreto de referência

Na Figura 4.23 estão apresentadas as micrografias referentes ao concreto de referência com relação ag/lig = 0,6 (REF6), por região de análise.



Figura 4.23 - Micrografias do concreto de referência com relação ag/lig = 0,6.


A partir da análise das amostras ao MEV, acredita-se haver um refinamento de poros e uma consequente densificação da matriz cimentícia à medida em que se caminha da borda externa (cobrimento) em direção ao interior do concreto. Esse comportamento fica mais evidenciado quando se compara os concretos de referência em relação às duas relações ag/lig estudadas, a saber 0,4 e 0,6.

Na Figura 4.24 estão apresentadas as micrografias, em mesma ampliação, referentes ao concreto de referência com relação ag/lig = 0,4 (REF4), por região de análise.



Figura 4.24 - Micrografias do concreto de referência com relação ag/lig = 0,4.



É possível observar que os concretos de relação ag/lig 0,4 apresentam uma estrutura da matriz cimentícia menos porosa, mais densa, que os concretos de relação ag/lig 0,6 para todas as regiões de análise, em todo os níveis de ampliação.

4.7.2. Concreto composto com adição de sílica ativa e nanossílica

Nos concretos com incorporação de nanossílica e sílica ativa (SAN6) observou-se que a pasta possivelmente se apresenta mais densa e os poros, consequentemente, menos conectados que no concreto de referência para a mesma relação ag/lig (0,6), além disso, observa-se uma melhoria na zona de transição (ZT) entre a pasta e o agregado (miúdo e graúdo), estando a ZT mais aderida ao agregado no concreto com adição mineral, efeitos já discutidos por diversos pesquisadores, entre eles Kong *et al.* (2012), conforme exemplificado na Figura 4.25.

Figura 4.25 - Comparação da zona de transição do agregado miúdo (AG) para (a) o concreto de referência e (b) o concreto com adição de SA e NS.



(a)

(b)

Também observou-se a formação de gel típico de reação álcali-agregado (RAA), com evidências de instabilidade volumétrica associada ao craqueamento por secagem, conforme apresentado nas micrografias e análises de EDS apresentadas nas Figura 4.26 a 4.28 e discutido por Diamond *et al.* (2004).



Figura 4.26 - Micrografias da borda do cobrimento: estrutura com aparência de gel de RAA.



(b)

Figura 4.27 - Análise de EDS correspondente à Figura 4.26 (a).







Outros pesquisadores também observaram a formação dos géis de sílica, entre eles Kong *et al.* (2012). Segundo Kirby e Lewis (2004), a solução coloidal de nanossílica se transforma em gel, ou "coagula" imediatamente após o contato do cimento com a água, isso é devido ao rápido incremento da força iônica na pasta.

Os autores concluem que não importa o tipo de nanossílica utilizada na formulação de concretos, é o comportamento final, das aglomerações, ao invés do comportamento individual das nanopartículas, que controla o efeito fíler, pozolânico e efeito dispersante na hidratação do cimento e a melhoria da microestrutura.

Na Tabela 4.23 estão apresentadas as micrografias, em mesma ampliação, referentes ao concreto SAN6, por região de análise.



Tabela 4.23 - Micrografias do concreto com adição de sílica ativa e nanossílica com relação ag/lig = 0,6.



Acredita-se que, possivelmente, para os concretos com adição combinada de SA e NS, a região de análise apresentou pouca influência na porosidade da pasta, ou seja, mesmo para a relação ag/lig analisada (0,6), os poros observados são referentes ao ar aprisionado durante o processo de concretagem, conforme pode ser observado na primeira linha da Tabela 4.23.

4.7.3. Concreto com adição de Metacaulim HP MAX

A Tabela 4.24 apresenta as micrografias obtidas, em mesma ampliação, referentes ao concreto MM6, por região de análise.



Tabela 4.24 - Micrografias do concreto com adição de metacaulim HP MAX com relação ag/lig = 0,6.



Foi constatada a presença de etringita no interior de diversos poros do concreto com adição de metacaulim HP MAX, conforme apresentado na Figura 4.29 e confirmado na análise de EDS apresentada na Figura 4.30, na qual constata-se a presença de óxidos de enxofre, alumínio e cálcio.



Figura 4.29 - Presença de etringita no interior dos poros do concreto contendo adição de metacaulim HP MAX.

Figura 4.30 - Análise de EDS correspondente à Figura 4.26 (b).



A presença da etringita mesmo em idades mais avançadas, acima de 91 dias, pode estar relacionada às características químicas e mineralógicas do metacaulim, visto que ele apresenta uma composição teórica₁₂ de 46,5% de sílica, 39,5% de alumina e 14,0% de água combinada (MACKENZIE, 1959; SOUZA SANTOS, 1989; LUZ *et al.*, 2005; TEODORO, 2016).

¹² Calculada pela massa molecular da metacaulinita e seus elementos constituintes.

4.7.4. Concreto composto com adição de Metacaulim HP MAX e Metacaulim HP XW

A Tabela 4.25 apresenta as micrografias obtidas, em mesma ampliação, referentes ao concreto MMX6.

Tabela 4.25 - Micrografias do concreto com adição de metacaulim HP MAX e HP XW com relação ag/lig = 0,6.





Observa-se que a composição de Metacaulins não apresentou grandes melhorias em relação à adição unicamente de Metacaulim HP MAX. Era esperado que a composição MMX fosse mais eficiente em termos do refinamento dos poros do concreto visto que, além do efeito pozolânico, esperava-se contribuir com o efeito fíler, equilibrando as adições de diferentes granulometrias (MM e MX). Entretanto, uma melhoria significativa em relação aos concretos de referência é observada.

