

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

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DO METACAULIM NAS PROPRIEDADES DO  
CONCRETO EM CONTATO COM ATMOSFERAS AGRESSIVAS DO  
TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO**

Autor: Cristiano Martins Quintão

Orientadora: Professora Dra. Cristiane Machado Parisi Jonov

Coorientadora: Professora Dra. Maria Teresa Paulino Aguiar

Belo Horizonte

julho / 2018

Cristiano Martins Quintão

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DO METACAULIM NAS PROPRIEDADES DO  
CONCRETO EM CONTATO COM ATMOSFERAS AGRESSIVAS EM  
ESTRUTURAS DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO**

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

Orientadora: Profa. Dra. Cristiane Machado Parisi Jonov

Coorientadora: Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilár

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2018

Cristiano Martins Quintão

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DO METACAULIM NAS PROPRIEDADES DO  
CONCRETO EM CONTATO COM ATMOSFERAS AGRESSIVAS EM  
ESTRUTURAS DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 25 de julho de 2018.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Cristiane Machado Parisi Jonov  
Orientadora - UFMG/DEMC

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Maria Teresa Paulino Aguilár  
Coorientadora - UFMG/DEMC

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Adriana Guerra Gumieri  
UFMG/DEMC

---

Prof. Dr. Raphael Tobias de Vasconcelos Barros  
UFMG/DESA

---

Eng.<sup>o</sup> Mestre Fabrício Carlos França  
Assessoria Técnica - LafargeHolcim

Dedico este trabalho a Deus, a minha esposa Michelle pelo amor e apoio, à minha filha Ana Laura, ao meu pai Paulo e minha querida mãe Ana Maris, em memória.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos que já recebi e irei receber nesta minha caminhada.

A minha esposa, Michelle, pelo amor, apoio e dedicação e à minha filha Ana Laura.

Aos meus pais, Paulo e Ana Maris (em memória), que me deram toda a formação familiar e do meu caráter, para que eu conseguisse vencer mais esta etapa.

A Professora Dra. Cristiane pela orientação, amizade, incentivo e interesse em ajudar para a realização desta conquista.

A Prof. Dra. Maria Teresa pela coorientação, pelas suas sugestões e ensinamentos, pelo apoio prestado na utilização do laboratório para realização de ensaios, disponibilização para apoio pelos seus alunos orientados, pelo amor e interesse à pesquisa e ao conhecimento da engenharia.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Construção Civil da UFMG com quem tive a satisfação de ter aula, que contribuíram para meu aprendizado, Prof. Dra. Adriana Gumieri, Prof. Dr. Adriano, Prof. Dr. Aldo, Profa. Dra. Augusta, Profa. Dra. Danielle, Prof. Dr. Eduardo Chahud, Prof. Dr. José Márcio Calixto, Prof. Dr. Luiz Antônio, Prof. Dr. Manuel, Profa. Dra. Sidnea, assim como apoio do Willian e Ariela, da Secretaria do Departamento.

Ao técnico de laboratório do DEMC, Eng.º Msc. Ricardo, pelo interesse e apoio na realização de ensaios.

À estudante de Doutorado da Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Dayana Cristina Silva Garcia, pela amizade e apoio na realização de ensaios e interpretação de resultados.

Aos gerentes, Eng.<sup>a</sup> Maria Cristina Schembri e Eng.<sup>o</sup> Marcio Brant da COPASA pelo incentivo à realização de mestrado, ao diretor técnico Alex Moura pelo interesse à pesquisa, superintendente David Bichara por autorizar a realização da pesquisa, ao gerente de macro operação Geraldo pelo apoio na fabricação de suportes, ao Eng.<sup>o</sup> Olendino da ETE Onça, bem como todos os colegas profissionais que contribuíram para realização da pesquisa.

A empresa LafargeHolcim do Brasil, em Pedro Leopoldo, pelo importante apoio e patrocínio dado a esta pesquisa, colocando sua infraestrutura à disposição, pela doação dos materiais utilizados na pesquisa, ensaios de caracterização, estudo de dosagem, elaboração de concreto e realização de ensaios do concreto no estado fresco e endurecido. Em especial ao Eng.<sup>o</sup> Msc. Fabrício Carlos França, assessoria técnica da LafargeHolcim, pela amizade, interesse e apoio à pesquisa, contribuindo com sua experiência e expertise e à equipe de laboratório, Jean e Flávio, que me ajudaram na realização de diversas atividades.

A Metacaulim do Brasil S. A., pela doação do metacaulim utilizado neste trabalho de pesquisa, disponibilizado pelo Engenheiro Doutor, Guilherme Gallo.

Agradeço ao engenheiro doutor Rodrigo Moyses Costa, Ultralab Engenharia, pela amizade e pelo apoio na realização de ensaios de ultrassonografia.

Agradeço ao Engenheiro Marcelo Fonseca Araújo, LABCON, pelo apoio na realização de corte dos corpos de prova para avaliação da frente de carbonatação.

Agradeço a todos que colaboraram direta ou indiretamente para que este projeto acadêmico-profissional se realizasse.

“Viva como se fosse  
morrer amanhã.  
Aprenda como se fosse  
viver para sempre.”

Mahatma Gandhi

## RESUMO

As estruturas de concreto utilizadas nas estações de tratamento anaeróbico de esgoto no Brasil estão apresentando redução da vida útil em relação à projetada, devido à deterioração provocada pelo biogás produzido nessas instalações. Tal biogás é composto principalmente por metano, gás carbônico e íons sulfato. Diante da necessidade de otimizar a durabilidade dos concretos usados nas estações de tratamento de esgoto e de utilizar materiais cimentícios suplementares para a produção de concretos mais eficientes e sustentáveis, foi estudado o metacaulim em substituição parcial ao cimento. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência do metacaulim de alta reatividade nas propriedades de resistência e durabilidade do concreto. A pesquisa foi de característica experimental e aplicada. Um concreto de referência foi dosado e moldado para atender requisitos de durabilidade conforme norma NBR 6118:2014 e com consistência do concreto bombeável com *Slump* de  $120 \pm 20$  mm. Foram estudadas outras duas dosagens com substituição parcial de cimento por metacaulim, mantendo os mesmos parâmetros de dosagens. Foram realizadas comparações das propriedades no estado fresco e no estado endurecido. Foram realizados ensaios de propriedades mecânicas e de avaliação da durabilidade, para estudo comparativo dos diferentes concretos em condições antes e após serem submetidos a exposição ao biogás, para avaliação e entendimento das alterações de propriedades do concreto. Os corpos de prova foram expostos por meio de suportes metálicos nos pontos de inspeção e coleta de biogás em um reator da Estação de Tratamento de Esgoto Onça da COPASA, no município de Santa Luzia - MG. Os resultados indicaram que a incorporação de metacaulim melhora propriedades de resistência mecânica e de durabilidade do concreto. Contudo, a incorporação de metacaulim ao concreto promoveu o aumento da frente de carbonatação, proporcionalmente aos teores de substituição nas amostras estudadas. Os resultados permitem concluir que o emprego de metacaulim na dosagem de concretos é tecnicamente viável na produção de concretos com maior desempenho e durabilidade. Para avaliar a agressividade no concreto exposto ao biogás, faz-se necessário maior período de exposição para melhores avaliações da agressividade do ambiente.

Palavras-chave: Concreto, metacaulim, biogás, durabilidade.



## ABSTRACT

The concrete structures used in anaerobic sewage treatment plants in Brazil are showing a reduction in the useful life in relation to the projected one, due to the deterioration provoked by the biogas produced in these facilities. Such biogas is composed mainly of methane, carbon dioxide and sulfate ions. Faced the need to optimize the durability of concrete used in sewage treatment plants and to use supplementary cementitious materials for the production of more efficient and sustainable concrete, metacaolim was studied in partial replacement with cement. The objective of this research was to evaluate the influence of high reactivity metakaolin on the strength and durability properties of concrete. The research had an experimental and applied character. A reference concrete was dosed and shaped to meet durability requirements in accordance with NBR 6118:2014 and with the consistency of the pumpable slump  $120 \pm 20$  mm. Two other dosages with partial replacement of cement by metakaolin were studied, maintaining the same dosage parameters. A comparison of the properties in the fresh state and in the hardened state were carried out. Mechanical properties and durability evaluation tests were carried out to compare the different concretes in conditions before and after being submitted to biogas, for evaluation and understanding of the changes in concrete properties. The specimens were exposed using metal supports at the inspection and biogas collection points in a reactor at the COPASA Sewage Treatment Plant, in the municipality of Santa Luzia - MG. The results indicated that the incorporation of metakaolin improves mechanical strength and durability properties of the concrete. However, the incorporation of metakaolin to the concrete promoted the increase of the carbonation front, in proportion to the substitution levels in the studied samples. The results allow to conclude that the use of metakaolin in concrete dosage is technically feasible in the production of concrete with higher performance and durability. In order to evaluate the aggressiveness of the concrete exposed to the biogas, a longer period of exposure is necessary to better evaluate the aggressiveness of the environment.

Keywords: Concrete, metakaolin, biogas, durability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Consumo de cimento no Brasil. ....	6
Figura 3.2 - Consumo de cimento no Brasil. ....	6
Figura 3.3 – a) Diagrama Ternário de Materiais Cimentícios (CaO- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SiO <sub>2</sub> ). ....	15
Figura 3.4 - Variação da absorção de água por imersão, aos 28 dias de cura úmida, para 8% de adição em substituição ao cimento. ....	17
Figura 3.5 - Variação do índice de vazios, aos 28 dias de cura úmida, para 8% de adição em substituição ao cimento. ....	18
Figura 3.6 - Rotas Metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia, com redução de sulfato. ....	19
Figura 3.7 - Balanço esquemático de DQO nos sistemas aeróbios e anaeróbios. ....	20
Figura 3.8 - Desenho esquemático de um reator UASB. ....	21
Figura 3.9 - Causas físicas da deterioração do concreto. ....	28
Figura 3.10 -Tipo de reações químicas responsáveis pela deterioração do concreto. ....	30
Figura 3.11 - Enfoque holístico para expansão e fissuração por formação de etringita tardia. ....	36
Figura 3.12 - Representação esquemática do ciclo do enxofre em redes de esgotos com os quatro passos envolvidos na biodeterioração de materiais cimentícios. ....	40
Figura 3.13 – Corrosão de tudo de esgoto por sulfeto de hidrogênio. ....	41
Figura 3.14 - Representação esquemática do ataque biogás ao concreto .....	42
Figura 3.15 - Esquema do Digestor Anaeróbio. ....	42
Figura 3.16 - Esquema da biodeterioração induzida do concreto na fase sólido líquido de um digestor anaeróbio. ....	43
Figura 3.17 - Mecanismos de danos induzidos por microbiologia na fase gasosa do fermentador. ....	44
Figura 3.18 - Seções transversal de um concreto da parede de um silo. ....	45
Figura 3.19 - Observações do MEV da superfície de pasta de cimento ordinário colonizado com um biofilme microbiológico, após 4 semanas de exposição a resíduos sólidos sobre processo de decomposição anaeróbia. ....	46
Figura 3.20 - Curva Típica obtida em um calorímetro semi-adiabático. ....	48
Figura 3.21 - Curvas Tensão-deformação típicas para o concreto. ....	52

Figura 3.22 - Métodos de propagação e recepção de pulsos ultrassônicos: a) transmissão direta; b) transmissão semidireta e c) transmissão indireta ou superficial.....	56
Figura 3.23 - Croqui esquemático do Método Uniaxial de dois pontos. ....	58
Figura 3.24 - Croqui esquemático Método de Quatro-pontos (Sonda Wenner). ...	59
Figura 4.1- Fluxograma Esquemático dos Experimentos.....	62
Figura 4.2 - Cimento CP V ARI RS utilizado na pesquisa.....	64
Figura 4.3 – Embalagem do metacaulim utilizado e aspecto visual.....	65
Figura 4.4 - Materiais devidamente medidos em massa, para a mistura, 2017. ...	69
Figura 4.5 - Avaliação visual da mistura do concreto em fase de homogeneização, 2017.....	70
Figura 4.6 - Medição da temperatura do concreto homogeneizado, 2017. ....	71
Figura 4.7 - Equipamento do ensaio de calorimetria e amostras preparadas. ....	72
Figura 4.8 - Equipamento para leitura do teor de ar incorporado, 2017.....	73
Figura 4.9 - Verificação do <i>Slump</i> do concreto, 2017. ....	73
Figura 4.10 - Moldagem de corpos de prova prismáticos, 2017.....	74
Figura 4.11 - Moldagem de corpos de prova cilíndricos, 2017.....	76
Figura 4.12 - Moldagem dos corpos de prova para ensaio de abrasão, 2017. ....	76
Figura 4.13 - Câmara úmida, 2017. ....	77
Figura 4.14 - Foto Aérea da ETE Onça.....	78
Figura 4.15 - Detalhe Corte Seção Transversal do Reator. ....	78
Figura 4.16 - Projeto dispositivo de suporte.....	79
Figura 4.17 - Suportes com os corpos de prova posicionados sobre os pontos de inspeção e coleta do biogás, previamente à sua instalação, 2017. ....	80
Figura 4.18 - Instalação do dispositivo de suporte, 2017.....	80
Figura 4.19 - Prensa utilizada e corpo de prova equipado com LVDT's, 2017. ....	82
Figura 4.20 - Corpos de Prova antes e após realização dos ensaios, 2017. ....	83
Figura 4.21 - Dispositivo auxiliar para realização do ensaio de tração na flexão, 2017.....	84
Figura 4.22 - Ensaio de ultrassom com equipamento Pundit Lab (+) da PROCEQ. ....	85
Figura 4.23 - Secagem em estufa de corpos de prova. ....	86
Figura 4.24 - Condicionamento corpos de prova, pós secagem em estufa, 2017.	87

Figura 4.25 - Determinação da massa do corpo de prova imerso em água, utilizando balança hidrostática, 2017. ....	88
Figura 4.26 - Equipamento de carbonatação acelerada do DEMC, 2018. ....	89
Figura 4.27 - Fotografia da seção de corpo-de-prova com 8% de metacaulim, após realização do ensaio de carbonatação acelerada. ....	90
Figura 4.28 - Medidas da frente de carbonatação, utilizando o Auto CAD. ....	91
Figura 4.29 - Esquema de circuito elétrico para medição da condutibilidade elétrica usado neste trabalho. ....	93
Figura 4.30 - Esquema do equipamento Amsler. ....	94
Figura 4.31 - Ensaio de resistência à abrasão. ....	95
Figura 5.1 – Fotografia das areias natural de cava e artificial de gnaise, 2017. ....	97
Figura 5.2 - Curva granulométrica da areia artificial. ....	97
Figura 5.3 - Curva granulométrica da areia natural grossa. ....	98
Figura 5.4 - Curva granulométrica da brita 0. ....	99
Figura 5.5 - Curva granulométrica da brita 1. ....	99
Figura 5.6 - Aspectos visuais das brita 0 e 1 de calcário. ....	100
Figura 5.7 - Resultado ensaio de Calorimetria utilizando aditivo e diferentes teores de metacaulim. ....	101
Figura 5.8 - Resistência à compressão dos concretos em cura úmida e exposto ao biogás. ....	104
Figura 5.9 - Módulo de elasticidade dos concreto em função do teor de substituição do cimento por metacaulim. ....	107
Figura 5.10 - Ensaio de ultrassonografia - concreto referencial. ....	115
Figura 5.11 - Ensaio de ultrassonografia - concreto 4% metacaulim. ....	116
Figura 5.12 - Ensaio de ultrassonografia - concreto 8% de metacaulim. ....	116
Figura 5.13 - Curvas de secagem dos CPs na idade de 28 dias para realização de ensaio de absorção. ....	118
Figura 5.14 - Comparativo entre os resultados de absorção das dosagens de concreto estudadas. ....	120
Figura 5.15 - Comparativo entre os resultados de índice de vazios para as dosagens de concreto estudadas. ....	121
Figura 5.16 - Gráfico ox Plot com valores de frente de carbonatação para as três dosagens estudadas. ....	124

Figura 5.17 - Corpos de prova sendo retirado do reator aos 295 dias de idade, 2018.....	125
Figura 5.18 - Leitura da frente de carbonatação após aplicação de solução de fenolftaleína, 2018. a) parte interna; b) parte externa .....	126
Figura 5.19 - Superfície inferior da laje de cobertura de um reator agredida por biogás, 2016.....	127
Figura 5.20 - Superfície agredida por biogás, 2016. ....	127
Figura 5.21 - Comparativo entre os resultados de resistividade elétrica para as dosagens de concreto estudadas. ....	128
Figura 5.22 - Resultado do ensaio de desgaste por abrasão, referente à perda de massas em % dos CPs das 3 dosagens estudadas, para 500m e 1000m. ....	131
Figura 5.23 - Resultado do ensaio de desgaste por abrasão, referente ao desgaste em mm dos CPs das 3 dosagens estudadas, para 500m e 1000m. ...	132

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Limites aproximados da composição de óxidos do cimento Portland 8	
Tabela 3.2 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa).....	12
Tabela 3.3 - Faixas de variação das concentrações de sulfato e sulfeto para afluentes e efluentes dos reatores UASB tratando esgotos domésticos.....	22
Tabela 3.4 - Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos.....	22
Tabela 3.5 - Dados de indicadores operacionais ETE Onça.....	23
Tabela 3.6 - Classes de Agressividade Ambiental.....	24
Tabela 3.7 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.....	25
Tabela 3.8 - Algumas substâncias severamente agressivas ao concreto.....	29
Tabela 3.9- Classificação de Severidade dos Sulfatos.....	33
Tabela 3.10 - Classes de consistência do concreto.....	49
Tabela 3.11 - Qualidade do concreto em função da velocidade do pulso ultrassônico.....	55
Tabela 3.12 - Critérios de avaliação da atividade de corrosão em termos de resistividade do concreto.....	60
Tabela 3.13 - Recomendações do CEB-192 para estimar a provável taxa de corrosão baseada na resistividade do concreto.....	60
Tabela 4.1 – Características físicas do Cimento CP V ARI RS.....	64
Tabela 4.2 - Características químicas do cimento CP V ARI RS.....	64
Tabela 4.3 - Características físicas do Metacaulim HP Ultra.....	65
Tabela 4.4 - Características químicas do Metacaulim HP Ultra.....	65
Tabela 4.5 - Características do Aditivo.....	66
Tabela 4.6 - Composição Química do biogás.....	67
Tabela 4.7 - Requisitos das diferentes dosagens de concreto.....	68
Tabela 4.8 - Diferentes dosagens das pastas.....	72
Tabela 4.9- Matriz de ensaios no concreto.....	75
Tabela 5.1 - Caracterização dos Agregados Miúdos.....	96
Tabela 5.2 - Caracterização dos agregados graúdos.....	98
Tabela 5.3 – Proporcionamento dos materiais constituintes dos concretos estudados.....	100

Tabela 5.4 - Dosagem em massa, por m <sup>3</sup> de concreto. ....	100
Tabela 5.5 - <i>Slump</i> e teor de ar incorporado dos concretos estudados. ....	103
Tabela 5.6 - Resistência à compressão dos concretos. ....	103
Tabela 5.7 - Relação de resistência $f_{c28}/f_{c7}$ . ....	106
Tabela 5.8 - Módulo de elasticidade do concreto de referência. ....	106
Tabela 5.9 - Módulo de elasticidade do concreto com 4% de metacaulim. ....	107
Tabela 5.10 - Módulo de elasticidade do concreto com 8% de metacaulim. ....	107
Tabela 5.11 - Comparativo módulo de elast. medido vs. calculado- concreto de referência. ....	110
Tabela 5.12 - Comparativo módulo de elasticidade medido vs. calculado - concreto com 4% de metacaulim. ....	110
Tabela 5.13 - Comparativo módulo de elasticidade medido vs. calculado - concreto com 8% de metacaulim. ....	110
Tabela 5.14 - Resistência à tração na flexão. ....	111
Tabela 5.15- Razões entre resist. à tração calculado x obtido em ensaio aos 28 dias. ....	113
Tabela 5.16 - Resultados de ensaios de ultrassom. ....	114
Tabela 5.17 - Preparo dos CPs na estufa para ensaios de absorção de água – 28 dias. ....	117
Tabela 5.18 - Resumo preparo CPs na estufa para ensaios de absorção de água - 295 dias (cura úmida). ....	118
Tabela 5.19 - Resumo do preparo de CPs na Estufa para ensaios de absorção de água - 295 dias (biogás). ....	119
Tabela 5.20 - Preparo dos CP's na estufa para ensaios de carbonatação acelerada. ....	119
Tabela 5.21 - Resultados médios do ensaio de absorção por imersão, para as diferentes dosagens estudadas. ....	120
Tabela 5.22 - Resultados médios do índice de vazios para as diferentes dosagens estudadas. ....	121
Tabela 5.23 - Resultados Estatísticos de frente de carbonatação para as dosagens estudadas. ....	123
Tabela 5.24 - Resistividade Elétrica dos concretos estudados. ....	128
Tabela 5.25 - Leituras iniciais, após 500m e 1000m - dosagem referencial. ....	130

Tabela 5.26 - Leituras iniciais, após 500m e 1000m - Dosagem 4% metacaulim. .....	130
Tabela 5.27 - Leituras iniciais, após 500m e 1000m - Dosagem 8% metacaulim. .....	131
Tabela 5.28 - Resultado do desgaste médio.....	131



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
- a/agl. – relação água/aglomerantes (cimento + matecaulim), em massa
- a/c – relação água/cimento
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AFm – componentes químicos variáveis mas estruturalmente similares ao monossulfato hidratado.
- ASTM – *American Society for Testing and Materials* (USA)
- CEB – Comité Euro-International du Béton
- CP – corpo de prova
- CP's – corpos de prova
- CP V ARI RS – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos
- DEMC – Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Civil
- DQO – Demanda Química de Oxigênio
- E – módulo de elasticidade
- ETA – Estação de Tratamento de Água
- ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
- $f_c$  – resistência à compressão
- $f_{ck}$  – resistência à compressão característica do concreto
- $f_{cj}$  – resistência à compressão na idade de j dias
- LVDT - Linear Variable Differential Transformer
- MPa – MegaPascal
- NBR – Norma Brasileira Registrada
- PAC – Programa de Aceleração do Crescimento
- SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
- UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais
- UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

## LISTA DE SÍMBOLOS

- Óxidos relacionados à química dos cimentos:

A –  $\text{Al}_2\text{O}_3$

H –  $\text{H}_2\text{O}$

M -  $\text{MgO}$

C -  $\text{CaO}$

K –  $\text{K}_2\text{O}$

S –  $\text{SiO}_2$

F –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

Na –  $\text{Na}_2\text{O}$

$\bar{\text{S}}$  –  $\text{SO}_3$

- Compostos do clínquer de cimento Portland:

$\text{C}_3\text{A}$  -  $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  - Aluminato tricálcico

$\text{C}_2\text{S}$  –  $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  – Silicato dicálcio ou bicálcico

$\text{C}_3\text{S}$  –  $3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  – Silicato tricálcio ou tricálcico

$\text{C}_4\text{AF}$  -  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  – Ferroaluminato tetracalcico

- Principais compostos de hidratação do clínquer:

CH -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – Hidróxido de cálcio ou Portlandita

C-S-H –  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  - Silicato de Cálcio Hidratado

$\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$  -  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  – Trissulfoaluminato de calcio hidratado ou Etringita

$\text{C}_4\text{A}\bar{\text{S}}\text{H}_{18}$  -  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  – Monosulfoaluminato de calcio hidratado ou Monossulfato

$\text{CaCO}_3$  – Carbonato de cálcio ou calcita

$\text{CaO}$  – Óxido de cálcio

$\mu$  - micro

$\rho$  – densidade do material

$\sigma$  - tensão

## SUMÁRIO

RESUMO .....	viii
ABSTRACT .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xviii
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 OBJETIVO .....	4
2.1 Objetivos específicos .....	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 Concreto .....	5
3.2 Materiais constituintes do concreto .....	7
3.2.1 Cimento.....	7
3.2.2 Adições minerais.....	12
3.3 Caracterização do processo anaeróbio de tratamento .....	18
3.3.1 Sulfato nos esgotos.....	21
3.4 Durabilidade das Estruturas de Concreto .....	23
3.4.1 Definição .....	23
3.4.2 Água como agente de deterioração .....	25
3.4.3 Permeabilidade .....	25
3.4.4 Classificação das causas da deterioração do concreto .....	27
3.4.5 Deterioração do concreto por reações físicas.....	27
3.4.6 Deterioração do concreto por reações químicas.....	28
3.4.7 Carbonatação do concreto .....	36

3.4.8	Mecanismos de deterioração de materiais cimentícios expostos ao biogás	39
3.5	Ensaio de propriedades do cimento e concreto	46
3.5.1	Ensaio do cimento	46
3.5.2	Ensaio do concreto no estado fresco	48
3.5.3	Ensaio mecânico no concreto no estado endurecido	49
3.5.4	Ensaio relativo à durabilidade do concreto no estado endurecido	53
4	MATERIAIS E MÉTODOS	61
4.1	Materiais utilizados	63
4.2	Caracterização dos materiais	63
4.2.1	Cimento Portland	63
4.2.2	Pozolana metacaulim	64
4.2.3	Agregados	65
4.2.4	Água potável tratada	66
4.2.5	Aditivo redutor de água	66
4.3	Composição do biogás	66
4.4	Dosagem do concreto	67
4.4.1	Sequência de mistura na betoneira	69
4.5	Ensaio de caracterização das pastas	71
4.6	Caracterização física dos concretos no estado fresco	72
4.6.1	Ensaio de ar incorporado	72
4.6.2	Ensaio de abatimento de tronco de cone	73
4.7	Moldagem e cura dos corpos de prova	74
4.8	Local de exposição dos corpos de prova ao biogás	77
4.9	Dispositivos de suporte de corpos de prova	79
4.10	Propriedades mecânicas dos concretos no estado endurecido	81

4.10.1	Ensaio de resistência à compressão axial e medição do módulo de elasticidade .....	81
4.10.2	Ensaio de resistência à tração na flexão.....	84
4.10.3	Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica .....	84
4.11	Ensaio de durabilidade do concreto.....	85
4.11.1	Pré-condicionamento dos CP's para os ensaios de absorção de água e carbonatação acelerada.....	85
4.11.2	Absorção de água no concreto .....	87
4.11.3	Ensaio de carbonatação acelerada.....	89
4.11.4	Medida da frente de carbonatação em corpos de prova expostos ao biogás – teste de fenolftaleína .....	91
4.11.5	Medição da resistividade elétrica .....	92
4.11.6	Medição da resistência à abrasão.....	94
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	96
5.1	Caracterização dos agregados.....	96
5.2	Dosagem do concreto.....	100
5.3	Caracterização da pasta.....	101
5.4	Caracterização do concreto no estado fresco .....	102
5.5	Caracterização mecânica do concreto.....	103
5.5.1	Resultado dos ensaios de resistência à compressão axial .....	103
5.5.2	Resultado dos ensaios de módulo de elasticidade .....	106
5.5.3	Comparativo dos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade obtidos em laboratório com o calculado por norma.....	109
5.5.4	Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão.....	111
5.5.5	Comparativo dos resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão obtidos com calculados .....	112
5.5.6	Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica .....	113
5.6	Caracterização de durabilidade do concreto .....	117

5.6.1	Pré-condicionamento dos corpos de prova para os ensaios de durabilidade.....	117
5.6.2	Absorção de água no concreto .....	120
5.6.3	Deterioração dos concretos por carbonatação acelerada.....	122
5.6.4	Deterioração dos concretos por exposição ao biogás.....	125
5.6.5	Resultado do ensaio de resistividade elétrica .....	127
5.6.6	Ensaio de desgaste superficial do concreto .....	130
6	CONCLUSÃO .....	134
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	137
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	138

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado na construção civil no Brasil e no mundo, com aplicações em obras residências, industriais e de infraestrutura. Dentre os fatores que propiciam seu uso pode-se citar sua versatilidade, durabilidade, custo e resistência à água. De acordo com Mehta e Monteiro (2014) a versatilidade do concreto se deve à variedade de formas e tamanhos com que os elementos estruturais de concreto podem ser obtidos. A capacidade do concreto em resistir a ação da água o torna ideal para construção de estruturas para controle, armazenamento e transporte de água, como barragens, canais, bem como de elementos estruturais expostos à umidade, como diferentes elementos de fundações e superestruturas. Além disso, os principais componentes para a produção do concreto são relativamente baratos e encontrados em todos os lugares do mundo.

As estruturas de concreto de unidades operacionais de empresas de saneamento, por exemplo: reservatórios, Estações de Tratamento de Água (ETA's), Estações de Tratamento de Esgoto (ETE's), etc., são em sua maioria, construídas em concreto armado que necessitam ser estanques e passam constantemente por processos de degradação física, química e biológica.

Durante anos, o critério profissional para projetar estruturas de concreto levava em consideração apenas a resistência à compressão do concreto, o que resultou numa degradação das estruturas. Conseqüentemente, surgiu a necessidade de definir novos parâmetros de dimensionamento e controle, para garantir seu desempenho. Nos últimos anos, além da preocupação com a resistência do concreto, tem-se dado atenção especial à durabilidade do concreto, no que diz respeito à vida útil para qual a estrutura foi projetada sem alterar sua forma original, sua qualidade e seu desempenho quando exposta ao meio ambiente.

Muitas estruturas de concreto aplicadas no tratamento de esgoto no Brasil estão apresentando redução da vida útil em relação à projetada, completando um ciclo de pouco mais de uma década de uso e operação. A interação dessas

construções com o meio ambiente favoreceu o aparecimento de diversos tipos de manifestações patológicas que vieram a comprometer o desempenho e a integridade física dessas estruturas. Isso acontece, pois, por se tratar de uma prática relativamente recente na engenharia Brasileira, onde existem incertezas sobre o comportamento das estruturas expostas aos ambientes com esgoto.

Existem diversos processos de tratamento de esgotos domésticos, sendo consideravelmente empregados no Brasil reatores de manta de lodo, ou UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), uma tecnologia de tratamento biológico de esgotos, baseada na decomposição anaeróbia da matéria orgânica, gerando uma grande quantidade de gases, conhecido por biogás. As estruturas de ETE's construídas em concreto armado estão sujeitas a essa atmosfera bastante agressiva, onde a atuação conjunta de diversos mecanismos de envelhecimento e deterioração resultam na desagregação dos concretos e levam à redução de sua vida útil, para os quais essas estruturas foram projetadas. Daí a importância de implementar medidas que diminuam a permeabilidade e a conectividade de poros dos concretos, com conseqüente redução do potencial deletério dos agentes agressivos. Diante da necessidade de otimizar a durabilidade dos concretos usados nas ETE's e de usar materiais cimentícios suplementares para a produção de concretos mais eficientes e sustentáveis, nessa pesquisa foi estudado o metacaulim em substituição parcial ao cimento.

A utilização do metacaulim como adição ao concreto foi escolhida em função de menor custo comparado a outras adições e da combinação de efeitos físicos e químicos (pozolanicidade) na microestrutura do concreto, proporcionando benefícios de propriedades de resistência mecânica e de durabilidade. Segundo Lothenbach *et. al.* (2011), o uso de materiais cimentícios suplementares leva a redução de emissões de CO<sub>2</sub>, por tonelada de materiais cimentícios, uma vez que sua fabricação consome muito menos energia comparado aos processos de clínquerização.

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência do metacaulim de alta reatividade nas propriedades de resistência mecânica e durabilidade do concreto aplicado em reatores UASB. Em função da agressividade dos gases emanados



pelo esgoto, há a necessidade da substituição frequente ou reabilitação de tubulações danificadas, poços de visita, estações elevatórias, ETE's. Esses processos de reabilitação envolvem altos custos anuais, sendo que o custo de manutenção aumenta à medida que as estruturas envelhecem. Neste contexto este trabalho se propõe a estudar as características do concreto aplicado a estas estruturas, para que haja melhoria no desempenho, aumento da durabilidade das estruturas e diminuição dos gastos referentes à reabilitação. Além disso, observa-se a presença de gases nos processos de tratamento aeróbios e ao longo nas redes de coleta e transporte de esgotos, com constituições gasosas específicas e com diferentes níveis de ataque, que não farão parte desse estudo.

## **2 OBJETIVO**

Avaliar a influência da substituição parcial em massa do cimento Portland por metacaulim de alta reatividade, nas propriedades dos concretos no estado fresco, bem como avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos no estado endurecido, expostos ao biogás gerado no tratamento anaeróbio de esgoto.

### **2.1 Objetivos específicos**

Para alcançar o objetivo geral, será necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver a dosagem experimental dos concretos, com e sem adição de metacaulim, em atendimento aos requisitos da classe de agressividade ambiental definidos pela norma NBR 6118:2014 e NBR 12655:2015;
- Desenvolver dispositivo para exposição dos corpos de prova de concreto ao biogás de um reator tipo UASB;
- Verificar a influência da substituição parcial do cimento Portland pelo metacaulim nas propriedades do concreto no estado fresco, nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto no estado endurecido para corpos de prova;
- Avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos estudados expostos ao biogás, em relação ao concreto curado em câmara úmida.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feita uma revisão da literatura técnica dos temas mais relevantes para a pesquisa proposta, sendo estudados: concreto, cimentos, metacaulim, processo do tratamento anaeróbio do esgoto, os critérios de durabilidade do concreto e alguns ensaios sobre propriedades dos concretos.

#### 3.1 Concreto

A demanda de cimento está diretamente vinculada ao desempenho da construção civil e do comportamento econômico. Pelo gráfico da Figura 3.1 do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2015), observam-se informações sobre consumo absoluto e per capita do cimento no Brasil e per capita no Mundo, desde os anos 70, bem como diversas questões macroeconômicas vivenciadas em nosso país. Podem-se identificar três principais ciclos econômicos que influenciaram o consumo de cimento: ciclo do milagre econômico com grande expansão da atividade da construção civil e grandes obras de infraestrutura realizadas pelo governo até 1980; período de estagnação durante os anos 80; e retomada do crescimento a partir da criação do plano Real em 1994, principalmente a partir de 2004, com melhora do ambiente macroeconômico e programas do governo, como “Minha Casa Minha Vida” e o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) (SNIC, 2015).

As vendas internas de cimento no país sofreram uma nova queda em 2016. Com uma retração de mais 11,7% em relação a 2015, a queda acumulada nos dois últimos anos atingiu 19,25%, já que no bom momento de 2014 o volume vendido do produto chegou a 70,9 milhões de toneladas, com um consumo recorde de 71,7 milhões de toneladas no ano da copa. No ano de 2016, com os péssimos resultados mensais, o volume comercializado despencou e a queda no consumo do produto aproximou dos resultados alcançados em 2009. Ou seja, um recuo de quase sete anos no consumo de cimento no país, conforme gráfico da Figura 3.2 (CIMENTO.ORG, 2016).

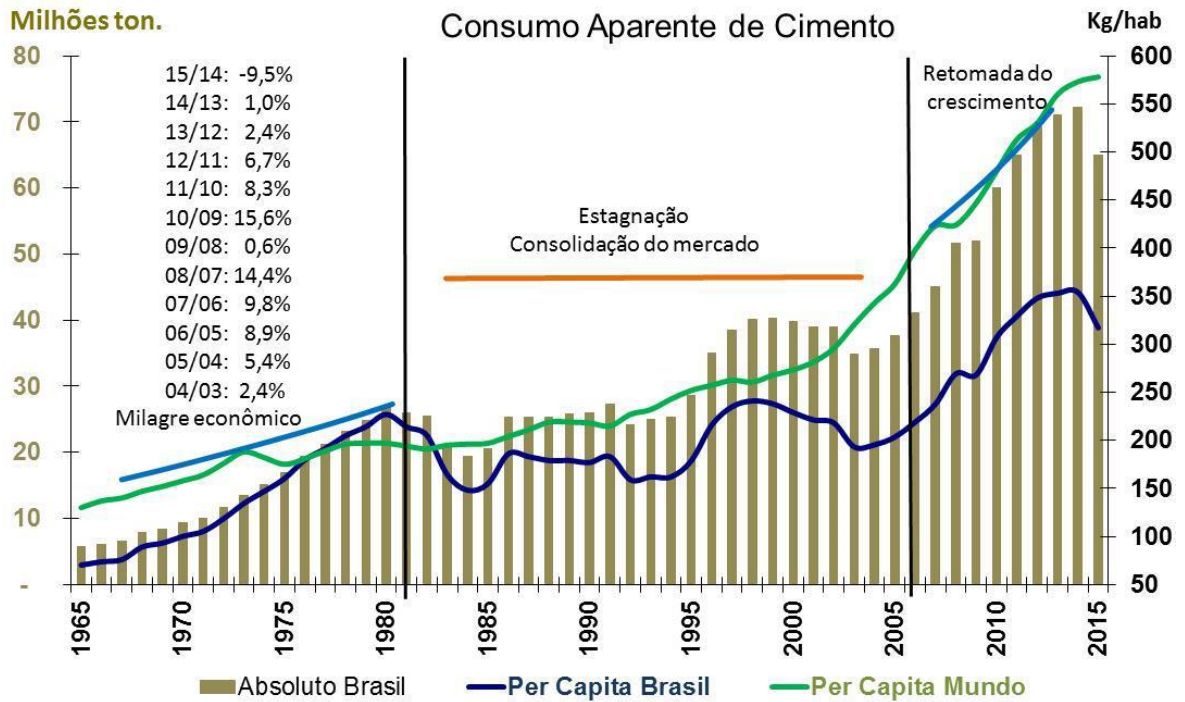


Figura 3.1 – Consumo de cimento no Brasil.  
 Fonte: SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2015.

## Consumo de Cimento no Brasil (em 1000 Ton)

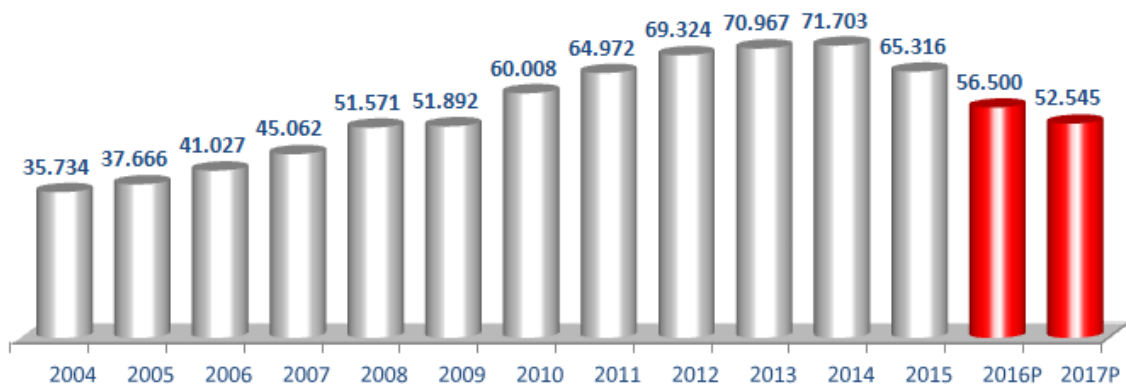


Figura 3.2 - Consumo de cimento no Brasil.  
 Fonte: Cimento.org, 2016.

O concreto hidráulico é o material mais utilizado na construção, obtido pela mistura entre um aglomerante, agregados e água. Quando recém-misturado, o concreto deve apresentar plasticidade para sua fabricação, transporte e lançamento. À medida que as reações químicas acontecem, o concreto adquire

coesão e resistência mecânica, pelas reações químicas de hidratação do aglomerante (PETRUCCI, 1998).

O concreto é um material compósito, que pode ser dividido em três fases: a primeira é chamada de pasta ou matriz e é composta por cimento e água; a segunda é a argamassa, composta pela adição do agregado miúdo à pasta ou matriz e a terceira é a adição do agregado graúdo à argamassa formando, por fim, o concreto (PETRUCCI, 1998).

### **3.2 Materiais constituintes do concreto**

Para o estudo da durabilidade do concreto e de suas propriedades físicas e mecânicas, é importante o conhecimento de seus materiais constituintes, em especial dos aglomerantes, cimento Portland e nesse estudo dando ênfase ao metacaulim, que influenciam no comportamento do concreto.

#### *3.2.1 Cimento*

Cimento Portland é o nome dado ao material obtido pela mistura de calcário, argila ou outros materiais silicosos, que possuam uma pequena quantidade de alumina e óxido de ferro e pela adição de pequenas quantidades de gesso (sulfato de cálcio). O processo de produção consiste em moer as matérias-primas cruas até obter um pó bastante fino, misturá-los em proporções predeterminadas e queimá-los em um forno rotativo a uma temperatura próxima dos 1400°C, formando o clínquer. Este material após resfriado recebe determinada quantidade de gipsita (sulfato de cálcio), para prevenir a pega instantânea do cimento, sendo moído novamente até em resultar em um pó fino, que é o cimento Portland (NEVILLE e BROOKS, 2013).

#### *Química básica do cimento*

Os componentes do cimento Portland se dividem entre aqueles que seriam os principais à sua composição, como o CaO e SiO<sub>2</sub>, seguidos por Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e

aqueles que estão presentes em menores proporções, conforme mostradas na Tabela 3.1 (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Tabela 3.1 – Limites aproximados da composição de óxidos do cimento Portland

Óxido	Nome	Teor (%)
CaO	Cal	60 - 67
SiO <sub>2</sub>	Sílica	17 - 25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina	3 - 8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Ferro	0,5 - 6,0
MgO	Magnésia	0,1 - 4,0
Na <sub>2</sub> O / K <sub>2</sub> O	Álcalis	0,2 - 1,3
SO <sub>3</sub>	Anidro sulfúrico	1 - 3

Fonte: NEVILLE e BROOKS, 2013.

