



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE**  
**MATERIAIS**

**ANDRÉ SCHRAMM BRANDÃO**

**ANÁLISE MICROESTRUTURAL DA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND**  
**COM ÁGUAS RESIDUÁRIAS PROVENIENTES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO**  
**DE ESGOTO PREDOMINANTEMENTE DOMÉSTICO**

**Fortaleza – CE**

**2020**

ANDRÉ SCHRAMM BRANDÃO

ANÁLISE MICROESTRUTURAL DA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND COM  
ÁGUAS RESIDUÁRIAS PROVENIENTES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE  
ESGOTO PREDOMINANTEMENTE DOMÉSTICO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais. Área de concentração: Engenharia de Processos de Transformação e Degradação dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pontes de Deus  
Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

- 
- B817e Brandão, André Schramm.  
Análise microestrutural da hidratação do cimento Portland com águas residuárias provenientes de estações de tratamento de esgoto predominantemente doméstico / André Schramm Brandão. – 2020.  
179 f. : il. color. , enc. ; 30 cm.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2020.  
Área de Concentração: Processos de Transformação e Degradação dos Materiais.  
Orientação: Prof. Dr. Ênio Pontes de Deus.  
Co-orientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral
1. Microestrutura cimentícia. 2. Cristalinidade. 3. Precipitação de carbonato. 4. Ação bactericida. 5. Águas residuárias. I. Título.

ANDRÉ SCHRAMM BRANDÃO

ANÁLISE MICROESTRUTURAL DA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND COM  
ÁGUAS RESIDUÁRIAS PROVENIENTES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE  
ESGOTO PREDOMINANTEMENTE DOMÉSTICO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais. Área de concentração: Engenharia de Processos de Transformação e Degradação dos Materiais.

Aprovada em: 29/01/2020

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Ênio Pontes de Deus (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral (Co-orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Ricardo Emilio Ferreira Quevedo Nogueira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Cassius Olívio Figueiredo Terra Ruchert  
Universidade de São Paulo (USP)

---

Prof. Dr. Rodrigo Nogueira de Codes  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

Dedico este trabalho aos meus pais Fernando e Maria Goretti, esposa Cibelle, filhos Lara e Gabriel, sogra Tereza e bisavó Tilde (eternamente presente).

## AGRADECIMENTOS

A DEUS, pela proteção e luz em meus caminhos, e seu enorme amor.

A Nossa Senhora, mãe de Jesus e nossa mãe, pela proteção e intercessão a seu filho Jesus.

Aos meus orientadores e amigos, Prof. Dr. Ênio Pontes de Deus e Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral pela orientação e apoio incondicional neste desafio acadêmico.

Aos meus pais, Fernando Padilha e Maria Goretti, pelas orientações, ensinamentos dos valores, o amor e condições com que me criaram.

À minha esposa Cibelle, pelo apoio, amor e compreensão.

À meus filhos Lara e Gabriel, pela alegria, leveza e distração nos momentos difíceis.

À minha sogra Tereza, pelo apoio, atenção e afeto com minha família.

Ao meu irmão, Fernando Nilson P. Brandão Junior, por estar sempre presente e me ajudando.

À Companhia de Água e Esgoto do Ceará, pelo conhecimento adquirido e oportunidades ao longo de minha carreira profissional dentro da empresa.

Ao Laboratório de Microbiologia Ambiental e do Pescado, em especial a Professora Dra. Oscarina Viana de Souza, querida amiga Cris, e colega Matheus, pelo apoio e orientação nos ensaios microbiológicos.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil, Professor Aldo, e técnicos Elano e Manuel, pela atenção e orientação no apoio à realização dos ensaios e no trânsito dentro do laboratório.

Aos colegas Wyoskinária, Altanizio Jr e Douglas Alexandre, pelo apoio no laboratório de materiais de construção civil.

Ao laboratório de termoanálises, Professor Dr. Klung e mestrando Samuel Lucas, pelo apoio com na realização dos ensaios de DSC e TG.

À empresa APODI, por ter disponibilizado os cimentos para a realização desse estudo, em especial à Claudia Zanetti e Thais.

“An equation has no meaning for me unless it expresses a thought of GOD.”

(Srinivasa Ramanujan, 19-27)

#ivaluewater

## RESUMO

Os critérios mais rígidos para lançamento de efluentes em corpos hídricos e o crescente custo da água têm incentivado o reúso nas indústrias, em busca de minimizar o conflito pela sua utilização com maior intensidade nas regiões áridas e semiáridas do globo terrestre.

A construção civil vem aumentando medidas que minimizem os impactos de sua ação no meio ambiente, praticando a “construção sustentável”, até mesmo para as atividades de produção (amassamento) e cura do concreto. Pesquisadores afirmam que para cada m<sup>3</sup> de concreto produzido consome-se aproximadamente 1,13 m<sup>3</sup> de água, sendo 28% deste valor com o amassamento. Assim, neste cenário adverso para o desenvolvimento local, e diante de práticas, estudos e normatizações mundiais, desenvolveu-se a análise macro e micro-estrutural do concreto produzidos com 2 diferentes tipos de cimento Portland (sendo CP III e CP V) combinados com 3 tipos de água (sendo potável, efluente tratado secundário e efluente tratado terciário), aonde os agregados graúdos e miúdos foram os mesmos.

Para análise macro-estrutural foram utilizadas técnicas de avaliação normativas para as águas de amassamento (tais como análises físico-químicas) e análise da pasta (tempos de pega e pasta de consistência normal) além do concreto (resistência a compressão axial, carbonatação e abatimento do tronco de cone). Já para análise micro-estrutural da pasta foram realizadas técnicas de calor de hidratação (calorimetria) e termo-análises (termogravimetria e calorimetria exploratória diferencial) para as idades de 1, 7, 14 e 28 dias. Foi utilizada técnica de liofilização para cessar a hidratação da pasta nas idades mencionadas. Adicionalmente, e não menos importante, foram realizadas técnicas de análise microbiológica (bactérias heterotróficas e coliformes) nos constituintes águas e cimentos, bem como da pasta até os 45 minutos de reação. Isolou-se também algumas bactérias e avaliou-se seu comportamento diante da adição dos cimentos. Os resultados macroestruturais são animadores, onde predominantemente não houve diferença significativa dos grupos avaliados com a água destilada, água de referência normativa. As termo-análises (calorimetria) realizadas não há diferença significativa considerando o desvio amostral das massas de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio (temperaturas de hidratação até os 7 dias). Para as análises microbianas da pasta, a atenção especial recai com a capacidade de esporulação das bactérias, sendo este alvo futuro a ser investigado, pois estudos comprovam que nem toda bactéria que esporula é nociva micro estruturalmente aos materiais cimentícios.