4.8. DISCUSSÃO GLOBAL DOS RESULTADOS

A influência da relação água/ligante apresentou-se significativa em todas as propriedades avaliadas. Foram percebidas diferenças substanciais entres os concretos de relação ag/lig igual a 0,60 e 0,40 em todos ensaios executados. Em linhas gerais, os resultados evidenciaram a melhoria gerada nas diversas propriedades do concreto com a redução da relação ag/lig, como decorrência das importantes alterações no sistema de poros do concreto.

No que se refere ao uso de adições minerais pozolânicas no concreto, verificou-se que todas as adições empregadas (SA+NS, MM e MM+MX) alteraram de maneira significativa tanto as propriedades ligadas à durabilidade, quanto as propriedades mecânicas dos concretos estudados. É importante destacar que os efeitos das adições minerais empregadas no presente trabalho foram mais evidenciados nos concretos de relação ag/lig igual a 0,6, o que comprova que o efeito dessa propriedade é mais significativo que o próprio efeito da incorporação de adições.

Em termos das propriedades mecânicas, a contribuição das adições minerais tanto na resistência à compressão quanto no módulo de elasticidade é notável, tendo em vista a capacidade desses materiais em alterar fisicamente a pasta de cimento e, principalmente, em refinarem a estrutura interna dos poros. Ressalta-se que, tanto para os resultados de resistência à compressão, quanto para os resultados de módulo de elasticidade, os concretos MM e MMX apresentaram valores superiores aos demais, seguidos pelo concreto SAN e, por último, pelo concreto REF. Os resultados de resistência à compressão ag/lig, conforme pode ser observado pelo valor do parâmetro F_{calculado}, seguido pelos parâmetros idade e tipo de adição mineral. Já os resultados de módulo de elasticidade são mais influenciados pelo parâmetro tipo de adição mineral, seguido pelos parâmetros idade e reso de adição mineral, seguido pelos parâmetros idade e relação ag/lig.

Quanto aos resultados de absorção de água por imersão, verificou-se que esse método não apresentou sensibilidade para diferenciar os concretos avaliados, como discutido no item 4.3.

O ensaio de absorção por capilaridade evidenciou que a região do cobrimento do concreto comportou-se melhor (absorveu menor quantidade de água) que a região do interior tanto para os CPs prismáticos, quanto para os CPs cilíndricos. Esse mesmo resultado também foi observado por Mendes (2009) e foi comprovado nesta pesquisa por meio do ensaio de reconstituição de traço, no qual a região do cobrimento do concreto apresentou menor relação agregado/ligante, ou seja, a região do cobrimento, por apresentar menor quantidade de agregados em relação à região interna do concreto e, consequentemente, menos zonas de

transição, apresenta menores absortividades, tanto no período de absorção (1), quanto no período de saturação (2).

O tipo de corpo de prova utilizado no ensaio de absorção por capilaridade (cilíndrico ou prismático) mostrou-se significativo na análise de ANOVA, apesar de a amplitude dos valores não se mostrar elevada. Entretanto, é importante destacar-se que o desvio padrão para os CPs cilíndricos normalizados foi muito superior ao desvio padrão dos CPs prismáticos utilizados nesta pesquisa.

O ensaio de permeabilidade ao ar pelo método de Figg mostrou-se sensível para os traços estudados no presente trabalho, entretanto, ressalta-se o caráter artesanal desse ensaio e a elevada variabilidade observada nos resultados. É possível observar-se ainda que existe uma elevada correlação (R² igual a 0,91) entre a permeabilidade ao ar obtida pelo método de Figg e a Resistência à compressão à idade de 91 dias, conforme apresentado na Figura 4.31.





As análises ao microscópio eletrônico de varredura mostraram que há um refinamento da rede de poros quando da redução da relação água/ligante para os concretos de referência. Para os demais concretos, analisados apenas na relação ag/lig igual a 0,6, é provável que a presença de adição mineral tenha gerado um refinamento dos poros, quando comparados com os concretos de referência. É importante salientar que a microscopia eletrônica de varredura não se propõe a avaliar e quantificar o diâmetro dos poros, sendo uma técnica subjetiva de análise da qualidade da matriz cimentícia.

Nos concretos com adição combinada de SA e NS observou-se a formação de gel típico de reação álcali-agregado (RAA), com evidências de instabilidade volumétrica associada ao craqueamento por secagem, oriundo das aglomerações causadas pela má dispersão da nanossílica.

Além disso, nos concretos com adição de metacaulim HP MAX foi constatada a presença de etringita no interior de diversos poros, mesmo as análises tendo sido realizadas com idade superior aos 91 dias. Acredita-se que a formação de etringita possa estar relacionada às características químicas e mineralógicas do metacaulim, visto que ele apresenta sílica e alumina em sua composição, os quais reagem com o gesso do cimento (gipsita), dando origem à etringita.

Para os concretos com adição combinada de Metacaulim HP MAX e Metacaulim HP XW (MMX) observou-se um substancial refinamento dos poros quando comparados ao concreto de referência para a mesma relação água/ligante (0,6), entretanto, nenhum efeito de refinamento de poros superior ao concreto com adição unicamente de Metacaulim HP MAX (MM) foi observado, ao contrário do que era esperado, visto que a combinação de materiais de elevada pozolanicidade e diferentes granulometrias supostamente melhoraria o efeito físico de preenchimento dos poros do concreto, o efeito fíler.

Portanto, fica evidenciada a contribuição das adições minerais empregadas neste programa experimental para a durabilidade do concreto, principalmente no que tange o refinamento dos poros e, consequentemente, as propriedades ligadas aos mecanismos de transporte de massa.