No processo de fabricação do cimento ocorrem combinações químicas entre os componentes anteriormente relacionados, que conduzem à formação dos principais produtos de hidratação do cimento, que são os silicatos tricálcico e dicálcico (C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S), aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A), ferroaluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF), além do MgO e pequena quantidade de cal livre. A nomenclatura utilizada na química do cimento é dada por abreviações, simplificada, descrevendo cada óxido por uma letra, sendo: CaO = C; SiO<sub>2</sub> = S; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = A e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = F e H<sub>2</sub>O = H (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Os silicatos C<sub>3</sub>S (3CaO.SiO<sub>2</sub>) e C<sub>2</sub>S (2CaO.SiO<sub>2</sub>) são os compostos responsáveis pela resistência mecânica da pasta de cimento hidratada e assume-se, na prática, que o C<sub>3</sub>S contribui principalmente para o desenvolvimento da resistência durante as quatro primeiras semanas, enquanto o C<sub>2</sub>S influencia no ganho de resistência posterior. Em relação ao C<sub>3</sub>A (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), este contribui pouco, ou praticamente nada, para a resistência do cimento, exceto nas primeiras idades (até 28 dias). Na pasta endurecida o C<sub>3</sub>A é suscetível ao ataque de sulfatos, com a formação de produtos expansivos, podendo causar a degradação do concreto e, apesar disso, seu uso é necessário, pois é benéfico à produção do cimento, pois facilita a combinação do óxido de cálcio com a sílica. O C<sub>4</sub>AF (4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) está presente em pequenas quantidades no cimento e sua presença pode acelerar a hidratação dos silicatos (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Conforme Petrucci (1998), nos cimentos brasileiros, os teores médios dos compostos são os seguintes:

$C_3S$  – 42 a 60%

$C_2S$  – 14 a 35%

$C_3A$  – 6 a 13 %

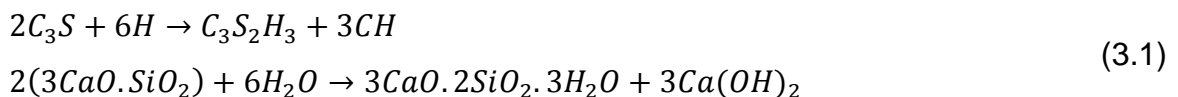
$C_4AF$  – 5 a 10%

### *Hidratação do cimento, calor de hidratação e resistência mecânica*

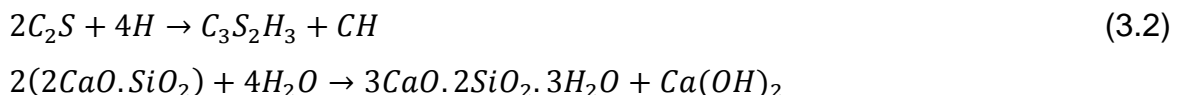
As reações de hidratação do cimento com a água formam compostos hidratados, que com o passar do tempo, formam a pasta de cimento endurecida (NEVILLE e BROOKS, 2013). Conforme Petrucci (1998) a hidratação do cimento consiste na transformação de compostos anidros mais solúveis em compostos hidratados menos solúveis.

O  $C_3S$  “impuro” é conhecido como alita e o  $C_2S$  “impuro” como belita. As reações de hidratação do  $C_3S$  e  $C_2S$  são exotérmicas, escritas a seguir, conforme formulação adotada no meio técnico e formulação detalhada (NEVILLE e BROOKS, 2013; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

- Reação de Hidratação do  $C_3S$



- Reação de Hidratação do  $C_2S$



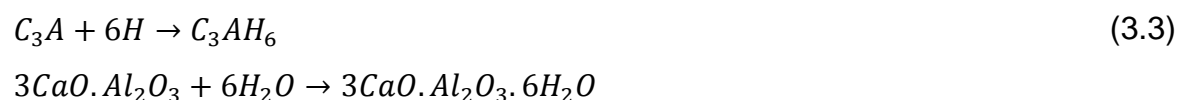
Os dois silicatos de cálcio ( $C_3S$  e  $C_2S$ ) são os principais compostos do cimento e são responsáveis pela resistência mecânica das pastas endurecidas. A hidratação do  $C_3S$  se processa mais rapidamente que a hidratação do  $C_2S$  e com maior calor de hidratação. Os produtos de hidratação são o composto hidratado  $C_3S_2H_3$ ,

descritos como C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e também CH (hidróxido de cálcio), conhecido como Portlandita (NEVILLE e BROOKS, 2013). Petrucci (1998) comenta que, dos compostos resultantes da hidratação do cimento, a Portlandita é o único solúvel em água, e que esta solubilidade é uma das principais causas de degradação da pasta de concreto.

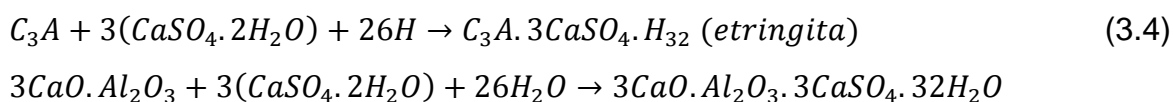
Cálculos estequiométricos mostram que o  $C_3S$  quando hidratado, produz 61% de  $C_3S_2H_3$  e 39% de CH, ao passo que o sob as mesmas condições de hidratação o  $C_2S$  produz 82% de  $C_3S_2H_3$  e 18% de CH. O  $C_2S$  por gerar proporcionalmente mais C-S-H do que o  $C_3S$  apresenta resistência final superior e maior durabilidade por formar menor quantidade de Portlandita. O C-S-H ocupa de 50 a 60% do volume de sólidos da pasta de cimento, possui propriedades adesivas e é responsável pela resistência mecânica da pasta de cimento. A Portlandita ocupa de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta de cimento, possui baixa resistência mecânica, pois tende a formar placas e pode se lixiviar, deixando poros na matriz cimentícia. Os sulfoaluminatos de cálcio ocupam de 15 a 20 % do volume de sólidos. (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O cimento Portland possui uma pequena quantidade de  $C_3A$ , onde a reação do  $C_3A$  na forma pura com a água resulta na pega instantânea, que é prevenida pela adição de sulfato de cálcio (gesso) ao clínquer, onde mesmo assim são reações muito mais rápidas que a dos silicatos (NEVILLE e BROOKS, 2013), com reações mostradas a seguir.

- Reação de Hidratação do  $C_3A$



- Reação de Hidratação do  $C_3A$  em Presença de Gesso





O equilíbrio aluminato-sulfato obtido pela adição de gesso ao clínquer é que determina o comportamento da pega do cimento. Como produto da reação é formado o trissulfoaluminato de cálcio hidratado, conhecido como etringita ( $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ ), sigla C-A- $\bar{S}$ -H, ( $\bar{S}$  equivale a  $SO_3$ ), possui morfologia no formato de agulha e é o primeiro produto formado pela hidratação do cimento. É um elemento instável, expansivo, com alto teor de sulfato e ocupa de 15 a 20% do volume de sólidos da pasta de cimento. Com o decorrer do tempo a etringita se decompõe em monossulfato de cálcio hidratado,  $C_4A\bar{S}H_{18}$ , que forma cristais de placas hexagonais, pela redução da relação enxofre/cálcio, tornando a pasta de cimento vulnerável ao ataque de sulfatos (MEHTA e MONTEIRO, 2014). As reações de hidratação do  $C_4AF$  são similares ao  $C_3A$ , porém a reatividade do  $C_4AF$  é mais lenta, sua reação com o sulfato de cálcio forma o sulfoferrito de cálcio e o sulfoaluminato de cálcio (NEVILLE, 2016).

#### *Classificação dos cimentos brasileiros*

Existem no Brasil diversos tipos de cimento Portland, diferentes entre si, em função de sua composição. Os vários tipos de cimento normalizados pela ABNT são designados pela sigla, que correspondem ao prefixo CP acrescido dos algarismos romanos de I a V, conforme o tipo do cimento, e pela classe de resistência, indicadas pelos números 25, 32 e 40. As classes de resistência apontam os valores mínimos de resistência à compressão, garantidos pelo fabricante, após 28 dias de cura. Os diversos tipos de cimentos podem ser utilizados às mais diversas aplicações, em função de suas propriedades distintas, exercendo influência direta sobre as argamassas e concretos (ABCP, 2002).

A classificação dos cimentos brasileiros, suas várias subdivisões, siglas, classes de resistência e composição dos componentes, são apresentadas por meio da Tabela 3.2.

A Norma NBR 16697:2018 passou a vigorar no decorrer desta pesquisa, em 03/07/2018, cancelando e substituindo as NBR 5732:1991, NBR 5733:1991, NBR 5735:1991, NBR 5736:1991 (Versão corrigida:1999), NBR 5737:1992, NBR 11578:1991 (Versão corrigida:1997), NBR 12989:1993 e ABNT NBR 13116:1994.

Tabela 3.2 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa).

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	C clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Fíler calcário
Cimento Portland Comum	CP I	25 32 40 <sup>c</sup>	RS <sup>a</sup> ou BC <sup>b</sup>	95-100	0-5		
	CP I-S			90-94	0	0	6-10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E			51-94	6-34	0	0-15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z			71-94	0	6-14	0-15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F			75-89	0	0	11-25
Cimento Portland de alto forno	CP III			25-65	35-75	0	0-10
Cimento Portland pozolânico	CP IV			45-85	0	15-50	0-10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V <sup>e</sup>			ARI <sup>d</sup>		90-100	0
Cimento Portland branco	Estrutural	25, 32, 40		75-100	0	0	0-10
	Não estrutural	CPB	-	50-74	-	-	26-50
a	O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em norma, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.						
b	O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em norma, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.						
c	As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.						
d	Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.						
e	No caso de cimento Portland de alta resistência inicial a sulfatos (CP V ARI RS), podem ser adicionado escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos						

Fonte: Norma NBR 16697:2018.

### 3.2.2 Adições minerais

As adições minerais são materiais silicosos, finamente moídos, podendo ser adicionados ao cimento no seu processo de fabricação ou adicionado separadamente na confecção do concreto (LOTHENBACH *et al.*, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014). Para Lothenbach *et al.* (2011) o uso de materiais cimentícios suplementares levam à redução de emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada de materiais cimentícios, pois sua fabricação consome muito menos energia comparada aos processos de clínquerização. Dentre os benefícios obtidos do uso de adições minerais no concreto, há a melhoria da resistência à fissuração térmica devido baixo calor de hidratação, aumento da resistência mecânica final e redução da

permeabilidade do concreto devido ao refinamento dos poros, fortalecimento da zona de transição entre agregado e pasta, maior resistência química ao ataque por sulfatos e à expansão provocada pela reação álcali-agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2014). As adições minerais são denominadas também de materiais cimentícios suplementares, na literatura de língua inglesa.

Conforme Mehta e Monteiro (2014) as adições minerais são classificadas como materiais pozolânicos (sílica ativa, cinza de casca de arroz, cinza volante com baixo teor de cálcio, metacaulim), cimentantes (escória granulada de alto forno), cimentantes e pozolânicos (cinza volante com alto teor de cálcio) e Neville (2016) cita os fillers ( $\text{CaCO}_3$ ).

“Conforme definição dada pela ASTM 618-08a a pozolana é um material silicoso ou silico-aluminoso amorfo que, por si mesmo, possui pouco ou nenhum valor cimentício, mas quando finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com a cal (liberada na hidratação do cimento Portland) em temperatura ambiente formando composto com propriedades cimentícias” (NEVILLE e BROOKS, 2013, p.31).

O filler é um material finamente moído, da ordem da finura do cimento, em geral quimicamente inerte, que pode intensificar a hidratação do cimento Portland, que devido às suas propriedades físicas exerce um efeito benéfico em algumas propriedades do concreto (NEVILLE, 2016).

Adições de materiais inertes e materiais pozolânicos modificam as propriedades físicas e químicas do concreto. Como efeitos físicos da adição pozolânica observa-se o efeito microfíler, por ser um material mais fino que o cimento leva ao aumento da densidade e preenchimento de vazios. Além disso, observa-se o efeito de nucleação, de modo que as partículas atuam como centro de nucleação para os hidratos, promovendo o refinamento da estrutura de poros e alteração na microestrutura na zona de transição, com a melhoria da interface agregado/matriz cimentícia. As partículas pozolânicas são altamente reativas e o efeito químico da reação pozolânica é caracterizado pela reação da sílica amorfa com o hidróxido de cálcio –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formado durante hidratação do cimento Portland,

para produzir silicato de cálcio hidratado – C-S-H (DAL MOLIN, 1995; DAVE *et al.*, 2017).

As fases do clínquer hidratam-se a várias taxas, resultando principalmente na formação das fases C-S-H, portlandita, etringita e AFm. O C-S-H presente no cimento Portland tem uma composição de  $\text{CaO}_{1,5-1,9} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . A mistura dos materiais suplementares com o cimento leva a um sistema mais complexo de hidratação, pois a hidratação do cimento e reação hidráulica da adição ocorrem simultaneamente, podendo influenciar a reatividade entre si. A cinética de reações dos materiais cimentícios suplementares depende da composição química, finura e da quantidade de fases amorfas reativas, bem como da composição da interação da solução (LOTHENBACH *et al.*, 2011).

Os materiais cimentícios suplementares são geralmente caracterizados pelo baixo conteúdo de cálcio e maior quantidade de silício comparado ao cimento Portland, conforme diagrama ternário, mostrado na Figura 3.3 (a). Na Figura 3.3 (b) está representado esquematicamente as fases hidratadas formadas no sistema  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ . Uma característica marcante deste diagrama é o grande campo de composições da fase C-S-H, com diferentes proporções de Ca/Si, significativamente diferentes do C-S-H em cimentos Portland, que é a fase mais importante em cimentos, então, há diferenças nos hidratos formados durante hidratação, que influenciam na força e resistência do concreto. Dependendo da composição e reatividade dos materiais cimentícios suplementares, pode alterar a quantidade de outros produtos de hidratação, como a etringita, Portlandita e fases AFm (LOTHENBACH *et al.*, 2011).

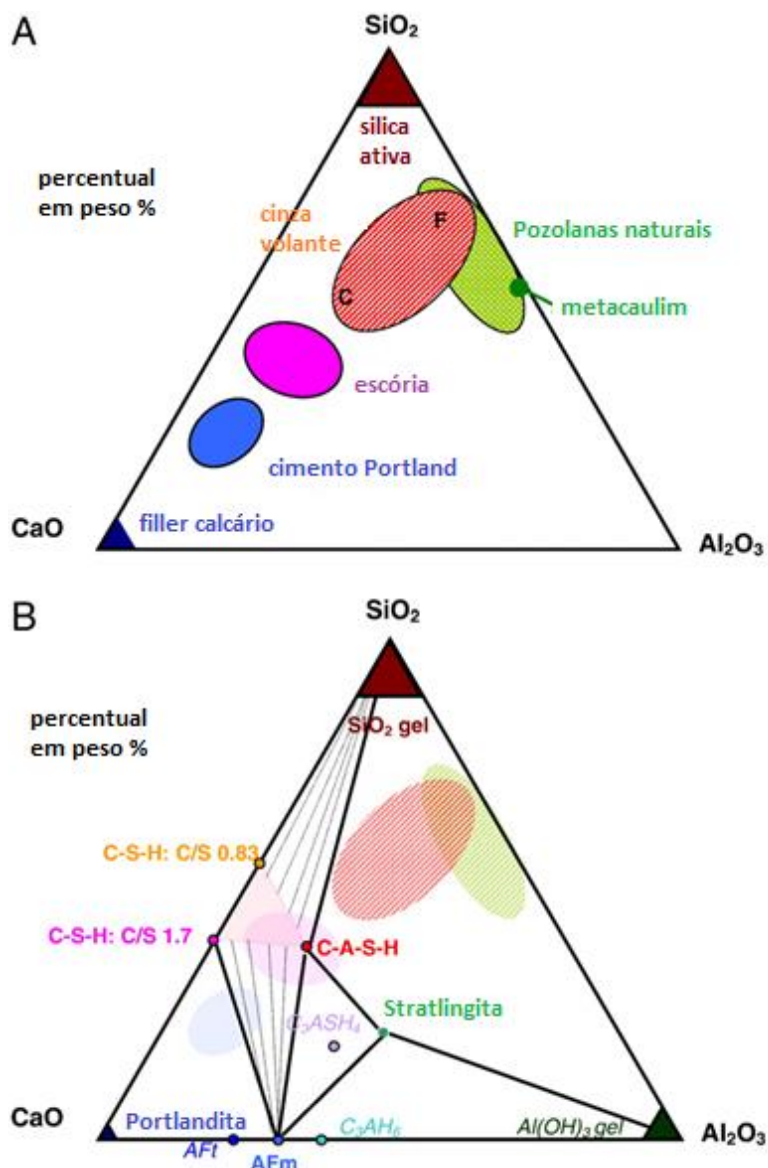


Figura 3.3 – a) Diagrama Ternário de Materiais Cimentícios (CaO- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- SiO<sub>2</sub>)  
 b) Fases hidratadas no Sistema CaO- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- SiO<sub>2</sub>. Nota-se ausência de carbonato ou sulfato, C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> é mais estável que as fases AFm  
 Fonte: Adaptado de LOTHENBACH *et al.*, 2011.

### Metacaulim

O metacaulim é um material silicoso amorfo obtido pela calcinação de argilas caulínicas, puras ou refinadas, em temperaturas entre 650 °C e 850°C, seguida da moagem até a finura entre 700 e 900 m<sup>2</sup>/Kg (FIGUEIREDO *et al.*, 2014; NEVILLE, 2016; SIDDIQUE e KLAUS, 2009). É um material muito fino, com 99,9% das partículas possuindo tamanho inferior a 16 µm, com tamanho médio de 3 µm, apresentando assim uma alta superfície específica (FIGUEIREDO *et al.*, 2014; SIDDIQUE e KLAUS, 2009), “cuja mineralogia sílico-aluminosa retrata

tipicamente os seguintes constituintes e teores: 50-55% de  $\text{SiO}_2$  e 40-45% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ” (DADSETAN e BAI, 2017; FIGUEIREDO *et al.*, 2014). Conforme Changling *et al.* (1995 *apud* SIDDIQUE e KLAUS, 2009) o metacaulim é constituído principalmente por compostos à base de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na fase amorfa (vítrea), proporcionando alta reatividade com o hidróxido de cálcio presente no concreto, produzindo fases contendo alumina, incluindo  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ,  $\text{C}_2\text{ASH}_8$  e  $\text{C}_3\text{AH}_6$ .

Há três fatores do metacaulim que influenciam as propriedades de resistência do concreto: efeito filler, melhorando assim o empacotamento da matriz cimentícia; aceleração da hidratação do cimento e reação pozolânica do metacaulim com a Portlandita (SIDDIQUE e KLAUS, 2009). Além do dado de porosidade total, é importante conhecer a distribuição do tamanho de poros. A exemplo, um volume maior de microporos (dimensões inferiores a 50 nm) em substituição a macroporos (dimensões superiores a 50 nm), mesmo apresentando um maior volume de poros, caracteriza um sistema com maior refinamento de poros. Refinamento maior, em geral entende-se por poros menos interconectados e mais tortuosos, sendo menos permeável ao transporte de íons (FIGUEIREDO *et al.*, 2014). Apesar de haver refinamento dos poros, a porosidade por água permanece equivalente (NICOLAS e ESCADEILLAS, 2014).

O uso de metacaulim aumenta a resistência do concreto especialmente durante as primeiras idades de hidratação. O teor de Portlandita em pasta e argamassa com metacaulim é reduzido devido à reação entre o produto de hidratação do cimento Portland e o metacaulim. Portanto, a maior resistência a sulfatos em argamassas contendo metacaulim foi atribuída à redução de portlandita no sistema, o que, por sua vez, reduziria a formação de gesso e etringita. A outra possível razão para a resistência melhorada ao sulfato é o refinamento na estrutura do poro, o que impediria a entrada de íons sulfato (KHATIB e HIBBERT, 2005).

Através de resultados de estudos, tem-se observado o aumento da resistência à compressão e densificação da microestrutura da pasta, pela adição de metacaulim, bem como ao aumento do módulo elástico, ou a um concreto mais

rígido. O módulo de elasticidade parece aumentar com aumento da adição de metacaulim, embora a taxa de aumento seja menor que para resistência à compressão (DADSETAN e BAI, 2017).

Khatib e Wild (1996 *apud* SIDDIQUE; KLAUS, 2009) observaram que as incorporações de 5% a 15% de metacaulim em pastas de cimento levam ao refinamento da estrutura de poros. A proporção de poros com raios menores de 20  $\mu\text{m}$  foi aumentada em todas as idades estudadas (3 a 90 dias). Os melhores resultados foram obtidos com a adição de 15% de metacaulim, em que, aos 28 dias, a proporção de poros menores de 20  $\mu\text{m}$  foi de 33,7% para o concreto referência e de 54,9% para o concreto com adição.

O metacaulim possibilita o aumento de resistência mecânica, aumento da resistência ao ataque por sulfato, por ácidos e outros agentes químicos, além da diminuição do calor de hidratação, diminuição da porosidade, através de testes normatizados. Através das Figura 3.4 e Figura 3.5 pode-se observar melhoria das propriedades de absorção de água por imersão e índice de vazios, para concretos com mesmos consumos de cimento (Escola Politécnica da USP, 2003).

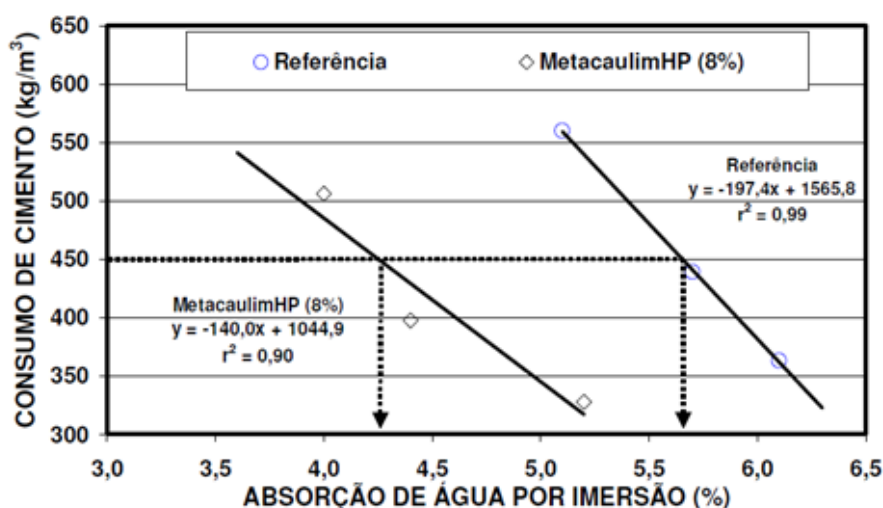


Figura 3.4 - Variação da absorção de água por imersão, aos 28 dias de cura úmida, para 8% de adição em substituição ao cimento.

Fonte: Escola Politécnica da USP, 2003.

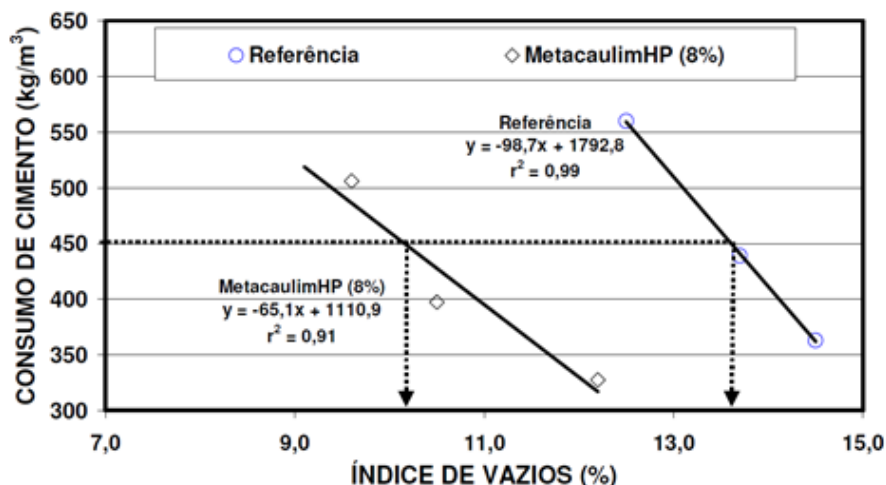


Figura 3.5 - Variação do índice de vazios, aos 28 dias de cura úmida, para 8% de adição em substituição ao cimento.

Fonte: Escola Politécnica da USP, 2003.

### 3.3 Caracterização do processo anaeróbio de tratamento

Diante do déficit sanitário e ao perfil socioeconômico Brasileiro, constata-se a necessidade de utilização de sistemas simplificados de coleta e tratamento de esgoto. Para o tratamento de esgotos em países de clima tropical são amplamente utilizados os sistemas anaeróbios, notadamente através dos reatores de fluxo ascendente e manta de lodo, tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors*), que colocam o Brasil em posição de vanguarda em nível mundial. Dentre as vantagens, apresentam baixos custos de implantação e operação, simplicidade operacional, pouca mecanização e sustentabilidade do sistema como um todo (CHERNICHARO, 2016).

O processo de digestão anaeróbia consiste em reações consecutivas de degradação chamados: hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese, conforme Figura 3.6. A digestão anaeróbia pode ser considerada como um ecossistema onde diversos grupos de microrganismos trabalham interativamente na conversão de matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas (CHERNICHARO, 2016). A etapa de metanogênese é responsável pela produção de biogás, composto principalmente por 65% de metano ( $\text{CH}_4$ ) e 35% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e coprodutos como lodo digerido, que é utilizado como um



fertilizante agrícola (CHERNICHARO, 2016; EVANS e FURLONG, 2003 *apud* VOEGEL *et al.*, 2016).

A produção de sulfetos é um processo no qual o sulfato e outros compostos à base de enxofre são reduzidos através da ação de um grupo de bactérias anaeróbias estritas, denominadas bactérias sulforedutoras, formando como produto final o sulfeto de hidrogênio, que resulta em problemas de corrosão, emissão de maus odores e toxicidade do meio, conforme fluxo caracterizado em vermelho na Figura 3.6 (CHERNICHARO, 2016).

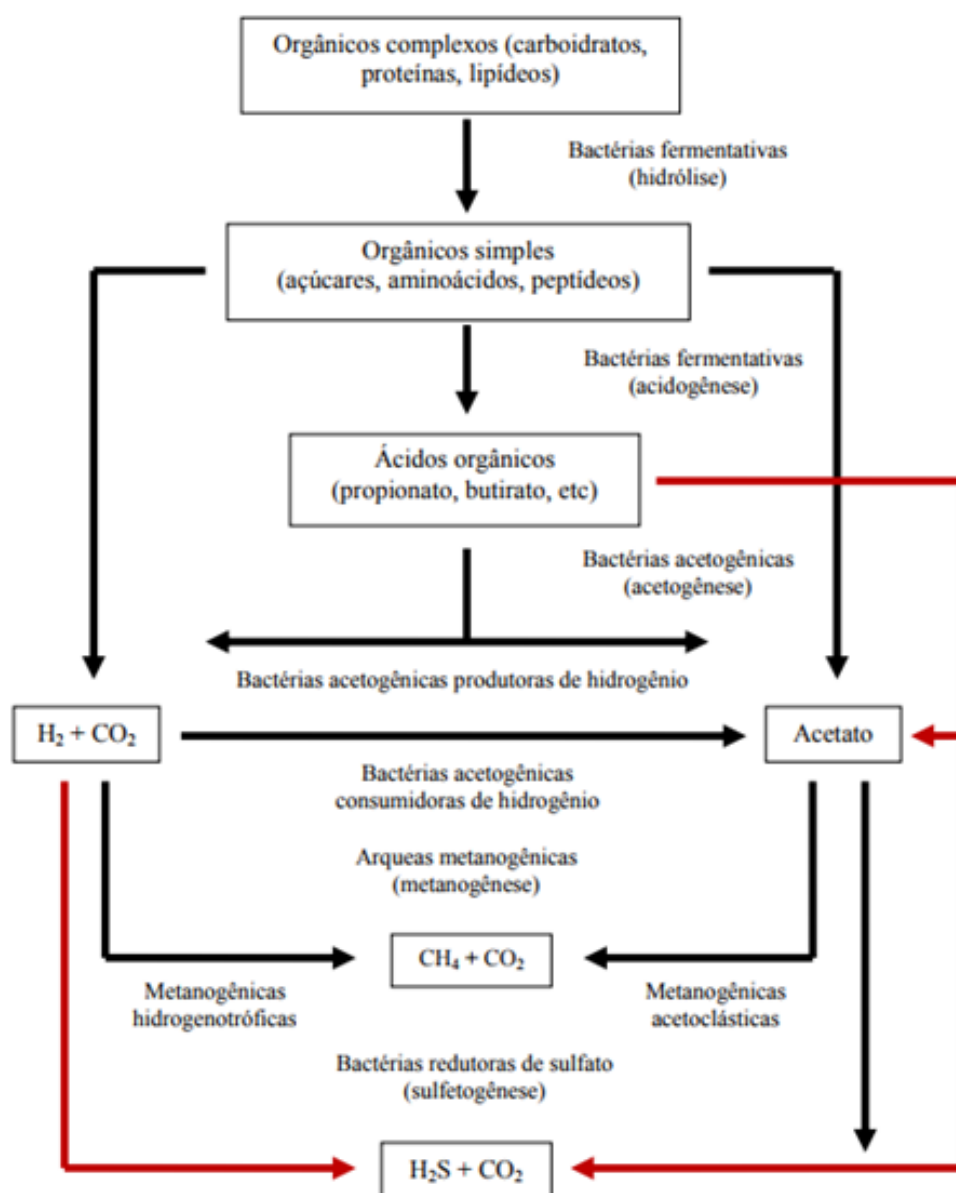


Figura 3.6 - Rotas Metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia, com redução de sulfato.

Fonte: CHERNICHARO, 2016 adaptado de Lettinga *et al.*, 1996.

Segundo Chernicharo (2016), dentre as vantagens dos processos anaeróbios a maior parte do material orgânico biodegradável presente é convertida em biogás (cerca de 70% a 90%) e apenas uma pequena parcela do material orgânico é convertida em biomassa microbiana (5% a 15%), com baixa produção de sólidos em relação aos processos aeróbios, como mostrado na Figura 3.7.

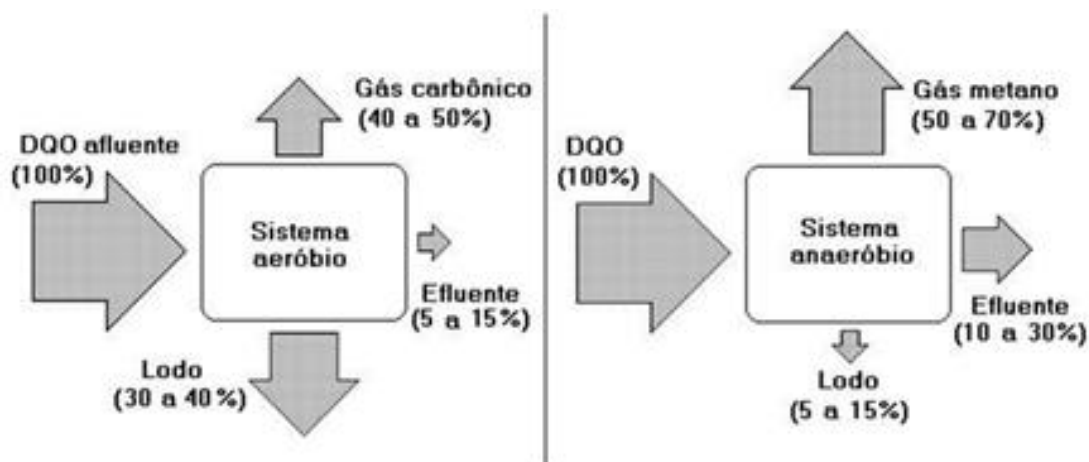


Figura 3.7 - Balanço esquemático de DQO nos sistemas aeróbios e anaeróbios.  
Fonte: CHERNICHARO, 2016.

O funcionamento de um reator se dá com o lançamento do afluente no leito de lodo, na parte inferior da unidade, camada onde crescem colônias de bactérias responsáveis pela decomposição da matéria orgânica, formando o biogás que se movimenta ascendentemente, ocorrendo também o carreamento de lodo, fazendo-se necessária a instalação do separador trifásico (gases, sólidos e líquidos) na parte superior do reator, de forma a permitir retenção e retorno do lodo. O biogás gerado é composto basicamente na proporção por 60% a 70 % em volume de metano ( $\text{CH}_4$ ), gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) de 30% a 40%, nitrogênio, hidrogênio e gás sulfídrico. A Figura 3.8 apresenta um corte esquemático de um reator *UASB* (CHERNICHARO, 2016).

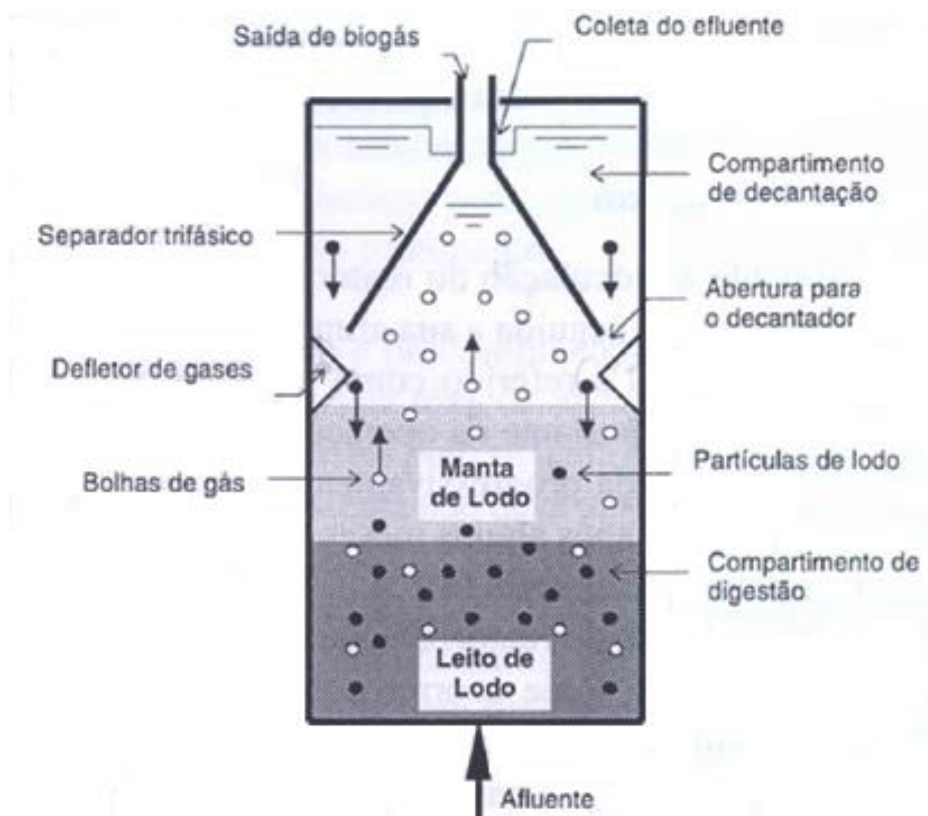


Figura 3.8 - Desenho esquemático de um reator UASB.  
Fonte: CHERNICHARO, 2016.

### 3.3.1 Sulfato nos esgotos

Segundo Chernicharo (2016) a produção de sulfetos é um processo no qual o sulfato e outros compostos a base de enxofre são utilizados como aceptores de elétrons durante a oxidação de compostos orgânicos, através da ação de um grupo de bactérias redutoras de sulfato (bactérias sulforedutoras). Reactores anaeróbios podem tolerar níveis elevados de sulfetos, da ordem de 170 mg H<sub>2</sub>S/L.

A forma mais estável e comum de compostos de enxofre é o íon sulfato e este pode ser encontrado nos mais diversos tipos de águas residuárias (esgoto sanitário/descartes industriais). Kulisch (2011) resume, por meio da Tabela 3.3, dados dos valores usuais de concentração de sulfato e sulfeto encontrados nos esgotos domésticos, citando Glória *et al.* (2008) e Singh e Viraraghavan (1998):

Tabela 3.3 - Faixas de variação das concentrações de sulfato e sulfeto para afluentes e efluentes dos reatores UASB tratando esgotos domésticos.

Sulfato (mg/L)		Sulfeto (mg/L)		Referência
Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	
20 - 60	1 - 9	0 - 2	8 - 14	Glória <i>et al.</i> (2008)
50 - 1000	4 - 10	-	20 - 30	Singh e Viraraghavan (1998)

Fonte: KULISCH, 2011 adaptado de Glória (2008).

De acordo com a norma NBR 12655:2015, concretos expostos a solos ou a soluções contendo sulfatos devem ser preparados com cimento resistente a sulfatos (NBR 5737:1992) e atender ao que estabelece a Tabela 3.4, no que se refere à relação água/cimento e à resistência a compressão do concreto ( $f_{ck}$ ).

Tabela 3.4 - Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos.

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO <sub>4</sub> ) presente no solo % em massa	Sulfato solúvel (SO <sub>4</sub> ) presente na água ppm	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal*	Mínimo fck (para concreto com agregado normal ou leve) MPa
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	-	-
Moderada**	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	35
Severa***	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,45	40

\* Baixa relação água/cimento ou elevada resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo.

\*\* Água do mar.

\*\*\* Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Fonte: NBR 12655:2015.

Informações de quantitativos de sulfatos e sulfetos realizados mensalmente na ETE objeto do experimento, são mostrados na Tabela 3.5.

Os valores dos sulfatos presentes no afluente e efluente dos reatores da ETE exibidos na Tabela 3.5, são classificados como fraca condição de agressividade, conforme Tabela 3.4, isto é observado pela baixa agressividade do esgoto, sob a lâmina de água dos reatores.

Tabela 3.5 - Dados de indicadores operacionais ETE Onça.

Mês	Sulfeto afluente (mg/l)	Sulfeto efluente (mg/l)	Sulfato afluente (mg/l)	Sulfato efluente (mg/l)
Janeiro	0,1	< 0,1	4,27	1,73
Fevereiro	0,7	0,1	8,04	5,06
Março	0,1	0,1	16,79	28,74
Abril	1,0	0,1	11,24	16,69
Maiο	1,5	0,2	17,44	36,17
Junho	2,0	0,5	29,53	11,61
Julho	2,0	0,5	39,96	37,24
Agosto	1,0	0,3	39,25	36,74
Setembro	1,0	0,1	37,89	32,97
Outubro	1,0	0,1	45,149	36,87
Novembro	2,0	<0,1	47,60	40,00
Dezembro	0,3	0,1	39,75	39,23

Fonte: COPASA, 2017.

### 3.4 Durabilidade das Estruturas de Concreto

A durabilidade do concreto está relacionada ao desempenho de suas funções previstas em projeto às ações de intempéries, mantendo a resistência, estabilidade e integridade.

#### 3.4.1 Definição

“De acordo com o ACI Concrete Terminology, a durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como sua capacidade de resistir às intempéries, ao ataque químico, à abrasão e outras condições em serviço. Em outras palavras, um concreto durável preservará sua forma, qualidade e capacidade de uso original, quando exposto ao ambiente de uso para o qual foi projetado” (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

De acordo com a norma NBR 6118:2014, as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas sob as condições ambientais previstas na época do projeto; e quando utilizadas, conservem suas segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil.

A agressividade ambiental é classificada de acordo com o apresentado na Tabela 3.6, nos projetos das estruturas correntes. A atmosfera existente dentro das estruturas de tratamento anaeróbio de estruturas de concreto em obras de saneamento se enquadra na classe de agressividade ambiental IV, ou seja, com risco de deterioração elevado. Para esta classe de agressividade a dosagem do concreto dosado com cimento Portland deve seguir os requisitos mínimos, conforme Tabela 3.7, da mesma norma ABNT.

Os projetistas de estruturas de concreto apresentam muito interesse pelas características de resistência do concreto e custo inicial de estruturas, porém é necessário que se dê devida atenção à durabilidade. É importante o entendimento das implicações socioeconômicas da durabilidade, pois o custo de reparo e recuperação de estruturas por falhas de seus materiais tem apresentado custo significativo em relação ao orçamento da sua construção (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Tabela 3.6 - Classes de Agressividade Ambiental.

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

a - Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos

b – Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar  $\leq 65\%$ , partes da estrutura protegidas de chuva em ambiente predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

c – Ambiente quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns e indústrias químicas.

Fonte: ABNT 6118:2014.

Tabela 3.7 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água / cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto kg/m <sup>3</sup>	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

CA – Componentes e elementos estruturais de concreto armado.  
CP – Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: ABNT 12655:2015.

### 3.4.2 Água como agente de deterioração

A água é agente fundamental na criação e destruição de muitos materiais naturais. Nos sólidos porosos é a causa de diversos tipos de processos físicos de degradação e atua também como veículo para transporte de íons agressivos que atuam nos processos químicos de degradação. A facilidade com que a água penetra nos sólidos porosos determina sua taxa de deterioração. A água é caracterizada pelo pequeno tamanho de suas moléculas, alto calor de evaporação e se destaca por sua capacidade de dissolver muito mais substâncias do que qualquer outro líquido, fazendo com que muitos íons e alguns gases estejam presentes, fundamentais para a decomposição de materiais sólidos. Em geral, as causas físicas e químicas de deterioração estão interligadas e mutuamente interagindo para a degradação do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

### 3.4.3 Permeabilidade

Define-se permeabilidade como a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido através de um sólido poroso. Além disso, é uma propriedade importante para a estanqueidade de estruturas destinadas à contenção de líquidos e ataque químico por gases (NEVILLE e BROOKS, 2013). A penetrabilidade do concreto é dada pelo movimento de fluídos (líquidos e gases) através de um sistema de poros, mas também por difusão e sorção (NEVILLE, 2016). A permeabilidade à

água é expressa como um coeficiente de permeabilidade,  $k$  (m/s), dado pela lei de Darcy (NEVILLE e BROOKS, 2013):

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dq}{dt} = K \frac{\Delta h}{L} \quad (3.5)$$

onde:  $\frac{dq}{dt}$  é a velocidade do fluxo de água (m<sup>3</sup>/s),  $A$  é a área da seção transversal da amostra (m<sup>2</sup>);  $\Delta h$  é a diferença de altura na coluna hidráulica através da amostra (m),  $L$  é a espessura da amostra (m) e  $K$  coeficiente de permeabilidade do concreto.