**Palavras-chave:** Microestrutura cimentícia; Águas residuárias; Precipitação do carbonato; Cristalinidade; ação antibactericida.



## ABSTRACT

The stricter criteria for discharging effluents into water bodies and the rising cost of water have encouraged reuse in industries, seeking to minimize conflict by using it more intensely in the arid and semi-arid regions of the globe.

Civil construction has been increasing measures that minimize the impacts of its action on the environment, practicing the "sustainable construction", even for the production activities (kneading) and curing of concrete. Researchers state that for each m<sup>3</sup> of concrete produced, approximately 1.13 m<sup>3</sup> of water is consumed, 28% of this value with kneading. Thus, in this adverse scenario for local development, and in face of worldwide practices, studies and standards, the macro and microstructural analysis of concrete produced with 2 different types of Portland cement (CP III and CP V) were developed combined with 3 types of water (being potable, secondary treated effluent and tertiary treated effluent), where the large and fine aggregates were the same.

For macrostructural analysis, normative evaluation techniques were used for kneading waters (such as physicochemical analysis) and paste analysis (handling times and normal consistency paste) as well as concrete (axial compressive strength, carbonation and abatement resistance). of the cone trunk). For the microstructural analysis of the paste, hydration heat (calorimetry), X-ray diffraction and thermoanalysis (thermogravimetry and differential exploratory calorimetry) techniques were performed for ages 1, 7, 14 and 28 days. Lyophilization technique was used to stop the hydration of the paste at the mentioned ages. In addition, and not least, microbiological analysis techniques (heterotrophic and coliform bacteria) were performed in the constituent waters and cements, as well as paste until 45 minutes of reaction. Some bacteria were also isolated and their behavior was evaluated when cement was added. The macrostructural results are encouraging, where predominantly there was no significant difference between the groups evaluated with distilled water, water standart reference. As for the microstructural analyzes, thermo-analyzes (calorimetry) performed there is no significant difference considering the sample deviation of the masses of calcium hydroxide and calcium carbonate (hydration temperatures up to 7 days). For the microbial analysis of paste, special attention is given to the sporulation capacity of bacteria, which is a future target to be investigated, since studies show that not all bacteria that sporulate are micro structurally harmful to cementitious materials.

**Keywords:** Cement microstructure; Wastewater; Carbonate precipitation; Crystallinity; antibacterial action.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	Representação esquemática da liberação de calor (A) e a concentração de $\text{Ca}^{+2}$ em solução (b) durante a hidratação.....	41
Figura 2.2	Produtos da hidratação do cimento anidro.....	44
Figura 2.3	Ponto triplo da água.....	46
Figura 3.1	Fluxograma da Estação de Tratamento de Esgoto Marechal Rondon.....	65
Figura 3.2	Fluxograma da Estação de Tratamento de Esgoto Guadalajara.....	66
Figura 4.1	Ciclo de desenvolvimento e fases dos biofilmes microbianos sobre um substrato sólido.....	99
Figura 4.2	Rendimento celular e concentração de metais essenciais.....	102
Figura 4.3	Rendimento celular e concentração de metais.....	102
Figura 5.1	Estrutura Analítica do Projeto da Pesquisa.....	105
Figura 5.2	Estratégia para alcance dos objetivos, avaliação da macroestrutura.....	105
Figura 5.3	Estratégia para alcance dos objetivos, avaliação da microestrutura.....	106
Figura 5.4	Estratégia para alcance dos objetivos, avaliação da microbiológica.....	106
Figura 5.5	Moldagem das pastas.....	116
Figura 5.6	Desmoldagem (a), acondicionamento (b) e cura úmida (c).....	116
Figura 5.7	Abatimento típico verdadeiro do 1º traço (a) e do 2º traço (b).....	126
Figura 6.1	Resultados do ensaio microbiológico de placas.....	137

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Requisitos aproximados de consumo de água para diferentes dimensões de agregado graúdo.....	27
Tabela 1.2	Tempo mínimo de cura recomendada pelo IBRACON.....	27
Tabela 2.1	Tipos de ligações nos materiais cerâmicos.....	32
Tabela 2.2	Composição química aproximada dos principais componentes presentes em alguns silicatos cerâmicos.....	33
Tabela 2.3	Simbologia dos óxidos e constituintes do cimento.....	34
Tabela 2.4	Composição química aproximada dos principais componentes presentes em alguns silicatos cerâmicos.....	39
Tabela 3.1	Características da água em benefício da vida.....	48
Tabela 3.2	Principais diferenças entre adsorção física e adsorção química.....	50
Tabela 3.3	Levantamento bibliográfico normativo mundial de parâmetros de resistência a compressão.....	57
Tabela 3.4	Levantamento bibliográfico normativo mundial de parâmetros de pH.....	57
Tabela 3.5	Levantamento bibliográfico normativo mundial de parâmetros de tempos de pega.....	58
Tabela 3.6	Levantamento bibliográfico normativo mundial de parâmetros de sólidos.....	58
Tabela 3.7	Levantamento bibliográfico normativo mundial de parâmetros da presença de Sulfatos.....	58
Tabela 3.8	Levantamento bibliográfico normativo mundial de parâmetros da presença de Cloreto.....	59
Tabela 3.9	Características de crescimento das BOE.....	74
Tabela 4.1	Levantamento bibliográfico realizado.....	80
Tabela 4.2	Efeitos ou recomendações das impurezas químicas dissolvidas na água de amassamento para o concreto.....	92
Tabela 4.3	Levantamento bibliográfico dos efeitos das impurezas presentes na água de amassamento para a pasta.....	92
Tabela 4.4	Levantamento bibliográfico dos efeitos das impurezas presentes na água de amassamento para o concreto.....	93
Tabela 4.5	Levantamento bibliográfico dos efeitos das impurezas presentes na água de amassamento para o concreto armado.....	97