Sob a ótica da tecnologia dos materiais, tanto os concretos com adição de metacaulim HP MAX como os com adição combinada de sílica ativa e nanossílica se apresentaram mais favoráveis à implantação de parques eólicos no que tange às propriedades referentes ao transporte de massa (absorção e permeabilidade).

CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste item são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho de forma geral. São, portanto, apresentadas as conclusões obtidas a partir dos resultados do programa experimental e, por fim, são sugeridos tópicos relacionados a esta pesquisa para trabalhos futuros.

5.1. CONCLUSÕES

A partir do programa experimental desenvolvido nesta pesquisa foi possível concluir:

- todas as adições minerais estudadas proporcionaram significativas alterações na estrutura interna dos concretos, sobretudo alterações físicas na estrutura de poros (redução da porosidade total e refinamento de poros), bem como uma densificação da zona de transição do agregado graúdo;
- a presença de adições minerais proporcionou melhorias significativas nas propriedades mecânicas dos concretos estudados a saber: módulo de elasticidade e resistência à compressão.
- o cobrimento do concreto apresentou melhor comportamento face à absorção por capilaridade quando comparado com a região interna, o que pode estar associado à menor presença de agregados em relação à quantidade de ligante nessa região, reduzindo a quantidade de zonas de transição;
- dentre os parâmetros de desempenho estudados, a permeabilidade ao ar pelo método de Figg e a absorção de água por capilaridade apresentaram resultados facilmente aplicáveis em estudos de implantação de parques eólicos, enquanto que os ensaios de absorção de água por imersão e permeabilidade à água não geraram parâmetros aplicáveis;
- mesmo que as adições minerais proporcionem uma densificação da zona de transição, a presença dela em muito contribui para os mecanismos de transporte no interior do material concreto. Aparentemente, o efeito da presença das ZTs é mais pronunciado

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A presente pesquisa evidenciou alguns aspectos que merecem estudos mais aprofundados, referentes aos mecanismos de transporte no interior do concreto e às metodologias aplicadas, sendo assim, sugere-se para os futuros trabalhos:

- aprofundamento da pesquisa do sistema de poros dos diversos concretos, mediante o emprego das técnicas de porosimetria por intrusão de mercúrio e porosimetria por dessorção de vapor de água, para avaliar principalmente as diferentes regiões do concreto, cobrimento e interior;
- avaliar e quantificar a melhoria causada nos mecanismos de transporte devido à carbonatação (colmatação de poros) do cobrimento;
- avaliar as propriedades dos concretos com adição combinada de MM e MX com outros teores de substituição, preferencialmente baseados na granulometria desses materiais;
- avançar na compreensão da formação de etringita quando do uso do metacaulim HP MAX mesmo em idades superiores a 91 dias;
- avaliar a influência das adições minerais empregadas em outras propriedades associadas à durabilidade das estruturas de concreto, como resistência ao ataque por sulfatos e cloretos, mitigação de reação álcali-agregado, prevenção de formação tardia de etringita;
- avaliar a sensibilidade de outros métodos de caracterização da permeabilidade dos concretos de alto desempenho como, por exemplo, a metodologia CEMBUREAU para o ensaio de permeabilidade ao ar.

REFERÊNCIAS

ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica. **Boletim de dados**: janeiro de 2015. São Paulo, 2015, 7 p. Disponível em: < http://www.abeeolica.org.br/pdf/Boletim-de-Dados-ABEEolica-Janeiro-2015-Publico.pdf >. Acesso em: 20 de maio de 2014.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009. 4p.

ABNT_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015a. 9p.

ABNT_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9p.

ABNT_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto -Especificação. Rio de Janeiro, 2009c. 9p.

ABNT_____. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008a. 7p.

ABNT_____. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003a. 6p.

ABNT_____. **NBR NM 47:** Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002. 23p.

ABNT_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009a. 6p.

ABNT_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009b. 8p.

ABNT_____. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8p.

ABNT_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003b. 6p.

ABNT_____. **NBR 10908:** Aditivos para argamassa e concreto - Ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2008b. 17p.

ABNT_____. **NBR 11578:** Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1997. 5p.

ABNT_____. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012. 3p.

ABNT_____. **NBR 7680:** Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, 2015b. 27p.

ABNT_____. **NBR 10786:** Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de permeabilidade a água. Rio de Janeiro, 2013. 6p.

ABNT_____. NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014a. 6p.

ABNT_____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014b. 238p.

ABNT_____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT: 16 p. 2008c.

AÏSSOUN, B.; KHAYAT, K.; GALLIAS, J. -L. Variations of sorptivity with rheological properties of concrete cover in self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**. v. 113, p. 113-120, 2016.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. 1ªed. São Paulo: Pini, 2000. 667 p. ISBN: 85-7266-123-9.

ALEXANDER, M. G.; MAGEE, B. J. Durability performance of concrete containing condensed silica fume. **Cement and Concrete Research**. V. 29, Issue 6, Pages 917–922, June 1999. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00064-2.

ALGIZAKI, K. K. Pore Structure of Cement-Based Materials: Testing, Interpretation and Requirements. 1 ed. New York: Taylor & Francis, 2006. ISBN: 0-419-22800-4.

AZEVEDO, A. F. F. L. C. Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes. 2002. 487p. Tese (Doutorado) – Universidade do Minho, Portugal, 2002.

ANDRADE, C. Multilevel (four) methodology for durability design. *In*: International RILEM Workshop on Performance evaluation and Indicators for Concrete Durability. **Proceedings...** Madrid, 19-21, mars, 2006.

ASTM INTERNATIONA. **ASTM C469-02**: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. West Conshohocken, PA, 2002. Disponível em: www.astm.org.