A água está presente no concreto desde sua elaboração, é um ingrediente necessário para as reações de hidratação do cimento e como agente facilitador da mistura dos componentes do concreto. Gradualmente, a maior parte da água é evaporável, deixando os poros vazios, tornando o concreto vulnerável aos fenômenos destrutivos relacionados à água, como congelamento da água, reações de hidrólise e como agente transportador de íons agressivos (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A porosidade capilar e permeabilidade da pasta de cimento são governadas pela porosidade da pasta de cimento, que é função da relação água/cimento e do grau de hidratação do cimento. Para uma baixa permeabilidade é essencial uma baixa relação  $a/c$ , especialmente abaixo de 0,6, no qual os poros se tornam segmentados ou descontínuos, bem como é necessário que o concreto deve ser dosado com agregados bem graduados. A permeabilidade é fator de controle fundamental do ponto de vista da durabilidade, recomendada uma permeabilidade máxima de  $1,5 \times 10^{-11}$  m/s (NEVILLE e BROOKS, 2013). Segundo Mehta e Monteiro (2014), com o desenvolvimento da hidratação do cimento, há uma redução na permeabilidade do concreto, com a redução do tamanho dos poros e de suas interconexões. Em pastas de cimentos convencionais, a descontinuidade na rede capilar ocorre quando a porosidade capilar é da ordem de 30%. Os agregados normalmente possuem baixo volume de poros comparados à pasta de cimento, normalmente abaixo de 10%, no entanto, o tamanho dos poros capilares do agregado é muito maior que o da pasta de cimento hidratada (da ordem de 10



a 100 nm), fazendo com que alguns agregados apresentem permeabilidade superior à pasta. A incorporação de agregados à pasta de cimento ou argamassa aumenta a permeabilidade do compósito, devido à microfissuras normalmente presentes na zona de transição na interface entre o agregado e a pasta de cimento. Quanto maior a dimensão do agregado, maior será o coeficiente de permeabilidade da argamassa ou concreto.

#### *3.4.4 Classificação das causas da deterioração do concreto*

As causas de deterioração do concreto são classificadas em causas físicas e químicas, sendo a distinção entre elas de maneira arbitrária, pois na prática as duas se superpõem.

#### *3.4.5 Deterioração do concreto por reações físicas*

Mehta e Gerwick (1982 *apud* MEHTA e MONTEIRO, 2014) agruparam as causas físicas da deterioração do concreto em duas categorias (Figura 3.9). A primeira está relacionada ao desgaste superficial ou perda de massa devido à abrasão, erosão e cavitação. A segunda corresponde à fissuração devida a gradientes normais de temperatura e umidade, cristalização de sais nos poros, carregamento estrutural e exposição a temperaturas extremas, como congelamento ou fogo.

Conforme Mehta e Monteiro (2014), o desgaste superficial é caracterizado por perdas progressivas de massa da superfície do concreto e podem ocorrer por abrasão, erosão e cavitação. O termo abrasão se refere ao atrito seco (desgaste em pisos e pavimentos por tráfego de veículos), erosão é a abrasão de fluidos contendo partículas sólidas em suspensão (estruturas hidráulicas) e cavitação relacionada à perda de massa de concreto pela formação de bolhas de vapor em estruturas hidráulicas e sua subsequente ruptura.

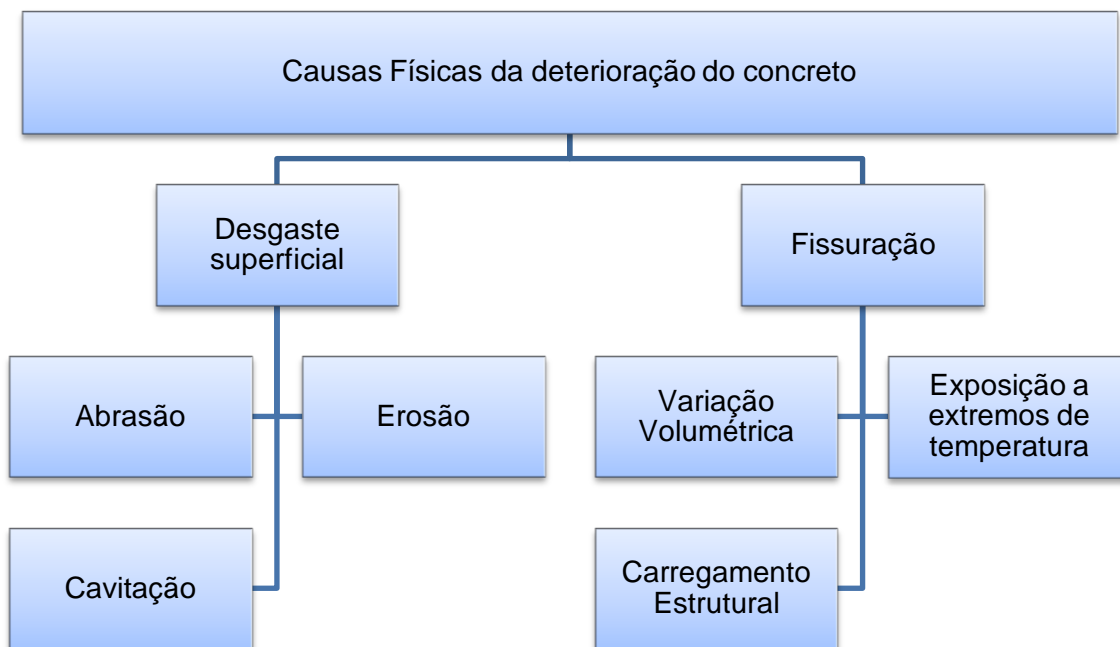


Figura 3.9 - Causas físicas da deterioração do concreto.  
Fonte: Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2014.

De acordo com ACI *Committee* 201 para obtenção de superfícies de concreto resistente à abrasão são recomendados: resistência à compressão do concreto superior a 28 MPa, baixa relação a/c, dimensão máxima de agregado graúdo de 25 mm e *slump* máximo de 75 mm de abatimento. Um concreto resistente pode não ser eficiente para evitar danos de cavitação, devendo ser corrigidos os desalinhamentos de superfície e alterações abruptas na declividade, como forma de prevenção ao fenômeno da cavitação (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

As fissuras no concreto podem ser formadas devido ao carregamento estrutural excessivo, ou serem de origem intrínseca ao concreto, sendo as principais: fissuras plásticas, fissuras térmicas nas primeiras idades, fissuras de retração por secagem, provocadas pela corrosão da armadura e pelas reações álcali-agregado (NEVILLE e BROOKS, 2013).

#### 3.4.6 Deterioração do concreto por reações químicas

Segundo Mehta e Monteiro (2014), os processos de deterioração do concreto provocados por reações químicas envolvem basicamente interações químicas entre os agentes agressivos do ambiente e os constituintes da pasta de cimento.

As exceções são as reações álcali-agregado, hidratação tardia do CaO e MgO e a formação de etringita tardia.

Conforme Neville (2016) as principais substâncias agressivas que podem atacar o concreto, em vários graus estão apresentadas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Algumas substâncias severamente agressivas ao concreto.

Ácidos inorgânicos	Carbônico, Clorídrico, Fluorídrico, Nítrico, Fosfórico, Sulfúrico
Ácidos orgânicos	Acético, Cítrico, Fórmico, Húmico, Lático, Tânico
Outras substâncias	Cloreto de alumínio, Sais de amônia, Sulfeto de hidrogênio, Gorduras vegetais e animais, óleos vegetais, Sulfatos

Fonte: Adaptado de Neville, 2016.

Em uma pasta de cimento Portland bem hidratada a fase sólida é composta por hidratos de cálcio relativamente insolúveis como o C-S-H (silicato de cálcio hidratado), CH (hidróxido de Cálcio) e o C-A-S-H (sulfoaluminato de cálcio hidratado), que encontram-se em estado de equilíbrio estável com a solução dos poros com altos valores de pH entre 12,5 e 13,5. Quando o concreto de cimento Portland está em contato com um ambiente ácido, com pH abaixo de 6, acontece a desestabilização dos produtos de hidratação de materiais cimentícios. Além disso, a taxa de ataque químico é em função do pH do fluido agressivo e da permeabilidade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014). O concreto que contém cimento Portland é extremamente alcalino e não deve ser utilizado quando estiver exposto a ataque ácido, a não ser que seja protegido (NEVILLE, 2016).

Mehta e Monteiro (2014) observaram que os ataques químicos no concreto manifestam-se através de efeitos físicos nocivos, como aumento de porosidade, permeabilidade, diminuição de resistência, fissuração e lascamento. Processos químicos e físicos de deterioração ocorrem simultaneamente e se reforçam mutuamente. Ataque por sulfato, reação álcali-agregado e corrosão de armaduras são os principais responsáveis pela deterioração da maioria de estruturas de concreto. Os processos químicos podem ser divididos em três subgrupos, como mostra a Figura 3.10, com a seguinte divisão:

- a) hidrólise de componentes da pasta por água mole;
- b) reações de troca catiônica entre fluidos agressivos e a pasta de cimento;
- c) reações químicas levando à formação de produtos expansivos, como ataque por sulfato, reação álcali-agregado e corrosão da armadura no concreto.

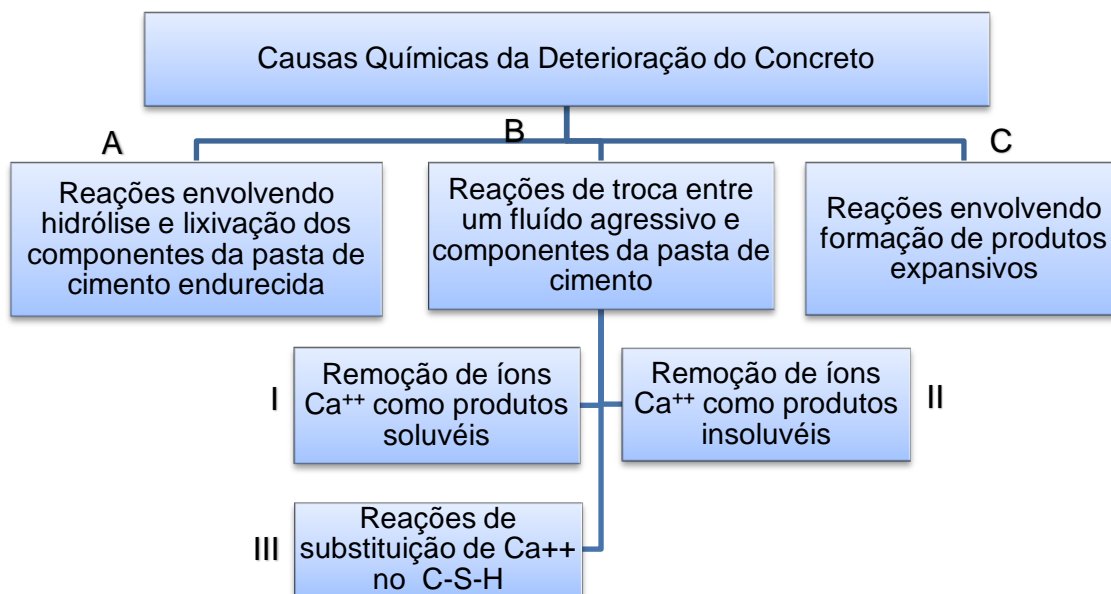


Figura 3.10 -Tipo de reações químicas responsáveis pela deterioração do concreto.  
Fonte: Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2014.

*A: ataque de água mole no hidróxido de cálcio e C-S-H presentes nos cimentos Portland hidratados;*

*B(I): solução ácida formando componentes solúveis de cálcio, como cloreto de cálcio, sulfato de cálcio, acetato de cálcio ou bicarbonato de cálcio; B(II): soluções de ácido oxálico e seus sais, formando oxalato de cálcio; B(III): ataque de longa duração de água do mar enfraquecendo o C-S-H pela substituição de  $Ca^{2+}$  por  $Mg^{2+}$ ;*

*C: ataque por sulfato formando etringita e gesso, reação álcali-agregado, corrosão da armadura no concreto, hidratação de MgO e CaO cristalinos.*

#### 3.4.6.1 Hidrólise dos componentes da pasta de cimento (A)

A água pura formada a partir da condensação da neblina ou do vapor de água e a água mole da chuva ou neve derretida contêm pouco ou nenhum íon de cálcio, que, em contato com a pasta de cimento Portland, tendem a hidrolisar ou dissolver os produtos que contêm cálcio. Caso a superfície de concreto esteja em contato com água corrente haverá condição para que a hidrólise continue atacando primeiramente o hidróxido de cálcio, em função de solubilidade relativamente alta na água pura (1230 mg/l), podendo continuar até que a maior

parte do hidróxido de cálcio tenha sido eliminada por lixiviação, causando assim erosão superficial do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014, NEVILLE, 2016).

#### 3.4.6.2 Reações de Troca Catiônica (B):

Conforme Mehta e Monteiro (2014), através da troca de cátions podem ocorrer três tipos de ações deletérias entre as soluções químicas agressivas e a pasta de cimento Portland, sendo elas:

##### a) Formação de sais solúveis de cálcio

As soluções ácidas contendo ânions que formam sais solúveis de cálcio, são encontradas em diversos ambientes industriais, por exemplo, ácido clorídrico, sulfúrico ou nítrico presentes em efluentes da indústria química; ácido acético, fórmico ou láctico, encontrados em produtos alimentícios e ácido carbônico ( $H_2CO_3$ ) presentes em refrigerantes. As soluções ácidas provocam reações de troca catiônica com os constituintes da pasta de cimento Portland, removendo íons  $Ca^{++}$  e resultando em aumento de sais solúveis de cálcio, a exemplo, cloreto de cálcio, acetato de cálcio e bicarbonato, que são removidos por lixiviação (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O ácido sulfúrico provoca ataque por sulfato à fase aluminato, bem como ataque ácido ao  $Ca(OH)_2$  e ao C-S-H, portanto, a redução da quantidade de cimento pode ser benéfica, desde que seja garantida a obtenção de um concreto denso (NEVILLE, 2016).

Conforme Neville (2016) o ataque do ácido carbônico na pasta de cimento ocorre através de reações de troca catiônica entre o ácido carbônico e hidróxidos de cálcio presentes na pasta de cimento Portland hidratados, detalhadas na seção 3.4.7.

O produto lixiviado em contato com  $CO_2$  presente na atmosfera, forma uma superfície esbranquiçada de carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) na superfície,

conhecido como eflorescência, sendo indesejável por questões estéticas e por indicar redução do pH do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

b) Formação de sais de cálcio insolúveis e não expansivos

Certos ânions quando presentes em água agressiva (ácidos oxálicos, tânico, húmico fosfóricos) podem reagir com a pasta de cimento, removendo íons  $\text{Ca}^{++}$  e formar sais de cálcio insolúveis e podem não causar danos ao concreto, desde que não sejam expansivos, ou serem removidos pela água corrente (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

c) Ataques químicos por soluções contendo sais de magnésio

O íon de magnésio presente nas soluções de magnésio, podendo ser cloreto/sulfato ou bicarbonato de magnésio, de origem em águas subterrâneas, marinhas e efluentes industriais primeiramente reage com o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento Portland. Esse ataque se estende até o silicato de cálcio hidratado, onde os íons de cálcio que são gradualmente substituídos por íons de magnésio, formam o silicato de magnésio hidratado, que não possui características cimentícias (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

#### *3.4.6.3 Reações envolvendo a formação de produtos expansivos (C)*

Os quatros fenômenos associados às reações químicas que envolvem a formação de produtos expansivos no concreto, são: ataque por sulfato, reação álcali-agregado, hidratação tardia do CaO e MgO livres e corrosão da armadura do concreto.

##### *Ataque por sulfato*

Os sais sólidos não atacam o concreto; porém, quando na forma de solução, podem reagir com a pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 2016).

Conforme Neville e Brooks (2013), o ataque por sulfato no concreto apresenta uma aparência característica de cor esbranquiçada, com deterioração normalmente começando pelas bordas e cantos, seguida por expansão e fissuração no concreto endurecido, com aumento de sua permeabilidade acelerando o processo de deterioração. O ataque por sulfato pode levar também a diminuição progressiva de sua resistência e perda de massa, devido à perda da coesão dos produtos de hidratação do cimento.

A exposição do concreto a fontes externas de sulfato é classificada em 4 graus de severidade no ACI 201.2R-08, em função do percentual do teor de sulfato no solo ou em função de ppm (mg/l) na água, como mostrado na Tabela 3.9 (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Tabela 3.9- Classificação de Severidade dos Sulfatos

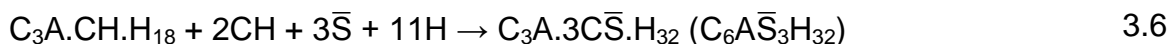
Severidade da exposição	Teor de sulfato (SO <sub>4</sub> ) no solo (%)	Sulfato (SO <sub>4</sub> ) na água (ppm)	Relação água/material cimentício	Requerimento de materiais cimentícios
Classe 0 – ataque negligenciável	< 0,1%	< 150	Não há requerimentos especiais	Não há requerimentos especiais.
Classe 1 – ataque moderado	0,1 a 0,2%	150 a 1.500	0,50	Cimento ASTM Tipo II (EUA) / todos com sufixo RS* (Brasil), ou equivalente.
Classe 2 – ataque severo	0,2 a 2,0%	1.500 a 10.000	0,45	Cimento ASTM Tipo V (EUA) / todos com sufixo RS* (Brasil) ou equivalente
Classe 3 – ataque muito severo	> 2,0%	> 10.000	0,40	Cimento ASTM Tipo V (EUA) / todos com sufixo RS*(Brasil), mais adição pozolânica ou escória

Fonte: Mehta e Monteiro (2014), adaptado pelo autor.

### *Reações químicas no ataque por sulfato*

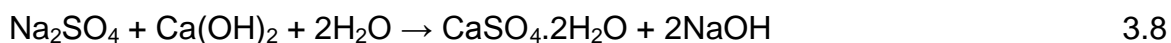
O hidróxido de cálcio e as fases que contêm alumina presentes no cimento Portland hidratado são mais vulneráveis ao ataque de íons sulfato  $\bar{S}$  (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Na hidratação do cimento Portland, o sulfato de cálcio reage rapidamente com o C<sub>3</sub>A formando etringita, sendo inofensiva neste estágio, pois o concreto ainda está em um estado semiplástico, permitindo a acomodação da expansão, que se converte logo em seguida na forma de monossulfato de cálcio

hidratado (NEVILLE e BROOKS, 2013). Devido ao ataque de sulfatos, podem se converter na forma altamente sulfatada (Etringita,  $C_3A.3CS.H_{32}$ ), como mostram as equações:

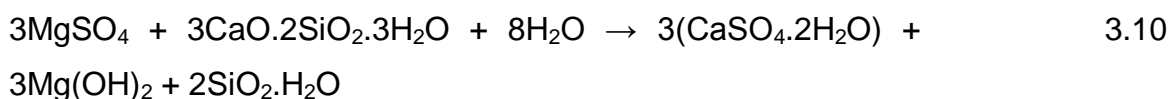
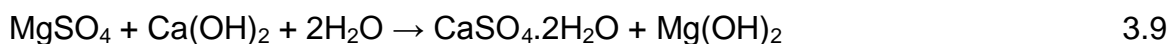


Devido ao  $C_3A$  ser vulnerável ao ataque de sulfatos, a vulnerabilidade do concreto pode ser reduzida com o uso de cimento de baixo valor de  $C_3A$ , ou seja, cimento do tipo resistente a sulfatos (NEVILLE e BROOKS, 2013).

O hidróxido de cálcio e o C-S-H na pasta de cimento hidratado podem se transformar em gipsita, pelo ataque de sulfato, em função dos tipos de cátions  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$  associados à solução de sulfato. No caso de ataque por sulfato de sódio, é atacado o  $Ca(OH)_2$ , formando o subproduto hidróxido de sódio que garante a alcalinidade necessária para manter estabilizado o produto da hidratação, C-S-H (MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).



No ataque por sulfato de magnésio há conversão de hidróxido de cálcio em gipsita e formação de hidróxido de magnésio (brucita), que é insolúvel e reduz a alcalinidade do sistema. Não contendo íons hidroxila na solução, o C-S-H também é atacado pelo sulfato, formando gipsita, sendo o tipo de sulfato mais agressivo ao concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).





### *Formação de etringita tardia*

Este é o caso de ataque químico por sulfato acontece quando a fonte de íons sulfato é interna ao concreto. Esse fenômeno irá ocorrer quando o concreto for confeccionado com um cimento com alto teor de sulfato ou quando o agregado estiver contaminado com gipsita (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Os efeitos nocivos são perda de resistência, diminuição do módulo de elasticidade e até fissuração. Para se evitar a formação de etringita tardia deve ser selecionado um cimento composto adequado que não resulte em excessiva elevação de calor (NEVILLE, 2016).

A Etringita não é uma fase estável para temperaturas de cura acima de 65°C, ou em grandes volumes de concreto, decompondo-se em monossulfato hidratado ( $C_3A.C\bar{S}.H_{18}$ ), onde os íons liberados pela Etringita primária são adsorvidos pelo C-S-H. Posteriormente durante o uso da estrutura, esses íons sulfato são desorvidos, com formação de nova Etringita, que causa expansão e fissuração (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A Figura 3.11 ilustra de forma esquemática, as hipóteses propostas pelo pesquisador Collepardi, para a formação de etringita tardia. Em função da permeabilidade do concreto, o sulfato é liberado por fonte interna e transportado pelo concreto por meio da água (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Esse problema pode ser evitado adotando mesmos procedimentos para se evitar risco de fissuração térmica, com adoção de medidas para reduzir o pico de temperatura de hidratação.



Figura 3.11 - Enfoque holístico para expansão e fissuração por formação de etringita tardia.

Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2014.

### 3.4.7 Carbonatação do concreto

Conforme mencionado no item 3.4.6.2, a carbonatação é um fenômeno que ocorre no concreto a partir de reações de troca catiônica. A carbonatação é um fenômeno físico-químico que ocorre nas estruturas de concreto, em função da interação de gases ácidos presentes na atmosfera com os produtos alcalinos do concreto. Essas reações levam a mudanças da microestrutura do concreto e à redução do pH, podendo acontecer a despassivação do aço presente no concreto armado, permitindo a corrosão das armaduras (NEVILLE, 2016; WERLE *et al.*, 2011). Segundo Kulakowski (2002) os principais gases que levam à carbonatação do concreto são o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ). Na carbonatação são consumidos os compostos alcalinos da matriz cimentícia, principalmente pela reação do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  com o  $\text{CO}_2$ , em função da rapidez, bem como ocorre em outros álcalis presentes em pequena quantidade, como  $\text{KOH}$  (hidróxido de potássio) e  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (hidróxido de magnésio) (KULAKOWSKI, 2002; WERLE *et al.*, 2011).

Papadakis *et al.* (1991 *apud* KULAKOWSKI, 2002) estudaram o processo físico-químico que leva à carbonatação do concreto, envolve as seguintes etapas:

o hidróxido de cálcio, resultante de reações de hidratação do cimento, é dissolvido em meio aquoso dentro dos poros do concreto, segundo a equação:



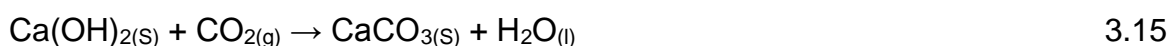
O gás carbônico em contato com o concreto, penetra por difusão nos vazios da matriz e se dissolve na solução aquosa, conforme a equação:.



Os íons  $\text{Ca}^{2+}$  reagem com o  $\text{CO}_3^-$ , formando carbonatos na pasta de cimento, conforme equação:



A reação simplificada do fenômeno de carbonatação é dado pela equação:



Essa interação entre os elementos resulta na formação de carbonato de cálcio e água. O consumo do  $\text{Ca(OH)}_2$  faz com que o pH do concreto diminua a níveis de 9 e 8, extinguindo a camada passivante do aço, resultando na corrosão da armadura, formando produtos expansivos, que geram tensões internas, fissurando o concreto, facilitando a entrada de agentes deletérios, podendo levar até ao colapso da estrutura, em estágios mais avançados do fenômeno (WERLE *et al.*, 2011).

A Carbonatação se dá progressivamente a partir da face exposta do concreto ao  $\text{CO}_2$  (NEVILLE, 2016). Kulakowski (2002), Neville (2016) e Werle *et al.* (2011) observaram que a velocidade da frente de carbonatação é variável, determinada por diversos fatores relacionados às condições de exposição e das características intrínsecas do concreto. Fatores relativos às condições de exposição são a

concentração de CO<sub>2</sub>, umidade relativa e temperatura. A penetração do gás é regida pelo mecanismo de difusão e é diretamente proporcional à diferença de concentração entre o CO<sub>2</sub> do meio externo e o interior do concreto. O fenômeno de carbonatação não é perceptível em umidades inferiores a 50%, sendo as maiores velocidades de carbonatação situadas entre 50 e 70% de umidade e quando os poros se encontram saturados, o transporte do CO<sub>2</sub> é praticamente interrompido. Além disso, sabe-se que a difusão é diretamente dependente da temperatura, influenciando significativamente na profundidade de carbonatação.

Fatores relativos às características do concreto, quanto à velocidade da frente de carbonatação, são em função do cimento, das adições, da relação água/aglomerante, da cura e do agregado (WERLE *et al.*, 2011). A quantidade e tipo de cimento determinam a quantidade de compostos alcalinos no concreto para reagir com o CO<sub>2</sub>, sendo determinantes para a velocidade de propagação, assim como condições de cura, relação a/c e presença de fissuras. Quanto maior a concentração de Ca(OH)<sub>2</sub> na matriz cimentícia, menor a velocidade de penetração do CO<sub>2</sub>, que só avança após reagir com o Ca(OH)<sub>2</sub> disponível, para então continuar penetrando e precipitar o hidróxido de cálcio. As adições minerais, quando alcalinas, extremamente finas e reativas reagem com o Ca(OH)<sub>2</sub> da matriz cimentícia, diminuindo a reserva alcalina do meio, tendendo a acelerar o fenômeno (KULAKOWSKI, 2002). A relação água/aglomerante influencia as características microestruturais da matriz cimentícia, influenciando diretamente na velocidade de propagação, ou seja, para maiores relações a/c, maior a velocidade de carbonatação. As condições de cura, para hidratação da matriz cimentícia, influencia diretamente na diminuição da porosidade e retração do concreto, reduzindo a profundidade de carbonatação. O agregado exerce menor influência por ser considerado um material inerte à carbonatação (WERLE *et al.*, 2011).

Segundo Neville (2016) a profundidade de carbonatação aumenta na proporção da raiz quadrada do tempo, em condições higrométricas uniformes, podendo ser possível expressar a profundidade de carbonatação pela equação.

$$D = k \cdot t^{0,5}$$

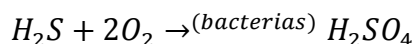
Onde  $D$  é a profundidade de carbonatação (mm),  $k$  é o coeficiente de carbonatação ( $\text{mm/ano}^{0,5}$ ) e  $t$  é o tempo de exposição (anos).

Para efetuar as medidas de profundidade da frente de carbonatação empregam-se indicadores de pH, com ponto de troca de cor dentro da faixa de pH básico. Neste caso, pode se empregar a fenolftaleína, por aspensão, que apresentará uma coloração vermelha para o concreto não carbonatado, com ponto de mudança de cor na faixa de pH de 8,3 a 10, indicando um pH maior que 10 (KULAKOWSKI, 2002). O ensaio é rápido e de fácil aplicação, mas deve ser lembrado que a cor vermelha indica a presença de  $\text{Ca(OH)}_2$  livre e não ausência total de carbonatação (NEVILLE, 2016).

#### *3.4.8 Mecanismos de deterioração de materiais cimentícios expostos ao biogás*

O biogás é uma fonte de energia renovável e de fácil armazenamento, que é produzida a partir de matérias-primas renováveis locais da agricultura e/ou outros resíduos da indústria, comércio e municípios. Pode ser usado localmente para fornecer eletricidade, calor e gás. Concretos em plantas de biogás são sujeitos a danos químicos causados por ácidos que são formados por processos microbiológicos (KOENIG e DEHN, 2016).

O processo da etapa de formação do ácido sulfúrico biogênico (ASB) ocorre sob condições anaeróbias. Primeiramente certa bactéria anaeróbia (*Desulfovibrio*) reduz sulfato  $\text{SO}_4^{2-}$  a íons sulfeto  $\text{S}^{2-}$ , que podem combinar com íons de hidrogênio para formar sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) que permanece parcialmente dissolvido em água. Com o aquecimento da água, a solubilidade do esgoto muda, aumentando a quantidade de gás no ambiente, em que o  $\text{H}_2\text{S}$  liberado é reoxidado em ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) por uma bactéria aeróbica (*Thiobacillus thiooxidans*) na presença de oxigênio, conforme equação 3.17, que produz um forte ataque ácido na matriz do concreto e agregados de concreto, que dissolvem a matriz cimentícia, formando produtos minerais secundários expansivos, como gipsita e etringita, conforme esquema representado na Figura 3.12 (HERISSON *et al.*, 2013; NNADI e MARRIAGA, 2013).



3.17

A etapa de biodeterioração de materiais cimentícios na presença de  $H_2S$ , também mostrada na Figura 3.12, pode ser dividida em quatro etapas: oxidação abiótica de  $H_2S$  em enxofre elementar sobre a superfície do material cimentício; oxidação de moléculas contendo enxofre em ácido sulfúrico formado por bactérias; difusão de ácido sulfúrico na camada de produto de degradação; e ataque de ácido em materiais cimentícios saudáveis (HERISSON *et al.*, 2013). Ataque por ácido sulfúrico pode ser considerado um fenômeno de superfície, em que o dano ocorre externamente, que reage com a superfície em contato e ao mesmo tempo penetra no material (NNADI e MARRIAGA, 2013).

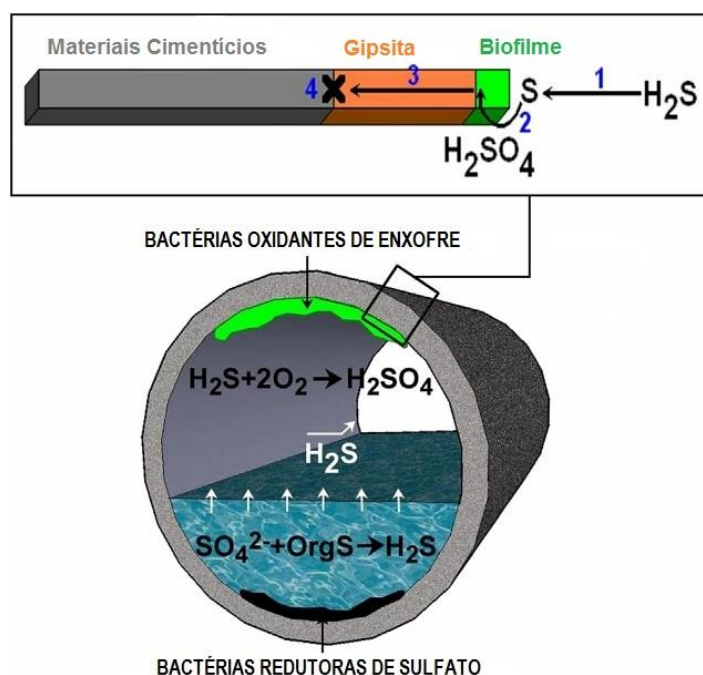


Figura 3.12 - Representação esquemática do ciclo do enxofre em redes de esgotos com os quatro passos envolvidos na biodeterioração de materiais cimentícios.

Fonte: Adaptado de HERISSON *et al.*, 2013.

O cimento Portland não é resistente ao ataque por ácidos, que dissolve e remove parte da pasta do cimento hidratado, deixando a massa friável e com resistência muito baixa. O grau do ataque aumenta com o aumento da acidez da solução, do dióxido de carbono livre em água (concentrações mínimas entre 15 e 60 p.p.m.) e da facilidade de difusão dos íons de hidrogênio no C-S-H após a dissolução e lixiviação do  $Ca(OH)_2$  (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Nas tubulações condutoras de esgoto, o ataque ácido no concreto forma uma pasta que fica fracamente ligada aos agregados inertes do concreto acima do nível do líquido, onde a pasta desprende-se da parede do tubo, por seu peso próprio, ou é arrastado pelo esgoto quando seu nível sobe, de acordo com a Figura 3.13 (NEVILLE, 2016; TSUTIYA e SOBRINHO, 2000).

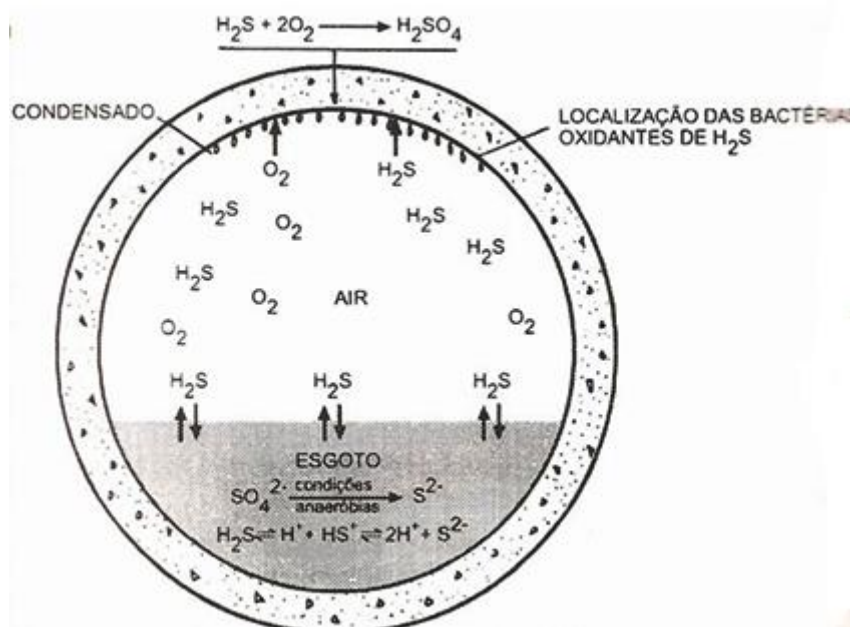


Figura 3.13 – Corrosão de tudo de esgoto por sulfeto de hidrogênio.  
Fonte: TSUTIYA e SOBRINHO, 2000.

A formação de ácido sulfúrico é normalmente limitada pela umidade e pela presença de oxigênio (TSUTIYA e SOBRINHO, 2000). De acordo com Chernicharo (2016), este processo inicia-se nos reatores anaeróbios após a formação de fissuras que permitem que a pasta entre em contato com o oxigênio na atmosfera, permitindo o desenvolvimento desse tipo de bactéria, esquematizado conforme croqui da Figura 3.14.

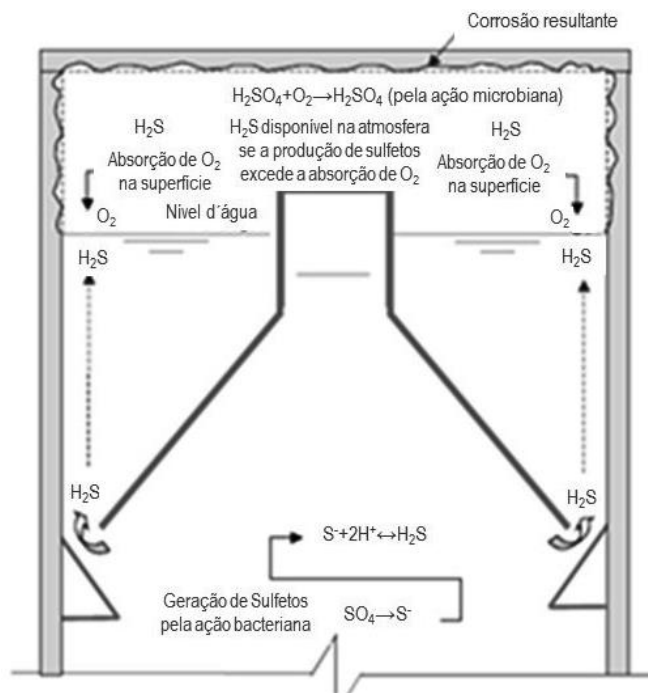


Figura 3.14 - Representação esquemática do ataque biogás ao concreto  
Fonte: CHERNICHARO, 2016.

Koenig e Dehn (2016) citados por Voegel *et al.* (2016), observaram que os padrões de deterioração do concreto em um digestor anaeróbio de biogás ocorrem devido a processos de deterioração microbiológica. Concluíram que a deterioração do concreto era causada por ataque de ácido sulfúrico biogênico na zona gasosa e erosão superficial do concreto, lixiviação leve e carbonatação na zona líquida/sólida de fermentação, conforme Figura 3.15.

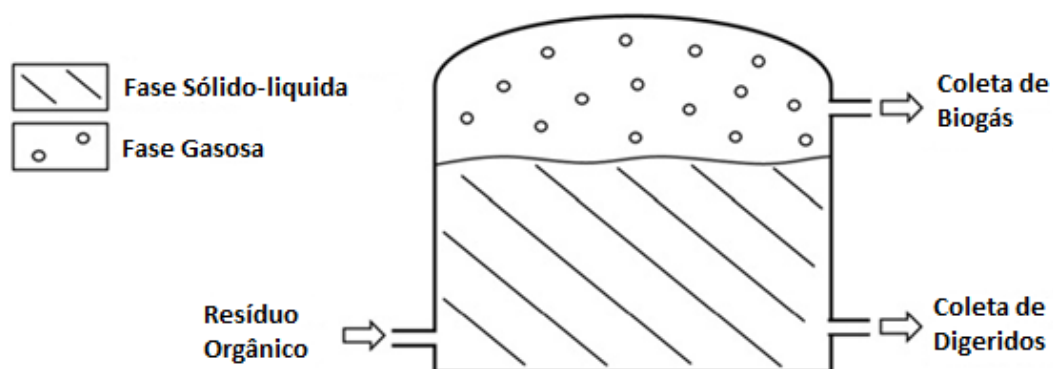


Figura 3.15 - Esquema do Digestor Anaeróbio.  
Fonte: Adaptado de VOEGEL *et al.*, 2016.

A fase líquido/sólida em um digestor anaeróbio contém vários agentes agressivos: uma variedade de ácidos gordurosos voláteis, amônia que é responsável por



lixiviação do concreto e  $\text{CO}_2$  que pode levar a carbonatação do concreto, conforme Figura 3.16 (VOEGEL *et al.*, 2016). Estes compostos são produzidos em grandes quantidades por cooperação de comunidades microbiológicas envolvidas em processo de digestão anaeróbia (FERNÁNDEZ *et al.*, 2008).

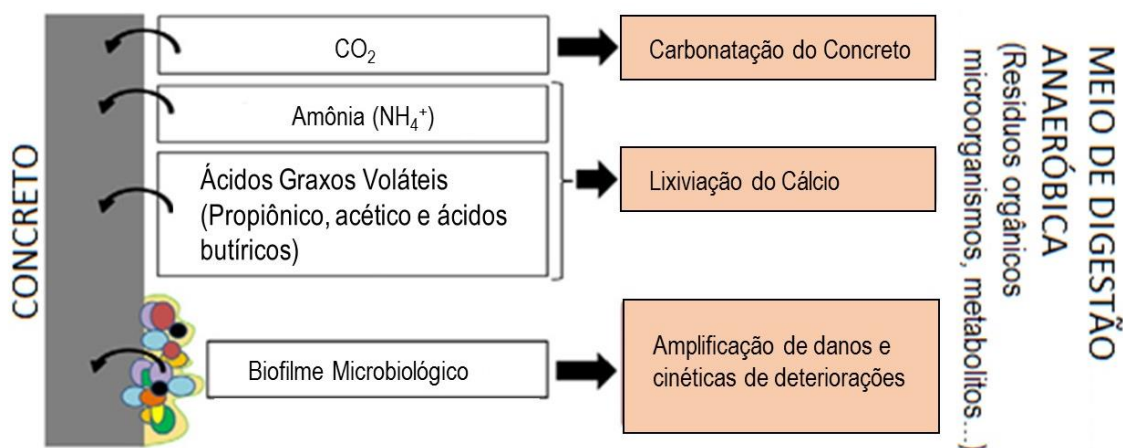


Figura 3.16 - Esquema da biodeterioração induzida do concreto na fase sólido líquido de um digestor anaeróbio.

Fonte: Adaptado de VOEGEL *et al.* (2016).

Koenig e Dehn (2016) em seu experimento expuseram amostras de concreto ao biogás, em silos e em fermentadores em escala piloto (laboratório), com diferentes processos de dessulfurização. Observaram a sequência de mecanismos de danos no concreto, na fase gasosa do fermentador, caso oxigênio atmosférico for adicionado como medida interna de dessulfurização, são caracterizados pelas seguintes fases, conforme diagrama esquemático da Figura 3.17.

Fase 1: O pH de alta alcalinidade na superfície do concreto diminui através da carbonatação, antes da fase operacional. Durante a fase operacional o pH da superfície reduz ainda mais em função da dissociação do  $\text{H}_2\text{S}$ , que foi produzido pelas baterias redutoras de sulfato, do  $\text{CO}_2$ , da umidade crescente e através ácidos orgânicos que são produzidos por bactérias heterotróficas.

Fase 2: pequenas quantidades de  $\text{S}_2$  liberadas durante dissociação do gás  $\text{H}_2\text{S}$  são provavelmente oxidados quimicamente em enxofre elementar (fase 2a) no início da produção do biogás. As condições de crescimento para as bactérias

oxidantes de enxofre são otimizadas com redução do valor de pH. Na presença de oxigênio essas cepas bacterianas oxidam sulfureto poli-hidrogenado primário ( $H_2S_n$ ) e tiosulfato  $S_2O_3^{2-}$  para o elementar  $S^0$  (fase 2 b). Em uma segunda etapa de oxidação é formado  $SO_4^{2-} + 2H^+$  a partir do  $S^0$ , onde esses prótons de hidrogênio causam a hidrólise na superfície da pasta do concreto e os íons  $Ca^{2+}$  que são liberados nesse processo, interagem com a camada de enxofre compacta e formam fases de sulfato, como Gipsita ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) e Mascagnita ( $(NH_4)_2 \cdot SO_4$ ).

Fase 3: com o valor de pH suficientemente baixo na superfície do concreto, o  $H_2S$  reduzido e com uma concentração adequada de oxigênio gasoso, mais *thiobacillus* resistentes a ácidos, do tipo *thiooxidans* ou *ferrooxidans*, formam colônias que primariamente usam S, sendo produzido como um reagente inicial de oxidação para  $SO_4^{2-} + 2H^+$  (fase 3a). O ambiente extremamente ácido ( $pH < 1,0$ ) e a alta concentração de sulfato levam a danos significantes no concreto. Os produtos da reação das fases da pasta de cimento desestabilizadas se acumularam como uma camada de reação de passivação ou se dissolvem da estrutura, significando perda de massa, caracterizam a fase 3b.