Tabela 4.6	Levantamento bibliográfico dos efeitos das impurezas presentes na água de amassamento para a argamassa.....	97
Tabela 4.7	Levantamento bibliográfico dos efeitos das impurezas presentes nos agregados.....	98
Tabela 4.8	Descritivo estrutural dos polimorfos de carbonato de cálcio.....	100
Tabela 4.9	Remoção de microorganismos vivos através de metais pesados.....	102
Tabela 4.10	Fatores que influenciam a atividade antimicrobiana das nanopartículas metálicas.....	103
Tabela 5.1	Verificação normativa.....	107
Tabela 5.2	Avaliação macroestrutural.....	108
Tabela 5.3	Avaliação micro-estrutural.....	108
Tabela 5.4	Avaliação microbiológica.....	109
Tabela 5.5	Características do agregado miúdo (1° e 2° Traços).....	109
Tabela 5.6	Características do agregado graúdo (1° e 2° Traços).....	110
Tabela 5.7	Características técnicas e propriedades do plastificante.....	111
Tabela 5.8	Propriedades químicas do CP II 32 Z.....	112
Tabela 5.9	Propriedades físicas e mecânicas do CP II 32 Z.....	112
Tabela 5.10	Propriedades químicas do CP III 40 RS.....	112
Tabela 5.11	Propriedades físicas e mecânicas do CP III 40 RS.....	112
Tabela 5.12	Propriedades químicas do CP V.....	112
Tabela 5.13	Propriedades físicas e mecânicas do CP V.....	113
Tabela 5.14	Ensaio realizado para cada tipo de pasta .....	115
Tabela 5.15	Dosagem de materiais adotados.....	118
Tabela 5.16	Especificações de exigência de O <sub>2</sub> , meio de cultura, tempo e temperatura de incubação utilizados para cada grupo microbiano analisado.....	119
Tabela 5.17	Métodos utilizados, normas, parâmetros e locais das análises das águas de amassamento pesquisadas.....	121
Tabela 5.18	Métodos utilizados, normas, parâmetros e locais das análises das pastas produzidas pelas águas de amassamento pesquisadas.....	123
Tabela 5.19	<i>Slump Test</i> , para as águas de amassamento do estudo (1° Traço).....	126
Tabela 5.20	<i>Slump Test</i> , para as águas de amassamento do estudo (2° Traço).....	126
Tabela 6.1	Propriedades físico-químicas e biológicas das águas destilada e potável..	129

Tabela 6.2	Resultados das análises físico-químicas das águas residuárias.....	131
Tabela 6.3	Análise quantitativa de grupos microbianos relacionados com a qualidade da água utilizada para formulação do concreto.....	132
Tabela 6.4	Análise quantitativa de grupos microbianos presentes nos cimentos.....	133
Tabela 6.5	Resultados dos tempos de pega e penetração da sonda.....	134
Tabela 6.6	Resultados dos valores de calor de hidratação (C*) por tempo, com suas respectivas comparações com a água de referência (destilada).....	134
Tabela 6.7	Resultados dos valores máximos de calor de hidratação (C*) e seu início temporal, com suas taxas comparativas, em relacionando os valores com as águas de amassamento Ref e TAP e seus respectivos cimentos.....	135
Tabela 6.8	Resultados das quantidades dos grupos microbianos, relacionados com decaimento bacteriológico.....	139
Tabela 6.9	Resultados das quantidades dos grupos microbianos, relacionados com decaimento bacteriológico.....	139
Tabela 6.10	Resultados do aumento (azul) e redução (vermelho) de compostos através da hidratação do CP III com a água de amassamento E2 comparativamente com a Ref e TAP.....	140
Tabela 6.11	Resultados do aumento (azul) e redução (vermelho) de compostos através da hidratação do CP III com a água de amassamento E3 comparativamente com a Ref e TAP.....	140
Tabela 6.12	Resultados do aumento (azul) e redução (vermelho) de compostos através da hidratação do CP V com a água de amassamento E2 comparativamente com a Ref e TAP.....	143
Tabela 6.13	Resultados do aumento (azul) e redução (vermelho) de compostos através da hidratação do CP V com a água de amassamento E3 comparativamente com a Ref e TAP.....	143
Tabela 6.14	Resultados da média, tréplica, do ensaio de resistência a compressão (MPa) para o 1° traço com CP II 32 Z.....	147
Tabela 6.15	Resultados da média, tréplica, do ensaio de resistência a compressão (MPa) para 2° traço com CP III 40 RS.....	148

Tabela 6.16	Resultados da média, tréplica, do ensaio de resistência a compressão (MPa) para 2º traço com CP V.....	149
Tabela 6.17	Resultados da média, tréplica, do ensaio de índice de vazios (%).....	150
Tabela 6.18	Resultados da média, tréplica, do ensaio de absorção (%).....	150
Tabela 6.19	Resultados da média, tréplica, do ensaio de massa específica (g/cm³).....	151
Tabela 6.20	Resultados da média, tréplica, de penetração de carbonatação (mm).....	152
Tabela B1.1	Tabela primária de interpretação dos gráficos A1.....	199
Tabela B1.2	Tabela ajustada da interpretação da tabela B1.1.....	199
Tabela B2.1	Tabela primária de interpretação dos gráficos A2.....	199
Tabela B2.2	Tabela ajustada da interpretação da tabela B2.1.....	199
Tabela B3.1	Tabela primária de interpretação dos gráficos A3.....	200
Tabela B3.2	Tabela ajustada da interpretação da tabela B3.1.....	200
Tabela B4.1	Tabela primária de interpretação dos gráficos A4.....	200
Tabela B4.2	Tabela ajustada da interpretação da tabela B4.1.....	200
Tabela B5.1	Tabela primária de interpretação dos gráficos A5.....	201
Tabela B5.2	Tabela ajustada da interpretação da tabela B1.1.....	201
Tabela B6.1	Tabela primária de interpretação dos gráficos A6.....	201
Tabela B6.2	Tabela ajustada da interpretação da tabela B2.1.....	201
Tabela B7.1	Tabela primária de interpretação dos gráficos A7.....	202
Tabela B7.2	Tabela ajustada da interpretação da tabela B7.1.....	202
Tabela B8.1	Tabela primária de interpretação dos gráficos A8.....	202
Tabela B8.2	Tabela ajustada da interpretação da tabela B8.1.....	202
Tabela B9	Morfologia celular e características tintoriais de culturas bacterianas isoladas das amostras das pastas após os 45 minutos.....	203
Tabela D1	Distribuição F ( $\alpha = 5\%$ a direita).....	208