BAROCHEL-BOUNY, V.; CUSSIGH, F.; ROUGEAU, P. **Durabilidade dos concretos a** partir da abordagem do desempenho. *In*: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. **Durabilidade do** concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. CASCUDO, O; CARASEK, H. (Ed. Trad.). 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 615 p. ISBN: 978-85-98576-22-0.

BAI, J.; WILD, S. Investigation of the temperature change and heat evolution of mortar incorporating PFA and metakaolin. **Cement and Concrete Composites**, 2002, v. 24, p. 201-209.

BADOGIANNIS, E.; TSIVILIS, S. Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete. **Cement and Concrete Composites**. V. 31, p. 128-133, 2009.

BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D. J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. **Construction and Building Materials**. v. 15, n. 2-3, p. 93-103, 2001.

BAUER, E. Avaliação da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas.1995. 236 p. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

BENTZ, D. P.; GARBOCZI, E. J. Percolation of phases in a three-dimensional cement paste miscrostuctural model. **Cement and Concrete Research**, 1991, vol. 21, p. 325-344.

BERGNA, H. E. **Colloid Chemistry of Silica**: An Overview. *In*: BERGNA, H. E.; ROBERTS, W. O. (Ed.). **Colloidal Silica**: Fundamentals and Applications. Surfactant Science Series, V. 131. Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 0-8247-0967-5.

BIER, T. Influence of type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hardened cement pastes. **MRS Symposium Proceedings**, vol.85, pp. 123-134, 1997.

BOURDETTE, B.; RINGOT, E.; OLLIVIER, J. P. Modelling of the Transition Zone Porosity. **Cement and Concrete Research**, 1995, vol.25, p. 741-751.

BRAUN, V. Influência das condições de moldagem e cura nas características do cobrimento de diversos concretos. 2003. 203 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

CALDARONE, M. A.; GRUBER, K. A.; BURG, R. G. High-reactivity Metakaolin: a new generation mineral admixture. **Concrete International**, v. 16, n. 11, p. 37-40, 1994.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto:** inspeção e técnicas eletroquímicas. Coedição, Goiânia: Editora UFG/ São Paulo: PINI, 1997. 237 p.

CASTRO, A. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação**. 2003. 215p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

CATHER, R.; FIGG, J. W.; MARSDEN, A. F.; O'BRIEN, T. P. Improvements to the Figg method for determining the air permeability of concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 36, n. 129, p. 241245, 1984.

CERQUEIRA, G. A. *et al.* **A Crise Hídrica e suas Consequências**. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, abril/2015 (Boletim do Legislativo nº 27, de 2015). Disponível em: www.senado.leg.br/estudos. Acesso em 12 de setembro de 2016.

CHASTRE, C; LÚCIO, V. Evolução histórica, desenvolvimento atual e potencial futuro das torres de concreto pré-moldado para suporte de aerogeradores. **Concreto e Construções**, São Paulo: IBRACON, v.75, p. 24-34, 2014. ISSN: 1809-7197.

CLAISSE, P. A., CABRERA, J. G.; HUNT, D.N. Measurement of porosity as a predictor of the performance of concrete with and without Silica Fume. Advances in Cement Research, 2001. v. 13 (4): 165-174.

CONCRETO E CONSTRUÇÕES, São Paulo: IBRACON, 2014. ISSN: 1809-7197 (impresso).

COUTO, P. A. B. Influência das condições de cura nas características do cobrimento de diferentes concretos. Goiânia, 2003. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas de concreto de alta resistência com adições de microssílica**. 1994. 286 p. Tese (Doutorado em engenharia civil), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

DAL MOLIN, D.C.C. Adições Minerais para Concreto Estrutural. *In*: ISAIA, G. C. (Ed.) Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. v.1. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 12, p. 345-379.

DAL MOLIN, D.C.C. **Adições Minerais**. *In*: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto**: Ciência e Tecnologia. v.1. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 8, p. 261-309.

DIAMOND, S. **Physical and chemical characteristics of cement composites**. *In*: PAGE, C. L. (Ed.); PAGE, M. M. (Ed.). **Durability of concrete and cement composites**. 1 ed. USA: Woodhead Publishing Limited, 2007. 404 p.

DIAMOND, S.; SAHU, S.; THAULOW, N. Reaction products of densified silica fume agglomerates in concrete. **Cement and concrete research**. v. 34, p. 1625 - 1632. 2004.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **BEN – Balanço Energético Nacional 2014**: Ano base 2013. Rio de Janeiro, 2014, 288 p. Disponível em < https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf>. Acesso em 05 de maio de 2015.

FEITOSA, C. A. G. Avaliação da sensibilidade do ensaio de penetração de água sob pressão e de um índice de permeabilidade para o concreto. Goiânia, 2000. 79 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, 2000.

FERREIRA, R. B. Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de Armaduras Induzidas por Cloretos. 2003. 244 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

FIGG, J. W. Methods of measuring the air and water permeability of concrete. **Magazine of Concrete Research**, (S.1.), v. 15, n.85, p. 213-219, 1973.

FURQIM, P. R.V. Estudo Estatístico de Produção de Concretos com Adições Minerais. Universidade Federal de Santa Maria (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil -Materiais de Construção). Santa Maria, 2006. 208 p.

GANESH, P.; MURTHY, A. R.; KUMAR, S. S.; REHEMAN, M. M. S.; IYER, N. R. Effect of nanosilica on durability and mechanical properties of high-strength concrete. **Magazine of Concrete Research**. v. 68, n. 5, p. 229-236, 2016.

GESOĞLU, M.; GÜNEYISI, E.; ÖZTURAN, T.; MERMERDAŞ, K. Permeability properties of concretes with high reactivity metakaolin and calcined impure kaolin. **Materials and Structures**. 2014, 47, Issue 4, p. 709-728. DOI: 10.1617/s11527-013-0090-9.