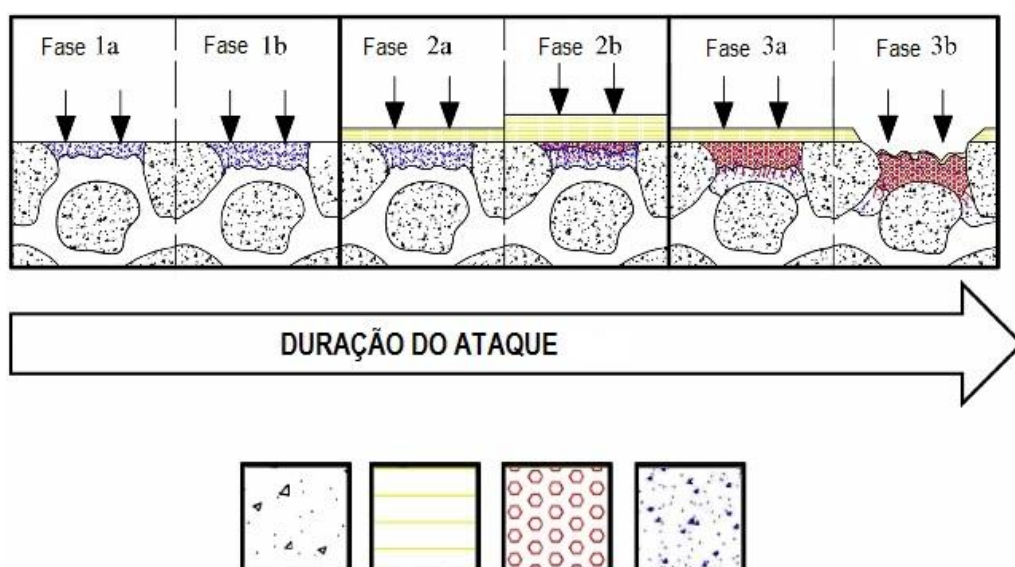


Figura 3.17 - Mecanismos de danos induzidos por microbiologia na fase gasosa do fermentador.

Fonte: Adaptado de KOENIG e DEHN, 2016.

Em seções cortadas do concreto das paredes do silo expostos ao biogás, do experimento de Koenig e Dehn (2016), foi observada uma descoloração amarelo-

amarronzada na borda da zona danificada, conforme Figura 3.18.a. Devido aos ataques ácidos, as principais fases do concreto, C-S-H e Portlandita são atacados e o  $\text{Ca}^{2+}$  desaparece. As fases amorfas de Al e ricas em Fe são possivelmente mais estáveis sob tais condições, observadas na Figura 3.18.b (KOENIG e DEHN, 2016).

Voegel *et al.* (2016) expuseram corpos de prova de pasta de cimento imersos em biorreatores anaeróbios experimentais, em condições de laboratório, por 4 semanas. Esse tempo corresponde a um processo completo de digestão anaeróbio, onde a superfície do material cimentício foi totalmente coberta por biofilme, numa espessura aproximada de 100  $\mu\text{m}$ , contendo microrganismos com formas esféricas e alongadas, de morfologias chamadas cocos e bacilos (Figura 3.19). Os produtos agressivos secretados por estes organismos são concentrados na superfície do material resultando em um dano acelerado. A mesma morfologia também foi observada nos biofilmes de reatores de digestão anaeróbia.

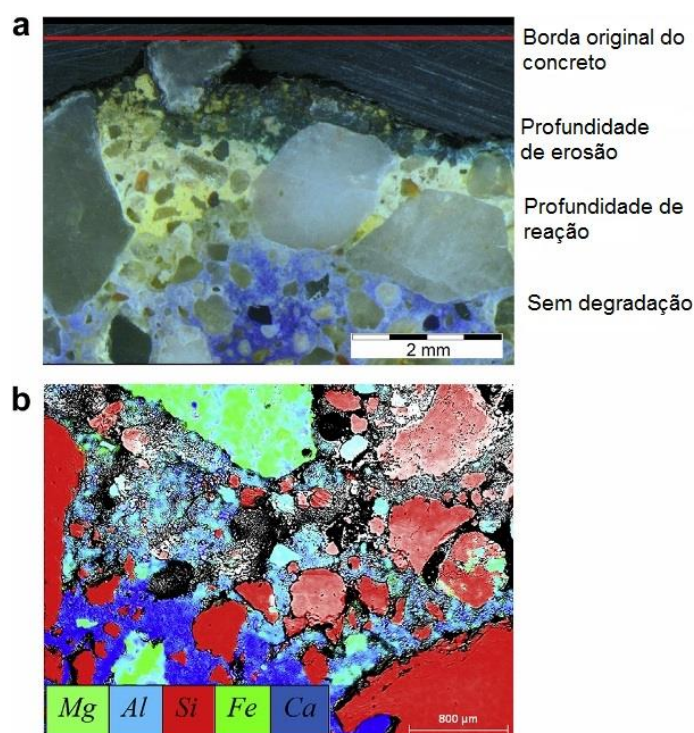


Figura 3.18 - Seções transversal de um concreto da parede de um silo.  
 a) Imagem de microscópio com indicador de pH em Timolfitaleína (azul para  $\text{pH} > 9,0$ )  
 b) MEV e EDX de mapeamento com os elementos químicos.

Fonte: Adaptado de KOENIG e DEHN, 2016.

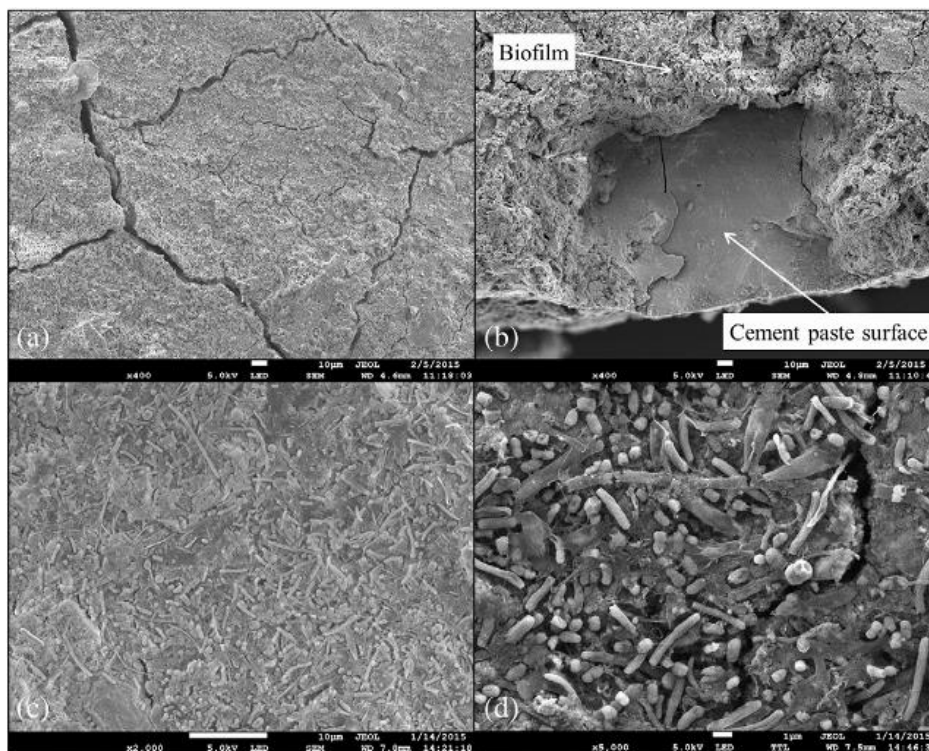


Figura 3.19 - Observações do MEV da superfície de pasta de cimento ordinário colonizado com um biofilme microbiológico, após 4 semanas de exposição a resíduos sólidos sobre processo de decomposição anaeróbia.

a) superfície global do biofilme; b) vista da pasta de cimento sob o biofilme; c,d) detalhes do Biofilme.

Fonte: VOEGEL *et. al.*, 2016.

### 3.5 Ensaios de propriedades do cimento e concreto

O tipo de cimento influencia diretamente nas propriedades do concreto para fins específicos, sendo recomendável a realização de ensaios para garantia da qualidade e conformidade com normas. As propriedades do concreto no estado fresco influenciam diretamente nas propriedades do concreto endurecido, quando estes são avaliados quanto às propriedades de resistência e durabilidade.

#### 3.5.1 Ensaios do cimento

Para produção de um bom concreto é fundamental a qualidade do cimento, que em sua fabricação requer um controle rígido. É necessária a realização de ensaios, tanto pelo fabricante ou comprador, para garantir a qualidade desejada em conformidade com normas, dentre os principais: ensaios de finura, tempo de pega, expansibilidade e resistência (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Segundo a norma NBR 16697 (2018), o início de pega dos cimentos acontece em um período inferior a 60 minutos e o tempo de fim de pega inferior a 600 minutos para os cimentos tipo: CPI, CPII e CPV e inferior a 720 minutos para os cimentos tipo: CPIII e CPIV.

A hidratação de compostos do cimento ocorre através de um conjunto de reações químicas exotérmicas. O teste do calorímetro tem sido cada vez utilizado para monitoramento do calor de hidratação pelo tempo, com dois principais tipos de testes de calorimetria: isotérmico e adiabático. No calorímetro adiabático, o calor de hidratação é medido pelo monitoramento do fluxo de calor da amostra sob condição de isolamento térmico ideal com mínima perda de calor para o ambiente. Considerando que sistemas isotérmicos adiabáticos perfeitos requerem equipamentos e ambientes de altíssimos custos, o teste de calorímetro semi-adiabático tem apresentado resultados aproximados, para aplicações práticas (SANDBERG e BENINI, 2008).

Conforme Sandberg e Benini (2008) o uso de calorímetros de campo pode ser utilizado com ferramenta de controle de qualidade para a determinação para interação cimento/aditivo, para seleção de materiais, para previsibilidade do concreto no estado fresco e endurecido e liberação para acabamento e corte de juntas de pisos e pavimentos de concreto.

Sandberg e Benini (2008) estudaram o uso da calorimetria como técnica de controle de qualidade do concreto e obtiveram em seu estudo uma curva típica de hidratação do cimento em um calorimétrico semi-adiabático, conforme exibido na Figura 3.20 e constaram que o ponto “E” corresponde aproximadamente ao tempo de início de tempo de pega e ponto “F” ao tempo de fim de pega.

A parte de redução de calor ocorre quando a taxa de hidratação diminui gradualmente, com continua formação de C-S-H pela hidratação contínua de  $C_2S$  e  $C_3S$ , com desenvolvimento da resistência e redução da liberação de calor. (SANDBERG e BENINI, 2008)

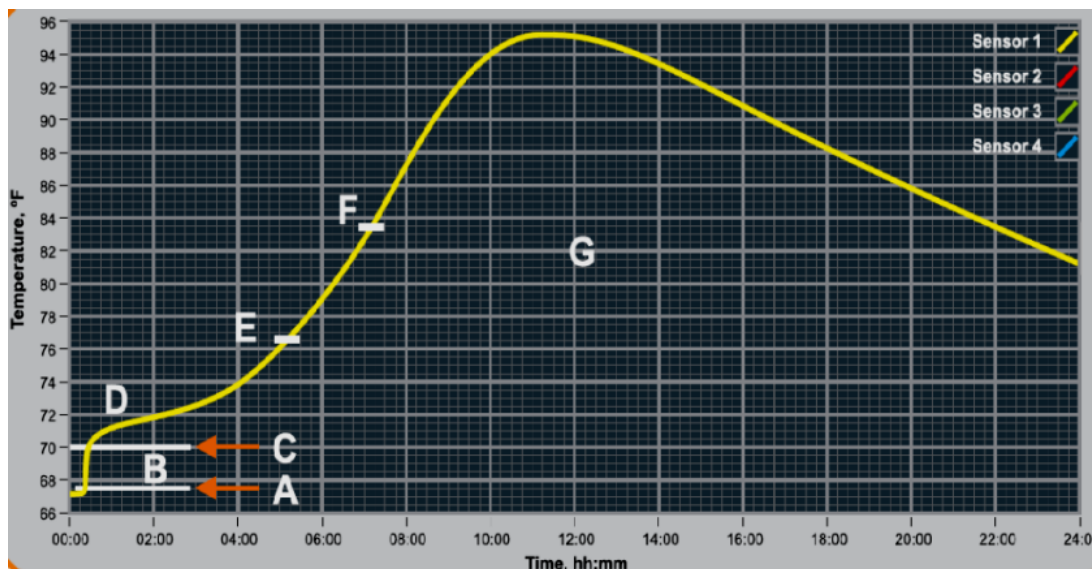


Figura 3.20 - Curva Típica obtida em um calorímetro semi-adiabático.  
Fonte: SANDBERG e BENINI, 2008.

### 3.5.2 Ensaios do concreto no estado fresco

De acordo com Petrucci (1998) são propriedades do concreto fresco: consistência, trabalhabilidade, integridade da massa (oposto de segregação), poder de retenção da água (oposto de exsudação) e massa específica. A trabalhabilidade é a mais importante característica do concreto fresco, apesar de ser de difícil conceituação por envolver uma série de propriedades. A consistência ou trabalhabilidade do concreto fresco é importante para que o concreto possa ser misturado, transportado, lançado, adensado e acabado, sem perda de sua homogeneidade, influenciando diretamente nas propriedades do concreto endurecido, como resistência, estabilidade de volume e durabilidade. A trabalhabilidade depende de vários fatores que se interagem, sendo eles: quantidade de água, tipo e granulometria dos agregados, relação agregado/cimento, finura do cimento, presença de aditivos e adições (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Dentre os ensaios para medida de trabalhabilidade, um dos mais simples e divulgados é o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, conhecido também por *Slump test*, com procedimento regulamentado pela NBR NM 67:1998 e classificação de suas classes de consistência de acordo com a NBR 8953:2015, mostradas na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Classes de consistência do concreto

Classe	Abatimento (mm)	Consistência	Aplicações Típicas
S10	10 a 45	Concreto consistência seca	Concreto extrudado, vibroprensado ou centrifugado
S50	50 a 95	Concretos pouco trabalháveis	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	100 a 155	Concretos de aplicação normal	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
S160	160 a 215	Concretos Plásticos para bombeamento	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	>220	Concretos fluidos	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Fonte: Adaptado da NBR 8953:2015.

Existem outros ensaios que medem a trabalhabilidade do concreto, são eles: ensaio do fator de compactação, ensaio Vebe, ensaio de espalhamento e ensaio de penetração de bola, que é raramente utilizado (NEVILLE e BROOKS, 2013).

### 3.5.3 Ensaios mecânicos no concreto no estado endurecido

A seleção de material construtivo para aplicação em determinado uso deve levar em conta a capacidade de resistir à força aplicada. As propriedades mecânicas do concreto podem ser avaliadas principalmente por ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, que influenciam a rigidez do concreto. Há uma relação entre resistência do concreto e durabilidade, pois concretos de maiores resistências possuem menor porosidade e permeabilidade (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

#### *Resistência do concreto endurecido*

Segundo Neville e Brooks (2013), a resistência do concreto é considerada como a propriedade mais importante, pois dá uma ideia geral da qualidade do concreto, que é diretamente vinculada à estrutura da pasta de cimento, embora outras características, como durabilidade, porosidade e estabilidade de volume possam ser mais importantes, dependendo do contexto. A resistência à compressão axial é o ensaio mais utilizado no concreto endurecido, devido sua facilidade de realização, como pelas suas características desejáveis estarem qualitativamente relacionadas à sua resistência e pela sua importância no projeto estrutural (NEVILLE, 2016).

Conforme Neville e Brooks (2013) a resistência do concreto é determinada com a utilização de corpos de prova de pequenas dimensões produzidos a partir de amostras de concreto fresco. Os procedimentos de produção dos corpos de prova e realização dos ensaios devem ser padronizados para avaliar com precisão a qualidade do concreto e normalmente são empregados para controle da qualidade e atendimento às especificações. Para execução de ensaios de resistência à compressão axial normalmente são utilizados corpos de prova cilíndricos de 150 x 300 mm ou cúbicos. São permitidos, pelas normas, o uso de corpos de prova menores, em função da dimensão máxima do agregado, com idade de referência para ensaio mais comum de 28 dias, mas ensaios adicionais podem ser feitos em geral aos 3 e 7 dias.

A NBR 5738:2008 prescreve os procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova de concreto, os quais são ensaiados segundo a NBR 5739:2007. Dentre os principais aspectos, é prescrito que os moldes sejam de aço ou outro material não absorvente e que não reajam com o cimento. A dimensão deve ser superior a quatro vezes a dimensão máxima do agregado. Para os corpos de prova de 100 mm de diâmetro, é estabelecida a moldagem em duas camadas, cada uma com 12 golpes, quando for adensamento manual.

A resistência de um corpo de prova de concreto é influenciada por vários fatores secundários como, por exemplo, a velocidade de carregamento, a condição de umidade, a dimensão do corpo de prova e as condições de cura (NEVILLE e BROOKS, 2013; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

#### *Módulo de Elasticidade*

O módulo de elasticidade é uma propriedade intrínseca do material, que depende das características dos materiais constituintes do concreto e de suas dosagens (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Conforme Neville e Brooks (2013) o módulo de elasticidade é a inclinação da relação entre tensão e deformação no material, mas a expressão do módulo de Young só pode ser aplicada aos tipos lineares da curva tensão/deformação, sendo:



$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

3.18

Onde: E é o módulo de elasticidade ou de Young, medido em unidades de pressão. As unidades práticas são (MPa ou N/mm<sup>2</sup>) ou (GPa ou KN/mm<sup>2</sup>);  $\sigma$  é a tensão aplicada, medida em pascal (N/m<sup>2</sup>);  $\varepsilon$  é a deformação elástica longitudinal do corpo de prova (adimensional).

A deformação do concreto na compressão ou tração, carregado com tensões moderadas ou elevadas, é considerada não linear e não elástica, existindo uma deformação permanente após a remoção da carga, conforme Figura 3.21. O módulo de Young pode ser determinado somente para a parte inicial da curva de carregamento, sendo esse o módulo tangente inicial. A partir de determinado ponto o gráfico não é mais linear e cessada a solitação, parte da deformação permanece. A não linearidade no concreto em tensões normais é devido principalmente à fluência, que é o aumento da deformação com o tempo sob tensão constante (NEVILLE e BROOKS, 2013).

No módulo de elasticidade estático, há uma deformação como resposta a uma tensão aplicada de intensidade conhecida. O módulo secante é um módulo estático, pois é determinado a partir de uma relação tensão-deformação experimental em corpos de prova cilíndricos. A forma de curva deve-se à presença de interfaces entre a pasta de cimento e o agregado e ao desenvolvimento de microfissuras de aderência nessas interfaces (NEVILLE, 2016).

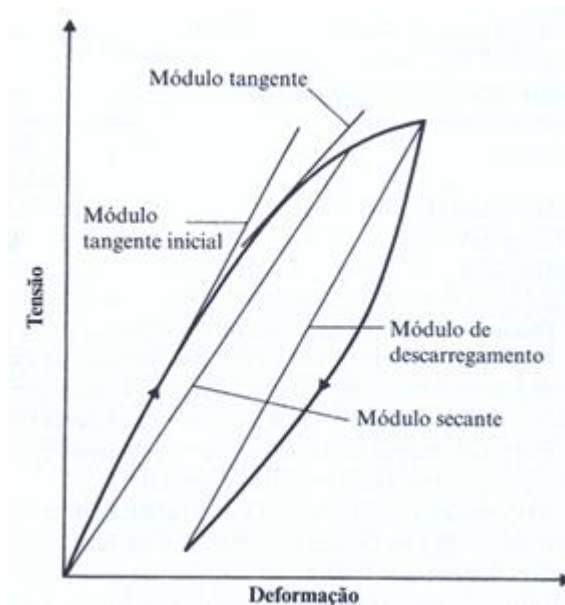


Figura 3.21 - Curvas Tensão-deformação típicas para o concreto.  
Fonte: NEVILLE e BROOKS, 2013.

A NBR 6118:2014 estabelece que o módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) pode ser obtido segundo ensaios estabelecidos pela NBR 8522:2008, sendo considerado nesta norma o módulo de deformação tangente inicial, obtido ao 28 dias de idade. Quando não forem feitos ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto usado na idade de 28 dias, a norma NBR 6118:2014 estipula que o valor do módulo de elasticidade pode ser estimado, usando a expressão:

$$E_{Ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 20 \text{ MPa a } 50 \text{ MPa} \quad 3.19$$

$$E_{Ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left( \frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 55 \text{ MPa a } 90 \text{ MPa}. \quad 3.20$$

Sendo  $\alpha_E = 1,2$  (basalto e diabásio),  $\alpha_E = 1,0$  (granito e gnaiss),  $\alpha_E = 0,9$  (calcário) e  $\alpha_E = 0,7$  (arenito).  $E_{ci}$  é módulo de deformação tangente inicial e  $f_{ck}$  é a resistência característica à compressão do concreto, sendo ambos com unidade em megapascal (MPa).

Esta norma estabelece também que o  $E_{cs}$  (módulo de deformação secante) a ser utilizado nas análises elásticas de projeto, especialmente para a determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço, pode ser obtido

segundo método de ensaio estabelecido na NBR 8522:2008, ou estimado pela expressão:

$$E_{CS} = \alpha_i \cdot E_{Ci} \quad 3.21$$

Sendo,

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad 3.22$$

#### 3.5.4 Ensaio relativos à durabilidade do concreto no estado endurecido

Os ensaios relativos à durabilidade do concreto no estado endurecido utilizados nessa pesquisa foram: absorção, resistência à abrasão, velocidade de propagação de onda ultrassônica e resistividade do concreto.

##### *Permeabilidade e absorção*

Petrucci (1998) observa que o concreto é um material poroso em função de sua constituição, pois a pasta de cimento não preenche todos os vazios entre os agregados, por diversas razões e a interconexão dos vazios torna o concreto permeável à água. A permeabilidade do concreto é a sua principal propriedade quando exposto a atmosferas agressivas.

A absorção é o processo físico em que o concreto retém água em seus poros e condutos capilares e a permeabilidade é a propriedade que identifica a possibilidade de passagem de água pelo material. O volume de poros no concreto pode ser determinada pela absorção do concreto. A absorção é determinada pelo simples ensaio de imersão em água de maneira a permitir o escape de ar retido no corpo de prova, calculada pela diferença entre o peso saturado e seco, tem-se a água absorvida, dividida pelo peso seco da amostra vezes 100, obtém-se a absorção em porcentagem (NEVILLE, 2016). A norma NBR 9778:2005 define que a absorção de água no concreto deve ser igual ou inferior a 10%, que nenhum valor individual deve ser maior que 12% e o índice de vazios deve ser igual ou inferior a 15%.

### *Resistência à abrasão*

As superfícies de estruturas de concreto podem ser submetidas a diversos tipos de desgaste por abrasão, que é o desgaste por atrito seco, ou erosão, e no caso de estruturas hidráulicas pelo carreamento de partículas sólidas pela água. A norma ASTM C779-05 prescreve ensaios para estimativa da resistência à abrasão para trânsito intenso de pessoas e veículos, através de três métodos de ensaios: ensaio de disco giratório, ensaio de abrasão das esferas de aço e ensaio da coroa de desgaste. Há também o ensaio de jateamento, que mensura a propensão à erosão por sólidos em fluxo de água. Através de experimentos, observou-se que a resistência à abrasão do concreto é proporcional à relação água/cimento e, portanto, à sua resistência à compressão (NEVILLE E BROOKS, 2013). No Brasil a norma NBR 12042:1992 estipula método para verificação da resistência à abrasão de materiais inorgânicos, por meio de disco giratório.

Ramesh e Sharma (2014) realizaram um experimento com 90 corpos de prova cilíndricos de concreto, segundo procedimentos da norma ASTM C1138M-05, para avaliar a resistência à abrasão do concreto, onde os parâmetros variáveis do estudo foram: agregados com diferentes valores de abrasão Los Angeles, classe de resistência do concreto, tipo de cimento, adições pozolânicas e idade de teste, que possuem influência sobre o desempenho abrasivo do concreto. Estudou-se a incorporação de materiais pozolânicos de diferentes tipos e quantidades em concretos similares. Concluíram que adições de 40% de cinza volante não apresentaram resultados animadores, porém adições de 10% de sílica ativa maximizou resultados de resistência à abrasão. A resistência à abrasão do concreto geralmente tende a melhorar com o aumento do consumo de cimento na dosagem do concreto (RAMESH e SHARMA, 2014).

### *Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica*

O ensaio de ultrassom é do tipo não destrutivo, utilizado como meio de verificação da qualidade do concreto de concretos similares, podendo ser detectadas falhas de adensamento, alteração na relação água/cimento, desenvolvimento de fissuras em estruturas e monitoramento de variações no concreto em função da

agressividade do meio (NBR 8802:2013; NEVILLE e BROOKS, 2013; QASRAWI, 2000).

O teste é descrito na norma ASTM C597-02, onde o princípio deste ensaio é dado pela velocidade do som em um meio sólido ( $V$ ), sendo função da raiz quadrada entre o seu módulo de elasticidade ( $E$ ), gravidade ( $g$ ) e densidade ( $\rho$ ), conforme formula equação 3.23, podendo obter o módulo de elasticidade do concreto, se o coeficiente de Poisson for conhecido (NEVILLE e BROOKS, 2013; QASRAWI, 2000). Uma vez que a velocidade é determinada, pode ser obtida uma ideia sobre qualidade, uniformidade, condição e resistência do concreto testado (QASRAWI, 2000).

$$V = f \cdot \left[ \frac{g \cdot E}{\rho} \right]^{1/2} \quad 3.23$$

“O aparelho gera um pulso de vibrações em frequência ultrassônica que é transmitida por um transdutor eletroacústico (emissor) mantido em contato com o concreto em ensaio, que ao passar pelo concreto, as vibrações são recebidas e convertidas em sinal elétrico por um segundo transdutor (receptor), que é enviado por um amplificador para um osciloscópio, medindo com exatidão o tempo de trânsito do pulso pelo concreto” (NEVILLE e BROOKS, 2013, p.314).

Whitehurst (1951, *apud* QASRAWI, 2000) sugeriu o uso de velocidades de pulso como um indicador de qualidade de concretos, conforme Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Qualidade do concreto em função da velocidade do pulso ultrassônico.

Velocidade pulso (m/s)	<2.000	2.000-3.000	3.000-3.500	3.500-4.500	>4.500
Qualidade do concreto	Muito pobre	Pobre	Duvidoso	Bom	Excelente

Fonte: QASRAWI, 2000.

A Figura 3.22 apresenta as três posições possíveis para emissão e recepção do pulso ultrassônico: transmissão direta, semidireta e indireta ou superficial.

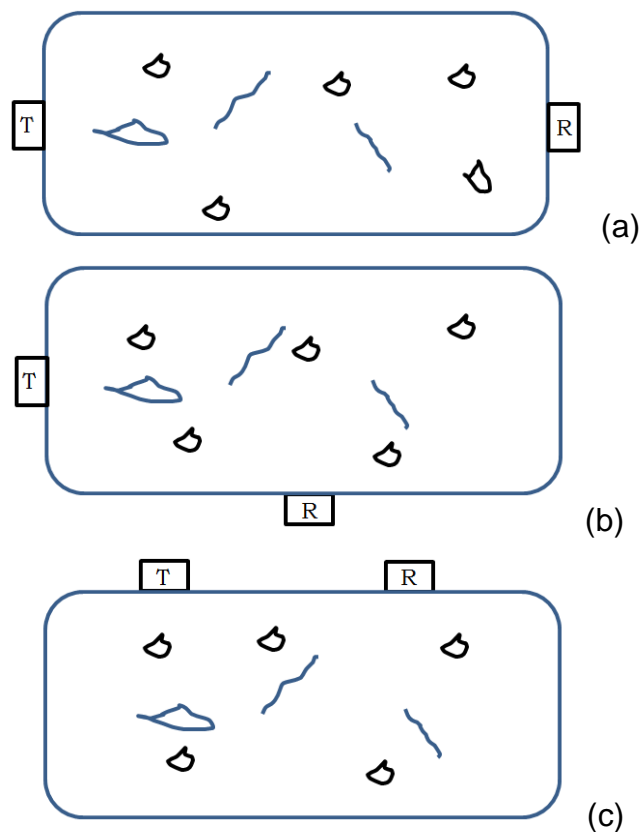


Figura 3.22 - Métodos de propagação e recepção de pulsos ultrassônicos: a) transmissão direta; b) transmissão semidireta e c) transmissão indireta ou superficial.

Fonte: acervo professor Rodrigo Moyses Costa, 2018.

Uma vez que resistência é a principal propriedade em concretos estruturais, medição da velocidade pode estar relacionada à resistência, e gráficos de velocidade vs. resistência podem ser obtidos; entretanto, os resultados do teste são sensíveis a propriedades de superfície, presença de aço, vazios e fissuras, propriedades de agregados e proporções das misturas (QASRAWI, 2000).

#### *Resistividade do concreto*

A resistividade do concreto é um parâmetro importante na avaliação da corrosão do aço em estruturas de concreto armado (HORNBOSTEL *et al.*, 2013; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

As medidas de resistividade superficial estão cada vez mais utilizadas para avaliar indiretamente a permeabilidade do concreto, devido o teste ser relativamente rápido e simples comparado a alguns testes padronizados existentes para difusão e permeabilidade. Algumas agências estaduais e federais americanas têm

adotado o teste de resistividade superficial como alternativa ao teste rápido de penetração de cloretos (TRPC), que é mais demorado e de trabalho intensivo, descrito na ASTM C1202-12 e AASHTO T277 (LAYSSI *et al.*, 2015; NALDEMAN e KURTIS, 2014).

As medições de resistividade elétrica têm se tornado usual para avaliação do controle de qualidade e durabilidade do concreto (LAYSSI *et al.*, 2015). A durabilidade do concreto depende das propriedades de sua microestrutura, como a distribuição dos poros e da forma das interconexões. A principal ideia por trás das técnicas de resistividade elétrica é de alguma maneira quantificar as propriedades de condução da microestrutura do concreto, descrevendo sua habilidade de resistir à transferência de íons submetidos a um campo elétrico. (LAYSSI *et al.*, 2015; NALDEMAN e KURTIS, 2014). Agregados e pasta de cimento possuem alta resistividade. Microestruturas mais densas de concreto, resultantes de adições pozolânicas ou maiores graus de hidratação, tendem a ter rede de poros mais complexa e refinada, dando à pasta do concreto, maior tortuosidade, menor permeabilidade e maior resistividade (NALDEMAN e KURTIS, 2014). O grau de saturação da estrutura de poros tem sido identificado como o fator que mais influencia a resistividade do concreto e a temperatura também possui um impacto considerável (HORNBOSTEL *et al.*, 2013).

Existem duas técnicas para medição da resistividade, podendo ser pelo método uniaxial, ou resistividade elétrica de massa, indicado para testes em corpos de prova e o método de quatro pontos (sonda Wenner), ou resistividade elétrica superficial, indicado para avaliação *in loco*. A relação entre resistividade elétrica e o coeficiente de difusão são apropriados para quantificar os critérios exigidos para o controle de qualidade do concreto baseado na durabilidade, particularmente aquelas requeridas para a classificação de permeabilidade do cloreto (LAYSSI *et al.*, 2015).

No método uniaxial (Figura 3.23) a amostra de concreto é colocada entre dois eletrodos, com contatos de esponja de aço úmida, onde uma corrente alternada é aplicada e é medida a queda de potencial entre os eletrodos, sendo um método confiável para medir a resistividade aparente elétrica de amostras em laboratório.

As mesmas amostras de concreto cilíndrico preparados para o teste de compressão podem ser previamente utilizadas para medição de resistividade. (LAYSSI *et al.*, 2015).

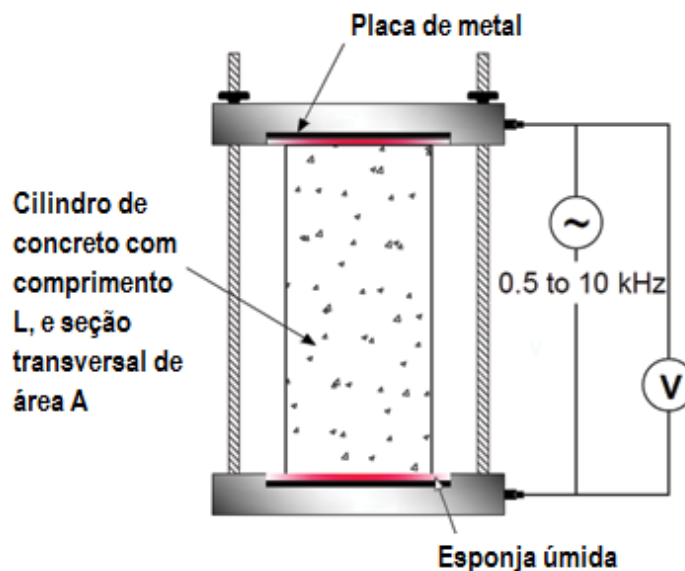


Figura 3.23 - Croqui esquemático do Método Uniaxial de dois pontos.  
Fonte: Adaptado de LAYSSI *et al.*, 2015.

A resistividade  $\rho$  é uma característica inerente de um material, e é independente da geometria da amostra, que descreve como o material resiste ao fluxo de corrente elétrica. Na prática, a resistência elétrica é medida diretamente pelo dispositivo de teste e a resistividade é calculada. A relação entre essas propriedades é dada pela equação (LAYSSI *et al.*, 2015; MEHTA e MONTEIRO, 2014; NALDEMAN e KURTIS, 2014):

$$\rho = K \cdot R \quad 3.24$$

Sendo:  $\rho$  resistividade ( $\Omega \cdot m$ ); K fator geométrico (m), que depende do tamanho e forma da amostra, bem como da distância entre as sondas do aparelho de teste (para sonda Werner) e R a resistência elétrica do concreto ( $\Omega$ ).

A equação descreve o fator geométrico para o método uniaxial, onde A é a área da seção transversal perpendicular à corrente ( $m^2$ ) e L é a altura da amostra de concreto (m).



$$K = A/L$$

3.25

Pelo método de Werner a resistividade elétrica ( $\rho$ ) é obtida através de uma pequena corrente induzida a percorrer na superfície do concreto até o terminal receptor localizado a uma distância da fonte, sendo realizado conforme configuração típica ilustrada na Figura 3.24 (LAYSSI *et al.*, 2015; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

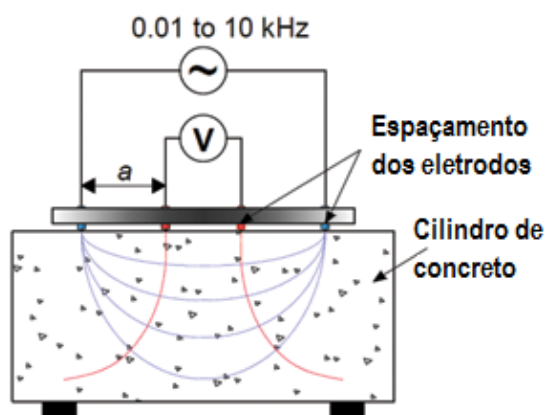


Figura 3.24 - Croqui esquemático Método de Quatro-pontos (Sonda Wenner).  
Fonte: Adaptado de LAYSSI *et al.*, 2015.

Na técnica uniaxial medidas de resistividade podem ser realizadas no intervalo de frequência entre 0,5 a 10KHz, porém em baixas frequências, abaixo de 500 Hz, geralmente os resultados de medições são superestimados em função do efeito interface concreto-eletrodo; enquanto para o método de Wenner é irrelevante, podendo ser realizado em uma faixa mais ampla de frequência (LAYSSI *et al.*, 2015).

Pesquisas têm apontado correlações entre resistividade do concreto e período de iniciação e propagação de corrosão. Hoje é amplamente aceito que a taxa de corrosão diminui com aumento da resistividade do concreto sob as mesmas condições ambientais. Os critérios de avaliação para quantificar a atividade de corrosão do aço por medidas de resistividade de concreto podem ser encontrados na literatura (Tabela 3.12); no entanto, observa-se uma alta variação entre os intervalos sugeridos pelos diversos pesquisadores (HORNBOSTEL *et al.*, 2013).

Tabela 3.12 - Critérios de avaliação da atividade de corrosão em termos de resistividade do concreto.

Referências	Intensidade de corrosão em termos de resistividade ( $\Omega.m$ )			Corrosão induzida por
	Alto	Moderado	Baixo	
Cavalier P.G., Vassie P.R.(1981)	< 50	50 -120	>120	Cloretos
Hope B.B., Ip AKC, Manning D.G. (1985)	< 65	65-85	>85	
López W., González J.A. (1993)	< 70	70-300	>300-400	
Morris W., Vico A., Vazquez M., de Sanchez S.R. (2002)	< 100	100-300	>300	
Gonzalez J.A., Miranda J.M., Feliu S. (2004)	< 200	200-1.000	>1.000	
Elkey W., Sellevold E.J. (1995)	< 50	Sob discussão	100-730	
Andrade C., Alonso C. (1996)	< 100	100-1.000	>1.000-2.000	
Polder R.B. (2001)	< 100	100-1.000	-	Geral
Broomfield J., Millard S. (2002)	< 50	50-200	>200	
Smith K.M, Schokker A.J, Tikalsky P.J. (2004)	< 80	80-120	>120	
AASHTO TP 95	< 120	120 – 210	> 210	

Fonte: HORNBOSTEL *et al.*, 2013; LAYSSI *et al.*, 2015.

A Tabela 3.13 apresenta as recomendações do CEB (Comité Euro-International du Béton) *apud* MEHTA e MONTEIRO (2014) da provável taxa de corrosão em função da resistividade elétrica, propondo que a taxa provável de corrosão é desprezível para concreto com resistividade maior que 200  $\Omega.m$ , baixa entre 100 e 200  $\Omega.m$ , alta entre 50 e 100  $\Omega.m$  e muito alta para valores inferiores a 50  $\Omega.m$ . Observa-se que, quanto maior a resistividade elétrica, maior é a resistência do concreto contra a passagem de íons e corrosão da armadura (LAYSSI *et al.*, 2015, McCARTER, 2015).

Tabela 3.13 - Recomendações do CEB-192 para estimar a provável taxa de corrosão baseada na resistividade do concreto.

Resistividade do concreto ( $\Omega.m$ )	Taxa provável de corrosão
> 200	Desprezível
100 a 200	Baixa
50 a 100	Alta
<50	Muito alta

Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2014.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo da influência da adição do metacaulim nas propriedades do concreto em contato com atmosferas agressivas em estruturas de tratamento anaeróbio de esgoto foi essencialmente experimental e basicamente ocorreu em 5 etapas.

A primeira etapa consistiu na caracterização de materiais e definição de dosagem dos concretos estudados. Na segunda etapa, durante a produção dos concretos, foi realizado um estudo comparativo das propriedades no estado fresco. Na terceira etapa, os corpos de prova foram moldados e curados em cura úmida e realizados ensaios de resistência mecânica. Em uma quarta etapa foram projetados e fabricados dispositivos para suporte de corpos de prova. Na última etapa os corpos de prova remanescentes, após cura inicial, foram separados em dois lotes, onde a metade continuou em cura úmida e a outra metade foi exposta ao biogás do reator anaeróbio através do dispositivo de suporte confeccionado.

Os experimentos foram realizados na LafargeHolcim, na ETE Onça e no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFMG. O procedimento experimental está ilustrado no fluxograma esquematizado da Figura 4.1. Após a caracterização dos materiais foi feito o estudo de dosagem dos traços, a confecção dos concretos para as diferentes dosagens propostas e a moldagem dos corpos de prova. Os concretos tiveram seu desempenho avaliado no estado fresco e endurecido. Para o estado endurecido foram propostos ensaios para as condições de cura úmida constante e expostos ao biogás. O ensaio de resistência à tração na flexão foi proposto apenas para o concreto em cura úmida, pois não é possível expor ao biogás, em função de suas dimensões. O ensaio de abrasão foi proposto apenas para a data de 28 dias. O ensaio de carbonatação acelerada é realizado para concretos após período de cura inicial, conforme metodologias propostas por diferentes pesquisadores. O detalhamento dessas etapas é apresentado a seguir.