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1	Consumo aparente de cimento – Brasil e Regiões.....	40
Gráfico 2.2	Taxa de hidratação de compostos puros.....	42
Gráfico 2.3	Desempenho da resistência dos constituintes do cimento.....	43
Gráfico 3.1	Variação das propriedades físicas da água com relação a alterações da força de ligação do hidrogênio.....	47
Gráfico 4.1	Evolução temporal de estudos correlatos ao tema da pesquisa.....	79
Gráfico 4.2	Locais de origem das pesquisas realizadas.....	79
Gráfico 4.3	Continentes de origem das pesquisas realizadas.....	80
Gráfico 5.1	Avaliação da conformidade dos agregados miúdos.....	110
Gráfico 5.2	Avaliação da conformidade dos agregados graúdos.....	111
Gráfico 6.1	Gráfico dos ensaios calorimétricos de indução das águas do 2º traço com o CP III 40 RS, após o período de indução.....	136
Gráfico 6.2	Gráfico dos ensaios calorimétricos de indução das águas do 2º traço com o CP V, após o período de indução.....	136
Gráfico 6.3	Resultados das quantidades dos grupos microbianos, relacionados com decaimento microbiano das Bactérias Heterotróficas.....	137
Gráfico 6.4	Resultados das quantidades dos grupos microbianos, relacionados com decaimento microbiano de coliformes.....	138
Gráfico 6.5	Resultados das quantidades dos grupos microbianos, relacionados com decaimento microbiano das Bactérias Heterotróficas.....	138
Gráfico 6.6	Resultados das quantidades dos grupos microbianos, relacionados com decaimento microbiano de coliformes.....	138
Gráfico 6.7	Percentual de massa do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) mais aluminatos, advindos da hidratação do CP III 40 RS com as águas do estudo, ao longo dos 28 dias.....	140
Gráfico 6.8	Percentual de massa de hidróxido de cálcio (Ca(OH) <sub>2</sub> , ou portlandita), advindos da hidratação do CP III 40 RS com as águas do estudo, ao longo dos 28 dias.....	141
Gráfico 6.9	Percentual de massa de carbonato de cálcio (CaCO <sub>3</sub> ), advindos da hidratação do CP III 40 RS com as águas do estudo, ao longo dos 28 dias.....	142

Gráfico 6.10	Percentual de massa do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) mais aluminatos, advindos da hidratação do CP V com as águas do estudo, ao longo dos 28 dias.....	144
Gráfico 6.11	Percentual de massa de hidróxido de cálcio (Ca(OH) <sub>2</sub> , ou portlandita), advindos da hidratação do CP V com as águas do estudo, ao longo dos 28 dias.....	145
Gráfico 6.12	Percentual de massa de carbonato de cálcio (CaCO <sub>3</sub> ), advindos da hidratação do CP V com as águas do estudo, ao longo dos 28 dias.....	146
Gráfico 6.13	Resistência à compressão axial do 1° traço, CP II 32 Z.....	147
Gráfico 6.14	Resistência à compressão axial do 2° traço, CP III 40 RS.....	148
Gráfico 6.15	Resistência à compressão axial do 2° traço, CP V.....	149
Gráfico 6.16	Resultados da média, tréplica, da resistência a compressão axial (MPa) aos 28 dias.....	152
Gráfico A1.1	Termogravimetria (TG) e Análise Térmica Diferencia (DTG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida.....	183
Gráfico A1.2	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida.....	184
Gráfico A2.1	Termogravimetria (TG) e Análise Térmica Diferencia (DTG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida.....	185
Gráfico A2.2	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida.....	186
Gráfico A3.1	Termogravimetria (TG) e Análise Térmica Diferencia (DTG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida.....	187
Gráfico A3.2	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida.....	188



Gráfico A4.1	Termogravimetria (TG) e Análise Térmica Diferencia (DTG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida.....	189
Gráfico A4.2	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida.....	190
Gráfico A5.1	Termogravimetria (TG) e Análise Térmica Diferencia (DTG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida.....	191
Gráfico A5.2	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida.....	192
Gráfico A6.1	Termogravimetria (TG) e Análise Térmica Diferencia (DTG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida.....	193
Gráfico A6.2	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida.....	194
Gráfico A7.1	Termogravimetria (TG) e Análise Térmica Diferencia (DTG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida.....	195
Gráfico A7.2	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida.....	196
Gráfico A8.1	Termogravimetria (TG) e Análise Térmica Diferencia (DTG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida.....	197
Gráfico A8.2	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida.....	198

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1	Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.....	36
Quadro 2.2	Limites de composição do cimento Portland.....	36
Quadro 2.3	Requisitos químicos do CsP, em percentagem de massa.....	37
Quadro 2.4	Requisitos físicos e mecânicos do CsP, em percentagem de massa.....	38
Quadro 2.5	Requisito do valor máximo do calor de hidratação para enquadrar-se como BC.....	38
Quadros 2.6	Determinações facultativas.....	38

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\text{Al}_2\text{O}_3$	Óxido de alumínio
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
$\mu\text{m}$	Micrometro
3C4A S H12	Monossulfoaluminato de cálcio ou fase AFm $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$
C4AF	ferro aluminato tetracálcico
A	Ampère
AFm	Monossulfoaluminato de cálcio hidratado
AFt	Trissulfoaluminato de cálcio hidratado ou etringita
$\text{Al}(\text{OH})_4^-$	Íon aluminato
C2S	Silicato bicálcico ou belita
C3A	Aluminato tricálcico
C3S	Silicato tricálcico ou alita
$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$	Silicato de cálcio hidratado
C4AF	Ferro aluminato tetracálcico ou brownmillerita
$\text{C}_6\text{A S } 3\text{H}_{32}$	Etringita
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de cálcio ou portlandita
$\text{Ca}^{2+}$	Íon cálcio
$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	C2S – silicato dicálcico ou belita
$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	C3A – aluminato tricálcico
$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$	C3S – silicato tricálcico ou alita
$\text{CaCO}_3$	Carbonato de cálcio
C-A-H	Aluminato de cálcio hidratado
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Carbonato de cálcio e magnésio ou dolomita
$\text{CaO}$	Óxido de cálcio ou cal livre
$\text{CaSO}_4$	Sulfato de cálcio ou anidrita
$\text{CaSO}_4\cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de cálcio hemihidratado ou hemidrato
$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de cálcio dihidratado ou gipsita
CH	Hidróxido de cálcio ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou portlandita
C S H <sub>2</sub>	Gipsita
cm	Centímetro
$\text{CO}_2$	Anidrido carbônico
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado ou tobermorita
Cu	Cobre