GHAFARI, E.; COSTA, H.; JÚLIO, E.; PORTUGAL, A.; DURÃES, L. The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete. **Materials and Design**, v. 59, p. 1-9, 2014.

GLEIZE, P. J. P. Nanociência e Nanotecnologia dos Materiais Cimentícios. *In*: ISAIA, G. C. (Ed.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: IBRACON, n. 2, p. 1871 – 1884, 2011.

GONÇALVES, J. P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial**. 2005. 292 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; KARAOĞLU, S.; MERMERDAŞ, K. Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 120-130, 2012.

GWEC; GREENPEACE, 2014 - Global Wind Energy Council e Greenpeace. **Global Wind Energy Outlook/2014**. Brussels, Netherlands, october 2014, 60 p. Disponível em: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/10/GWEO2014_WEB.pdf>. Acesso em: 29 de outubro de 2014.

HALL, C. Water absortpion of mortars and concretes: a review. **Magazine of Concrete Research**, V. 41, N^o 147, p. 51-61. 1989.

HASSAN, K. E., CABRERA, J. G., MALIEHE, R. S. The effect of mineral admixture on the properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, p. 267-271, 2000.

HOLLY, J; HAMPTON, D.; THOMAS, M. D. A. Modelling relationships between permeability and cement paste pore microstructures. **Cement Concrete Research**. v. 23, p. 1317-1330, 1993.

HUSSAIN, S. T.; SASTRY, K. V. S. G. K. Study of strength properties of concrete by using micro silica and nano silica. **International Journal of Research in Engineering and Technology**. V. 3, Issue 1, 2014.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Fifth Assessment Synthesis Report**: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of

Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 p., 2014.

ISFAHANI, F. T.; REDAELLI, E.; LOLLINI, F.; LI, W.; BERTOLINI, L. Effects of Nanosilica on Compressive Strength and Durability Properties of Concrete with Different Water to Binder Ratios. Advances in Materials Science and Engineering. v. 2016, Article ID 8453567, 16 pages, 2016.

JO, B.; KIM, C. H.; TAE, G. H.; PARK, J. B. Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1351-1355, 2007.

KHANZADI, M.; TADAYON, M.; SEPEHRI, H.; SEPEHRI, M. Influence of nano-silica particles on mechanical properties and permeability of concrete. *In*: ZACHAR, J.; CLAISSE, P.; NAIK, T. R.; GANJIAN, E. (Ed.). Second Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2010. **Proceedings...** Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy, 2010.

KIRBY, G. H.; LEWIS, J. A. Comb Polymer Architecture Effects on the Rheological Property Evolution of Concentrated Cement Suspensions. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 87, n. 9, p.1643-1652, 2004.

KOLLEK, J. J. The determination of the permeability of concrete to oxygen by the CEMBUREAU Method – a recommendation. **Materials and Structures**. 1989, 22, p. 225-230.

KONG, D.; DU, X.; WEI, S.; ZHANG, H.; YANG, Y.; SHAH, S. P. Influence of nano-silica agglomeration on microstructure and properties of the hardened cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 707-715, 2012.

KONTOLEONTOS, F.; TSAKIRIDIS, P. E.; MARINOS, A.; KALOIDAS, V.; KATSIOTI, M. Influence of colloidal nanosilica on ultrafine cement hydration: Physicochemical and microstructural characterization. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 347-360, 2012.

KREIJGER, P. C. Skin of concrete: composition and properties, **Mater. Constr.** v. 17, p. 275 - 283, 1984.

KUMAR, A., ROY, D. M. Pore structure and ionic diffusion in admixture blended Portland cement system. *In*: **Proceedings of the 8th International Conference on the Chemistry of Cement**. 1986, V. 5, Rio de Janeiro, p. 73-79.

LARA, P. L. O. **Análise da relação entre propriedades de transporte de água e os mecanismos de corrosão das armaduras**. 2003. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2003.

LI, Z.; DING, Z. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. **Cement and Concrete Research**, 2003, vol. 33, Issue 4, p. 579-584.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Especificação 413. Lisboa, 1993.

LOPES, A. N. M. **Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura**. 2011. 281 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

LULA, E. Preço baixo do aço chinês preocupa indústria nacional. **Brasil Econômico**, São Paulo, março de 2013. Disponível em: http://brasileconomico.ig.com.br/ultimas-

163

noticias/preco-baixo-do-aco-chines-preocupa-industria-nacional_130147.html>. Acesso em 19 de novembro de 2014.

LUZ, A. B.; CAMPOS, A. R.; CARVALHO, E. A.; BERTOLINO, L. C. Caulim. *In*: LUZ, A. B. e LINS, F. A. F. (Ed.). **Rochas e Minerais Industriais**: Usos e Especificações. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2005. p.231-262.

MACKENZIE, R. The classification and nomenclature of clay minerals. **Clay Minerals Bulletin**. v. 4, n. 21, p. 52-66, 1959.

MADANI, H.; BAGHERI, A.; PARHIZKAR T. The pozzolanic reactivity of monodispersed nanosilica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, 2012, v. 42, p.1563-70.

MALHOTRA, V. M. Aplicações inovadoras de superplastificantes para produção de concreto de alto desempenho. **Revista Téchne**. GOY, L.; CAMPOS, P. E. F. C. (Trad.), n. 36, p.36-43, 1998.

MARDANI-AGHABAGLOU, A.; SEZER, G. I.; RAMYAR, K. Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. **Construction and Building Materials**. v. 70, p. 17-25, 2014.

MARTYS, N. S., FERRARIS, C. F. Capillary transport in mortars and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 5, p. 747-760, 1997.

MASSAZZA, F. Pozzolanic Cements. Cement and Concrete Composites. v. 15. p. 185-214, 1993.