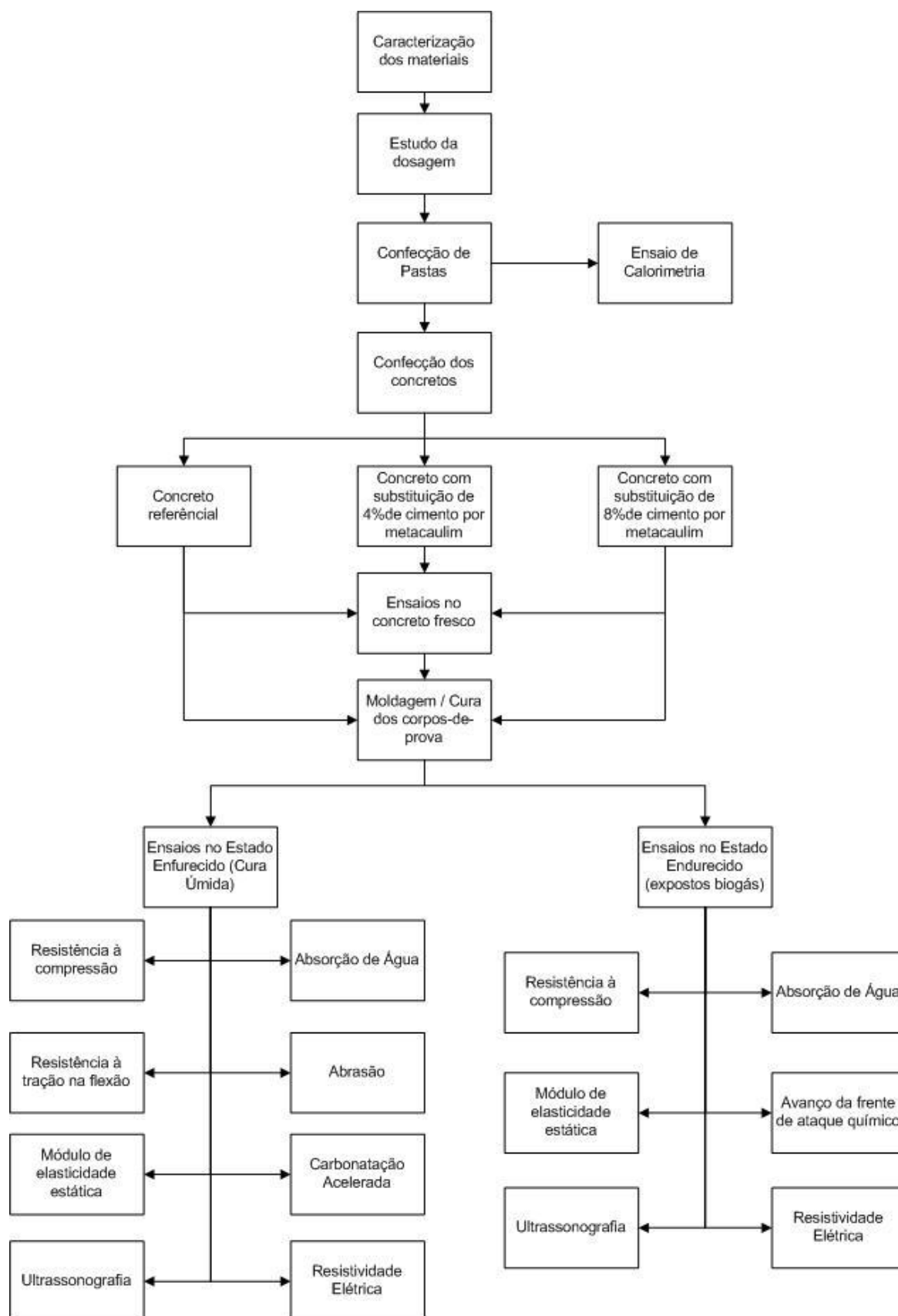


Figura 4.1- Fluxograma Esquemático dos Experimentos.

## 4.1 Materiais utilizados

Os materiais empregados para confecção das três tipologias de concreto foram:

- Cimento: CP V ARI RS;
- Pozolana – metacaulim;
- Areia Natural de Cava e Areia Artificial ;
- Brita 0 e Brita 1 de Calcário;
- Água potável tratada;
- Aditivo Polifuncional.

## 4.2 Caracterização dos materiais

O cimento e o metacaulim foram caracterizados pelos respectivos fabricantes.

### 4.2.1 Cimento Portland

O cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V ARI RS), pode receber adições de escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos. O cimento Portland resistente a sulfatos deve atender aos requisitos químicos, físicos e mecânicos estabelecidos conforme seu tipo e classe originais e apresentar expansão menor ou igual a 0,03 %, aos 56 dias de idade quando ensaiado pelo método estabelecido pela ABNT NBR 13583 (NBR 16697:2018).

A escolha desse cimento se deu pelo fato de ser um dos cimentos mais utilizados em obras de estruturas do sistema de esgotamento sanitário e por ter disponibilidade comercial nas concreteiras da região de Belo Horizonte. O cimento utilizado na pesquisa foi um CP V ARI RS, que é normatizado pela NBR 5733:1991, atual, NBR 16697:2018, foi fabricado pela LafargeHolcim de Pedro Leopoldo-MG, lote do período de 22/03/17 a 16/04/17. Sua caracterização física e química está descrita conforme Tabela 4.1 e Tabela 4.2 e mesmo lote de cimento (Figura 4.2). O cimento CP V ARI RS possui menor teor de CH e  $C_3A$  que o CP V ARI Plus, portanto menos formação de etringita e menor disponibilidade de cálcio atacável, levando a uma maior resistência ao ataque de sulfatos.

Tabela 4.1 – Características físicas do Cimento CP V ARI RS

Propriedade Analisada	Método de Ensaio	Resultados	Limites NBR 5733
Área Específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	NBR 16372	4456	≥ 3000
Tempo de Início Pega (min.)	NBR NM 65	171	≥ 60
Tempo de Fim Pega (min.)	NBR NM 65	224	≤ 600
Resistência à Compressão 1 dia (MPa)	NBR 7215	17,9	≥ 11,0
Resistência à Compressão 3 dia (MPa)	NBR 7215	33,6	≥ 24,0
Resistência à Compressão 7 dia (MPa)	NBR 7215	42,2	≥ 34,0
Resistência à Compressão 28 dias (MPa)	NBR 7215	54,1	-

Fonte: LafargeHolcim, 2017.

Tabela 4.2 - Características químicas do cimento CP V ARI RS.

	Norma	Resultado (%)	Limites NBR 5733
PF1000°C	NBR NM 18	3,56	≤ 4,5
Resíduo Insolúvel	NBR NM 15	0,95	≤ 1,0
SiO <sub>2</sub>	NBR 14656	23,09	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NBR 14656	6,73	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NBR 14656	2,72	-
CaO	NBR 14656	57,75	-
MgO	NBR 14656	1,94	-
SO <sub>3</sub>	NBR 14656	2,80	≤ 4,5
K <sub>2</sub> O	NBR 14656	0,66	-
CO <sub>2</sub>	NBR NM 20	2,30	≤ 3,0
C <sub>3</sub> A (Teórico)	Equação Bogue	5,32	-

Fonte: LafargeHolcim, 2017.



Figura 4.2 - Cimento CP V ARI RS utilizado na pesquisa.

#### 4.2.2 Pozolana metacaulim

O metacaulim é um subproduto silicoaluminoso originado da calcinação do rejeito do beneficiamento do caulim com diâmetros da ordem de 1 µm. O metacaulim utilizado é de alta reatividade, de coloração bege-claro, fabricado pela Metacaulim do Brasil em 12/03/2017 (Figura 4.3). Sua caracterização física e química está descrita, conforme Tabela 4.3 e Tabela 4.4, a seguir:

Tabela 4.3 - Características físicas do Metacaulim HP Ultra.

	Unidade	Resultado	Limites Norma
Finura (< #325; 44 µm)	%	8,3	< 10,0 %
Área Específica	cm <sup>2</sup> /g	199.000	> 150.000
Massa Específica	kg/dm <sup>3</sup>	2,53	2,60 >M.E. >2,45
Massa Unitária	kg/dm <sup>3</sup>	0,62	0,75 >M.U. >0,55

Fonte: Metacaulim do Brasil, 2017.

Tabela 4.4 - Características químicas do Metacaulim HP Ultra.

Elemento	Resultado (%)	Limites NBR 15894 (%)
SiO <sub>2</sub>	59,1	24,0 - 65,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33,0	32,0 - 46,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,1	-
TiO <sub>2</sub>	1,3	-
CaO	0,3	-
MgO	0,2	-
K <sub>2</sub> O	1,7	-
Na <sub>2</sub> O	0,2	≤ 0,5
SO <sub>3</sub>	0,0	< 1,0
Perda ao Fogo	2,2	< 4,0

Fonte: Metacaulim do Brasil, 2017.



Figura 4.3 – Embalagem do metacaulim utilizado e aspecto visual.

#### 4.2.3 Agregados

Os agregados selecionados para a pesquisa foram compostos por dois tipos de agregados miúdos e dois tipos de agregado graúdo, para melhor distribuição granulométrica. Os agregados miúdos são de areia natural de cava e areia

artificial de gnaisse. Os agregados graúdos são provenientes de rocha britada de calcário. Os agregados foram caracterizados conforme a norma NBR 7211:2009.

#### 4.2.4 *Água potável tratada*

Na elaboração das dosagens para confecção dos corpos de prova (CP) foi utilizada água potável tratada. Ressalta-se a importância da utilização de uma água limpa sem contaminantes como óleos, resíduos orgânicos e com o pH neutro.

#### 4.2.5 *Aditivo redutor de água*

Aditivo plastificante multifuncional retardador de pega, fabricado pela MC Bauchemie, tipo Muraplast FK 820, com características descritas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Características do Aditivo.

Característica	Unidade	Valor	Observação
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	1,20	
Dosagem	%	0,2 a 1,0	Sobre o peso do cimento
Estado/cor	-	-	Líquido de cor marrom

Fonte: MC do Brasil.

### 4.3 **Composição do biogás**

Para conhecer o ambiente a que os corpos de prova foram expostos na região gasosa do reator UASB, fez-se necessário conhecer sua composição química. Para determinação dessa composição do biogás produzido na ETE em estudo foi utilizada a técnica de cromatografia gasosa e o teor de umidade foi determinado por absorção de água em adsorvente específico. A coleta foi feita na linha do queimador tipo Flare da ETE, durante diversos dias em horários diferentes, com resultados médios descritos na Tabela 4.6 (COPASA, 2010).



Tabela 4.6 - Composição Química do biogás.

Parâmetros Determinados	%mol/mol
CH <sub>4</sub> (%mol/mol)	75,7
CO <sub>2</sub> (%mol/mol)	11,0
CO (%mol/mol)	< 0,01
O <sub>2</sub> (%mol/mol)	1,6
N <sub>2</sub> (%mol/mol)	10,0
H <sub>2</sub> (%mol/mol)	< 0,01
Teor de Umidade (%)	1,2
H <sub>2</sub> S (μmol/mol)	1050

Fonte: COPASA, adaptado autor, 2010.

A alta fração de nitrogênio presente no biogás é devido à presença de N<sub>2</sub> dissolvido no efluente, que nos reatores anaeróbios é retirado na fase gasosa, junto ao metano produzido. A composição química do biogás difere um pouco da bibliografia, apresentando um teor de metano de 75,7%, superior à faixa de 60 a 70% e um teor de 11,0%, inferior a faixa de 30 a 40%, estudada por Chernicharo (2016).

#### 4.4 Dosagem do concreto

A pesquisa teve como premissa estudar o concreto que pode ser aplicado em Reatores UASB expostos à agressividade interna do ambiente, neste caso, ao biogás gerado no processo de tratamento anaeróbio, que causam danos físicos e químicos ao concreto, ambiente este classificado como classe IV, conforme NBR 6118:2014.

O estudo de dosagem dos concretos foi concebido para atender requisitos da classe de agressividade IV, conforme norma ABNT 12655:2015, ou seja, fck de 40 MPa, fator água/cimento de 0,45, consumo mínimo de cimento por volume de concreto de 360 Kg/m<sup>3</sup> (Tabela 4.7).

Neste estudo avaliou-se a influência do metacaulim no desempenho dos concretos dosados com cimento CP V ARI RS, sendo dosado uma composição referencial, conforme requisitos de norma e outras 2 (duas) dosagens variando o teor de substituição parcial em massa do cimento pelo Metacaulim, mantendo-se

constantes o tipo de cimento e a relação água/aglomerantes, conforme Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Requisitos das diferentes dosagens de concreto.

Dosagem	Tipo de Cimento	A/agl.	Consumo mínimo de cimento	Fck (MPa)	% substituição, Metacaulim
Tipo 1	CP V ARI RS	0,45	360 Kg/m <sup>3</sup>	40	-
Tipo 2	CP V ARI RS	0,45	360 Kg/m <sup>3</sup>	40	4
Tipo 3	CP V ARI RS	0,45	360 Kg/m <sup>3</sup>	40	8

O método empregado para a definição das dosagens baseou-se na dosagem experimental, sendo utilizado um método desenvolvido pela equipe técnica da LafargeHolcim, a partir das recomendações dos métodos definidos pela ABCP (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e ACI (American Concrete Institute).

Um dos parâmetros definidos para a dosagem foi a condição fixa de consistência, estabelecendo para todos os concretos um abatimento de tronco de cone de 120 ± 20 mm, para atender à consistência de concreto necessária para bombeamento em obras de saneamento. Foi pesquisado junto a concreteiras da Região Metropolitana de Belo Horizonte que a partir de *slump* 100 mm, o concreto é comercializado como bombeado, diferentemente dos conceitos anteriormente descritos da norma NBR 8953:2015, de 160 a 215 mm.

Para o preparo do concreto foram utilizados critérios para atender as necessidades de trabalhabilidade, resistência e durabilidade, em conformidade com a norma NBR 12655:2015. De acordo com a norma NBR 8953:2015 a classe de resistência à compressão de aplicação do concreto se enquadra de C10 a C80, sendo dosado para a Condição “A” da norma NBR 12655:2015, com critérios de medidas de cimento, agregado e água medidos em massa, com a água corrigida em função da umidade, garantindo a resistência de projeto com baixa variabilidade medida pelo baixo desvio-padrão.

Primeiramente, foram realizadas misturas experimentais para ajuste das características do concreto fresco e endurecido. Para as dosagens foi utilizada a proporção de agregados, medidos em massa: agregados miúdos de 50% de areia

fina (areia artificial de gnaisse) e 50% de areia grossa (areia natural de cava); agregados graúdos na proporção de 20% de brita 0 e 80% de brita 1.

Durante o desenvolvimento da dosagem experimental foram realizadas misturas com volume de 25 litros por betonada, até definição do traço. O volume da dosagem final foi de 150 litros, baseado na quantidade de concreto necessário para a moldagem de corpos de provas previstos nos ensaios propostos, para as 3 (três) diferentes dosagens e para as 2 (duas) condições de exposição.

#### 4.4.1 Sequência de mistura na betoneira

Para a realização da dosagem do concreto definido após estudos, primeiramente realizou-se uma mistura de concreto de volume 5 litros com a mesma dosagem da mistura a ser realizada para homogeneizar a betoneira. Os materiais foram todos pesados e preparados para adição sequencial na betoneira, conforme Figura 4.4.



Figura 4.4 - Materiais devidamente medidos em massa, para a mistura, 2017.

O procedimento para a mistura do concreto na betoneira de eixo inclinado foi o padronizado na LafargeHolcim e consistiu na seguinte sequência: agregado graúdo; 70% da água e mistura por 1 minuto; adição do cimento e mistura por 1 minuto; agregados miúdos e mistura por 1 minuto; adição do aditivo polifuncional com o restante da água, com exceção de 500 a 600 ml e mistura por até 5 minutos, avaliando visualmente a mistura do concreto, pela curva gerada no concreto, conforme Figura 4.5; essa água restante é adicionada gradualmente até alcançar o *slump* definido.

Nas misturas com adição do metacaulim, este material foi adicionado juntamente com o cimento.

Após o concreto estar devidamente homogeneizado, procedeu-se a leitura da temperatura do concreto recém misturado com um termômetro laser digital (Figura 4.6), para que as dosagens fossem misturadas na mesma temperatura, mantendo-se a mesma reologia.



Figura 4.5 - Avaliação visual da mistura do concreto em fase de homogeneização, 2017.



Figura 4.6 - Medição da temperatura do concreto homogeneizado, 2017.

#### 4.5 Ensaio de caracterização das pastas

Para avaliar a influência do metacaulim nas propriedades do concreto, foi feita a caracterização das pastas, sendo separada uma quantidade de cimento, metacaulim e aditivo polifuncional, do mesmo lote utilizado para dosagem do concreto e enviada para o laboratório Central da LafargeHolcim em São Paulo. As pastas de cimento foram confeccionadas com 200 gramas de cimento, nas mesmas proporções utilizadas nas dosagens dos concretos (Tabela 4.8), onde foi realizado o ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC) para avaliar a evolução da temperatura ao longo do tempo das pastas.

Este ensaio, que não é normalizado, busca mensurar a reação isotérmica do cimento durante processo de hidratação, através de aquecedores individuais e medindo a diferença de potencial de entrada dos termopares. O equipamento de calorimetria utilizado no ensaio é da marca GRACE Adiacal, que consiste numa caixa lacrada de 8 canais de entrada e 8 termopares, conforme Figura 4.7, com o fluxo de calor determinado por meio de uma curva de calor de hidratação ao longo do tempo.



Figura 4.7 - Equipamento do ensaio de calorimetria e amostras preparadas.  
Fonte: LafargeHolcim, 2017.

Tabela 4.8 - Diferentes dosagens das pastas.

Dosagem	Composição das pastas
Dosagem 1	Cimento + água + 0,87% aditivo polifuncional
Dosagem 2	Cimento + água + 0,87% aditivo polifuncional + 4% metacaulim
Dosagem 3	Cimento + água + 0,87% aditivo polifuncional + 8% metacaulim

## 4.6 Caracterização física dos concretos no estado fresco

Os concretos foram avaliados no estado fresco, para verificação da sua trabalhabilidade e quanto ao teor de ar incorporado.

### 4.6.1 Ensaio de ar incorporado

O ensaio de ar incorporado (Figura 4.8), segundo a norma NBR NM 47:2002, foi realizado logo após a confecção do concreto para avaliar o teor de ar incorporado durante o processo de confecção do mesmo, fator este, que influencia diretamente em suas propriedades de resistência mecânica e de durabilidade. As amostras de concreto utilizadas neste ensaio foram descartadas, logo após a leitura, para não interferirem na dosagem definida, pois essas amostras ficam com fator água/aglomerantes aumentado.



Figura 4.8 - Equipamento para leitura do teor de ar incorporado, 2017.

#### 4.6.2 Ensaio de abatimento de tronco de cone

O ensaio de abatimento de tronco de Cone foi utilizado para aferir a trabalhabilidade dos concretos definidos na dosagem experimental, sendo realizado conforme a norma NBR NM 67:1998. A Figura 4.9 mostra a leitura realizada no concreto dosado com 4% de metacaulim.



Figura 4.9 - Verificação do *Slump* do concreto, 2017.

#### 4.7 Moldagem e cura dos corpos de prova

Após avaliação dos concretos no estado fresco, foram moldados por tipo de concreto: 37 corpos de prova cilíndricos, de dimensões 100mm x 200mm (diâmetro x altura); 3 corpos de prova prismáticos, de dimensões mínimas 150mmx 150 mm x 500mm (base x largura x comprimento) e 2 corpos de prova em concreto de dimensões 70mm x 70mm x 30mm (base x largura x altura).

Os corpos de prova foram moldados de acordo com os ensaios propostos na pesquisa, para realização de estudo comparativo do concreto, através de diversos ensaios para avaliarem parâmetros mecânicos e de durabilidade, curados em câmara úmida (aos 7, 28 dias e 9 meses) e após ser exposto à atmosfera interna dos reatores UASB (8 meses), avaliando os mecanismos de deterioração provocados pelos gases gerados no tratamento de esgoto aos concretos e as alterações das propriedades do concreto, conforme matriz de ensaios para cada concreto proposto na Tabela 4.9. O período de realização do experimento foi definido em função do prazo para conclusão da pesquisa de mestrado.

Os corpos de prova prismáticos de 150 x 150x 500 e cilíndricos de 100 mm x 200 mm foram moldados segundo diretrizes da norma NBR 5738:2008, sendo adensados com haste, conforme mostrado nas Figura 4.10 e Figura 4.11.



Figura 4.10 - Moldagem de corpos de prova prismáticos, 2017.



Tabela 4.9- Matriz de ensaios no concreto.

Ensaio	Normas	Tipo CP	Tamanho CP (mm)	Quantidade				Total
				7 dias	28 dias	100 dias	9 meses	
Análise Calorimetria - DSC (pasta)	não normalizado	Ensaio Pasta Cimento						
Trabalhabilidade - Tronco de cone	NBR NM 67	Ensaio Concreto Fresco						
Ensaio de ar incorporado	NBR NM 47							
Resistência à Compressão	NBR 5739 (ABNT, 2007)	Cilindrico	100 x 200	5	5		5+5	20
Módulo de elasticidade estático	NBR 8522 (ABNT, 2008)	Cilindrico	100 x 200	3*	3*		3+3*	12*
Propagação de Onda Ultrassônica	NBR 8802 (ABNT, 2013)	Cilindrico	100 x 200	3*	3*		3+3*	12*
Resistência à Tração na Flexão	NBR 12142 (ABNT, 2010)	Prismático	150x150x500		3			3
Absorção de água	NBR 9778 (ABNT, 2005)	Cilindrico	100 x 200				3+3	6
Carbonatação Acelerada	KULAKOWSKI (Tese)	Cilindrico	100 x 200			3		3
Carbonatação ao biogás	-	Cilindrico	100 x 200				2	2
Resistividade elétrica	NBR 9204 (ABNT, 2012)	Cilindrico	100 x 200				2	2
Abrasão	NBR 12042 (ABNT, 1992)	Prismático	70x70x30		2			2
Reserva (exposto)		Cilindrico	100 x 200				4	4
Total								37

#### Observações:

\* Os corpos de prova a serem utilizados na determinação da propagação da onda ultrassônica, serão os mesmos daqueles que serão utilizados para módulo de elasticidade estático (demarcados com asterisco), para posterior ensaio de compressão;

Os corpos de prova do ensaio de abrasão foram moldados em formas de madeira, previamente preparadas com desmoldante. Para o adensamento do concreto foi utilizado um soquete para compactação de corpos de prova de argamassa, com 30 golpes para seu adensamento, seguindo norma NBR 7215:1996, conforme Figura 4.12.



Figura 4.11 - Moldagem de corpos de prova cilíndricos, 2017.



Figura 4.12 - Moldagem dos corpos de prova para ensaio de abrasão, 2017.

Decorridas 24 horas da moldagem dos corpos de prova, expostos à temperatura ambiente, os mesmos foram desmoldados e levados para a câmara úmida da LafargeHolcim (Figura 4.13), em conformidade com diretrizes na NBR 5738:2008. As condições operacionais da câmara úmida, mostrada na Figura 4.13, são de

temperatura aproximada de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa superior a 95%, com aspersão de névoa de água.



Figura 4.13 - Câmara úmida, 2017.

Para realização dos ensaios mecânicos propostos, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida com 1 (um) dia de antecedência e ficaram na sombra, expostos à temperatura ambiente do laboratório de análise.

#### **4.8 Local de exposição dos corpos de prova ao biogás**

Os corpos de prova foram expostos, por meio de dispositivos de suportes, nos pontos de inspeção e coleta de biogás, em um dos reatores da Estação de Tratamento de Esgoto Onça da COPASA (Figura 4.14). Na Figura 4.15 é apresentado o perfil transversal do reator, onde os corpos de prova foram instalados na região superior, que é a região gasosa. A ETE Onça é localizada junto ao Ribeirão do Onça, no município de Santa Luzia - MG, próximo a Belo Horizonte - MG, Brasil.



Figura 4.14 - Foto Aérea da ETE Onça.  
Fonte: COPASA, 2013.

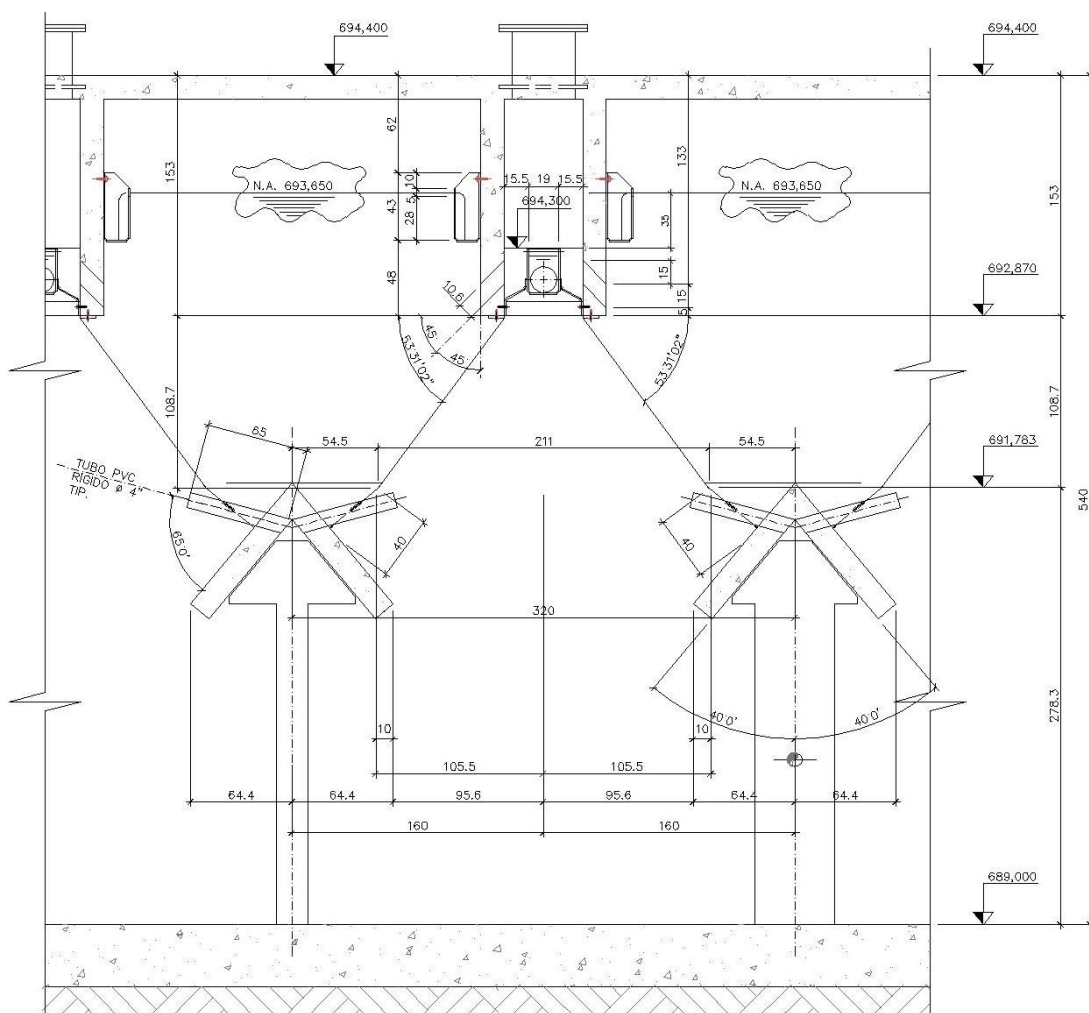


Figura 4.15 - Detalhe Corte Seção Transversal do Reator.  
Fonte: COPASA, 2010.

#### 4.9 Dispositivos de suporte de corpos de prova

Os corpos de prova foram expostos ao biogás, utilizando-se dispositivos de suportes fabricados em aço carbono ASTM A36, de acordo com projeto exibido na Figura 4.16. Estes dispositivos foram dimensionados considerando que o ponto de inspeção continuasse hermeticamente fechado quanto ao escape de gases, que fosse ergonômico ao seu manuseio e que resistisse à carga e à atmosfera agressiva. Em cada dispositivo foram posicionados 6 corpos de prova de concreto. Para que os suportes resistissem ao biogás, que é uma atmosfera bastante agressiva, foram protegidos com pintura anticorrosiva, de base epóxi, da fabricante BEMA Tintas. A Figura 4.17 mostra os dispositivos de suportes dos corpos de prova posicionados sobre os pontos de inspeção e coleta de biogás, localizados na laje superior em um dos reatores da Estação de Tratamento de Esgoto e a Figura 4.18 a sua instalação. Os corpos de prova e dispositivos foram identificados por tipo de concreto dosado.

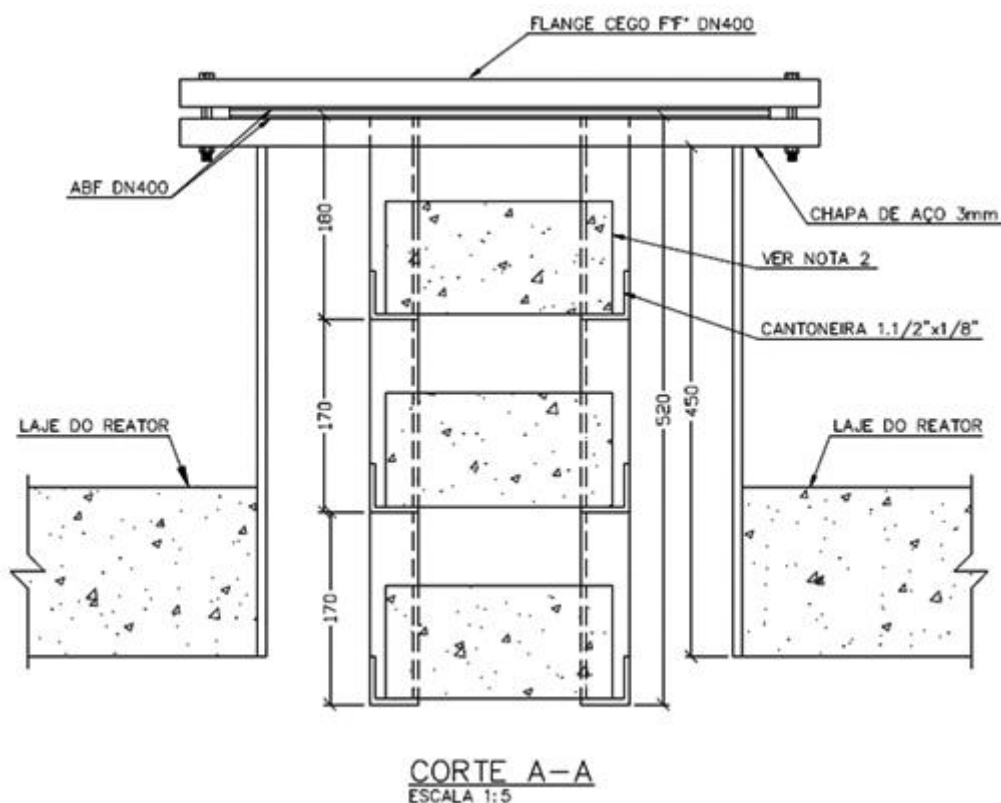


Figura 4.16 - Projeto dispositivo de suporte.



Figura 4.17 - Suportes com os corpos de prova posicionados sobre os pontos de inspeção e coleta do biogás, previamente à sua instalação, 2017.



Figura 4.18 - Instalação do dispositivo de suporte, 2017.

#### **4.10 Propriedades mecânicas dos concretos no estado endurecido**

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de propriedades mecânicas do concreto, sendo realizados: ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade estático, resistência à tração na flexão e ensaio de propagação de onda ultrassônica, conforme normas vigentes, para as idades de 7 dias, 28 dias e 9 meses de cura úmida e de 8 meses de exposição ao biogás, após período de cura inicial, totalizando mesma idade que os concretos que ficaram apenas em cura úmida.

##### *4.10.1 Ensaio de resistência à compressão axial e medição do módulo de elasticidade*

Para a determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade foram moldados corpos de prova cilíndricos (molde de 100 mm de diâmetro x 200 mm de comprimento), sendo previstos 5 corpos de prova por concreto estudado, utilizando 2 corpos de prova para resistência à compressão, para as idades determinadas de 7 dias, 28 dias e de 9 meses de cura úmida e de 8 meses de exposição ao biogás, após cura inicial de 28 dias. Os ensaios foram realizados conforme diretrizes da NBR 5739:2007, para obter a tensão estimada para o ensaio de módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade estático foi determinado conforme estabelecido na NBR 8522:2008, utilizando 3 corpos de prova por dosagem, em cada período definido para determinação da resistência.

Os ensaios foram realizados no laboratório de concreto da LafargeHolcim, utilizando uma prensa alemã da marca Mohr Federhaff Losenhausen, modelo DPT 200 do tipo eletro hidráulico, de capacidade 200 toneladas (Figura 4.19).



Figura 4.19 - Prensa utilizada e corpo de prova equipado com LVDT's, 2017.

Primeiramente foi realizado o ensaio de resistência à compressão em 2 corpos de prova da mesma betonada, preparados e curados sob as mesmas condições, de acordo com o que estabelece a NBR 5738:2008, com velocidade de aplicação de carga de  $(0,45 \pm 0,15)$  MPa/s, medindo a carga de ruptura e posteriormente calculado a carga média, determinando a resistência à compressão simples, denominada  $f_c$ . Os corpos de prova são ensaiados na condição de umidade saturado superfície seca.

Para o ensaio de módulo de deformação o corpo de prova deve se encontrar centralizado nos pratos da máquina, ser instrumentado com a instalação de 2 LVDT's (*Linear Variable Differential Transformer*) no corpo de prova, tendo cuidado com pontos vazios na superfície do concreto, acoplado a um sistema digital de alta precisão ( $1 \mu\text{m}$ ). Aplicou-se uma carga de acomodação de 3 ciclos de carregamentos até 30% da carga média calculada à velocidade de  $(0,45 \pm 0,15)$  MPa/s e descarregamentos até uma força próxima a zero, conforme metodologia A - Tensão fixa da NBR 8522:2008. Em seguida, carregou-se o corpo de prova até 70% da carga média, registrou-se as leituras de deformação de 0 a 70%,



subdivididos de 10 em 10%, descarregou-se o corpo de prova novamente até carga próxima a zero.

Após este procedimento, foi feita a liberação da instrumentação de leitura de deformação, submetendo-se ao ensaio de compressão axial, carregando na mesma taxa de velocidade utilizada para resistência à compressão, até que se produziu a ruptura, obtendo-se a resistência efetiva do concreto, para critério de conformidade. Os corpos de prova da dosagem de referência são mostrados antes e após a realização dos ensaios (Figura 4.20), que apresentaram um tipo de ruptura predominante, tipo E–Cisalhada, conforme norma NBR 5739:2007.



Figura 4.20 - Corpos de Prova antes e após realização dos ensaios, 2017.

Com os dados obtidos nos ensaios foram determinados os módulos de elasticidade secantes, calculados a partir da derivada da reta traçada da origem até o ponto da curva correspondente a tensão de 30% da carga de ruptura, conforme norma NBR 8522: 2008.

Após a realização do ensaio de módulo de elasticidade os corpos de prova são rompidos, apenas como controle de qualidade, para verificar se apresentam valores de resistência à compressão da mesma ordem de grandeza daqueles dois utilizados na resistência à compressão. Caso os valores obtidos diferirem em mais de 20% do  $f_c$ , os resultados desses corpos de prova devem ser descartados.

#### 4.10.2 Ensaio de resistência à tração na flexão

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados na mesma prensa utilizada para o ensaio de resistência à compressão (Figura 4.21). Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão, de acordo com a norma NBR 12142:2010. Foram confeccionados 3 corpos de prova prismáticos de dimensão 150x150x500 mm para cada dosagem, que foram ensaiados na idade 28 dias, com velocidade carga de  $(1,05 \pm 0,15)$  MPa/min.



Figura 4.21 - Dispositivo auxiliar para realização do ensaio de tração na flexão, 2017.

#### 4.10.3 Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica

Os ensaios foram realizados conforme NBR 8802:2013, objetivando-se avaliar o desempenho da compacidade interna dos concretos dos corpos de prova. Foi realizado o ensaio de ultrassom nos corpos de prova previamente à realização dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, para as idades de 28 dias e 9 meses de cura úmida e para os corpos de prova expostos ao biogás com idade de também 9 meses, sendo 8 meses expostos ao biogás.

O ensaio de ultrassom foi realizado no laboratório da LafargeHolcim, utilizando o equipamento Pundit Lab (+) da PROCEQ, com distância de 200 mm (comprimento longitudinal do CP) entre os transdutores transmissor e receptor.



Figura 4.22 - Ensaio de ultrassom com equipamento Pundit Lab (+) da PROCEQ.

#### **4.11 Ensaios de durabilidade do concreto**

Visando conhecer o comportamento dos concretos quanto aos parâmetros de durabilidade, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de absorção, carbonatação acelerada, carbonatação resultante da exposição ao biogás, resistividade elétrica e abrasão.

##### *4.11.1 Pré-condicionamento dos CP's para os ensaios de absorção de água e carbonatação acelerada.*

A RILEM em 1999, publicou a norma TC 116 PCD que descreve uma metodologia para o pré-condicionamento de corpos de prova, como preparação para ensaios de medição da permeabilidade a gases e absorção de água, que constitui-se de duas etapas: pré-secagem e redistribuição da umidade de corpo-de-prova, para amostras de concreto com mais de 28 dias. O método define primeiramente a medição da água totalmente evaporável ao final do período de cura a 105°C secagem até constância de perda de massa, igual a menos que 0,5 g entre duas medidas consecutivas. Para determinação da quantidade de perda de peso do

concreto durante pré-secagem também é necessária a medição da umidade de equilíbrio em um ambiente com  $75 \pm 2\%$  de umidade do ar e temperatura de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ , demandando tempo prolongado para os materiais alcançarem a umidade interna de equilíbrio, para serem ensaiados.

Os corpos de prova das três tipologias de concreto estudadas foram desmoldados após 24 h e mantidos em cura úmida por um período de 28 dias para o ensaio de absorção e 70 dias para o ensaio de carbonatação. A diferença de período de cura dos corpos de prova para esses ensaios foi devido a disponibilidade de tempo e logística para realização dos ensaios. Após período de cura, foi realizada a secagem dos corpos de prova, conforme recomendação RILEM TC 116PCD (1999) e NBR 9778:2005, onde os corpos de prova foram submetidos à estufa, a uma temperatura de  $\pm 105^\circ\text{C}$ , para um processo de secagem, na qual foram medidas as massas de cada corpo de prova após permanência na estufa de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, até a constância de massa no decorrer destes dias, não podendo exceder a 0,5% do menor valor entre duas pesagens consecutivas (Figura 4.23).



Figura 4.23 - Secagem em estufa de corpos de prova.

Seguindo o procedimento definido por Teixeira (2014) os corpos de prova cilíndricos, de dimensão igual a 100 x 200 mm, usados para o ensaio de carbonatação acelerada, após procedimento de secagem descrito anteriormente, foram retirados da estufa e deixados ao ar por algumas horas, para resfriamento,

sendo então, envoltos por um filme de PVC impermeável e lacrados em uma caixa de isopor, hermeticamente fechada, para o equilíbrio da sua umidade interna e mantidos em uma caixa plástica hermeticamente fechada por 65 dias (Figura 4.24).



Figura 4.24 - Condicionamento corpos de prova, pós secagem em estufa, 2017.

#### 4.11.2 Absorção de água no concreto

A porosidade aberta dos concretos foi avaliada por meio de ensaios de absorção de água, com base na NBR 9778:2005, sendo previstos 3 corpos de prova de dimensões de 100 mm x 200 mm, para cada dosagem estudada, aos 28 dias e posteriormente aos 8 meses de cura úmida contínua com os expostos ao biogás, comparando os resultados obtidos.

Após o período de pré-condicionamento os corpos de prova foram imersos em água à temperatura de  $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$  durante 72 h, até constância da massa, sendo determinadas as massas dos corpos de prova secados superficialmente com pano, podendo-se calcular a absorção de água por imersão, utilizando a seguinte equação:

$$\text{Absorção} = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \cdot 100$$

Onde:  $M_{sat}$  = massa do corpo-de-prova saturado e  $M_s$  = massa do corpo-de-prova em estufa.

Completada a etapa de saturação em água à temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C, continuou-se com a permanência dos corpos de prova em água progressivamente levados à ebulição por um período de 5 horas, determinando a massa saturada e massa submersa dos corpos-de-prova, calculando-se a absorção de água após fervura e o índice de vazios, que é a relação entre o volume dos poros permeáveis e o volume total dos corpos de prova, expressa em %. A massa do corpo-de-prova saturado imerso em água é determinada utilizando balança hidrostática (Figura 4.25).

$$\text{Índice de Vazios} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \cdot 100 \quad 4.2$$

Onde:  $M_i$  = massa do corpo-de-prova saturado, imerso em água.



Figura 4.25 - Determinação da massa do corpo de prova imerso em água, utilizando balança hidrostática, 2017.

#### 4.11.3 Ensaio de carbonatação acelerada

Após o procedimento de pré-condicionamento, dando continuidade ao procedimento definido por Teixeira (2014), os corpos de prova foram colocados na câmara de carbonatação acelerada por um período de 106 dias, submetidos a uma atmosfera de 5% CO<sub>2</sub>, com temperatura variando no intervalo de 29,4 a 31,1°C e umidade relativa variando no intervalo de 45 a 60%. Foi adotado o mesmo procedimento definido por Teixeira(2014) para comparação de resultados obtidos nas duas pesquisas. A câmara de carbonatação utilizada foi Thermo Fisher Scientific, modelo RCO 3000 T-5-VBC, do Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica da UFMG (Figura 4.26).



Figura 4.26 - Equipamento de carbonatação acelerada do DEMC, 2018.

Após a retirada dos corpos de prova da câmara de carbonatação iniciou-se o rompimento dos corpos de prova, via ensaio à tração por compressão diametral, conhecido por método de Lobo Carneiro, porém houve a perda de um dos CPs, optando-se por fazer o corte longitudinal dos demais corpos de prova usando serra circular. Para observação da frente de carbonatação foi aspergido o

indicador químico fenolftaleína 1% sobre a parte interna do CP, onde a parte carbonatada do concreto não altera sua cor e o concreto não carbonatado fica com a cor vermelha ( $\text{pH} \geq 10$ ), exibido na Figura 4.27.

Após a aspersão de fenolftaleína, as amostras foram fotografadas e importadas para análise no AutoCad, para medição das profundidades de carbonatação por meio de análise de imagem, usando escala de referência, que medidas nos corpos de prova, conforme Figura 4.28.



Figura 4.27 - Fotografia da seção de corpo-de-prova com 8% de metacaulim, após realização do ensaio de carbonatação acelerada.