$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido de ferro III
g	Grama
G	Giga ( $10^9$ )
h	Hora
$\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$	Íon silicato
Hg	Mercúrio
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
J	Joule
K	Quilo ( $10^3$ )
$\text{K}^+$	Íon potássio
$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Singenita
$\text{K}_2\text{O}$	Óxido de potássio
$\text{K}_2\text{SO}_4$	Sulfato de potássio
L	Litro
m	Metro
M	Mega ( $10^6$ )
$\text{Mg}(\text{OH})_2$	Hidróxido de magnésio ou brucita
$\text{MgO}$	Óxido de magnésio ou periclásio
min	Minuto
mm	Milímetro
Mol	Molécula-grama
NBR	Norma Técnica Brasileira
$\text{N}_2$	Nitrogênio
$\text{Na}^+$	Íon sódio
$\text{Na}_2\text{O}$	Óxido de sódio
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	Sulfato de sódio
$(\text{OH})^-$	Íon hidroxila
Pa	Pascal
pH	Potencial Hidrogeniônico
s	Segundo
$\text{SiO}_2$	Quartzo ou óxido de silício ou dióxido de silício
$\text{SO}_3$	Trióxido de enxofre ou anidrido sulfuroso
$\text{SO}_4^{2-}$	Íon sulfato
W	Watt

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Percentual
~	Aproximação
R\$	Reais
®	Marca registrada
$\lambda$	Lambda
$\phi$	Diâmetro
$\theta$	Teta
$\mu\text{m}$	Micrômetro
°	Grau
°C	Grau Celsius

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>25</b>
1.1	Considerações iniciais .....	25
1.2	Justificativa .....	28
1.3	Objetivos .....	30
1.3.1	<i>Objetivo Geral</i> .....	30
1.3.2	<i>Objetivo Tecnológico</i> .....	30
1.3.3	<i>Objetivo Econômico-Financeiro-Ambiental</i> .....	31
1.4	Estrutura do trabalho .....	31
<b>2</b>	<b>HIDRATAÇÃO DO CIMENTO</b> .....	<b>32</b>
2.1	Silicatos Cerâmicos .....	32
2.2	Cimento Portland .....	34
2.2.1	<i>Tipos de Cimento Portland</i> .....	34
2.2.2	<i>Reações de Hidratação</i> .....	40
2.3	Técnicas de Paralisação da Hidratação de Cimento Portland .....	44
<b>3</b>	<b>ÁGUA</b> .....	<b>47</b>
3.1	Água e suas Propriedades .....	47
3.1.1	<i>Propriedades da água</i> .....	48
3.2	Água de Amassamento .....	52
3.2.1	<i>Resquisitos Normativos Mundiais para Qualidade da Água de Amassamento</i> .....	55
3.3	A água nos processos de degradação do concreto .....	60
3.3.1	<i>Fissuração</i> .....	60
3.3.2	<i>Ataques Ácidos</i> .....	60
3.3.3	<i>Ataque por Sulfato</i> .....	61
3.3.4	<i>Reações álcali-silica</i> .....	61
3.3.5	<i>Corrosão de armadura</i> .....	62
3.3.6	<i>Carbonatação</i> .....	63
3.3.7	<i>Resistividade do concreto</i> .....	63
3.3.8	<i>Ataque Biológico</i> .....	64
3.4	Água Recuperada (Reuso) .....	64
3.4.1	<i>Descrição dos tratamentos dos efluentes utilizados para pesquisa</i> .....	65
3.4.2	<i>Microbiologia Presente nos Efluentes das ETEs</i> .....	67
3.4.3	<i>Conceituação de Grupos Microbianos Presentes na Águas Utilizadas</i> .....	70
3.4.4	<i>Apresentação da hidrolização da Ureia</i> .....	76

<b>4</b>	<b>HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND COM ÁGUA RECUPERADA</b>	<b>77</b>
4.1	Revisão Literária	77
4.2	Impacto das Impurezas Presentes na Água	82
4.2.1	<i>Pasta</i>	92
4.2.2	<i>Concreto</i>	93
4.2.3	<i>Argamassa e Agregados</i>	97
4.3	Interação de Constituintes e Compostos da Hidratação do Cimento com Microorganismos	98
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>105</b>
5.1	Materiais	109
5.1.1	<i>Constituintes</i>	109
5.1.2	<i>Pasta</i>	114
5.1.3	<i>Concreto</i>	117
5.1.4	<i>Argamassa</i>	118
5.2	Métodos e Equipamentos	118
5.2.1	<i>Agregados miúdos e graúdos</i>	120
5.2.2	<i>Cimento</i>	120
5.2.3	<i>Água Recuperada</i>	120
5.2.4	<i>Pasta</i>	123
5.2.5	<i>Concreto</i>	125
5.2.6	<i>Argamassa Padrão</i>	128
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>129</b>
6.1	Os Constituintes	129
6.1.1	<i>Águas Utilizadas</i>	129
6.1.2	<i>Cimentos Utilizados</i>	132
6.2	<i>Pasta</i>	133
6.2.1	<i>Pasta de Consistência Normal e Tempos de Pega</i>	133
6.2.2	<i>Calorimetria de Condução</i>	134
6.2.3	<i>Análises Microbiológicas (Mbio)</i>	136
6.2.4	<i>Análises Térmicas: TG, DTG e DSC</i>	139
6.3	<i>Concreto</i>	146
6.3.1	<i>Resistência a Compressão Axial</i>	146
6.3.2	<i>Índice de Vazios, Absorção e Massa Específica</i>	149
6.3.3	<i>Carbonatação</i>	151
6.4	<i>Argamassa</i>	152

<b>6.5</b>	<b>Análise Geral .....</b>	<b>153</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>156</b>
<b>7.1</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>156</b>
<b>7.2</b>	<b>Trabalhos Futuros .....</b>	<b>159</b>
<b>7.3</b>	<b>Sugestões .....</b>	<b>160</b>
	<b>REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>161</b>
	<b>ANEXO A – GRÁFICOS DOS ENSAIOS TERMO-ANALÍTICOS .....</b>	<b>183</b>
	<b>ANEXO B – TABELAS DE INTERPRETAÇÃO DOS GRÁFICOS DO ANEXO A ...</b>	<b>199</b>
	<b>ANEXO C – ILUSTRAÇÕES .....</b>	<b>204</b>
	<b>ANEXO D – MÉTODO ESTATÍSTICO .....</b>	<b>205</b>
	<b>ANEXO E – OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....</b>	<b>209</b>



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações iniciais

A água é um bem imprescindível, sendo essencial à toda a vida, elemento indispensável como componente bioquímico dos seres vivos ou habitat natural para muitas espécies, além de ser fator necessário no desenvolvimento de várias atividades, adquirindo valor econômico e social. Entretanto, este recurso fundamental é mal distribuído temporal e espacialmente ao redor do planeta.