MEHTA, P. K. Pozzolanic and cementitious by-products in concrete – Another look. *In*: MALHOTRA, V. M. (Ed.) International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, 3rd, Trondheim, 1989. **Proceedings**... Detroit: American Concrete Institute, 1989, v. 1, p. 1-44.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. HASPARYK, N. P. (Ed. Trad.). 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p. ISBN: 978-85-98576-21-3.

MEHTA, P. K.; AÏTCIN, P. C. **Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high strength concrete**. *In*: HESTER, W. (Ed.) International Conference on Utilization of High Strenght Concrete, 2nd, 1990, Berkeley. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1990. p. 265-287 (SP-121).

MELO, E. A. S. Investimentos em energia eólica no Brasil: aspectos de inserção, tecnologia e competitividade. **Concreto e Construções**, São Paulo: IBRACON, v.75, p. 74-77, 2014. ISSN: 1809-7197.

MENDES, M. V. A. R. **Avaliação das propriedades de transporte de massa em concretos contendo adições minerais**. 2009. 201 p. Dissertação (mestrado em construção civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

MENDIZABAL, R. L. Realizações do concreto no setor eólico. **Concreto e Construções**, São Paulo: IBRACON, v 75, p. 42-48, 2014. ISSN: 1809-7197.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. CREMONINI, R. A. (Trad.). 5. ed., Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

NGALA, V. T. Effect of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. **Cement Concrete Research**. v. 27, p. 995 -1007, 1997.

OLIVEIRA, A. M. **Avaliação do desempenho de concretos com adições minerais quanto à corrosão das armaduras induzida por cloretos**. 2007. 255 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007. OLLIVIER, J. P.; TORRENTI, J. M. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. *In*: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. CASCUDO, O; CARASEK, H. (Ed. Trad.). 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 615 p. ISBN: 978-85-98576-22-0.

OLLIVIER, J. P.; TORRENTI, J. M.; CARCASSÈS, M. **Physical Properties of concrete and concrete constituents**. 1 ed. EUA: John Wiley & sons, 2012, 332 p. ISBN: 978-1-84821-330-2.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Volume útil dos principais reservatórios**. Brasil, 2015. Disponível em: http://www.ons.org.br/historico/percentual_volume_util.aspx.

PAIVA, H.; VELOSA, A.; CACHIM, P.; FERREIRA, V. M. Effect of metakaolin dispersion on the fresh and hardened state properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 607-612, 2012.

PHUNG, Q. T.; MAES, N.; JACQUES, D.; BRUNEEL, E.; VAN DRIESSCHE, I.; YE, G.; DE SCHUTTER, G. Effect of limestone fillers on microstructure and permeability due to carbonation of cement pastes under controlled CO₂ pressure conditions. **Construction and Building Materials**. v. 82, p. 376-390, 2015.

PORTAL BRASIL, 2015. **BNDES investe quase R\$ 7 bilhões em energia eólica**. Disponível em: http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2015/01/bndes-investe-quase-r-7-bilhoes-em-geracao-de-energia-eolica-no-brasil-em-2014>. Acesso em 06 de maio de 2015.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Pore size distribution of high performance metakaolin concrete. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed**. March, V. 17, Issue 1, 2002, p. 42-46.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. **Construction and Building Materials**. 20 (2006) 858–865. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2005.07.001.

POURJAVADI, A.; FAKOORPOOR, S. M.; KHALOO, A.; HOSSEINI, P. Improving the performance of cement-based composites containing superabsorbent polymers by utilization of nano-SiO₂ particles. **Materials and Desing**, v. 42, p. 94-101, 2012.

PUENTES, J.; BARLUENGA, G.; PALOMAR, I. Effect of silica-based nano and micro additions on SCC at early age and on hardened porosity and permeability. **Construction and Building Materials**. v. 81, p. 154-161, 2015.

QUERCIA, G.; SPIESZ, P.; HÜSKEN, G.; BROUWERS, H. J. H. SCC modification by use of amorphous nano-silica. **Cement and Concrete Composites**. v. 45, p. 69-81, 2014.

RAMEZANIANPOUR, A. A., MALHOTRA, V. M. Effect of curing on the compressive strength, resistance to cloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. **Cement and Concrete Composites**, V. 17, p. 125-133, 1995.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 6, p. 441-454, 2001.

SAID, A. M.; ZEIDAN, M. S.; BASSUONI, M. T.; TIAN, Y. Properties of concrete incorporating nano-silica. **Construction and Building Materials**. v. 36, p. 838-844, 2012.

SENFF, L.; HOTZA, D.; REPETTE, W. L.; FERREIRA, V. M.; LABRINCHA, J. A. Effect of nanosilica and microsilica on microstructure and hardened properties of cement pastes and mortars. **Advances in Applied Ceramics**, 2010 V. 109 n. 2. p. 104-110.

SENSALE, G. R.; DAL MOLIN, D. C. C. Estudio sobre la influência de la incorporación de puzolanas altamente reactivas en las propriedades del hormigon. *In*: V Congresso

IBEROAMERICANO de Patologia das Construções e VII Congresso de Controle de Qualidade, 1., Montevideo, 1999. **Anais**... Montevideo, 1999. p. 433-441.

SHEKARCHI, M.; BONAKDAR, A.; BAKHSHI, M.; MIRDAMADI, B.; MOBASHER, B. Transport Properties in metakaolin blended concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2217-223, 2010.

SILVA, E. F. Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. 332 p.

SILVA, M. G. Cimentos Portland com Adições Minerais. *In*: ISAIA, G. C. (org.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2 ed. Vol. 1. São Paulo: IBRACON. 2010. 862 p. ISBN: 978-85-98576-14-5.