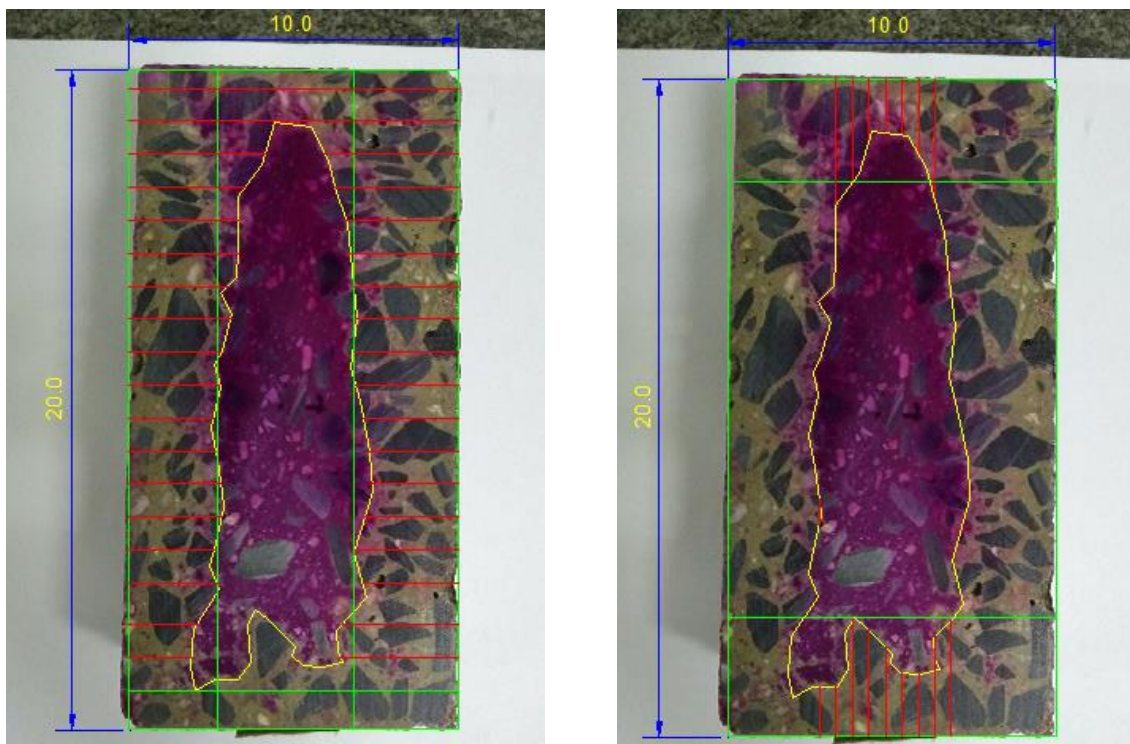


Figura 4.28 - Medidas da frente de carbonatação, utilizando o Auto CAD.

Com base na metodologia desenvolvida por Werle *et al.* (2011), para leitura das frentes de carbonatação nos corpos de prova, determinou-se o contorno de toda a área de interesse; em seguida, foram traçadas linhas paralelas, equidistantes entre si, através da ferramenta poli-linha, com espaçamento de 1 cm para cada face analisada. Desta forma, foram feitas medidas de profundidade de carbonatação para cada metade de um mesmo corpo de prova, proporcionando uma profundidade média bastante confiável. Foi calculado o coeficiente de carbonatação por meio da equação 3.16, descrita no item 3.4.7.

#### 4.11.4 Medida da frente de carbonatação em corpos de prova expostos ao biogás – teste de fenolftaleína

Para este ensaio foram previstos 2 corpos de prova por dosagem, que passaram por um período de cura úmida de 28 dias e depois foram expostos ao biogás, por meio de um dispositivo projetado, por um período de 8,5 meses, totalizando a idade total de 295 dias.

Após retirada do reator os corpos de prova foram cortados longitudinalmente com uma serra circular, onde na seção cortada foi aspergida fenolftaleína 1% e feita a leitura da profundidade de penetração da frente de carbonatação.

O ensaio de verificação da frente de carbonatação foi proposto para comparação dos resultados do ensaio de carbonatação acelerada e medição da carbonatação do concreto exposto ao biogás, para fazer uma estimativa de proporcionalidade dos resultados.

#### 4.11.5 Medição da resistividade elétrica

No Brasil, a medição de resistividade elétrica volumétrica em concretos endurecidos é padronizada pela norma NBR 9204:2012. Contudo, neste trabalho, foi adotada a metodologia proposta por Lage *et al.* (2017), no qual foi desenvolvido um circuito elétrico em que o concreto atua como uma impedância de resistência desconhecida. Esse circuito é constituído por um osciloscópio, duas placas de cobre quadradas com arestas de 100mm e espessura de 2mm, conjunto de resistores com resistências conhecidas (denominado *shunt*) e um gerador de sinais de frequência pré-estabelecida.

A norma NBR 9204:2012 recomenda que a saturação dos corpos de prova seja feita em câmara úmida durante 48 horas. Neste trabalho, os corpos de prova de concreto foram submetidos à cura em câmara úmida sob condições controladas de temperatura e umidade por 28 dias, sendo 2 corpos de prova por dosagem para fins de medição de resistividade elétrica. Para compensar a perda de saturação de água devido ao translado dos corpos de prova entre a câmara úmida da LafargeHolcim em Pedro Leopoldo e o Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica da UFMG, os corpos de prova foram imersos em água durante 4 horas e então submetidos ao ensaio de resistividade elétrica.

Um corpo de prova de concreto cilíndrico, com dimensões 10 x 20 cm, foi instalado entre as duas placas de cobre, conforme indicam a Figura 4.29. No circuito elétrico proposto, o concreto e os resistores do *shunt* (resistência

conhecida) são dispostos em séries, submetidos a uma tensão elétrica em torno de 8V, com frequência de aproximadamente 40 Hz controlada pelo gerador de sinais. A fim de obter maior área de contato entre as placas de cobre, as extremidades do concreto foram adicionadas esponjas de aço secas nas interfaces placa-concreto. Foram obtidas 5 medições de resistividade elétrica para cada corpo de prova, totalizando 10 medições para cada dosagem de concreto.

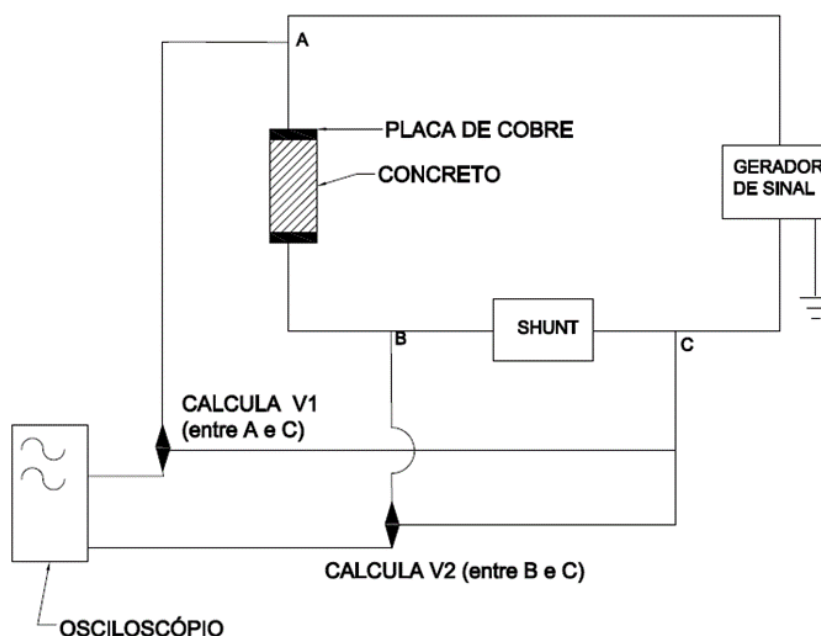


Figura 4.29 - Esquema de circuito elétrico para medição da condutibilidade elétrica usado neste trabalho.

Por meio do osciloscópio, mede-se a tensão gerada no circuito (tensão V1) e a tensão aplicada no *shunt* (tensão V2), unidade (V). Com esses valores, obtém-se o módulo da corrente elétrica do circuito e, em seguida, calcula-se a resistência elétrica do concreto, conforme a equação 4.3, na qual  $R_c$  é a resistência elétrica do concreto, unidade ( $\Omega$ ) e  $R_{shunt}$  é a resistência dos resistores contidos no *shunt*.

$$R_c = \frac{V1 - V2}{V2} \cdot R_{shunt} \quad 4.3$$

Dadas a geometria e as dimensões do corpo de prova, determina-se a resistividade elétrica do concreto ( $\Omega \cdot m$ ), utilizando a equação 4.4, na qual  $\rho$  indica

a resistividade elétrica,  $R_c$  a resistência elétrica do concreto,  $A$  é a área da base e  $L$  o comprimento longitudinal.

$$\rho = \frac{A}{L} \cdot R_c \quad 4.4$$

Medições de resistividade podem ser usadas para melhor entendimento da influência da composição do aglomerante na taxa de desenvolvimento microestrutural do concreto (NADELMAN e KURTIS, 2014).

#### 4.11.6 Medição da resistência à abrasão

Os ensaios foram realizados conforme NBR 12042:1992, prevendo 2 corpos de prova por tipologia de concreto estudada, com dimensões de 70x70x30mm, que foram submetidos ao desgaste Amsler, para a idade de 28 dias.

A aparelhagem para a execução do ensaio é apresentada na Figura 4.30 e realização do ensaios (Figura 4.31).

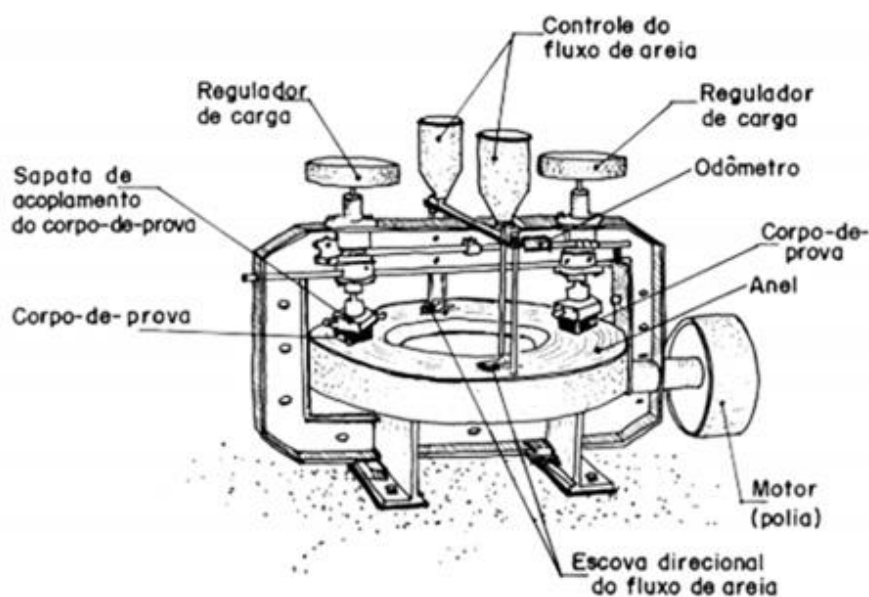


Figura 4.30 - Esquema do equipamento Amsler.  
Fonte: NBR 12042:1992.



Figura 4.31 - Ensaio de resistência à abrasão.

O equipamento deve apresentar um anel de ferro fundido com superfície plana e lisa, sendo utilizado no experimento o equipamento do fabricante CONTENCO, girando a uma rotação de 30 rpm. Como material abrasivo foi usada a areia seca número 50 (0,3 mm) padrão IPT, nos dois funis de armazenagem, que são usados como controle de fluxo de areia aproximado de  $(72 \pm 6) \text{ cm}^3/\text{min}$ . Com o auxílio de um paquímetro realizaram-se as leituras iniciais das alturas dos corpos de prova em cada ponto e pesou-se cada corpo de prova. Feitas as devidas leituras os corpos de prova foram posicionados nas respectivas sapatas de acoplamento do equipamento, com uma carga de 66 N. Colocou-se o equipamento em funcionamento, até que o anel completasse 250 voltas, que equivalem a um percurso dos corpos de prova em relação ao anel de aproximadamente 500 m. Após esse processo, os corpos de prova foram retirados do equipamento, feitas as leituras das alturas de cada ponto e da massa e repetiu-se o processo de abrasão até que completassem os 1000 metros (500 voltas). O desgaste por abrasão após 500 e 1000 m é calculado pela equação:

$$\text{Desgaste} = \frac{M_f - M_i}{M_i} \cdot 100\% \quad 4.5$$

Onde:  $M_i$  é a massa inicial do corpo de prova e  $M_f$  é a massa final do corpo de prova após 500 e 1000 m.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados os resultados de caracterização de agregados, da dosagem dos concretos, caracterização das pastas por calorimetria, caracterização dos concretos frescos, propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos.

### 5.1 Caracterização dos agregados

Os agregados selecionados para a pesquisa foram compostos por dois tipos de agregados miúdos e dois tipos de agregado graúdo, para melhor distribuição granulométrica. Os agregados miúdos são de areia de cava, de granulometria grossa e areia artificial de gnaiss, de granulometria fina, conforme Tabela 5.1 de caracterização.

Tabela 5.1 - Caracterização dos Agregados Miúdos.

Propriedade Analisada	Método de Ensaio	Unidade	Resultado Areia Grossa	Resultado Areia Fina
Módulo de Finura	NBR NM 248:2003	-	3,51	1,48
Dimensão Máxima Característica	NBR NM 248:2003	mm	6,3	2,4
Massa Específica	NBR NM 52:2009	kg/dm <sup>3</sup>	2,66	2,68
Massa Unitária Seca	NBR 7251:2006	kg/dm <sup>3</sup>	1,43	1,46
Mat. Pulverulento	NBR NM 46:2003	%	5,96	17,58
Zona Granulométrica	NBR NM 248:2003	-	Limite Utilizável Superior	Limite Utilizável Inferior

Fonte: LafargeHolcim, 2017.

Estão apresentadas na Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3 as imagens e curva granulométrica das areias fina e grossa.



Figura 5.1 – Fotografia das areias natural de cava e artificial de gnaiss, 2017.

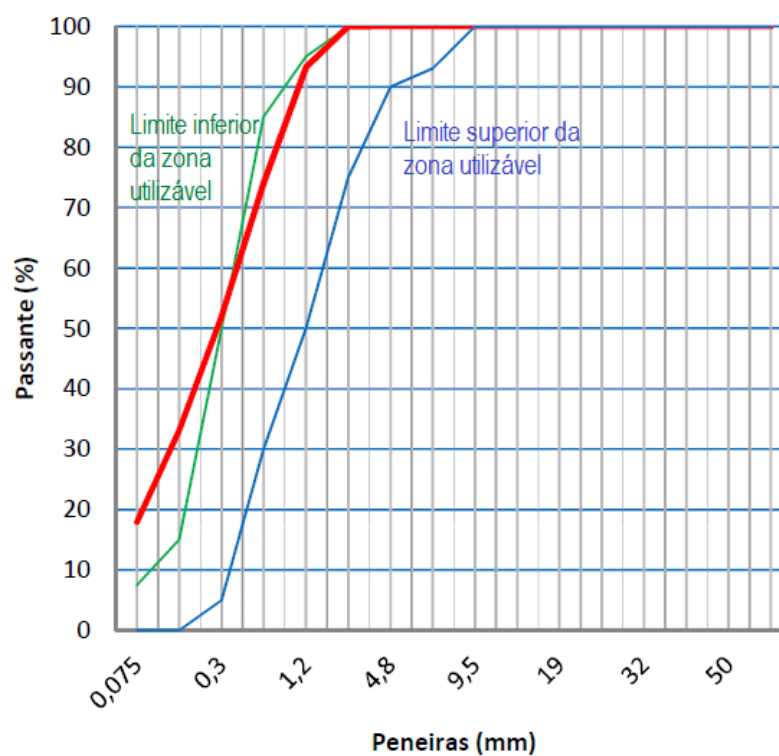


Figura 5.2 - Curva granulométrica da areia artificial.  
Fonte: LafargeHolcim, 2017.

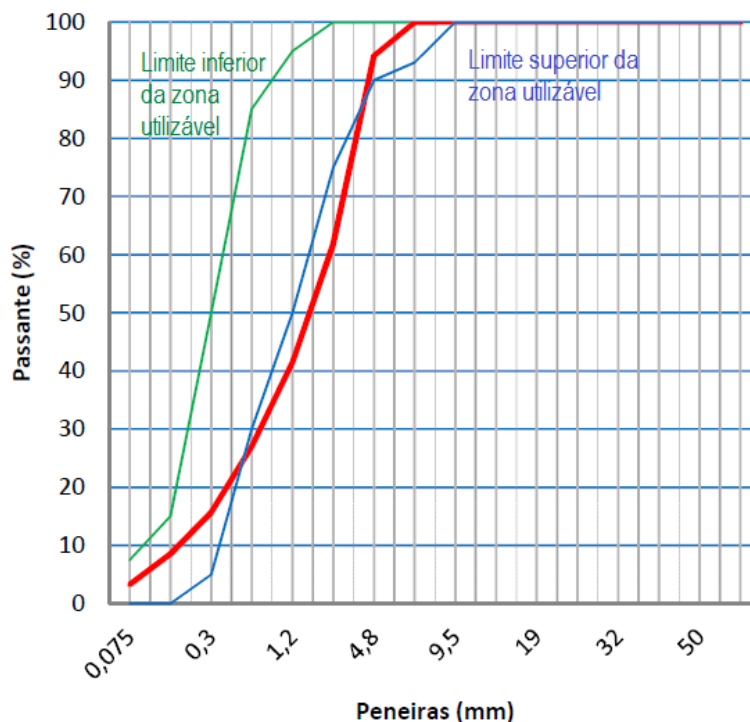


Figura 5.3 - Curva granulométrica da areia natural grossa.  
Fonte: LafargeHolcim, 2017.

Os agregados graúdos são provenientes de rocha britada de calcário, do tipo brita 0 e 1, com zonas granulométricas 4,8/12,5 e 9,5/25 respectivamente, com caracterização detalhada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Caracterização dos agregados graúdos.

Propriedade Analisada	Método de Ensaio	Unidade	Resultado Brita 0	Resultado Brita 1
Módulo de Finura	NBR NM 248	-	6,08	6,64
Dimensão Máxima	NBR NM 248	mm	12,5	19
Massa Específica	NBR NM 52	Kg/dm <sup>3</sup>	2,75	2,75
Massa Unitária Seca	NBR 7251	Kg/dm <sup>3</sup>	1,39	1,38
Mat. Pulverulento	NBR NM 46	%	1,04	1,12
Zona Granulométrica	NBR NM 248	-	4,8 / 12,5	9,5 / 25

Fonte: LafargeHolcim.

Estão apresentadas nas Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6, curvas granulométricas e imagens das Britas 0 e 1.



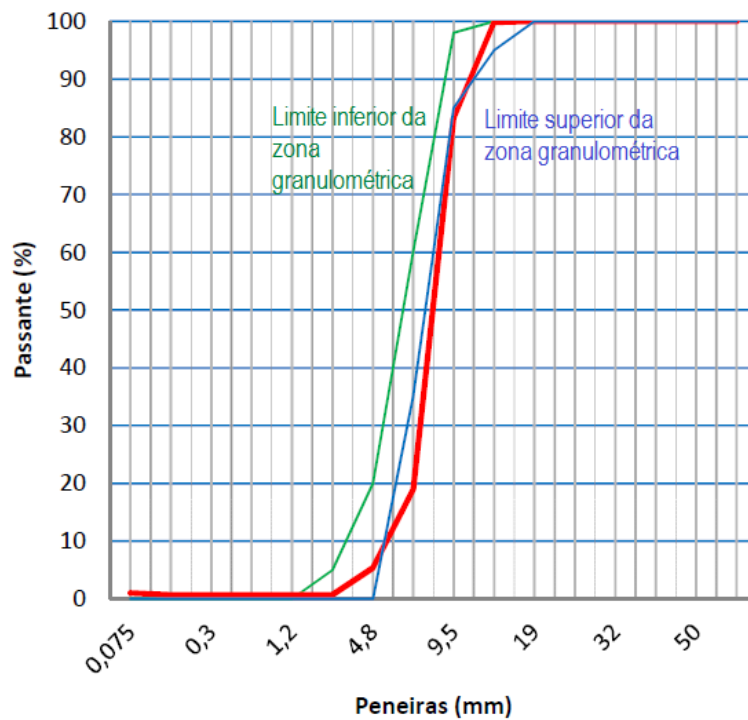


Figura 5.4 - Curva granulométrica da brita 0.  
Fonte: LafargeHolcim.

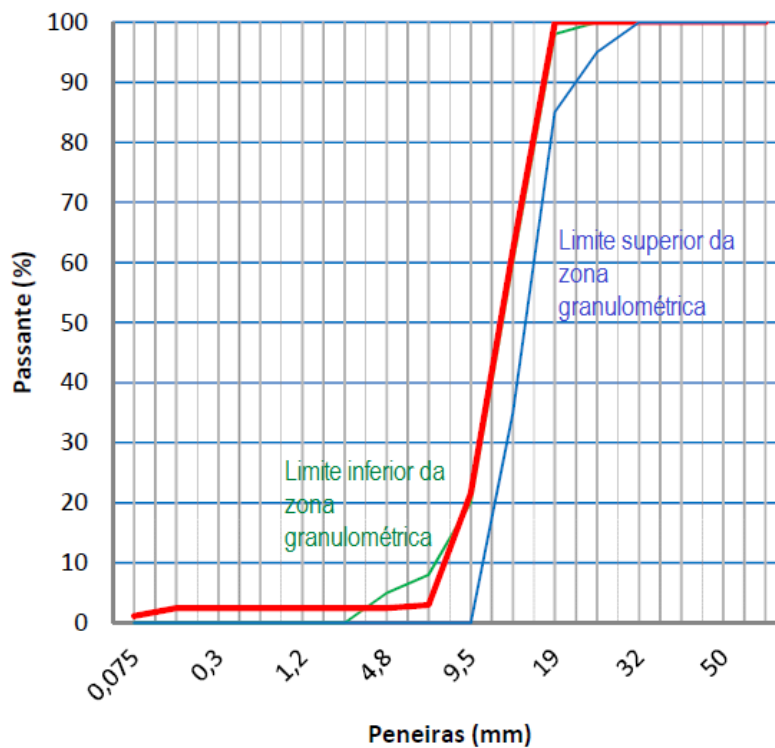


Figura 5.5 - Curva granulométrica da brita 1.  
Fonte: LafargeHolcim.



Figura 5.6 - Aspectos visuais das brita 0 e 1 de calcário.  
Fonte: LafargeHolcim, 2017.

## 5.2 Dosagem do concreto

As dosagens para os concreto estudados foram concebidas de modo que a reologia dessas amostras chegasse a apresentar propriedades de concreto bombeável, com *slump* de 120 mm e boa plasticidade, obtendo-se as dosagens referentes ao traço unitário em massa, apresentados na Tabela 5.3, bem como os quantitativos de insumos por m<sup>3</sup>, apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.3 – Proporcionamento dos materiais constituintes dos concretos estudados.

Concreto	Traço Unitário, em massa (Cimento:Metacaulim:areia: brita)	Relação água/ aglomerantes	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Metacaulim (kg/m <sup>3</sup> )
Dosagem 1 (Refer.)	(1:000 : 0,000 : 1,401 : 2,516)	0,45	438	-
Dosagem 2 (4%)	(0,961 : 0,039 : 1,269 : 2,374)	0,45	449	18
Dosagem 3 (8%)	(0,926 : 0,074 : 1,190 : 2,296)	0,45	449	36

Tabela 5.4 - Dosagem em massa, por m<sup>3</sup> de concreto.

Insumo	Dosagem 1 Referencial	Dosagem 2 (4% metacaulim)	Dosagem 3 (8% metacaulim)
CIMENTO CPV ARI RS PL	438 kg	449 kg	449 kg
METACAU LIM HP ULTRA	-	18 kg	36 kg
AREIA 1	317 kg	294 kg	280 kg
AREIA 2	315 kg	292 kg	278 kg
BRITA 0	224 kg	221 kg	218 kg
BRITA 1	897 kg	882 kg	873 kg
ÁGUA	197 lts	210 lts	218 lts
MURAPLAST FK 820	3066 ml	3269 ml	3394 ml

### 5.3 Caracterização da pasta

Para estudo da influência do metacaulim foi feita a caracterização da pasta utilizando o ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC). Foi gerada uma grande quantidade de dados de temperatura em função do tempo, para as três tipologias de concreto estudadas e foi gerado um gráfico, conforme exibido na Figura 5.7, permitindo observar a variação de temperatura das misturas em função do tempo de reação.

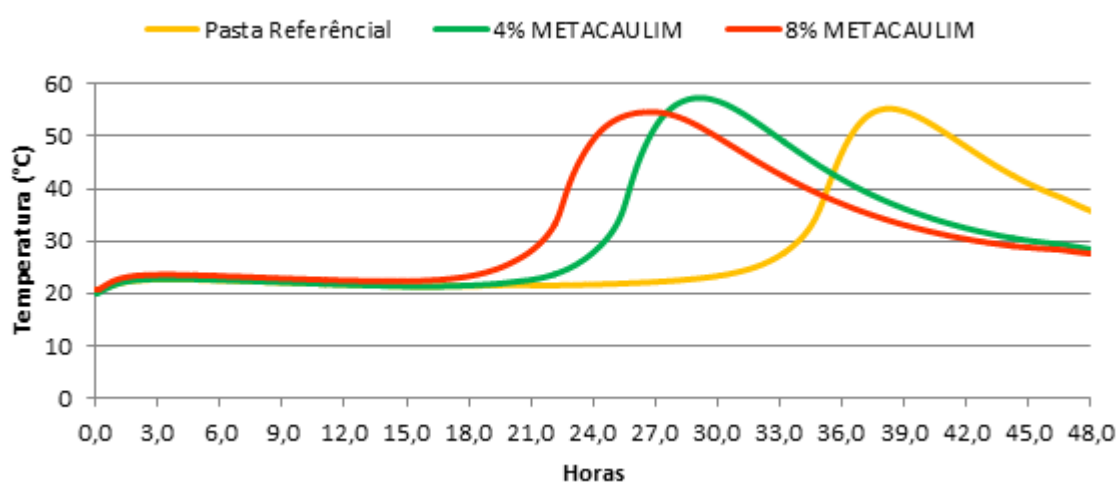


Figura 5.7 - Resultado ensaio de Calorimetria utilizando aditivo e diferentes teores de metacaulim.

Fonte: LafargeHolcim, 2017.

Observa-se que logo após o contato do cimento com a água há um pequeno desprendimento de calor, possivelmente pelas reações de hidratação do  $C_3A$ , formando aluminatos hidratados, mas também pela hidratação do  $C_3A$  com a presença de gipsita, formando etringita.

Posteriormente à etapa inicial de hidratação do  $C_3A$  inicia-se um período de dormência, correspondente ao estado fresco do concreto, com curva de liberação de calor praticamente nula. Ao final desse período inicia a reação do  $C_3S$ . Observa-se que o tempo de início e fim de pega são diferentes para as pastas estudadas.

O metacaulim acelerou o início das reações da pasta de cimento, equivalente ao início de pega, para a pasta de referência iniciou-se as reações por volta de 30

horas, enquanto a pasta com 4% às 21 horas e com 8% às 18 horas. Todas as pastas foram dosadas com a mesma relação água/aglomerante que o concreto e apresentaram um início de pega tardio, possivelmente em função do tipo de cimento utilizado e da característica e quantidade do aditivo utilizado, que possui propriedades plastificante e retardadora de pega. Uma explicação para o excesso de água na pasta é porque no concreto uma parcela da água é necessária para umedecer os agregados, que não se aplica na pasta.

A formação de CH e C-S-H ocorre com o máximo de liberação de calor, correspondente ao fim de pega (SANDBERG e BENINI, 2008). A pasta de referência apresentou pico de temperatura aproximadamente às 38 horas e temperatura máxima de 55,3°C. A pasta com 4% de metacaulim antecipou o pico de temperatura para 29 horas, com uma temperatura máxima de 57,3 °C e a pasta com 8% de metacaulim teve o fim de pega mais rápido com 27 horas e temperatura de 54,6°C. Observa-se diferença nos tempos de picos de calor, mas não na temperatura, devido Fe e Al do metacaulim.

#### **5.4 Caracterização do concreto no estado fresco**

Esta seção irá apresentar os resultados de propriedades dos concretos estudados no estado fresco, através do ensaio de ar incorporado e abatimento de tronco de cone.

O *slump* especificado foi obtido durante análise realizada, indicando compatibilidade para uso bombeável em todas as dosagens. Estes resultados indicam que a dosagem experimental dos concretos foi devidamente dimensionada e teve os processos de produção bem definidos.

Conforme a NBR NM 47:2002, o teor de ar incorporado deve ser de 2 a 5%. Os concretos apresentaram basicamente o mesmo teor de ar incorporado, valores ótimos em relação à referência de norma. Além disso, a adição do metacaulim no concreto de referência praticamente não alterou o teor de ar incorporado no concreto, conforme observa-se na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - *Slump* e teor de ar incorporado dos concretos estudados.

Ensaio	Concreto de Referência (0%)	Dosagem 4% Metacaulim	Dosagem 8% Metacaulim
Especificação " <i>Slump</i> " (cm)	12 ± 2	12 ± 2	12 ± 2
" <i>Slump</i> " obtido (cm)	12,0	12,5	12,0
Teor de ar Incorporado (%)	1,6	1,5	1,5

## 5.5 Caracterização mecânica do concreto

São apresentados os resultados das propriedades mecânica (resistência à compressão e resistência à tração na flexão) e elástica (módulo de elasticidade estático) dos concretos estudados, incluindo também os resultados de ultrassom, por sua afinidade com essas propriedades.

### 5.5.1 Resultado dos ensaios de resistência à compressão axial

Os concretos foram submetidos a ensaios de compressão axial nas idades de 7, 28 e 295 dias de idade. Para a idade de 295 dias foram ensaios os corpos de prova que foram mantidos em cura úmida contínua e aqueles com cura de 28 dias e posterior exposição ao biogás. Os dados obtidos estão apresentados na Tabela 5.6 e esses dados foram plotados na Figura 5.8.

Tabela 5.6 - Resistência à compressão dos concretos.

% de Metacaulim		7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	9 meses – Cura Úmida (MPa)	9 meses – Exp. gases (MPa)
0%	CP1	38,5	51,7	63,7	67,2
	CP2	42,2	49,0	65,0	67,4
	Média	<b>40,3</b>	<b>50,3</b>	<b>64,3</b>	<b>67,3</b>
4%	CP1	45,2	52,0	65,7	65,2
	CP2	40,7	58,7	63,5	66,4
	Média	<b>42,9</b>	<b>55,3</b>	<b>64,6</b>	<b>65,8</b>
8%	CP1	45,7	54,7	66,7	68,9
	CP2	44,2	54,7	65,9	67,2
	Média	<b>44,9</b>	<b>54,7</b>	<b>66,3</b>	<b>68,1</b>

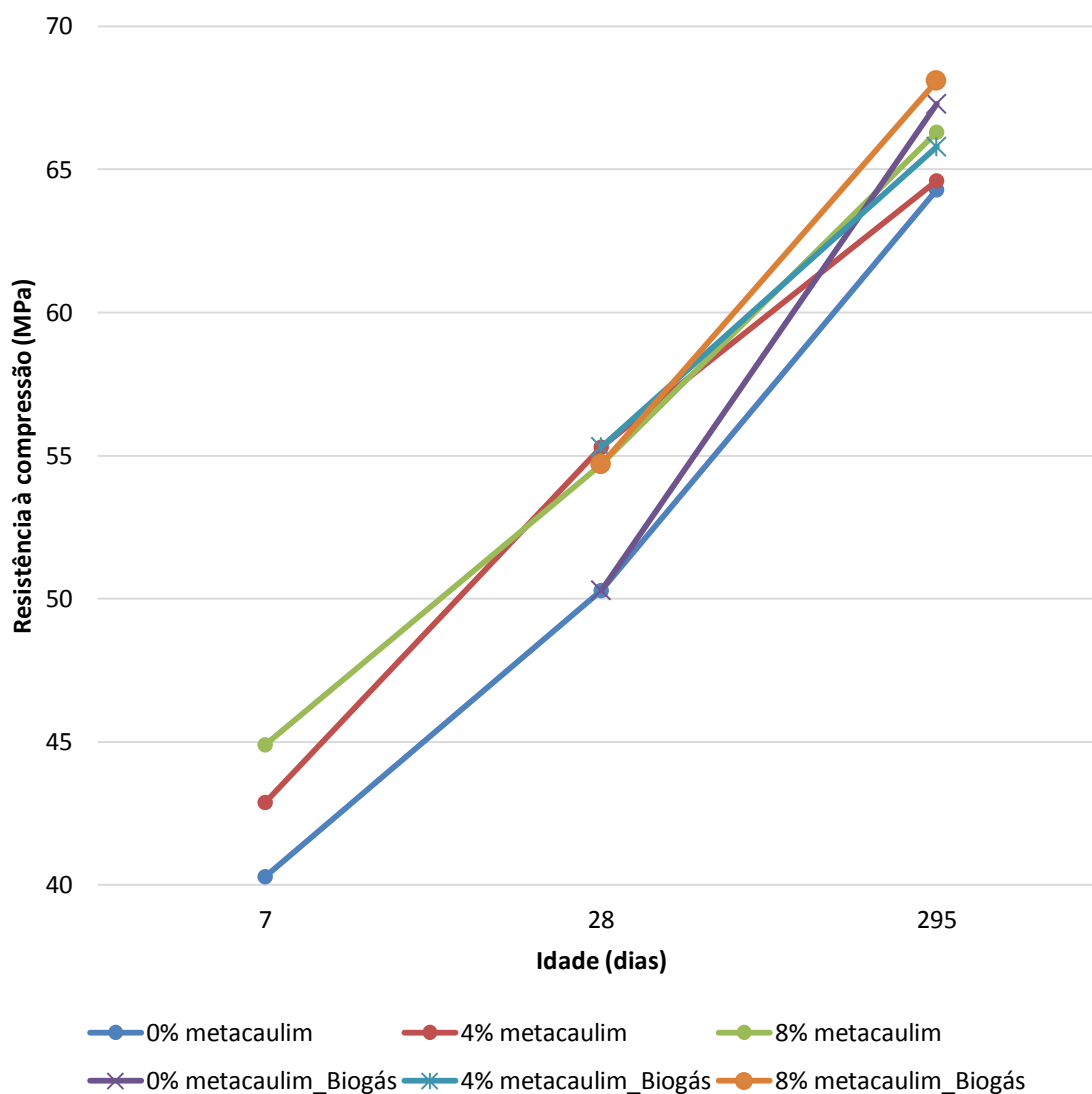


Figura 5.8 - Resistência à compressão dos concretos em cura úmida e exposto ao biogás.

Na Figura 5.8 constata-se maior resistência dos concretos proporcionalmente às adições de metacaulim de uma forma geral. Nas primeiras idades, os concretos com adição de metacaulim apresentam maior resistência, proporcionalmente aos teores de substituição, possivelmente em função do efeito fíler e pozolânico do metacaulim. Para a idade de 7 dias, o concreto com teores de substituição de 4% e 8% tiveram em média aumento de 6,5% e 11,4%, respectivamente superiores ao concreto de referência e para a idade de 28 dias o aumento foi de 10% e 8,7%. A resistência à compressão obtida aos 28 dias superou o valor do fck de 40 MPa preestabelecido em 25,7%, 38,2% e 36,7%, em relação aos concreto referencial, 4% e 8%.

Aos 295 dias, para a condição de cura úmida continua os concretos com metacaulim continuaram apresentando uma ligeira maior resistência à compressão. Os concretos que foram expostos ao biogás apresentaram resistências superiores de 4,6%, 2% e 3%, em relação aos pares que estiveram em câmara úmida, de dosagens referencial, 4% e 8% respectivamente, que está de acordo com a literatura, o aumento da temperatura de cura aumenta a velocidade de desenvolvimento de resistência do concreto (NEVILLE, 2016). Nesse período de exposição dos corpos de prova ao biogás não provocou alterações na estrutura do concreto, que provocassem redução de resistência à compressão do concreto.

Pode-se observar que a adição de metacaulim promoveu ganhos de resistência do concreto, sendo os dois principais fatores o efeito filler nas primeiras idades e reação pozolânica que ocorre com mais evidência entre o 14º e 28º dia. Nos ensaios de 295 dias, os ganhos de resistência do concreto com metacaulim foram menores, porém ligeiramente superiores aos ganhos do concreto de referência.

Teodoro (2016) relata fato semelhante em seu estudo de concreto, dosado com adições de Metacaulim de diferentes fornecedores, para concreto dosados com fator a/ag de 0,40, utilizando cimento CP II-F-40, *slump* de 120 mm, curados por imersão em água saturada de cal hidratada até os 28 dias e posteriormente acondicionados à sombra, onde os concretos com metacaulim tiveram resistências 23%, 15%, 19% e 9% maiores que o concreto de referencia aos 7, 28, 91 e 140 dias, respectivamente.

Brooks e Johari (2001 *apud* SIDDIQUE; KLAUS, 2009) estudaram a inclusão de metacaulim como substituição parcial de cimento de alto desempenho nas proporções de 5 a 15%. A resistência à compressão para o concreto de referência foi de 87 MPa; 91,5 MPa para substituição de 5%; 104 MPa para 10 % e 103,5 MPa para 15%, alcançando melhor resistência com 10 % de substituição de cimento por metacaulim, com ganho da ordem de 20%.

A relação entre a resistência à compressão aos 7 e 28 dias ( $f_{c28}/f_{c7}$ ) é um importante indicador permitindo avaliar o ganho de resistência do concreto, com

valores apresentados na Tabela 5.7. As relações entre resistências à compressão  $f_{c28}/f_{c7}$ , para o cimento Portland comum, são da ordem de 1,25 a 1,5 (PETRUCCI, 1998). Observa-se que o concreto com adição de 4% apresentou pequeno ganho de resistência no período em relação aos demais concretos. Para o cimento CP V ARI RS há um ganho de resistência à compressão mais rápido até 7 dias, e portanto, após esta idade a diferença de ganho de resistência é menor.

Tabela 5.7 - Relação de resistência  $f_{c28}/f_{c7}$ .

Idade	Dosagem 1 – 0%	Dosagem 2 – 4%	Dosagem 3 – 8%
7	40,3	42,9	44,9
28	50,3	55,3	54,7
$f_{c28}/f_{c7}$	1,25	1,3	1,22

### 5.5.2 Resultado dos ensaios de módulo de elasticidade

Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade pelo método secante, para as diferentes dosagens e idades, são mostrados nas Tabela 5.8, Tabela 5.9 e Tabela 5.10 a seguir, com informações dos valores medidos, média e desvio padrão. A avaliação do controle de preparo foi feita através do cálculo do desvio padrão, conforme NBR 7212:2012, todas as dosagens apresentaram nível 1 ( $S_n < 3,0$ ), indicando que foi bem controlado o processo de produção.

Tabela 5.8 - Módulo de elasticidade do concreto de referência.

Concreto bombeável – Concreto de Referência (0%)					
	Leituras	7 dias	28 dias	9 meses (cura úmida)	9 meses (expostos gases)
Descrição	CP1	23,14	29,02	35,04	37,83
	CP2	24,59	30,36	34,10	36,27
	CP3	27,61	28,60	34,56	36,78
Mód. de Elast. Estático – Média (GPa)		<b>25,11</b>	<b>29,33</b>	<b>34,57</b>	<b>36,96</b>
Desvio Padrão (GPa)		<b>1,86</b>	<b>0,75</b>	<b>0,38</b>	<b>0,65</b>



Tabela 5.9 - Módulo de elasticidade do concreto com 4% de metacaulim.

Concreto bombeável – Dosagem 4% Metacaulim					
Descrição	Leituras	7 dias	28 dias	9 meses (cura úmida)	9 meses (expostos gases)
	CP1	28,37	31,96	36,40	40,59
	CP2	23,91	33,96	38,03	38,78
	CP3	24,61	33,44	34,90	37,65
Mód. de Elast. Estático – Média (GPa)		<b>25,63</b>	<b>33,12</b>	<b>36,44</b>	<b>39,01</b>
Desvio Padrão (GPa)		<b>1,96</b>	<b>0,85</b>	<b>1,28</b>	<b>1,21</b>

Tabela 5.10 - Módulo de elasticidade do concreto com 8% de metacaulim.

Concreto bombeável – Dosagem 8% Metacaulim					
Descrição	Leituras	7 dias	28 dias	9 meses (cura úmida)	9 meses (expostos gases)
	CP1	27,32	28,64	33,31	37,12
	CP2	24,63	29,84	35,11	41,12
	CP3	27,76	29,43	37,65	36,12
Mód. de Elast. Estático – Média (GPa)		<b>26,57</b>	<b>29,30</b>	<b>35,36</b>	<b>38,12</b>
Desvio Padrão (GPa)		<b>1,38</b>	<b>0,50</b>	<b>1,78</b>	<b>2,16</b>

A Figura 5.9 apresenta as curvas de comportamento do módulo de elasticidade dos concretos estudados, para os diferentes teores de substituição de cimento por metacaulim, idades e condições de exposição. Observa-se a influência do teor de substituição de metacaulim no módulo de elasticidade.

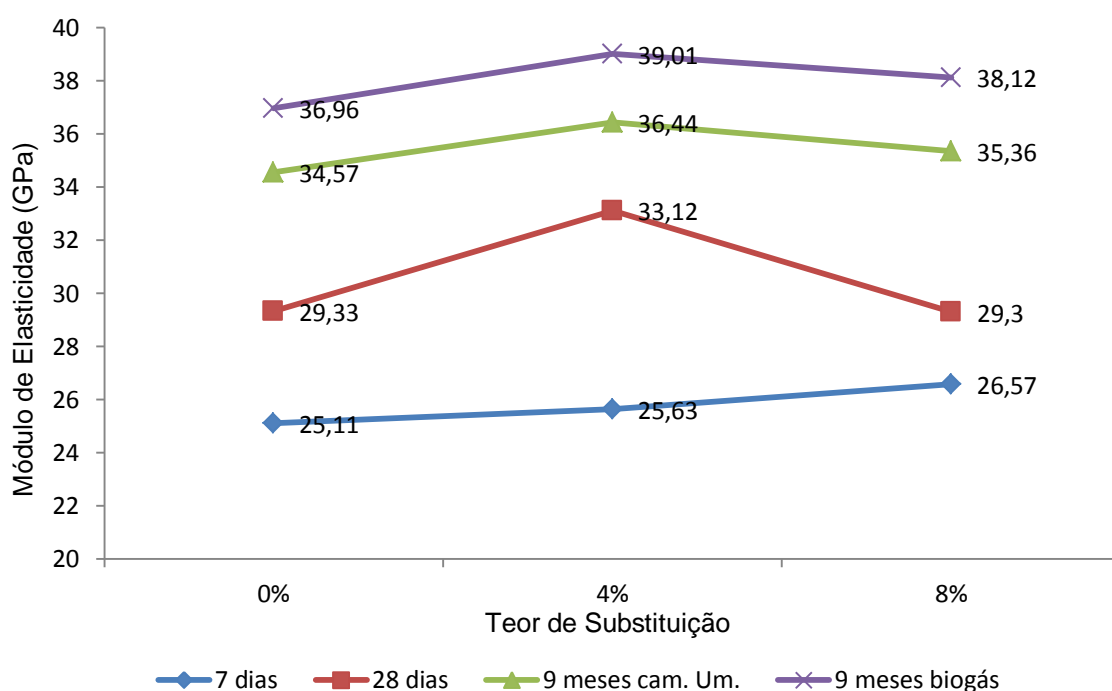


Figura 5.9 - Módulo de elasticidade dos concreto em função do teor de substituição do cimento por metacaulim.