Com uma área de aproximadamente 8.510.820,623 Km<sup>2</sup> e mais de 210,1 milhões de habitantes, o Brasil, segundo Santos (2003), possui cerca de 8% da reserva de água doce do planeta. Porém a distribuição de todo esse recurso não é uniforme. De acordo com Lima (1999) e Graziano (2017), na passagem dos séculos, o aumento populacional e a má administração em relação ao uso da água, foram os responsáveis pela redução da disponibilidade hídrica, trazendo problemas de escassez. Haja vista que 73% de água doce disponível no país se encontra na bacia Amazônica, que habita menos de 5% da população, sendo os demais 27% destes recursos disponíveis para as demais regiões, onde residem 95% da população do país. Um outro contraste é a oferta de água tratada, segundo Brasil (2017), enquanto na região Sudeste 87,5% dos domicílios são atendidos por distribuição de água, no Nordeste a porcentagem beira os 58,7%, devido aos seus baixos índices pluviométricos, altas taxas de insolação e intermitência no regime de chuvas, é afetada pela escassez hídrica. Ainda de acordo com Brasil, em um período de dez anos, aproximadamente 80% dos municípios da região declararam emergência ou de estado de calamidade pública devido a problemas com a seca, o que mostra que o problema na região é constante.

Nesses cenários, conforme Caixeta (2010), a reutilização da água se apresenta como uma alternativa viável para enfrentar o problema, uma vez que permite diminuir os conflitos pelo uso da água ao conservar as águas de melhor qualidade para fins mais nobres. Na indústria, o custo da água de abastecimento já tem sido fator de implantação de iniciativas de controle de perdas e de reuso, segundo Fiori et al (2006). A reutilização da água oferece o potencial de transformar o ciclo linear humano da água (extrair, tratar, distribuir, consumir, coletar, tratar e descartar) em um fluxo circular, potencialmente desacoplando o consumo municipal de água do esgotamento e poluição da água das reservas.

A utilização de águas residuárias tratadas, em algumas partes do mundo, tem sido impulsionado por fatores como a escassez, nas regiões áridas e semiáridas, preocupações com a segurança hídrica, onde a demanda excede a disponibilidade ou, mesmo, a necessidade de tratamentos caros para remover nutrientes e contaminantes provenientes da descarga de

efluentes em cursos d'água superficiais. No entanto, em muitas áreas, este potencial de reutilização ainda não foi explorado, assim segundo Voulvoulis (2018), uma transição para uma economia circular poderia criar sinergias significativas para a ampla adoção da reutilização de água como um suprimento alternativo deste bem.

No atual panorama do desenvolvimento sustentável, o assunto principal entre as discussões é sobre o comprometimento de várias nações em garantir os 17 (dezessete) Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS, apresentados no anexo E), lançado pela Organização das Nações Unidas e acordado por diversos países membros (ONU, 2016), sendo a construção civil um dos setores alvos dessa agenda global de sustentabilidade (AJAYI et al., 2017, p. 39). Nesta agenda global, também chamada de Agenda 2030, há 3 (três) alertas importantes apresentados a seguir (ONU, 2018):

1. Desligar: Acabar com a negação sobre a crise global de água, desligando a “torneira” com o desperdício; acabar com a poluição e com a destruição das bacias hidrográficas; combater as bactérias que adoecem as crianças; e Acabar com a necessidade de buscar água e transformá-la em um caminho para a educação.
2. Ligar: Criar soluções, idéias e inovações; realizar investimentos em infraestrutura, saneamento, na gestão e resiliência dos ecossistemas; incentivar a tomada de decisões políticas difíceis sobre como se entende, valoriza e administra a água
3. Intensificar: Elevar a urgência e o volume do debate público sobre a água; aumentar a cobrança para que as ODS sejam cumpridas, promovendo os desafios àqueles que utilizam a água de maneira inadequada; majorar o financiamento para fornecer o acesso universal à água.

Isaia (2011) afirma que em suas pesquisas não é usual considerar-se a água como material de construção, apesar de seu consumo ser significativo. Não obstante, Passarello em 2008 apresentou em seus estudos que o consumo de água em edificações está entre 0,4 a 0,7 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, a depender do porte da obra. Para Silva (2008), em seus estudos afirma que o concreto é o segundo material mais consumido pela humanidade, superado apenas pela água.

Estima-se, que para cada m<sup>3</sup> de concreto, o consumo de água adicionada varia entre 160 e 200 litros, e por cada m<sup>3</sup> de aterro compactado até 300 litros de água.

Estudo realizado por Hannad et. al (2013) mostra que para cada litro de água utilizado para produção de concreto e materiais similares, como argamassas e pastas, é

necessário 2,5 vezes mais litros para realizar as atividades periféricas. Meyer (2004) afirma ainda que a indústria do concreto é responsável pelo consumo de aproximadamente 3,79 trilhões de litros de água por ano, sem incluir a quantidade necessária para atividades secundárias, como lavagem de agregados e equipamentos. Com base no método de dosagem de concreto da *American Concrete Institute* (ACI), amplamente utilizado no Brasil através da Associação Brasileira de Cimento Portland, tem-se a tabela 1.1, apresentando os valores de consumo de água em litros por metro cúbico de concreto, onde o consumo de água é definido em função da dimensão máxima característica do agregado graúdo a ser utilizado e da consistência desejada para o concreto (*Slump Test*).

Segundo Neville (2000), a água é utilizada em quatro etapas na produção do concreto, sendo elas a de lavagem dos agregados, amassamento do concreto, limpeza dos equipamentos utilizados e a cura, possuindo requisitos de utilização similares, porém não idênticos. Ainda segundo o mesmo autor, a cura é o nome dado ao procedimento que visa manter o concreto saturado, para que a hidratação do cimento ocorra adequadamente. Segundo Battagin et al. (2002), o tempo mínimo de cura de acordo com o tipo de cimento e relação água e cimento (a/c) utilizada no concreto está apresentada na tabela 1.2.

Tabela 1.1 – Requisitos aproximados de consumo de água para diferentes dimensões de agregado graúdo.

<i>Slump Test</i> (mm)*	Dimensão Máxima Característica do agregado graúdo (mm)				
	9.5	19	25	50	75
25 a 50	207	190	179	154	130
75 a 100	228	205	193	169	145
150 a 175	243	216	202	178	160

\*NBR NM67/98: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone

Fonte: Adaptado pelo autor da tabela A1.533 da ACI 211.1-91

Tabela 1.2 – Tempo mínimo\* de cura recomendada pelo IBRACON

Tipo de Cimento	Relação água/cimento			
	0,35	0,55	0,65	0,7
CP I e II-32	2	3	7	10
CP IV-32	2	3	7	10
CP III-32	2	5	7	10
CP I e II-40	2	3	5	5
CP V-ARI	2	3	5	5

\*Em dias

Fonte: Adaptado pelo autor de BATTAGIN *et al.*, 2002.