SINGH, L. P.; BHATTACHARYYA, S. K.; AHALAWAT, S. Preparation of Size Controlled Silica Nano Particles and Its Functional Role in Cementitious System. **Journal of Advanced Concrete Technology**. 2012, V. 10 N. 11 p. 345-352. DOI: 10.3151/jact.10.345.

SLANIČKA, Š. The influence of condensed silica fume on the concrete strength. **Cement** and **Concrete Research**. v. 21, p. 462-470, 1991.

SOBOLEV, K.; GUTIÉRREZ, M. F. How Nanotechnology Can Change the Concrete World. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 84, n. 10, p.16-19.

SOUZA, P. S. D. L. Verificação da Influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SOUZA SANTOS, P. Propriedades das Argilas: Notas de aula do curso realizado pelo professor Ralph E. Grim. **Cerâmica**, v. 9, n. 35, p. 18-43, 1963.

SRIVASTAVA, V.; KUMAR, R., AGARWAL, V. C., MEHTA P. K. Effect of silica fume and metakaolin combination on concrete. **International journal of civil and structural engineering.** v. 2, n. 3, 2012. ISSN: 0976-4399. DOI:10.6088/ijcser.00202030017.

TEODORO, R. **Avaliação das características de diferentes metacaulins e sua influência na estrutura interna do concreto e em propriedades ligadas à durabilidade**. 2016. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016a.

TEODORO, R.; CASCUDO, O.; CARASEK, H. Avaliação da durabilidade do concreto com diferentes tipos de metacaulim. *In*: 2° encontro luso-brasileiro de degradação de estruturas de betão. **Anais...** Laboratório Nacional de Engenharia Civil: Lisboa, 2016b.

TEODORO, R.; CASCUDO, O.; CARASEK, H. Influência das características de diferentes tipos de metacaulim em propriedades mecânicas e absorção de água do concreto. *In*: 58° Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** IBRACON: Belo Horizonte, 2016.

TOBÓN, J. I.; PAYÁ, J.; RESTREPO, O. J. Study of durability of Portland cement mortars blended with silica nanoparticles. **Construction and Building Materials**. v. 80, p. 92-97, 2015.

TÜRKMEN, İ; GAVGALI, M. GÜL, R. Influence of mineral admixtures on the mechanical properties and corrosion of steel embedded in high strength concrete. **Materials Letters**. V. 57, Issues 13–14, April 2003, p. 2037–2043.

VALIPOUR, M.; PARGAR, F.; SHEKARCHI, M.; KHANI, S. Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristic of concrete: A laboratory study. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 879-888, 2013.

WILD, S.; KHATIB, J. M.; JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 10, p. 1537-1544, 1996.

ZAHEDI, M; RAMEZANIANPOUR, A. A.; RAMEZANIANPOUR, A. M. Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 354, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.045.

APÊNDICES

Relação ag/lig	Adição Mineral	ldade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)	
		3	25,3				
		3	25,7	26,0	0,95	3,63	
		3	27,1				
		7	28,4				
		7	29,9	29,9	1,54	5,14	
0,6	REF	7	31,5				
		28	32,0				
		28	35,2	34,9	2,76	7,91	
		28	37,5				
		91	41,0		0.07	o 1=	
		91	41,1	41,1	0,07	0,17	
	REF	3	38,1		1,53		
		3	39,6	39,6		3,9	
		3	41,2				
		7	42,1		3,92		
		7	46,0	46,0		8,5	
		7	49,9				
0,4		28	46,6				
		28	48,3	49,9	4,27	8,6	
		28	54,7				
		91	65,3		3,23	4,7	
		91	67,8	68,3			
		91	71,7				
		3	21,6				
		3	22,0	22,4	1,12	4,97	
		3	23,7				
		7	24,8		2,83		
		7	26,9	27,4		10,34	
0,6	SA+SN	7	30,4				
		28	40,1	40.0	0.07	0.40	
		28	40,2	40,2	0,07	0,18	
		91	41,4				
		91	48,4	46,4	4,32	9,33	
		91	49,3				

Tabela A1 - Valores de resistência à compressão por amostra, média, desvio padrão e coeficiente de variação.

		3	44,1		0,59	1,3	
		3	45,0	44,8			
		3	45,2				
		7	43,9				
		7	47,3	48,3	4,92	10,2	
0.4		7	53,6				
0,4	SA+SIN	28	60,5			2,1	
		28	62,1	61,9	1,31		
		28	63,1				
		91	63,5				
		91	69,7	68,3	4,32	6,3	
		91	71,8				
		3	25,4				
		3	25,6	25,6	0,25	0,98	
		3	25,9				
		7	33,8			5,15	
		7	36,9	35,9	1,85		
0,6	MM	7	37,1				
		28	35,6	27.4	2 47	6,63	
		28	39,1	57,4	2,47		
		91	45,0	47,2	2,71		
		91	46,3			5,74	
		91	50,2				
	MM	3	36,7	41,4	4,60	11,12	
		3	41,5				
		3	45,9				
		7	62,1	64,0			
		7	62,9		2,69	4,19	
0,4		7	67,1				
		28	65,5	65.6	0.14	0.22	
		28	65,7	03,0	0,14	0,22	
		91	61,7		3,08	4,72	
		91	66,4	65,2			
		91	67,5				
		3	24,1	24.2	0.07	0.29	
		3	24,2	24,2	0,07	0,29	
		7	36,6	36.6	0.00	0.00	
		7	36,6	00,0	0,00	0,00	
0.6		28	28,1				
0,6		28	38,3	36,0	7,00	19,5	
		28	41,5				
		91	39,6				
		91	42,7	43,6	4,57	10,5	
		91	48,6				