A adição do metacaulim não promoveu alterações consideráveis de valores do módulo de elasticidade. Aos 7 dias de idade, observa-se que o teor de substituição de metacaulim não influenciou o módulo de elasticidade, indicando pouca influência de atividade pozolânica. Para as idades de 28 e 295 dias (condições de cura úmida e expostos à atmosfera interna do reator), o concreto com 4% de metacaulim apresentou maiores resultados, com valores 12,9%, 5,2% e 5,5%, superiores ao concreto de referência e o concreto com 8% de metacaulim apresentou resultados, com valores de 0%, 2,2% e 3,1% superiores ao concreto de referência. Observa-se aumento contínuo do módulo de elasticidade para as três dosagens estudadas, em função do tempo de cura.

Teodoro (2016) obteve um módulo de elasticidade de 42,91 GPa para o concreto de referência, aos 91 dias de idade, com *slump* de 120 mm, confeccionado com 450kg de cimento CP II-F-40, fator a/c de 0,40 e resistência à compressão média de 62 MPa. Variando-se teores de teores de 10% de substituição do cimento por adições de Metacaulim de diferentes fornecedores e mantendo-se as condições de dosagem, obteve módulo de 41,88 GPa, 44,33 GPa e 40,94 GPa, com valores de desvio padrão abaixo de 1. Observa-se que os valores encontrados de módulo de elasticidade estático para 91 dias são superiores ao obtidos na pesquisa (9 meses), possivelmente em função do tipo de cimento utilizado e de menor relação a/c.

Khatib e Hibbert (2005) estudaram a influência de substituição parcial de cimento por 0 a 80% de escória de alto forno e também 0 a 20% de metacaulim, mantendo fator água/aglomerante de 0,5 constante em todas as misturas, sendo realizadas 12 diferentes misturas com essas adições. Para os concretos com teores de substituição do cimento por metacaulim em até 20%, há aumento da resistência a compressão e módulo de elasticidade, especialmente nas primeiras idades de hidratação. Foram observados ganhos de 25% para resistência e 40% para módulo para a idade de 100 dias, com teor de substituição de 20%. Não foram observados ganhos de módulo de elasticidade entre teores de substituição de 10% e 20% de metacaulim.

Dadsetan e Bai (2017) estudaram 18 dosagens de concreto, sendo 2 concretos de referência com fator  $a/agl$  de 0,4 e 0,45, formando 2 grupos com 8 diferentes teores de substituição em peso, de cimento por materiais cimentícios suplementares, sendo: 10% e 20% de metacaulim; 10%, 20% e 30% de escória de alto forno e 10%, 20% e 30% de cinza volante. Foi mantido consumo de aglomerantes de  $400 \text{ kg/m}^3$  para todas as misturas. Dentre os materiais cimentícios suplementares estudados, o metacaulim foi o que apresentou melhores resultados de resistência à compressão e de módulo de elasticidade, proporcional aos teores de substituição. Foi obtido o coeficiente de determinação de  $R^2=0,99$  entre os valores de módulo de elasticidade e resistência à compressão aos 28 dias, indicando alto grau de confiabilidade da relação. Foram observadas melhorias de 20% e 23% do módulo de elasticidade sobre o concreto de referência, com fator  $a/agl$  de 0,4, para os teores de substituição de 10% e 20% de metacaulim, para a idade de 28 dias. Para o concreto de referência de com  $a/agl$  de 0,45, foram observados aumentos de 24% e 26%, nas mesmas proporções de substituições.

### *5.5.3 Comparativo dos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade obtidos em laboratório com o calculado por norma*

Nas Tabela 5.11,

Tabela 5.12 e Tabela 5.13 são apresentadas os resultados médios obtidos para os módulos estáticos, conforme estabelecido na NBR 8522:2008 e também são apresentados os valores dos módulos calculados, para cada concreto estudado, conforme NBR 6118:2014, descritos anteriormente em 3.5.3 - Ensaio mecânico no concreto no estado endurecido. Para o cálculo do módulo de elasticidade Tangente ( $E_{ci}$ ), foi utilizado a equação 3.19 para os valores de  $f_c$  entre 20 e 50 MPa e a equação 3.20 os valores de  $f_c$  superiores a 50 MPa.

Tabela 5.11 - Comparativo módulo de elast. medido vs. calculado- concreto de referência.

Descrição	Concreto bombeável – Concreto de Referência (0%)			
	7 dias	28 dias	9 meses (cura úmida)	9 meses (expostos gases)
Módulo de Elasticidade Est. Secante Medido (GPa)	<b>25,11</b>	<b>29,33</b>	<b>34,57</b>	<b>36,96</b>
Resistência à Compressão – fc (MPa)	40,30	50,30	64,30	67,30
Módulo de Elasticidade Tangente – Eci (GPa)	32,00	35,7	38,18	38,67
Módulo de Deformação Secante Calc. – Ecs (GPa)	<b>28,82</b>	<b>33,05</b>	<b>36,68</b>	<b>37,44</b>
Relação Secante Estático Calculado / Medido (%)	<b>14,77</b>	<b>12,68</b>	<b>6,10</b>	<b>1,30</b>

Tabela 5.12 - Comparativo módulo de elasticidade medido vs. calculado - concreto com 4% de metacaulim.

Descrição	Concreto bombeável – Dosagem 4% Metacaulim			
	7 dias	28 dias	9 meses (cura úmida)	9 meses (expostos gases)
Módulo de Elasticidade Est. Secante Medido (GPa)	<b>25,63</b>	<b>33,12</b>	<b>36,44</b>	<b>39,01</b>
Resistência à Compressão – fc (MPa)	42,90	55,30	64,60	65,80
Módulo de Elasticidade Tangente – Eci (GPa)	33,01	36,64	38,23	38,42
Módulo de Deformação Secante Calc. – Ecs (GPa)	<b>29,95</b>	<b>34,39</b>	<b>36,75</b>	<b>37,06</b>
Relação Secante Estático Calculado / Medido (%)	<b>16,86</b>	<b>3,83</b>	<b>0,85</b>	<b>-5,00</b>

Tabela 5.13 - Comparativo módulo de elasticidade medido vs. calculado - concreto com 8% de metacaulim.

Descrição	Concreto bombeável – Dosagem 8% Metacaulim			
	7 dias	28 dias	9 meses (cura úmida)	9 meses (expostos gases)
Módulo de Elasticidade Est. Secante Medido (GPa)	<b>26,57</b>	<b>29,30</b>	<b>35,36</b>	<b>38,12</b>
Resistência à Compressão – fc (MPa)	44,90	54,70	66,30	68,10
Módulo de Elasticidade Tangente – Eci (GPa)	33,77	36,51	38,51	38,80
Módulo de Deformação Secante Calc. – Ecs (GPa)	<b>30,81</b>	<b>34,21</b>	<b>37,19</b>	<b>37,64</b>
Relação Secante Estático Calculado / Medido (%)	<b>15,96</b>	<b>16,76</b>	<b>5,18</b>	<b>-1,26</b>

Observa-se a para a idade de 7 dias, diferença de percentuais entre os valores medidos e calculados, respectivamente de 14,77%, 16,86% e 15,96% para os concretos de referência, 4% e 8%, com certa tendência de redução da diferença percentual para a idade de 28 dias, com valores de 12,68%, 3,83% e 16,76% respectivamente. Para os concretos nas idades de 295 dias os valores calculados

se aproximaram bastante dos valores médios efetivamente medidos, indicando que o critério de cálculo definido na NBR 6118:2014 se aplica bem para concretos com idades superiores a 28 dias. Os valores obtidos nos ensaios para 28 dias, foram todos inferiores aos valores calculados pela norma, indicando risco de segurança, pois o concreto não alcança os valores considerados em projeto.

Teixeira (2014) em sua dissertação de mestrado encontrou variações percentuais da relação módulo secante estático calculado/medido, de 7,7% a 14,7%, para concretos convencional e autoadensável de resistência à compressão aproximada de 50 MPa, nas idades de 7 e 28 dias. Resultado da mesma ordem de grandeza obtido neste trabalho.

#### 5.5.4 Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão -  $f_{ct}$ , para os concretos estudados com 28 dias de cura úmida, estão apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 - Resistência à tração na flexão.

	Concreto de Referência (0%)	Dosagem 4% Metacaulim	Dosagem 8% Metacaulim
CP 1	5,33	4,27	5,07
CP 2	5,33	4,53	5,07
CP 3	5,33	4,53	5,33
Média da resistência à Tração - $f_{ct,m}$ (MPa)	<b>5,33</b>	<b>4,44</b>	<b>5,16</b>
Desvio Padrão (MPa)	0,00	0,12	0,12
Resistência à compressão Média - $f_{cm}$ aos 28 dias (MPa)	50,3	55,3	54,7
Resistência à Tração / Resistência à compressão (%)	<b>10,6</b>	<b>8,0</b>	<b>9,4</b>

Os resultados da Tabela 5.14 demonstram que a adição em Metacaulim não proporcionou aumento de resistência à tração na flexão. A razão entre os valores de resistência à tração e resistência à compressão indica que houve uma redução dessa proporção para os concretos dosados com metacaulim, principalmente para a dosagem de 4%. O desvio padrão dos resultados foi próximo de 0 MPa, indicando que o processo de confecção dos corpos de prova e ensaio foram bastante criteriosos. Observou-se a redução da resistência à tração para o

concreto com teores de substituição parcial do cimento por metacaulim, sendo diferentes daqueles encontrados na literatura.

Esses resultados são próximos aos valores da relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão que Mehta e Monteiro (2014) encontraram, são da ordem de 10 a 11% para concreto de baixa resistência, de 8 a 9% para o de média resistência e de 7% para o de alta resistência.

Oliveira (2007) obteve resistência à tração na flexão de 7,3 MPa para o concreto de referência com resistência à compressão de 73,1 MPa aos 28 dias. O autor também obteve resistência à tração de 8,1 MPa e 9,4 MPa para concretos com teores de substituição de cimento por metacaulim nas proporções de 5 e 15%, com resistência à compressão de 76,8 MPa e 81,6 MPa respectivamente, demonstrando aumento de resistência à tração na flexão proporcional aos teores de substituição estudados.

Qian e Li (2001 *apud* SIDDIQUE; KLAUS, 2009) estudaram a influência da substituição parcial de cimento por metacaulim, nas proporções de 0 a 15 %, para a resistência à tração do concreto. Observaram que a resistência à tração aumentou sistematicamente com o aumento da substituição do cimento por metacaulim. Para substituição de 5% de cimento por metacaulim teve um pequeno efeito sobre a resistência à tração na flexão do concreto, aos 28 dias, porém substituições de 10% e 15% aumentaram a resistência em 32% e 38% respectivamente.

#### *5.5.5 Comparativo dos resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão obtidos com calculados*

Conforme item 8.2.5 da NBR 6118:2014 a resistência média a tração pode ser estimada por  $f_{ct,m} = 0,3 \cdot (f_{ck})^{2/3}$ , em MPa, para concretos de classes até C50 e  $f_{ct,m} = 2,12 \cdot \ln(1 + 0,11 \cdot f_{ck})$ , para concretos de classes C55 até C90.

Na Tabela 5.15 são apresentados os resultados médios obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão aos 28 dias de idade, conforme estabelecido na

NBR 12142:2010 e também são apresentados os valores calculados, para cada concreto estudado, conforme NBR 6118:2014. Observa-se que os valores calculados pela norma são todos inferiores àqueles obtidos nos ensaios, indicando a norma ser conservadora.

Tabela 5.15- Razões entre resist. à tração calculado x obtido em ensaio aos 28 dias.

	Concreto de Referência (0%)	Dosagem 4% Metacaulim	Dosagem 8% Metacaulim
Resistência média à Compressão, 28 dias – $f_c$ (MPa)	50,3	55,4	54,7
Resistência média à Tração Calculado - $f_{ct,m}$ (MPa)	4,09	4,15	4,13
Média da resistência à Tração medido – $f_{ct,m}$ (MPa)	5,33	4,44	5,16
Razão Resist. Tração Calculado / Tração na flexão Medido (%)	<b>76,7</b>	<b>93,5</b>	<b>80</b>

#### 5.5.6 Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica

Observa-se a seguir as velocidades do pulso ultrassônico obtidas no ensaio de propagação de onda ultrassônica, por transmissão direta, realizados nos corpos de prova cilíndricos, antes dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Levando em consideração as velocidades de pulso propostas como um indicador de qualidade de concretos (Tabela 3.11) - Whitehurst (1951 *apud* QASRAWI, 2000), os resultados obtidos neste ensaio (Tabela 5.16), permitem observar que o concreto apresenta excelentes resultados, indicando excelente homogeneidade do material, obtido a partir de um rigoroso controle de qualidade do concreto produzido, sem falhas de adensamento.

Tabela 5.16 - Resultados de ensaios de ultrassom.

Dosagem	Idade	CP	Tempo (ms)	Velocidade (m/s)	Qualidade
Referencial	28	1	44,2	4525	Excelente
		2	44,8	4461	Boa
		3	44,9	4454	Boa
		4	43,9	4556	Excelente
		5	43,9	4556	Excelente
4% Metacaulim	28	1	44,3	4511	Excelente
		2	43,4	4608	Excelente
		3	43,5	4601	Excelente
		4	44,1	4539	Excelente
		5	44,3	4515	Excelente
8% Metacaulim	28	1	44,0	4549	Excelente
		2	44,2	4521	Excelente
		3	43,7	4573	Excelente
		4	44,4	4505	Excelente
		5	44,7	4474	Boa
Referencial (Cura Úmida)	295	1	41,3	4846	Excelente
		2	40,4	4955	Excelente
		3	40,8	4905	Excelente
		4	40,4	4954	Excelente
		5	41,2	4854	Excelente
4% Metacaulim (Cura Úmida)	295	1	40,3	4969	Excelente
		2	41,2	4858	Excelente
		3	40,5	4942	Excelente
		4	40,7	4814	Excelente
		5	41,2	4858	Excelente
8% Metacaulim (Cura Úmida)	295	1	40,5	4842	Excelente
		2	41,1	4866	Excelente
		3	40,7	4910	Excelente
		4	40,8	4908	Excelente
		5	41,3	4840	Excelente
Referencial (biogás)	295	1	42,0	4759	Excelente
		2	42,5	4706	Excelente
		3	41,8	4782	Excelente
		4	40,9	4887	Excelente
		5	42,2	4736	Excelente
4% Metacaulim (biogás)	295	1	41,0	4874	Excelente
		2	41,8	4785	Excelente
		3	40,8	4898	Excelente
		4	41,6	4808	Excelente
		5	41,1	4866	Excelente
8% Metacaulim (biogás)	295	1	41,8	4785	Excelente
		2	41,9	4769	Excelente
		3	41,7	4800	Excelente
		4	41,4	4828	Excelente
		5	41,6	4812	Excelente

A partir dos valores de velocidades dos ensaios de ultrassonografia, foram realizados estudos estatísticos e desenvolvido um Diagrama de Caixa, para os traços de concreto em estudo, conforme expostos nas Figura 5.10, Figura 5.11 e Figura 5.12. Observa-se em todas as dosagens de concreto estudadas que houve melhoria da propriedade do concreto ao longo do tempo. Para a idade de



295 dias, a condição de cura úmida continua apresentou resultados superiores de velocidade do pulso ultrassônico em relação aos pares expostos ao biogás, indicando que na condição de cura úmida houve uma melhoria das propriedades do concreto associadas ao refinamento dos poros e vazios do concreto. Não foi observado aumento da velocidade do pulso ultrassônico com a variação dos teores de metacaulim no concreto.

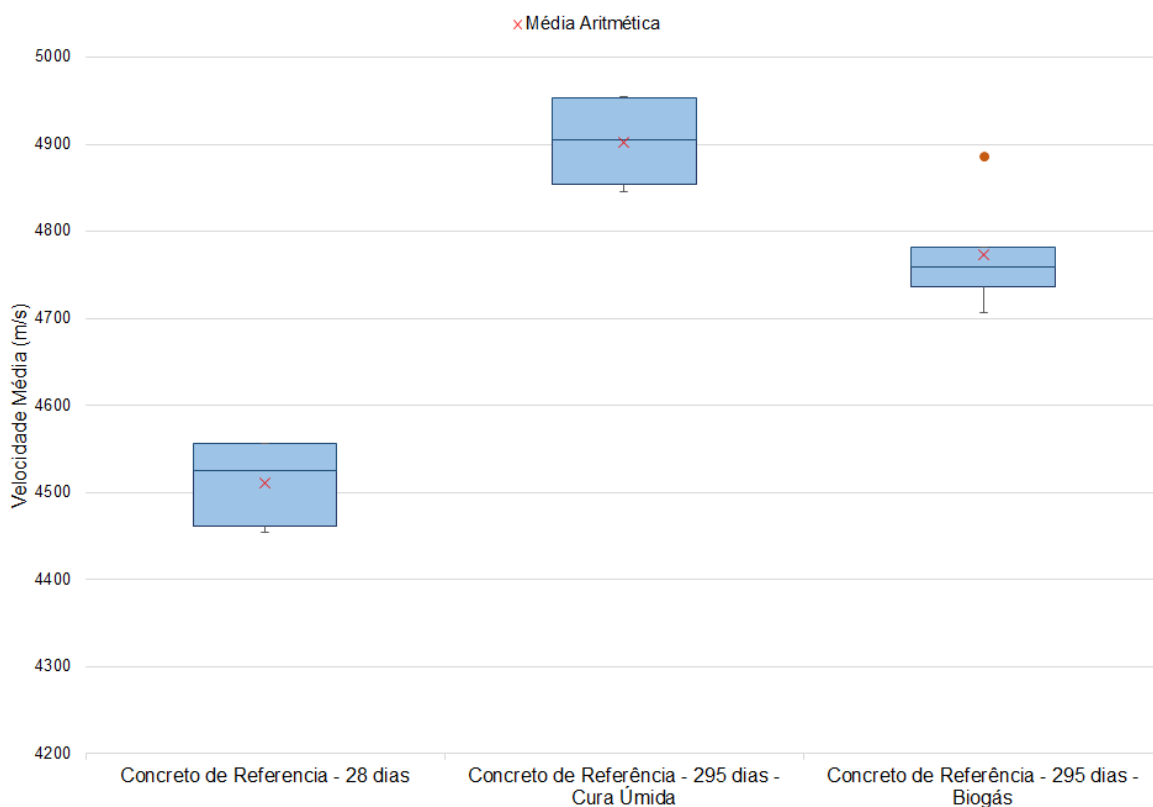


Figura 5.10 - Ensaio de ultrassonografia - concreto referencial.

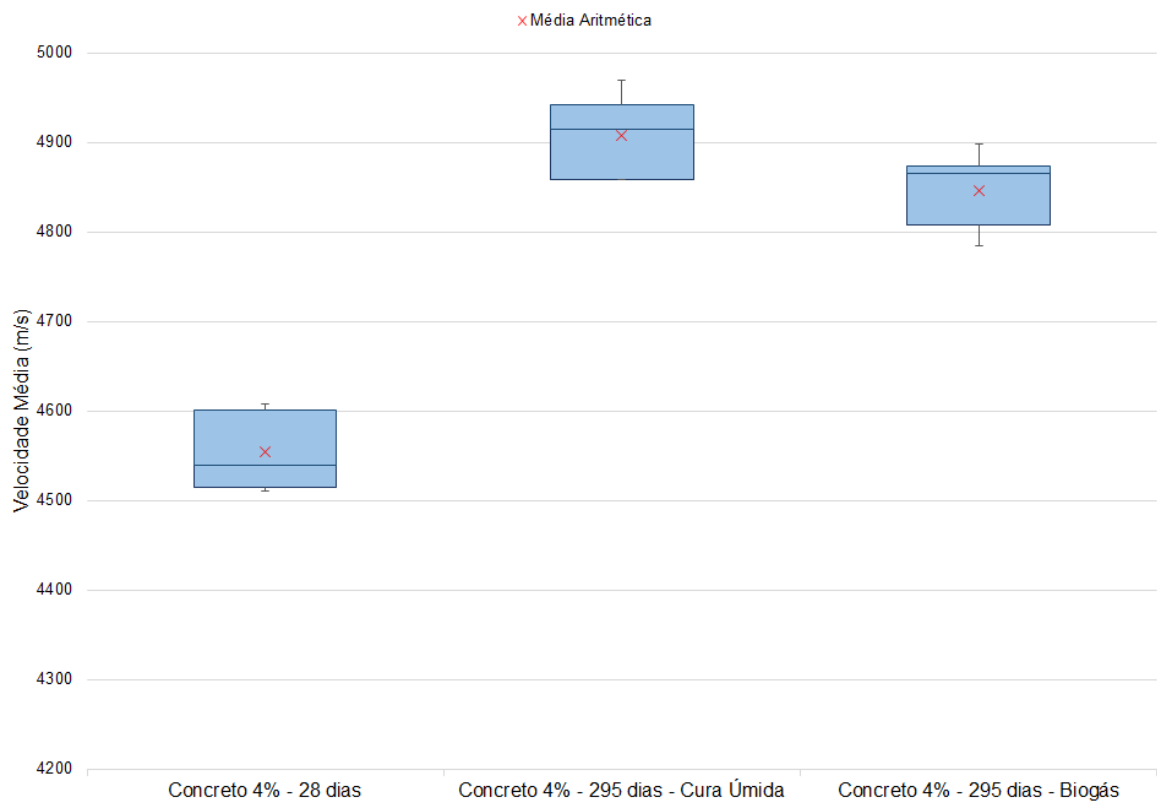


Figura 5.11 - Ensaio de ultrassonografia - concreto 4% metacaulim.

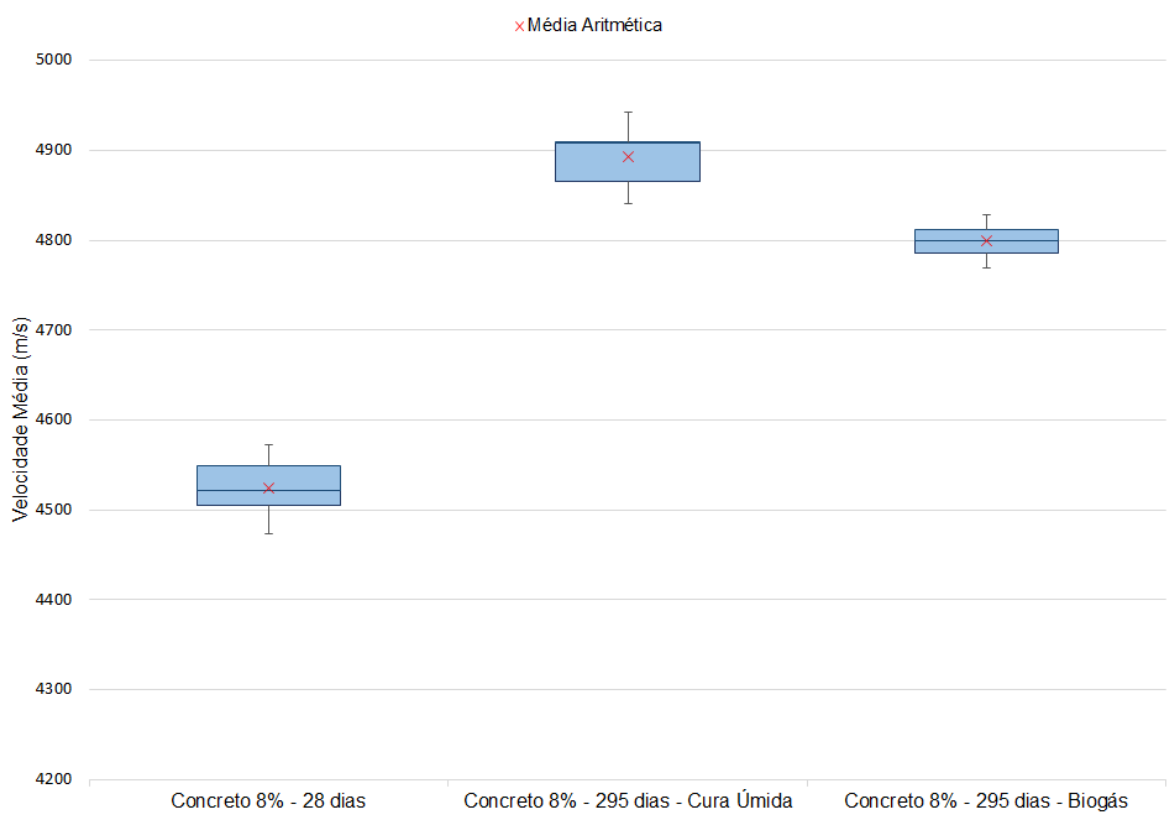


Figura 5.12 -Ensaio de ultrassonografia - concreto 8% de metacaulim.

## 5.6 Caracterização de durabilidade do concreto

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios propostos aos ensaios de durabilidade, através dos ensaios de absorção de água, carbonatação acelerada, medição de frente de carbonatação do concreto exposto ao biogás, resistividade elétrica e abrasão.

### 5.6.1 Pré-condicionamento dos corpos de prova para os ensaios de durabilidade

Na Tabela 5.17 estão registrados os valores medidos durante processo de pré-condicionamento dos corpos de prova para o ensaio de absorção aos 28 dias.

Tabela 5.17 - Preparo dos CPs na estufa para ensaios de absorção de água – 28 dias.

Descrição		Concreto de Referência (0%)			Dosagem 4% Metacaulim			Dosagem 8% Metacaulim		
		CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9
0 Horas	Peso (g)	3739	3706	3736	3746	3712	3725	3757	3760	3756
3 Horas	Peso (g)	3675	3640	3692	3689	3653	3670	3710	3716	3715
6 Horas	Peso (g)	3630	3598	3637	3628	3581	3604	3635	3654	3654
24 Horas	Peso (g)	3560	3527	3556	3539	3498	3513	3534	3539	3535
48 Horas	Peso (g)	3554	3515	3546	3530	3492	3507	3528	3530	3521
Diferença Peso - 48h	(g)	5,8	12,4	9,8	9,2	6	4,8	6,6	9,3	13,8
Diferença Percentual	(%)	0,16	0,35	0,28	0,26	0,17	0,14	0,19	0,26	0,39
72 Horas	Peso (g)	3552	3514	3545	3529	3491	3506	3525	3528	3517
Diferença Peso – 72h	(g)	2,0	0,5	1,5	0,8	0,7	1,4	2,2	1,6	4
Diferença Percentual	(%)	0,06	0,02	0,04	0,02	0,02	0,04	0,06	0,05	0,11

A Figura 5.13 apresenta as curvas médias de secagem do corpos de prova, como etapa preliminar do ensaio de absorção. Observa-se que os concretos estudados apresentam curvas de secagem de características similares, com exceção do concreto com 8% de substituição de cimento por metacaulim, apresentando uma maior perda de água entre as 6 horas e 24 horas em relação aos demais. Observa-se a estabilização da secagem após as 48 horas, com a constância dos pesos das amostras.

Com base no comportamento da secagem do concreto aos 28 dias, observou-se que o peso do concreto praticamente estabilizou a partir das 48 horas. Para realização de novo ensaio de absorção aos 295 dias, para as condições de cura úmida e expostos ao biogás, optou-se por secar as amostras até 48 horas, uma vez que já atingiram os preceitos da NBR 9778:2005, com resultados exibidos na Tabela 5.18 e Tabela 5.19.

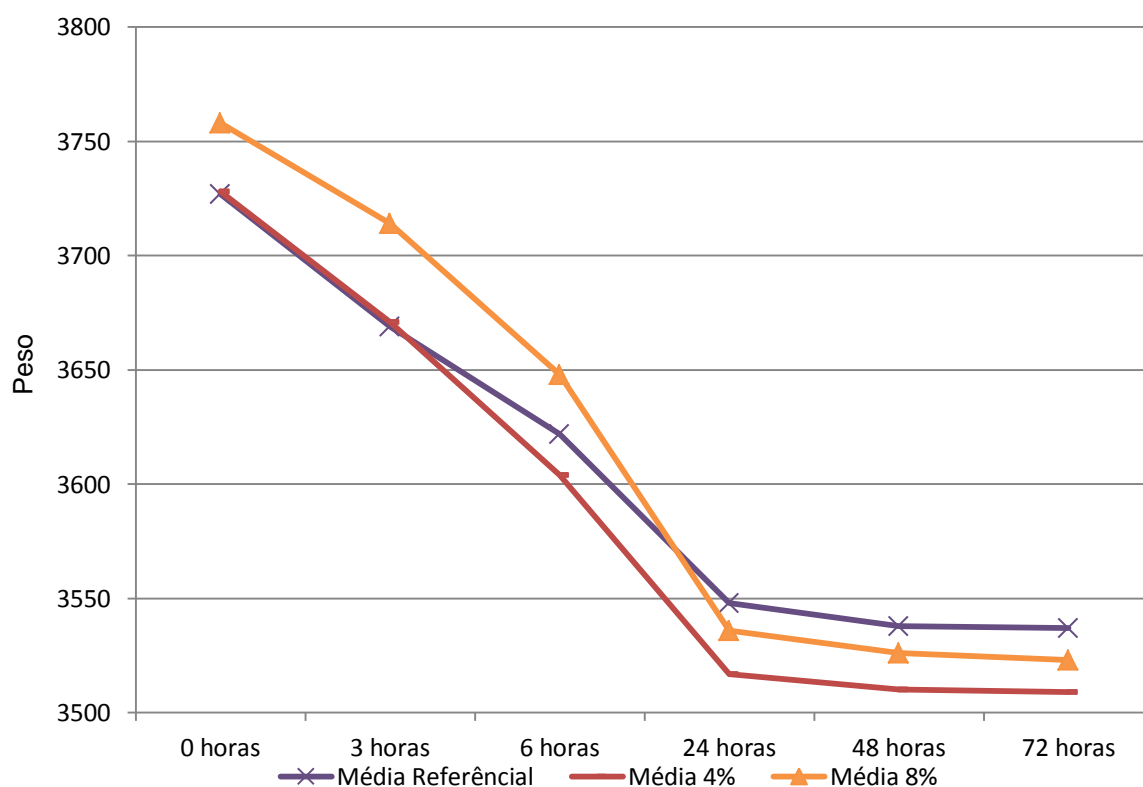


Figura 5.13 - Curvas de secagem dos CPs na idade de 28 dias para realização de ensaio de absorção.

Tabela 5.18 - Resumo preparo CPs na estufa para ensaios de absorção de água - 295 dias (cura úmida).

Descrição		Concreto de Referência (0%)			Dosagem 4% Metacaulim			Dosagem 8% Metacaulim		
		CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9
0 Horas	Peso (g)	3742	3745	3751	3729	3739	3720	3702	3737	3722
48 Horas	Peso (g)	3532	3528	3546	3491	3519	3491	3456	3493	3474
Diferença Peso – 48h	(g)	4	8	7	7	7	9	6	10	12
Diferença Percentual	(%)	0,11	0,23	0,2	0,2	0,2	0,26	0,17	0,29	0,35

Tabela 5.19 - Resumo do preparo de CPs na Estufa para ensaios de absorção de água - 295 dias (biogás).

Descrição		Concreto de Referência (0%)			Dosagem 4% Metacaulim			Dosagem 8% Metacaulim		
		CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP6	CP 7	CP 8	CP 9
0 Horas	Peso (g)	3739	3784	3716	3740	3756	3766	3745	3700	3735
48 Horas	Peso (g)	3542	3594	3517	3524	3543	3551	3509	3459	3504
Diferença Peso – 48h	(g)	15	9	13	7	14	13	16	9	14
Diferença Percentual	(%)	0,42	0,25	0,37	0,20	0,40	0,37	0,46	0,26	0,4

A secagem dos corpos de prova, para o ensaio de carbonatação acelerada iniciou-se aos 70 dias de idade, em função da programação da disponibilidade para uso da câmara de carbonatação acelerada, após período de estabilização da umidade interna, conforme descrito na metodologia. Os valores medidos durante secagem estão descritos na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 - Preparo dos CP's na estufa para ensaios de carbonatação acelerada.

Descrição		Concreto de Referência (0%)			Dosagem 4% Metacaulim			Dosagem 8% Metacaulim		
		CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP6	CP 7	CP 8	CP 9
0 Horas	Peso (g)	3724	3747	3721	3747	3732	3740	3760	3703	3717
3 Horas	Peso (g)	3677	3702	3656	3700	3678	3685	3715	3640	3654
6 Horas	Peso (g)	3618	3645	3613	3630	3611	3621	3633	3575	3586
24 Horas	Peso (g)	3533	3553	3536	3533	3507	3517	3521	3490	3505
48 Horas	Peso (g)	3516	3544	3527	3525	3500	3516	3513	3461	3473
Diferença Peso - 48h	(gr)	16,9	9,2	8,9	8,00	6,9	0,8	7,5	29,3	31,7
Diferença Percentual	(%)	0,48	0,26	0,25	0,23	0,2	0,02	0,21	0,85	0,91
72 Horas	Peso (g)	3514	3539	3524	3522	3497	3514	3510	3459	3470
Diferença Peso – 72h	(gr)	2,7	4,7	3,5	3,1	3,0	1,6	3,0	2,2	2,9
Diferença Percentual	(%)	0,08	0,13	0,1	0,09	0,09	0,05	0,09	0,06	0,08

### 5.6.2 Absorção de água no concreto

A Tabela 5.21 contém os valores médios do ensaio de absorção por imersão, realizada a média de três corpos de prova para cada condição, que podem ser observados na Figura 5.14.

Tabela 5.21 - Resultados médios do ensaio de absorção por imersão, para as diferentes dosagens estudadas.

Descrição	Idade (dias)	Condição de Exposição	Concreto de Referência (0%)	Dosagem 4% Metacaulim	Dosagem 8% Metacaulim
Média da absorção por imersão após fervura (%)	28	Cura úmida	5,78	6,61	6,73
	295	Cura úmida	5,58	6,17	6,62
	295	biogás	5,35	5,91	6,54

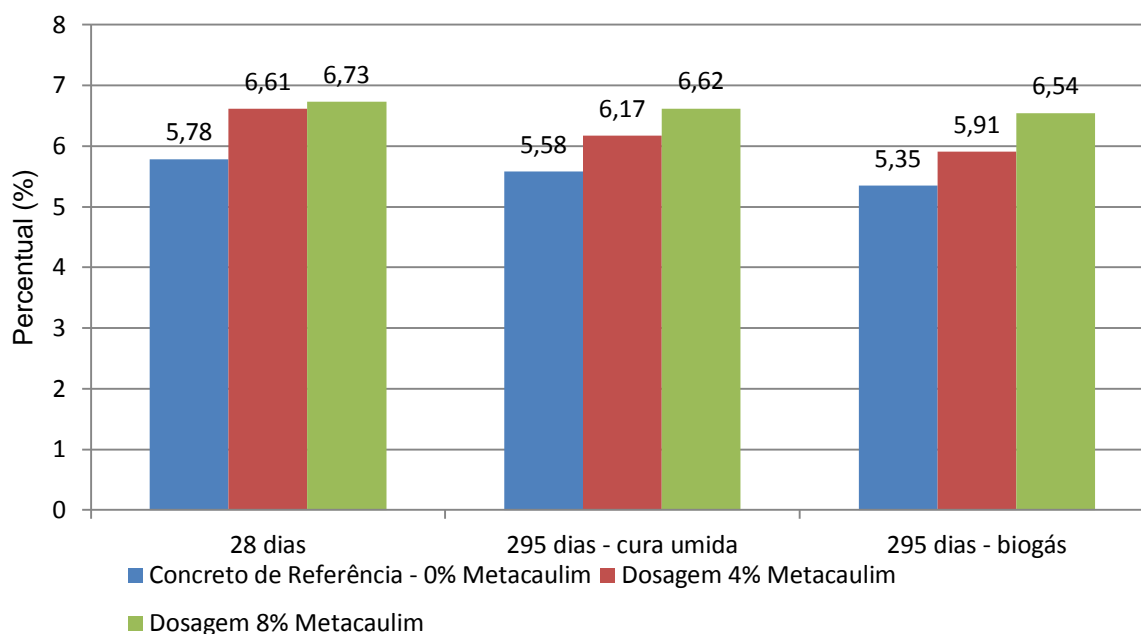


Figura 5.14 - Comparativo entre os resultados de absorção das dosagens de concreto estudadas.

Analisando os resultados da Tabela 5.21, verifica-se aumento do percentual de absorção de água do concreto, relativo aos poros permeáveis, proporcional aos teores de substituição do cimento por metacaulim. Porém, a diferença de valores entre eles é pequena, provavelmente devido os concretos serem dosados com a mesma relação água/aglomerante. Observa-se uma pequena redução do percentual de absorção de cada concreto ao longo do tempo. O concreto exposto ao biogás apresentou percentuais de absorção inferiores àquele concreto em cura úmida continua.

Para Neville (2016, p.507) a absorção não pode ser utilizada como uma medida da qualidade do concreto, mas o autor observou que a maioria dos bons concretos tem absorção bem menor do que 10% em massa.

A Tabela 5.22 contém os resultados médios calculados do índice de vazios, após ensaio de absorção por imersão, para as diferentes dosagens de concreto estudadas, que podem ser observados na Figura 5.15.

Tabela 5.22 - Resultados médios do índice de vazios para as diferentes dosagens estudadas.

Descrição	Idade (dias)	Condição de Exposição	Concreto de Referência (0%)	Dosagem 4% Metacaulim	Dosagem 8% Metacaulim
Média do índice de vazios (%)	28	Cura úmida	13,89	15,48	15,87
	295	Cura úmida	13,21	14,41	15,35
	295	biogás	12,48	13,66	14,91

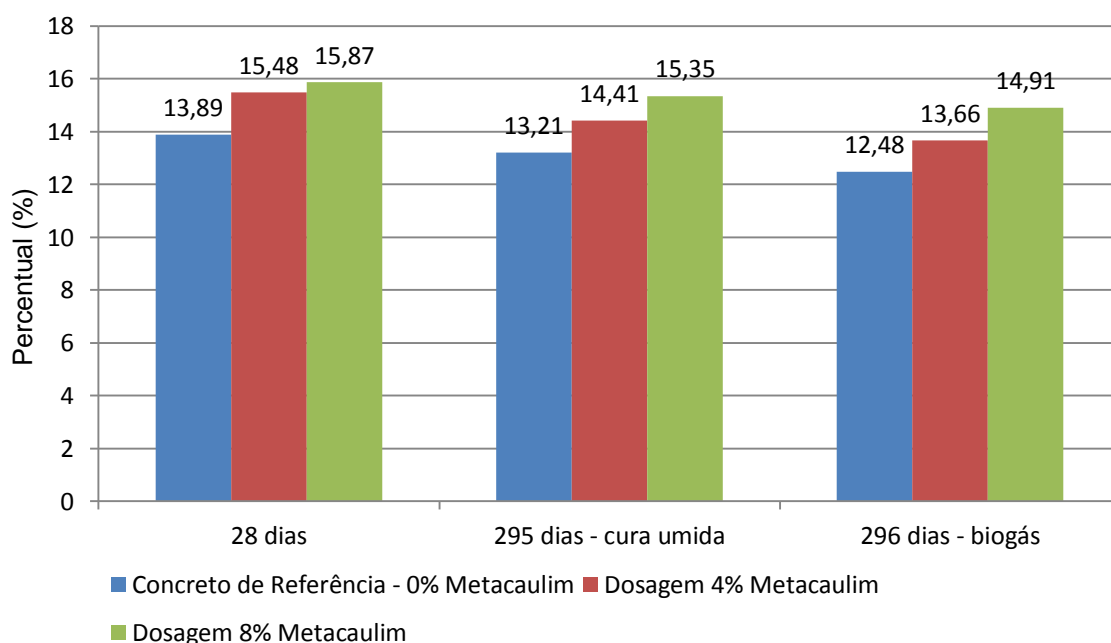


Figura 5.15 - Comparativo entre os resultados de índice de vazios para as dosagens de concreto estudadas.

Teixeira (2014) em sua dissertação de mestrado realizou ensaio de absorção seguindo a NBT 9778:2005, onde obteve o resultado médio para absorção de água de 6,94% e 7,00%, índice de vazios de 15,1% e 15,4%, para concreto convencional e concreto autoadensável. O concreto de referência foi dosado para uma resistência a compressão de 40 MPa e um fator água/cimento (a/c) igual a 0,55 e uso de 0,77% de aditivo superplastificante ViscoCrete 3535® CB para o

CAA. Estes valores encontrados pelo autor são próximos aos obtidos neste trabalho.

Em um programa experimental realizado pela Escola Politécnica da USP (2003) foi observado considerável redução da absorção de água provocada pelo emprego do Metacaulim HP, usado como adição, para o teor 8% de substituição do cimento. Para um concreto com consumo de 450 kg de cimento CPV ARI Plus RS por m<sup>3</sup> de concreto, *slump* de 80 mm, o concreto de referência apresentou absorção de 5,7% aos 28 dias de cura úmida, contra 4,3% para o concreto com 8% de substituição do cimento por metacaulim e índice de vazios de 13,6% e 10,2% para os concretos, respectivamente. Os resultados permitiram observar a vantagem do emprego deste tipo de adição, resultando em concretos mais compactos e com menor absorção de água. Estes valores obtidos neste experimento, diferem dos observados nesta pesquisa.

Nicolas e Escadeillas (2014) confirmaram através de seu experimento um comportamento característico do concreto, em que a resistência mecânica do concreto é relacionada à porosidade da água: quando a porosidade diminui a resistência à compressão aumenta. Todos os concretos de referência de diferentes trabalhabilidades, formulados com resistência à compressão, entre 20 e 70 Mpa, apresentaram valores similares de porosidade acessível por água, aos concretos homólogos com substituição do cimento por 25% de metacaulim calcinado instantaneamente. Em termos de porosidade, concreto com metacaulim calcinado instantaneamente tem poros mais finos, embora a porosidade à água permaneça equivalente. O refinamento da porosidade é associado com aumento da quantidade de C-S-H e C-A-S-H, e é devido ao consumo de portlandita pela alta reatividade pozolânica desse metacaulim.