Uma pesquisa divulgada pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) em 2013 mostrou que as concreteiras produziram cerca de 51 milhões de metros cúbicos de concreto no ano de 2012 no Brasil, com uma projeção estimada de 72,3 milhões de metros cúbicos para 2017. De acordo com Casado (2010) a indústria da construção civil brasileira

consome cerca de 21% de água, e segundo Paula e Fernandes (2015) a confecção de concreto está entre as atividades que mais consomem este recurso.

Esta alta produção aliada ao contexto de escassez de água, onde o reuso se torna importante para a segurança hídrica, torna o ambiente favorável para investigar a viabilidade do uso de tipos alternativos de água para produção de concreto, em especial as oriundas da indústria do saneamento, realizando um estudo a partir de uma perspectiva técnica, à luz da norma NBR 15.900 e avaliando a influência do tipo de água sobre as propriedades do material.

Segundo Hespanhol et al. (2002), a construção civil consta como uma das indústrias onde o reuso da água pode ser viabilizado, até mesmo para as atividades de produção e cura do concreto. De acordo com Filho (2014), a construção civil vem aumentando as medidas que minimizem os impactos de sua ação no meio ambiente, praticando a “construção sustentável” e maximizando o uso de materiais recicláveis ou reciclados.

Nesse viés, este trabalho tem como objetivo principal avaliar a viabilidade técnica da utilização de águas residuárias para produção de concreto, avaliando os efeitos dessa substituição nas principais propriedades do material e sua microestrutura, bem como contribuir para futuras atualizações da norma brasileira vigente, que trata os requisitos para água de amassamento, NBR 15.900.

## **1.2. Justificativa**

As prestadoras de serviços de tratamento de esgotos têm elevados custos para dar destino final aos efluentes das ETEs, uma vez que, em épocas de seca, os corpos hídricos (chamados de corpos receptores) em que esses efluentes são lançados podem estar com baixa vazão ou mesmo nula, ampliando de forma grave a possibilidade de poluição desses corpos d'água devido à alta concentração de matéria orgânica em forma de nutrientes, podendo eutrofizá-los. Nestes efluentes, também contém vírus e bactérias, sendo nem sempre nociva a microestrutura do concreto, exemplo do concreto autorecuperado, onde cientistas começaram a investigar as formas de vida que sobrevivem a condições extremas no concreto fresco e endurecido. Cientistas encontraram tipos de bactérias, extremamente duras capazes de sobreviver encapsuladas por décadas no fundo de lagos altamente alcalinos (sulfúricos) formados por atividade vulcânica, com pH entre 9 e 11. A bactéria chamada *B. pasteurii* excreta a calcita mineral, material constituinte da microestrutura do concreto. O concreto auto recuperável tem essas bactérias embutidas com uma forma de amido, que atua como alimento para elas. Havendo uma fissura, estas bactérias são liberadas de seus vínculos hidratando-se e

encontrando o amido, assim excretam a calcita que preenche a fissura, impedindo seu crescimento e vedando-a, conforme estudo precursor de Miodownik em 2014.

Para Silva e Naik (2010) mais pesquisas são necessárias sobre o tema, frente a escassez hídrica e ao alto consumo de água pela indústria do concreto, sendo este ambiente favorável para aplicar o reuso de água na construção civil.

Isaias (2011) afirma, sob o ponto de vista técnico-científico, os efeitos físico-químicos das transformações que a água opera na microestrutura das pastas cimentícias são importantes como a hidratação do cimento, suas propriedades reológicas enquanto fresco e endurecido, a retração e fluência, dentre outros fenômenos. Dito isto, a água é um dos principais materiais constituintes do concreto que lhe confere as propriedades requeridas para cumprir a sua função de resistência e durabilidade, podendo também atuar como agente de degradação física, química ou biológica.

Em janeiro de 2020, no estado do Ceará, houve o tratamento de aproximadamente 8,5 milhões de m<sup>3</sup> de esgoto mensal, sendo este volume a possível oferta para água de reuso em todo o estado. As tecnologias de tratamento variam, mas todas instaladas em operação visam atender a resolução 397/2008 do Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA, onde estabelece parâmetros de qualidade dos efluentes a serem dispostos nos corpos receptores (rios e mares). Cerca de 70% deste volume total, encontra-se na capital cearense, Fortaleza, a qual possui índice de cobertura de esgoto de 62,39%, segundo relatório da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (2020), com potencial para incrementar este volume a medida que a cobertura pelo serviço de coleta de esgoto aumenta, sendo este esgoto predominantemente doméstico, uma vez que as indústrias tem suas próprias estações de tratamento de efluentes, podendo ou não dispor em rede coletora operada pela companhia.

De acordo a ABCP (2016) o consumo aparente de cimento em 2014 no nordeste brasileiro foi de 16.545 milhões de toneladas, destacando-se em primeiro lugar no Brasil. Logo, estima-se que foram consumidos 62,53 milhões de metros cúbicos de água anual, para uma região situada no semi-árido, com menor disponibilidade hídrica do país, com taxa entre demanda e disponibilidade superior 0,401 (ANA, 2013; BRANDÃO, 2018; BRANDÃO, 2019), podendo abastecer 1,16 milhões de habitantes em um ano, considerando a percapita 150 litros por habitante dia.

Assim, o volume de água necessária para suprir a necessidade mensal de produção de concreto, segundo consumo aparente mensal de cimento, é inferior ao volume ofertado de esgoto tratado mensal, onde há oferta de 8,5 milhões de metros cúbicos de água para uma demanda de 5,21 milhões de metros cúbicos, isto para toda região do Nordeste.

A proposta de avaliação da utilização dos efluentes oriundos de estações de tratamento de esgoto, predominantemente domésticos, é uma alternativa factível e sustentável do ponto de vista sócio-econômico-ambiental, mitigando a poluição dos recursos hídricos disponíveis através do lançamento dos efluentes e ofertando a água disponível no meio ambiente, tão escassa, para o abastecimento de humano.

### **1.3. Objetivos**

#### ***1.3.1 Objetivo Geral***

Avaliar os impactos da utilização dos efluentes, oriundos de estações de tratamento de esgoto (ETE) predominantemente domésticos, como água de amassamento na construção civil, avaliando as fases de transformação das reações e produção de compostos orgânicos e inorgânicos com adição do cimento.