0.4	MM+MX	3	34,7		3,10	8,2	
		3	37,9	37,8			
		3	40,9				
		7	51,5	55,1	3,11		
		7	56,5			5,6	
		7	57,2				
0,4		28	57,7	58,6	0,86	1,5	
		28	58,8				
		28	59,4				
		91	55,1	61,2	7,17	11,7	
		91	59,4				
		91	69,1				

Tabela A2 - Valores de módulo de elasticidade por amostra, média, desvio padrão e coeficiente de variação

Relação ag/lig	Adição Mineral	ldade (dias)	Módulo de elasticidade (GPa)	Média do módulo de Desvio elasticidade padrão (GPa)		Coeficiente de variação (%)	
		3	21,1	21.1	0.00	0.0	
		3	21,1	21,1	0,00	0,0	
		7	27,7	27.7	0.00	0,0	
		7	27,7	21,1	0,00		
0,6	REF	28	29,8		0,56	1,9	
		28	30,1	30,2			
		28	30,9				
		91	42,3	12.1	1 56	3,6	
		91	44,5	43,4	1,50		
		3	27,5	27.5	0.00	0,0	
		3	27,5	27,5	0,00		
		7	30,3	20.2	0.00	0,0	
		7	30,3	30,3	0,00		
0,4	REF	28	41,3	40.7	1.09	4.6	
		28	44,1	42,7	1,90	4,0	
		91	41,7			8,8	
		91	44,7	45,3	3,99		
		91	49,6				

					-		
		3	30,6			5,2	
		3	33,3	32,5	1,69		
		3	33,7				
		7	32,1				
		7	35,9	34,9	2,49	7,1	
		7	36,8				
0,6	SA+NS	28	37,2				
		28	37,7	37,5	0,29	0,8	
		28	37,7				
		91	36,2				
		91	37,5	38,1	2,32	6,1	
		91	40,7				
		3	38,0		0,47	1,2	
	SA+NS	3	38,7	38,5			
		3	38,9				
		7	39,4	40,5			
		7	40,9		1,00	2,5	
0.4		7	41,3				
0,4		28	45,3	48,0			
		28	49,3		2,37	4,9	
		28	49,5				
		91	42,7	45,5	2,91		
		91	45,2			6,4	
		91	48,5				
		3	30,4	31,1	0,66	2,1	
		3	31,2				
		3	31,7				
		7	40,8				
		7	44,0	43,8	2,91	6,6	
0.0	N 4N 4	7	46,6				
0,6	IVIIVI	28	40,9				
		28	43,9	43,9	3,00	6,8	
		28	46,9				
		91	41,2		3,74		
		91	42,7	44,1		8,5	
		91	48,3				

	MM	3	42,1				
		3	42,9	43,0	1,01	2,3	
		3	44,1				
		7	44,6			2,1	
		7	45,4	45,5	0,95		
0,4		7	46,5				
		28	45,3			3,3	
		28	47,3	47,0	1,53		
		28	48,3				
		91	47,9	10.0	0.14	0.2	
		91	48,1	48,0	0,14	0,3	
		3	34,4	25.5	4.40	4,2	
	MM+MX	3	36,5	30,0	1,48		
		7	43,2	44,4	1,77		
		7	43,5			4,0	
		7	46,4				
0,6		28	44,8	46,1	1,35		
		28	46,0			2,9	
		28	47,5				
		91	36,5	36,9	0,75		
		91	36,5			2,0	
		91	37,8				
		3	37,7			5,1	
		3	39,2	39,5	2,02		
		3	41,7				
		7	45,7				
0,4		7	46,0	47,1	2,23	4,7	
	MM+MX	7	49,7				
		28	45,8	47,3			
		28	46,7		1,93	4,1	
		28	49,5				
		91	39,0	39,0	0.06	0.2	
		91	39,1		0,00	0,∠	

	Resultados em %																							
A second stars	Р	erda ao	Fogo		R.I.				Traço															
Amostra	PF	Média	Desvio Padrão	RI	Média	Desvio Padrão	Ligante	Agregado	(1 : X)															
REF6C - A	6,0			81,3																				
REF6C - B	5,3	5,7	0,4	83,0	82,2	0,8	12,9	87,1	6,8															
REF6C - C	6,0			82,1																				
REF6I - A	6,4			82,0																				
REF6I - B	6,0	6,2	0,2	81,3	81,8	0,4	12,9	87,1	6,8															
REF6I - C	6,1			82,0																				
SAN6C - A	6,46			80,8																				
SAN6C - B	6,49	6,33	6,33	0,25	82,5	81,6	0,9	12,9	87,1	6,8														
SAN6C - C	6,04			81,6																				
SAN6I - A	6,37	6,16		82,6																				
SAN6I - B	6,10		0 6,16	10 6,16	10 6,16	0,18	83,7	83,0	0,6	11,6	88,4	7,7												
SAN6I - C	6,02			82,7																				
MMX6C - A	7,0			81,2																				
MMX6C - B	6,0	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5 0,5	81,9	81,2	0,7	13,1	86,9	6,6
MMX6C - C	6,5			80,6																				
MMX6I - A	6,7			81,4																				
MMX6I - B	6,7	6,5	0,4	81,2	82,1	1,5	12,2	87,8	7,2															
MMX6I - C	6,0			83,9	3,9																			
MM6C - A	6,70			80,0																				
MM6C - B	7,09	6,81	0,25	78,1	79,6	1,3	14,6	85,4	5,8															
MM6C - C	6,63			80,5																				
MM6I - A	6,63			81,7																				
MM6I - B	6,53	6,48	0,18	82,1	81,7	0,4	12,6	87,4	6,9															
MM6I - C	6,28			81,4																				

Tabela A3 - Valores individuais para o ensaio de reconstituição de traço.