### 5.6.3 Deterioração dos concretos por carbonatação acelerada

Para o ensaio de frente de carbonatação foram obtidas 188 leituras para os corpos de prova do concreto referencial, 210 leituras para os corpos de prova de concreto com teor de substituição de 4% de cimento por metacaulim e 221 leituras para o concreto com teor de 8%. A diferença de número de leituras foi em



função da perda de alguns corpos de prova, ao tentar realizar paralelamente o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Esses dados foram tratados estatisticamente, utilizando a ferramenta *box plot* ou diagrama de caixa para representar a variação dos dados observados, com resultados que segue na Tabela 5.23 e Figura 5.16.

Tabela 5.23 - Resultados Estatísticos de frente de carbonatação para as dosagens estudadas.

Resultados	Concreto de Referência	Concreto 4% de metacaulim	Concreto 8% de metacaulim
Limite Inferior (mm)	9,7	23,5	22
1º Quartil (mm)	22,3	32,6	32,4
Mediana (mm)	28,6	35,8	35,9
Média Aritmética (mm)	27,9	36,2	36,6
3º Quartil (mm)	33,0	39,1	39,6
Limite Superior (mm)	42,2	48,8	49,7

Observa-se que o concreto de referência apresentou mediana de 28,6mm da frente de carbonatação, enquanto que os concretos com teores de substituição de 4% e 8% de metacaulim apresentam medianas de 35,8mm e 35,9mm, valores estes aproximadamente 25% superiores ao concreto de referência. Os concretos com metacaulim apresentaram menor amplitude interquartil, que representa 50% de todos os valores observados, concentrados na tendência central dos valores, bem como também apresentaram menor diferença entre valores extremos. Porém foram observados valores *outliers* (valores discrepantes), que são desconsiderados, conforme cálculos estatísticos, representados pelos pontos individuais.

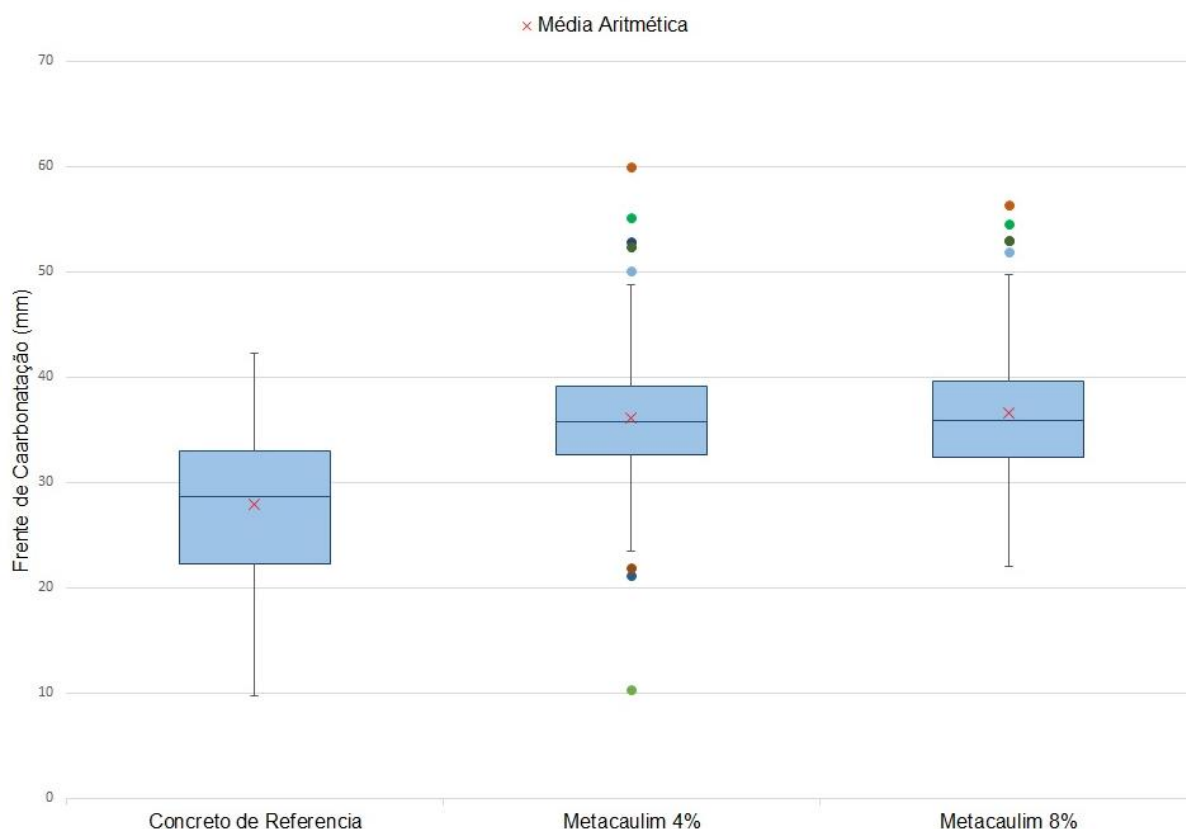


Figura 5.16 - Gráfico Box Plot com valores de frente de carbonatação para as três dosagens estudadas.

Nicolas e Escadeillas (2014) realizaram ensaio de carbonatação acelerada em seu experimento e observaram que o concreto produzido com teor de substituição de 25% de cimento por metacaulim apresentou menores teores de portlandita e maiores profundidades de carbonatação que o concreto de referência, produzido 100% com um cimento com mais de 95% de clínquer. Para o concreto com metacaulim, a portlandita foi parcialmente consumida pela reação pozolânica e a profundidade de carbonatação maior.

Teixeira (2014) em sua dissertação de mestrado desenvolveu metodologia de ensaio de carbonatação acelerada, conforme descrito em 4.11.3, onde obteve o resultado médio de espessura de carbonatação de 8,4 mm e 8,3 mm, para concreto convencional e concreto autoadensável, tendo como parâmetros de dosagem um concreto com resistência a compressão de 40 MPa, cimento tipo CPV ARI Plus e um fator água/cimento ( $a/c$ ) igual a 0,55 e uso de 0,77% de aditivo superplastificante ViscoCrete 3535® CB para o CAA. Estes valores encontrados pelo autor foram inferiores aos obtidos nesta pesquisa,

possivelmente em função do tipo e quantidade de cimento utilizado, que por ser de alta resistência inicial é um cimento mais fino e possui maiores teores de  $C_3S$  em relação aos demais, que no processo de hidratação do cimento, geram maior quantidade de Portlandita, ficando com maior reserva alcalina.

#### 5.6.4 Deterioração dos concretos por exposição ao biogás

Ao retirar as amostras do dispositivo observa-se alteração da cor do concreto, ficando numa cor escura, com alguns pontos esbranquiçados, conforme Figura 5.17. A pintura epóxi utilizada para proteger o aço carbono mostrou-se eficiente, não sendo perceptíveis pontos de corrosão.



Figura 5.17 - Corpos de prova sendo retirado do reator aos 295 dias de idade, 2018.

Conforme estudado na literatura o ataque por ácido sulfúrico pode ser considerado um fenômeno de superfície, em que o dano ocorre externamente, que reage com a superfície em contato e ao mesmo tempo penetra no material.

Conforme sequência de mecanismos de danos no concreto observados no experimento proposto por Koenig e Dehn (2016), as amostras de concreto dessa

pesquisa se enquadram como “Fase 1”, com apenas redução do pH apenas na superfície do concreto, conforme observado na Figura 5.18. Com a aspersão de fenolftaleína nos corpos de prova cortados e realização da leitura da carbonatação, observou-se que o ataque dos gases existentes no biogás não provocou a formação de frente de carbonatação nos corpos de prova, para as três dosagens, no período definido.



Figura 5.18 - Leitura da frente de carbonatação após aplicação de solução de fenolftaleína, 2018. a) parte interna; b) parte externa

Este concreto estando exposto um maior tempo a essa atmosfera agressiva, o pH da superfície reduz ainda mais em função da dissociação do  $H_2S$ , que foi produzido pelas bactérias redutoras de sulfato, do  $CO_2$ , da umidade crescente e por meio de ácidos orgânicos que são produzidos por bactérias heterotróficas, causando alterações químicas na matriz cimentícia.

Como exemplo do avanço do ataque ácido, nas figuras observa-se o estado de degradação da superfície inferior da laje de um reator de uma Estação de Tratamento de Esgoto, com aproximadamente 8 anos de uso, para um concreto de 40 MPa, exibidos nas figuras Figura 5.19 e Figura 5.20.



Figura 5.19 - Superfície inferior da laje de cobertura de um reator agredida por biogás, 2016.



Figura 5.20 - Superfície agredida por biogás, 2016.

#### 5.6.5 Resultado do ensaio de resistividade elétrica

Os dados obtidos no ensaio de resistividade elétrica foram resumidos na Tabela 5.24 e Figura 5.21 indicam os valores médios de resistividade elétrica para as 3 amostras de concreto estudadas neste trabalho, nas diferentes idades e

condições de exposição. As amostras de concreto com adição de metacaulim apresentaram maior resistividade elétrica proporcional ao teor de substituição de cimento por metacaulim. Para a idade de 28 dias o concreto de referência apresentou resistividade elétrica média de 139,6  $\Omega.m$ , já as dosagens com teores de substituição de 4% e 8% de metacaulim, valores de 205,1  $\Omega.m$  e 304,4, representando aumentos de 47% e 118%, respectivamente.

Tabela 5.24 - Resistividade Elétrica dos concretos estudados.

Descrição	Idade (dias)	Condição de Exposição	Concreto de Referência (0%)	Dosagem 4% Metacaulim	Dosagem 8% Metacaulim
Resistividade Elétrica ( $\Omega.m$ )	28	Cura úmida	139,6	170,6	213,5
	295	Cura úmida	205,1	320,1	451,4
	295	biogás	304,4	474,8	570,0

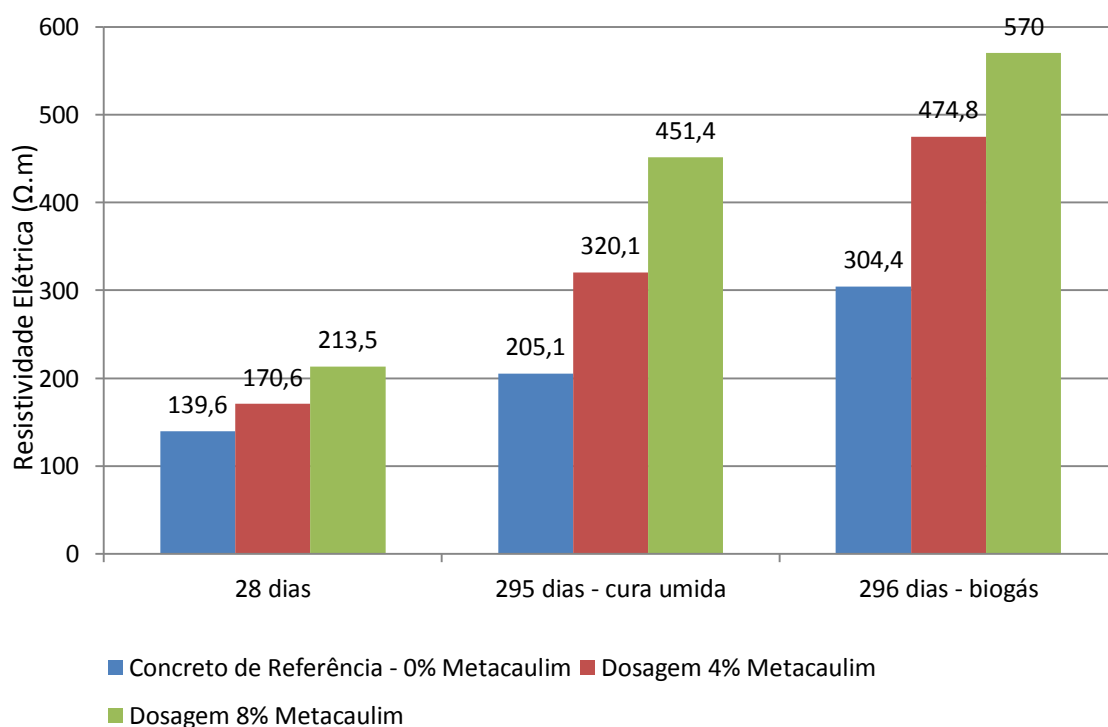


Figura 5.21 - Comparativo entre os resultados de resistividade elétrica para as dosagens de concreto estudadas.

O crescimento da resistividade elétrica é proporcional ao tempo, onde observa-se que sob a condição de cura úmida aos 295 dias, todas as dosagens de concreto podem ser qualificadas como excelentes, conforme parâmetro de correlação entre resistência à corrosão e resistividade elétrica. Esse concreto de 295 dias de cura úmida, comparado à idade de 28 dias, apresentou ganhos de resistividade elétrica de 22,2%, 56% e 56% para o concreto de referência, concreto com teores de 4%

e de 8% respectivamente. O concreto com teor de substituição de 8% de cimento por metacaulim apresentou resistividade elétrica de 111% e 167% superiores ao concreto de referência para as condições de cura úmida e exposição ao biogás respectivamente. As amostras de concreto expostas no reator apresentaram resistividade elétrica superior ao concreto em cura úmida constante para as três dosagens estudadas. Os resultados apresentados sugerem que a adição de metacaulim propiciou o refinamento de poros do concreto, tornando-o menos suscetível à penetração de íons agressivos, em conformidade com outros resultados encontrados na bibliografia.

McCarter *et al.* (2015) concluíram que concretos com adição de cinza volante apresentam maior resistividade elétrica que o concreto de referência. Tais autores atribuíram esses resultados ao refinamento de poros e nucleação dos produtos hidratados ocasionados pelas adições pozolânicas.

Em um programa experimental realizado pela Escola Politécnica da USP (2003) foi observado aumento da resistividade elétrica provocada pelo emprego do Metacaulim HP, usado como adição, para o teor 8% de substituição do cimento. Para as três dosagens de concreto com consumo de 560 kg, 439 kg e 363 kg de cimento CPV ARI Plus RS por m<sup>3</sup> de concreto, *slump* de 80 mm, os concretos de referência apresentaram resistividade elétrica de 307 Ω.m, 305 Ω.m e 267 Ω.m aos 28 dias de cura úmida, contra 724 Ω.m, 713 Ω.m e 622 Ω.m para o concreto com 8% de substituição do cimento por metacaulim, valores estes que representam aumentos de 135%, 134% e 133% respectivamente.

Nadelman e Kurtis (2014) estudaram a resistividade elétrica superficial para dosagens com o cimento ASTM C150 tipo I e II, sendo realizadas 5 dosagens de aglomerantes, sendo 2 combinações de 100% de cimento, com variações apenas de fator a/c (0,4 e 0,5) e outras 3 dosagens com fator a/c constante de 0,4, com substituições do cimento, por 15% e 25% de cinzas volantes e uma terceira de 25% de cinza volante com 5% de metacaulim. À medida que cada material cimentício suplementar começa a reagir, observaram-se aumentos adicionais de valores nos testes de Resistividade Superficial. A dosagem com 25% de cinza volante e 5% de metacaulim, que foi a de maior taxa de substituição de cimento

(30%), teve a menor resistividade superficial inicial; porém, após os 4 dias, a alta reatividade pozolânica do metacaulim foi perceptível pela maior ascensão de ganho de resistividade por duas semanas, alcançando resistividade de 340  $\Omega.m$  aos 56 dias, contra apenas 90 a 160  $\Omega.m$  para as demais dosagens.

### 5.6.6 Ensaio de desgaste superficial do concreto

As leituras iniciais e finais, da espessura e do peso de cada corpo de prova, para cada dosagem de concreto estudado, aos 28 dias de idades, são apresentadas nas Tabela 5.25, Tabela 5.26 e Tabela 5.27, além das Figura 5.22 e Figura 5.23.

Tabela 5.25 - Leituras iniciais, após 500m e 1000m - dosagem referencial.

Medidas	CP 1 (Referencial)			CP 2 (Referencial)		
	Altura (inicial)	Altura (500 m)	Altura (1000 m)	Altura (inicial)	Altura (500 m)	Altura (1000 m)
1	29,50	28,40	26,85	29,80	28,30	27,45
2	29,95	28,20	27,00	29,65	28,35	27,25
3	29,50	28,25	26,95	29,45	28,50	27,20
4	29,75	27,95	26,70	29,50	28,50	26,90
Medida média (mm)	29,70	28,20	26,90	29,60	28,41	27,20
Desgaste médio (mm)	-	1,5	2,8	-	1,19	2,4
Massa (g)	350,61	331,55	316,14	349,42	330,51	319,57
Perda de Massa (g)	-	19,06	34,47	-	18,91	29,85
Perda de massa (%)	-	5,6	9,8	-	5,4	8,54

Tabela 5.26 - Leituras iniciais, após 500m e 1000m - Dosagem 4% metacaulim.

Medidas	CP 1 (4%)			CP 2 (4%)		
	Altura (inicial)	Altura (500 m)	Altura (1000 m)	Altura (inicial)	Altura (500 m)	Altura (1000 m)
1	29,75	27,75	27,20	29,95	27,90	26,95
2	29,75	27,85	27,40	29,25	27,80	26,90
3	29,55	27,60	26,40	29,60	27,60	26,70
4	29,40	27,60	26,70	29,15	27,85	26,70
Medida média (mm)	29,62	27,70	26,93	29,49	27,79	26,82
Desgaste médio (mm)	-	1,92	2,69	-	1,7	2,67
Massa (g)	346,18	324,08	312,58	340,30	322,84	312,28
Perda de Massa (g)	-	22,1	33,6	-	17,46	28,02
Perda de massa (%)	-	6,38	9,71	-	5,13	8,23



Tabela 5.27 - Leituras iniciais, após 500m e 1000m - Dosagem 8% metacaulim.

Medidas	CP 1 (4%)			CP 2 (4%)		
	Altura (inicial)	Altura (500 m)	Altura (1000 m)	Altura (inicial)	Altura (500 m)	Altura (1000 m)
1	29,75	27,75	27,20	29,95	27,90	26,95
2	29,75	27,85	27,40	29,25	27,80	26,90
3	29,55	27,60	26,40	29,60	27,60	26,70
4	29,40	27,60	26,70	29,15	27,85	26,70
Medida média (mm)	29,62	27,70	26,93	29,49	27,79	26,82
Desgaste médio (mm)	-	1,92	2,69	-	1,7	2,67
Massa (g)	346,18	324,08	312,58	340,30	322,84	312,28
Perda de Massa (g)	-	22,1	33,6	-	17,46	28,02
Perda de massa (%)	-	6,38	9,71	-	5,13	8,23

Tabela 5.28 - Resultado do desgaste médio.

Dosagem	1 – Concreto Refer.		2 - 4% Metacaulim		3 - 8% Metacaulim	
Percurso (m)	500 m	1000 m	500 m	1000 m	500 m	1000 m
Desgaste médio (mm)	1,35	2,60	1,81	2,68	1,40	2,60
Perda de Massa (g)	18,99	32,16	19,78	30,81	15,83	29,94
Perda de massa (%)	5,50	9,17	5,76	8,97	4,65	8,79

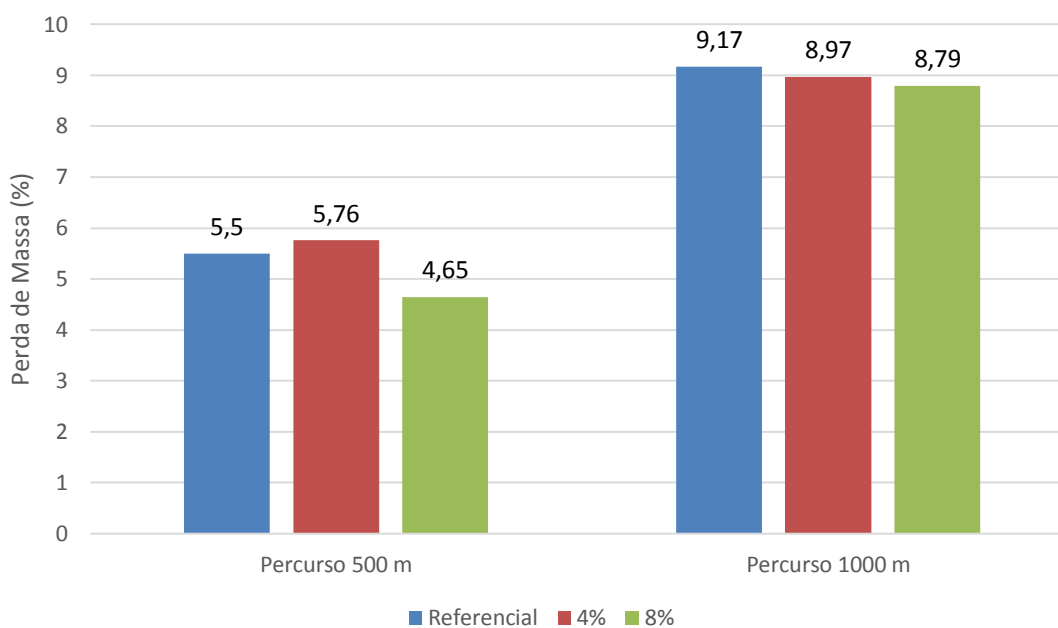


Figura 5.22 - Resultado do ensaio de desgaste por abrasão, referente à perda de massas em % dos CPs das 3 dosagens estudadas, para 500m e 1000m.

Os dados referentes à perda de massa (Tabela 5.28 e Figura 5.22) permitem observar que no percurso de 500 metros o concreto com adição de 8% de metacaulim apresentou perda de massa de 4,65% e o concreto de referência de 5,50% indicando melhoria dessa propriedade, com a adição pozolânica. Para o percurso de 1000 metros o concreto de referência apresentou uma perda de 9,17%, enquanto os concretos com teores de substituição do cimento por metacaulim de 4% e 8% apresentaram 8,97% e 8,79%, indicando valores de abrasão da mesma ordem de grandeza, para as três dosagens estudadas.

Oliveira (2007) obteve resultados para o ensaio de desgaste por abrasão aos 28 dias, perda de massa de 1,71% no percurso de 500 metros e de 4,21% para o percurso de 1000 metros, para o concreto de referência com resistência à compressão de 73,1 MPa aos 28 dias. Para concretos com teores de substituição de cimento por metacaulim de 5% e 15%, obteve para 500 metros, perdas de massa de 1,96% e 1,98% e para 1000 metros, obteve perdas de massa de 4,21% e 3,89% respectivamente. Observou que a inclusão dessa pozolana nos concretos não promoveu grandes variações nesta propriedade.

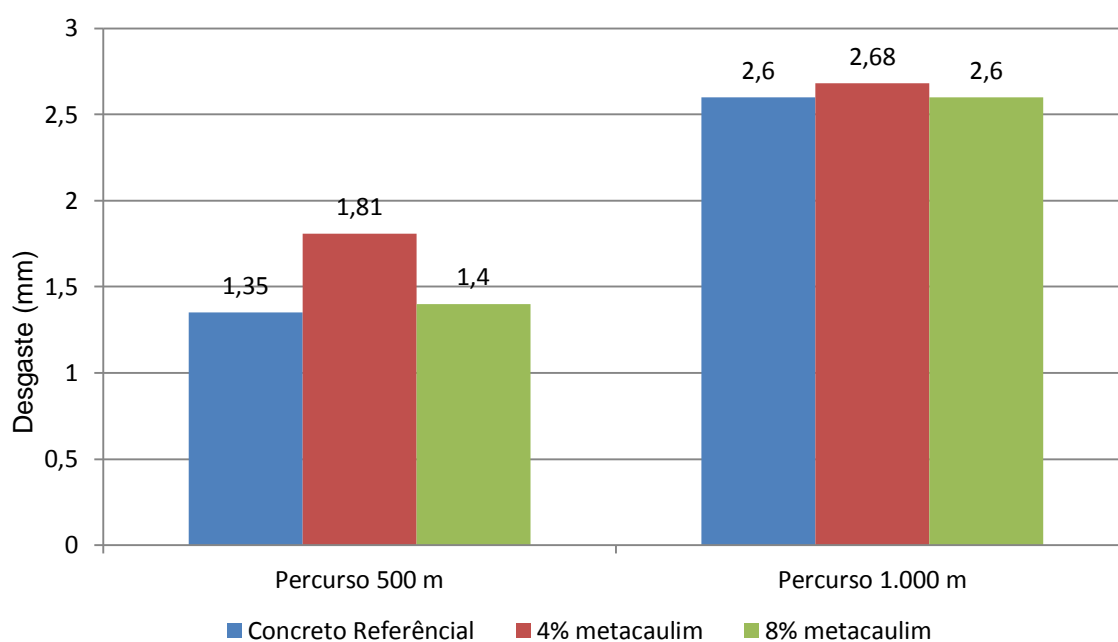


Figura 5.23 - Resultado do ensaio de desgaste por abrasão, referente ao desgaste em mm dos CPs das 3 dosagens estudadas, para 500m e 1000m.

Nos dados referentes ao desgaste (Tabela 5.28 e Figura 5.23), medidos em mm, para 500 mm, observa-se o concreto de referência apresentou desgaste de 1,35 mm, com valor bem aproximado ao concreto com teor de 8% de metacaulim e o concreto com 4% de metacaulim apresentou maior desgaste, com 1,8 mm. Para o percurso de 1000 metros, observaram-se desgastes da ordem de 2,6 mm para as três dosagens estudadas.

Mehta e Monteiro (2014) observaram que existem diferentes tipos de ensaios de abrasão, em que o grau de desgaste pode ser medido em termo de perda de massa após um tempo especificado e que não há ensaios satisfatórios para a resistência à erosão, porque as simulações das condições reais de desgaste não são facilmente reproduzidas em laboratório.

Rashad (2013) estudou em seu experimento a viabilidade de usar metacaulim em substituição parcial ao agregado miúdo no concreto, com teores de substituições de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% em peso, para um concreto de referência dosado para resistência à compressão de 30 Mpa, fator  $a/aglomerante$  constante de 0,50 e consumo constante de 400 kg/m<sup>3</sup> de cimento CEM I. A resistência a abrasão foi executada conforme norma egípcia ES:269-2/2003, sendo observadas melhorias de 23,12%, 36,18% e 46,25% sobre o concreto de referência, com 40% de substituição, para as idades de 28, 91 e 500 dias respectivamente. A resistência à abrasão está diretamente relacionada com resistência à compressão do concreto, sendo obtido um coeficiente de correlação de 0,972 entre os valores obtidos nesses ensaios.

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos no estudo do comportamento mecânico e de durabilidade dos concretos produzidos com diferentes teores de substituição do cimento por metacaulim permitiram tirar as conclusões apresentadas a seguir.

De acordo com os resultados da caracterização do metacaulim, a pozolana estudada é um material composto por 59,1% de  $\text{SiO}_2$  e 33,0 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , enquanto o cimento possui 57,75% de  $\text{CaO}$  e 23,1% de  $\text{SiO}_2$ . O metacaulim possui coloração bege-claro, área específica de 19,8  $\text{m}^2/\text{kg}$  e massa específica de 2,53  $\text{g}/\text{cm}^3$ , sendo muito mais fino e mais leve que o cimento, que possui área específica de 0,45  $\text{m}^2/\text{kg}$  e massa específica de 3,10  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

De acordo com os resultados de fluxo de calor das pastas estudadas, observou-se que as pastas apresentaram um início de pega tardio, possivelmente pelo tipo de cimento utilizado e pela característica e quantidade do aditivo plastificante multifuncional retardador de pega utilizado. O metacaulim acelerou o início das reações da pasta, por ser um material externamente fino, composto basicamente por alumínio, ferro e silício, de alta reatividade pozolânica com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

O concreto produzido com teores de substituição de metacaulim apresentou equivalente teor de ar incorporado no estado fresco.

De forma geral, constatou-se maior resistência dos concretos proporcionalmente às adições de metacaulim. Pode-se observar que a adição de metacaulim promoveu ganhos de resistência do concreto, proporcionalmente aos teores de substituição, sendo os dois principais fatores o efeito filler nas primeiras idades e reação pozolânica que ocorre com mais evidência entre o 7º e 28º dia. Nos ensaios de 295 dias, os ganhos de resistência do concreto com metacaulim foram menores, porém superiores aos valores finais concreto de referência. Os concretos que foram expostos ao biogás apresentaram resistências superiores em relação aos pares que estiveram em câmara úmida, possivelmente pelo fato de estarem expostos a temperaturas maiores durante a cura, que aumenta a velocidade de desenvolvimento de resistência do concreto.

A adição do metacaulim não promoveu alterações consideráveis de valores do módulo de elasticidade. Aos 7 dias de idade, observa-se que o teor de substituição de metacaulim não influenciou significativamente no módulo de elasticidade, indicando pouca influência de atividade pozolânica. Para a idade de 28 dias e idade de 295 dias (condições de cura úmida e expostos à atmosfera interna do reator), o concreto com 4% de metacaulim apresentou maiores resultados. Aumento contínuo do módulo de elasticidade para as três dosagens estudadas, em função do tempo de cura.

Através dos resultados de resistência à tração na flexão, observa-se que não houve ganhos de resistência para os concretos com teores de substituição do metacaulim. Esses resultados foram diferentes do esperado, uma vez que houve melhoria da resistência à compressão axial, proporcional aos teores de metacaulim.

A partir dos valores de velocidades dos ensaios de ultrassonografia observa-se em todas as dosagens de concreto estudadas, que houve melhoria da propriedade do concreto ao longo do tempo. Para a idade de 295 dias, a condição de cura úmida continuou apresentando resultados superiores de velocidade do pulso ultrassônico em relação aos pares expostos ao biogás, indicando que na condição de cura úmida houve uma melhoria das propriedades do concreto, associadas ao refinamento dos poros e vazios do concreto.

Verificou-se o aumento do percentual de absorção de água do concreto proporcional aos teores de substituição do cimento por metacaulim, porém a diferença de valores entre eles é pequena, provavelmente devido os concretos serem dosados com a mesma relação água/aglomerante. O resultado encontrado difere da literatura, pois esperava-se redução da absorção, associada ao efeito filler e pozolânico. Observou-se redução do percentual de absorção de cada concreto ao longo do tempo, com hidratação dos compostos cimentícios. O concreto exposto ao biogás apresentou percentuais de absorção inferiores àquele concreto em cura úmida contínua.

Através dos resultados obtidos no ensaio de carbonatação acelerada, observa-se que os concretos com teores de substituição de 4% e 8% de metacaulim apresentam frentes de carbonatação da ordem 25% superiores ao concreto de referência.

Não foi possível avaliar a frente de redução do pH para os concretos expostos ao biogás, havendo apenas redução do pH da superfície do concreto, requerendo um período de exposição maior para avaliar o ataque ácido.

Os dados obtidos no ensaio de resistividade elétrica indicam que as amostras de concreto com adição de metacaulim apresentaram maior resistividade elétrica proporcional ao teor de substituição de cimento por metacaulim, proporcionalmente ao tempo. As amostras de concreto expostas ao biogás apresentaram resistividade elétrica superior ao concreto em cura úmida contínua para as três dosagens estudadas.

Através dos resultados obtidos no ensaio de abrasão não se observou melhoria da resistência à abrasão, proporcional aos teores de substituição do cimento por metacaulim.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros relacionados a esta pesquisa, são sugeridos os seguintes estudos:

- Realização dos mesmos ensaios desta pesquisa, nas amostras remanescentes de concreto, que encontram-se em cura úmida e expostos aos biogás, em um período superior a 2 (dois) anos, para avaliar a evolução das propriedades do concreto;
- Realização de ensaio de microscopia eletrônica de varredura e difração de raios X das amostras remanescentes de concreto, que encontram-se em cura úmida e expostos aos biogás, em um período superior a 2 (dois) anos, para avaliar a microestrutura das amostras de concreto.
- Estudos de novas dosagens de concreto, variando relação água/aglomerante, teor e/ou tipo de cimento, teores de substituição ou adição de metacaulim.
- Estudos de diferentes materiais cimentícios suplementares, em substituição ao cimento CP V ARI RS, para a mesma dosagem estudada nesta pesquisa, para avaliar sua influência nas propriedades do concreto.
- Caracterização dos sulfetos e sulfatos dos concretos expostos ao biogás.
- Medida dimensional dos CP's para avaliação da expansão.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland – Boletim Técnico BT-106, 7ª ed.** São Paulo, 2002. 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733:** Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737:** Cimento Portland resistente a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpo-de-prova cilíndrico. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7212:** Execução de concreto dosado em central - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522:** Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802:** Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012. **NBR 9204:** Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrico-volumétrica – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12042**: Materiais inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 47**: Cimento Portland – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASTM INTERNACIONAL (ASTM). **C597-02**: Test for Pulse Velocity Through Concrete *apud* NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. Tradução Ruy Alberto Cremonini. - 2<sup>o</sup> Edição- . Porto Alegre, Bookman, 2013..

ASTM INTERNACIONAL (ASTM). **C779-05**: Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces *apud* NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. Tradução Ruy Alberto Cremonini. - 2<sup>o</sup> Edição- . Porto Alegre, Bookman, 2013.

ASTM INTERNACIONAL (ASTM). **C1138M-05**: Test for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method) *apud* RAMESH, K.G.B.; SHARMA, U.K. Abrasion resistance of concrete containing marginal aggregates. **Construction and Building Materials**, v.66, p.712-722, 2014.

BROOKS, J.J., JOHARI, M.M.A., 2001. Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete. **Cement & Concrete Composites** 23, 495–502 *apud*

O CIMENTO.org. Disponível em <https://cimento.org/nova-queda-em-2016-e-recuo-de-sete-anos-no-consumo/>. Acesso em: 04 ago. 2018.

SIDDIQUE R., KLAUS J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**, v.43, p.392-400, 2009.

CHANGLING, H., OSBAECK, B., MAKOVICKY, E. Pozzolanic reaction of six principal clay minerals: activation reactivity assessments and technological

effects. **Cement and Concrete Research** 25 (8), 1691-1702, 1995 *apud* Siddique R.; Klaus J. Influence of metakaolin on the proprieties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**, 2009.

CHERNICHARO, C. A. L.. **Volume 5 - Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Reatores Anaeróbios**. 2. ed. DESA-UFMG, 2016. 379 p.

COPASA. **Laudo Técnico – Gases Gerados nos Tanques dos reatores UASB da ETE Onça**. DESA-UFMG, 2010. 22 p.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de sílica ativa**. São Paulo, 1995. 286p. Tese (Doutorado em engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

DAVE, N.; MISRA, A. K.; SRIVASTAVA, A.; SHARMA, A. K.; KAUSHIK, S. K. Study on quaternary concrete micro-structure, strength, durability, considering the influence of multi-factors. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 447-457, 2017.

DADSETAN, S.; BAI J. Mechanical and microstructural properties of self-compacting concrete blended with metakaolin, ground granulated blast-furnace slag and fly ash. **Construction and Buildings Materials**, v. 146, p.658-667, 2017.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Estudo da influência do Metacaulim HP como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland – Relatório Final**. Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2003. 65 p.

EVANS, G.M.; FURLONG, J.C. **Environmental Biotechnology: Theory and Application**. 1.ed. WILEY, 2003. 300 p *apud* VOEGEL, C.; BERTRON, A.; ERABLE, B. Mechanisms of cementitious material deterioration in biogas digester. **Science of the total Environment**, v. 571, p. 892-901, 2016.

FERNÁNDEZ, N.; DÍAZ, E.E.; AMILS, R.; SANZ, J.L. Analysis of microbial community during biofilm development in an anaerobic wastewater treatment reactor. **Microbial Ecology**, v. 56, n.1, p. 121–132, 2008.

FIGUEIREDO, C.P.; SANTOS, F. B.; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CACHIM, P.; VELOSA, A. O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v.7, n.4, p. 685-708, 2014.

GLÓRIA, R. M. *et al.* Remoção de sulfeto de hidrogênio de efluente de reator UASB: contribuição da camada de espuma e da tubulação de descarte. In: TALLER Y SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE DIGESTION ANAEROBIA, 9., 2008, Ilha de Páscoa. **Anais... Ilha de Páscoa: Rede Latino Americana de Prevenção e Gestão de Sítios Contaminados (ReLASC)**, 2008. *apud* KULISCH, D. **Ataque por Sulfatos em Estruturas de Concreto**. 109 f. Trabalho Final de

Curso em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

HERISSON, J.; HULLEBUSH, E. D. VAN; MOLETTA-DENAT, M.; TAQUET P. Toward an accelerated biodeterioration test to understand the behavior of Portland and calcium aluminate cementitious materials in sewer networks. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 84, p. 236-243, 2013.

HORNBOSTEL, K.; LARSEN, C.K.; GEIKER, M.R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p.60-72, 2013.

KHATIB, J.M., WILD, S., 1996. Pore size distribution of metakaolin paste. **Cement and Concrete Research** 26 (10), 1545–1553 *apud* SIDDIQUE R., KLAUS J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**, v.43, p.392-400, 2009.

KHATIB, J.M.; HIBBERT, J.J. Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin. **Construction and Buildings Materials**, v. 19, p.460-472, 2005.

KOENIG, A., DEHN, F. Biogenic acid attack on concretes in biogas plants. **Biosystems Engineering**, v. 147, p. 226–237, 2016.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. Tese de doutorado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

KULISCH, Daniele. **Ataque por Sulfatos em Estruturas de Concreto**. 109 f. Trabalho Final de Curso em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

LAYSSI, Hamed; GHODS, Pouria; ALIZADEH, Aali R.; SALEHI, Mustafa. **Electrical Resistivity of Concrete: concepts, applications, and measurement techniques**. *Concrete International*, 2015. May 2015.

Lage, E.B.D.; Siqueira, P.G.F.; Martins, P.H.A.; Aguilar, M.T.P.; Chahud, E. Resistividade elétrica volumétrica do concreto: parâmetros laboratoriais, **59° Congresso Brasileiro do Concreto 2017**, Bento Gonçalves-RS, Brasil, 2017.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R.D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v.41, p. 1244-1256, 2011.

McCARTER, W.J.; TAHA, H.M.; SURYANTO B.; STARRS, G. Two-point concrete resistivity measurements: interfacial phenomena at the electrode-concrete contact zone. **Measurement Science and Technology**, v. 26, 2015.

MEHTA, P. K.; GERWICK, B.C.J. **Concr. Int.**, v.4, nº10, p.45-51, 1982. *apud* MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4º Edição. São Paulo, IBRACON, 2014

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4º Edição. São Paulo, IBRACON, 2014.

NALDEMAN, E. I.; KURTIS, K. E. A resistivity-based approach to optimizing concrete performance. **Concrete International**, maio 2014.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. Tradução Ruy Alberto Cremonini. 2º ed. Porto Alegre, Bookman, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução Ruy Alberto Cremonini. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NICOLAS, R. San; CYR M.; ESCADEILLAS G. Performance-based approach to durability of concrete containing flash-calcined metakaolin as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v.55, p. 313-322, 2014.

NNADI, E.O.; MARRIAGA, J.M. Acid Corrosion of Plain and Reinforced Concrete Sewage Systems. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.25, p.1353-1356 2013.

OLIVEIRA, C. A. S. **Avaliação microestrutural e comportamento físico e mecânico de concretos de alto desempenho produzidos com metacaulim**. 214 p. (Tese, Doutorado em engenharia) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais Belo horizonte, 2007.

PAPADAKIS, V.G.; VAYENAS, C.G; FARDIS, M.N; Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. *ACI Materials Journal*, v.88, n. 4, p. 363-373, Jul.Aug. 1991 *apud* KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. Tese de doutorado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. São Paulo, Globo, 1998

QASRAWI, H. Y. Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p.739-746, 2000.

Qian, X.; Li, Z., 2001. The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin. **Cement and Concrete Research** 31, 1607–1611 *apud* SIDDIQUE R., KLAUS J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**, v.43, p.392-400, 2009.

RAMESH, K.G.B.; SHARMA, U.K. Abrasion resistance of concrete containing marginal aggregates. **Construction and Building Materials**, v.66, p.712-722, 2014.

RASHAD, A.M. A preliminary study on the effect of fine aggregate replacement with metakaolin on strength and abrasion resistance of concrete. **Construction and Buildings Materials**, v. 44, p.487-495, 2013.

Reunion Internationale de Laboratoires D'essais Et Materiau – RILEM. Rilem TC116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability. **Materials and Structures**, v.32, p.174-179, abril 1999.

SANDBERG, P.; BENINI, H. O uso da calorimetria como uma técnica de controle tecnológico de materiais. **Revista Concreto & Construções**, ano 36, n. 51, p. 22-26, set. 2008.

SIDDIQUE, R.; KLAUS J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**, v.43, p.392-400, 2009.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). **Press Kit 2013**. Disponível em < <http://www.snic.org.br/press.asp>>. Acesso em 01/12/2016.

SINGH, K. S.; VIRARAGHAVAN, T. Start-up and Operation of UASB Reactors at 20°C for Municipal Wastewater Treatment. **Journal of Fermentation and Bioengineering**, v. 85, n. 6, p. 609-614, 1998 *apud* KULISCH, Daniele. **Ataque por Sulfatos em Estruturas de Concreto**. 109 f. Trabalho Final de Curso em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

TEIXEIRA, S. M. F. **Determinação da influência do aditivo superplastificante no desempenho de um concreto estrutural autoadensável de resistência de 40 MPa**. 170 p. (Dissertação, Mestrado em engenharia) – Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte, 2014.

TSUTIYA, M. T.; SOBRINHO, P. A. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**. 1º Edição. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

TEODORO, R. **Avaliação das características de diferentes metacaulins e sua influência na estrutura interna do concreto e em propriedades ligadas à durabilidade**. 193 p. (Dissertação, Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, 2016.

VOEGEL, C.; BERTRON, A.; ERABLE, B. Mechanisms of cementitious material deterioration in biogas digester. **Science of the total Environment**, v. 571, p. 892-901, 2016.

WERLE, A. P.; KAZMIERCZAK, C. S.; KULAKOWSKI, M. P. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Revista Ambiente Construído**, v.11, n. 2, p. 213-228, abr./jun. 2011.

WHITEHURST, E. Soniscope tests concrete structures. *J Am Coner Ist*, v.47, p. 433-444, 1951 *apud* QASRAWI, H. Y. Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p.739-746, 2000.