#### ***1.3.2 Objetivo Tecnológico***

- Diversificar a matriz hídrica utilizada na construção civil.
- Verificar a adequabilidade das águas utilizadas na pesquisa em conformidade com as normas vigentes nacionais e internacionais.
- Fazer análise comparativa das propriedades da pasta, argamassa padrão e concreto nos estados fresco e endurecido oriundos da utilização das águas da pesquisa.
- Verificar a presença de microorganismos nos efluentes com adição dos cimentos utilizados no estudo.
- Fazer análise comparativa da microestrutura das pastas durante a hidratação dos cimentos.
- Fazer análise comparativa das reações exotérmica durante a hidratação dos cimentos amassados com as águas da pesquisa.
- Sugerir novos ensaios para controle tecnológico das águas utilizadas na construção civil.
- Sugerir a atualização da norma NBR 15.900 (Águas de amassamento).
- Contribuir para aplicação de novas técnicas de avaliação da durabilidade das infraestruturas e supra estruturas de concreto armado.
- Buscar contribuir para o desenvolvimento de técnicas de análise microestrutural de patologias no concreto armado e argamassas.

### ***1.3.3 Objetivo Econômico-Financeiro-Ambiental***

- Contribuir para atualização da norma NBR 15.900 (Águas de amassamento).
- Prover destino sustentável dos efluentes oriundos de ETEs predominantemente domésticos.

## **1.4. Estrutura do trabalho**

Este trabalho foi estruturado com um total de sete capítulos, como segue:

- Capítulo 2, hidratação do cimento: silicatos cerâmicos e cimento Portland;
- Capítulo 3, Água: propriedades, água de amassamento e água nos processos de hidratação do cimento Portland, água recuperada;
- Capítulo 4, hidratação do cimento Portland: revisão literária, impacto das impurezas (pasta, concreto e argamassa) e interação de constituintes da hidratação do cimento com microorganismos;
- Capítulo 5, técnicas de análises micro estrutural e biológico adotados: calor de hidratação, termogravimetria, análise térmica diferencial e calorimetria exploratória diferencial, bem como técnica de análise microbiológica.
- Capítulo 5, materiais e métodos utilizados;
- Capítulo 6, resultados e discussões;
- Capítulo 7, considerações finais: conclusão e trabalhos futuros.

## 2. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

### 2.1 Silicatos Cerâmicos

Os materiais cerâmicos podem ser definidos como materiais compostos por elementos metálicos (Al, Na, K, Mg, Ca Si, entre outros), ligados a elementos não metálico: O, S, N, C e P, através de ligações iônicas e/ou covalente fortes, conforme mostrado na tabela 2.1. Existem várias combinações possíveis entre os átomos metálicos e não metálicos, assim os materiais cerâmicos possuem muitas fases, bem como vários arranjos estruturais.

Tabela 2.1 - Tipos de ligações nos materiais cerâmicos

Tipos de ligação	Material
Covalente	Si
	SiC
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
Iônica	NaCl
	MgO
	Mica - (K <sub>1</sub> ,H <sub>3</sub> O)Al <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
Covalente-Iônica	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Quartzo - SiO <sub>2</sub>
	Vidro soda-cal - Na <sub>2</sub> O.CaO. <sub>6</sub> SiO <sub>2</sub>

Considerado ligação predominante, com 70%.

Fonte: Adaptado pelo autor de Anderson et al. (1997)

Os materiais cerâmicos mais comuns encontrados são constituídos de óxidos, nitretos e carbetos, sendo cristalina a maior parte das fases. No entanto existem materiais cerâmicos com estrutura amorfa, a exemplo do vidro.

Na construção civil, os materiais cerâmicos compreendem uma grande variedade de substâncias naturais, materiais e produtos industrializados. Entre os materiais naturais que podem ser citados, principalmente, são argilas e as rochas, que possuem as suas respectivas aplicações práticas dentro dessa indústria. Como materiais industriais podem ser citados os tijolos, os blocos e as telhas cerâmicas; as peças cerâmicas de revestimento (azulejo, porcelanato, pastilhas e placas cerâmicas em geral para revestimento de parede e piso), as louças sanitárias, os vidros e os materiais refratários; os aglomerantes minerais (cimentos Portland, cal e gesso), bem como os elementos secundários a esses (argamassas e concretos).

A formulação química básica do silicato é o SiO<sub>4</sub>, onde sua designação genérica é dada a vários minerais, caracterizados por sua constituição cristalina em forma de um tetraedro estável, onde um átomo de silício se liga fortemente a quatro átomos de oxigênio, podendo conter um ou mais metais, e possivelmente o hidrogênio. Os minerais compostos de silicato representam cerca de 95% do volume da crosta terrestre e incluem todas as formas da sílica (inclusive o quartzo), feldspatos, os feldspatóides, as micas, os anfibólios e os piroxênios. Além



desses incluem-se ainda os silicatos de alteração, entre os quais a serpentina. Na tabela 2.2 está apresentado a composição química geral de alguns silicatos cerâmicos.

Tabela 2.2 - Composição química aproximada dos principais componentes presentes em alguns silicatos cerâmicos

Cerâmica	% Elementos químicos presentes					
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Outros
Cimento Portland	25	9	-	-	-	2
Sílica refratária	96	-	-	-	-	4
Argila calcinada refratária	50-70	45-25	-	-	-	5
Mulita refratária	28	72	-	-	-	-
Porcelana elétrica	61	32	6	-	-	1
Porcelana de esteatita	64	5	-	30	-	1

Fonte: Adaptado pelo autor de Shackelford (2000)

Para diversos minerais a base de sílica, um a três átomos de oxigênio nos vértices do tetraedro são compartilhados por outros tetraedros para formar algumas estruturas razoavelmente complexas. Algumas dessas estruturas têm fórmulas SiO<sub>4</sub><sup>-4</sup>, Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>-6</sup>, Si<sub>3</sub>O<sub>7</sub><sup>-6</sup>, e assim por diante, bem como são possíveis estruturas com uma única cadeia, como o (SiO<sub>3</sub>)<sub>n</sub><sup>-2n</sup>. Onde os cátions carregados positivamente, tais como Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>, responsáveis em compensar a carga negativa das unidades de SiO<sub>4</sub><sup>-4</sup>, e formar ligações iônicas entre si e os tetraedros de SiO<sub>4</sub><sup>-4</sup>.

Em meio as estruturas possíveis, aqueles estruturalmente mais simples envolvem tetraedros isolados, como por exemplo a forsterita (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) associa a cada tetraedro o equivalente a dois íons Mg<sup>2+</sup>, de modo que cada íon Mg<sup>2+</sup> tem seis oxigênios como átomos vizinhos mais próximos.

Existe ainda a possibilidade da produção, pelo compartilhamento de três íons oxigênio em cada um dos tetraedros, uma estrutura bidimensional em lâminas ou em camadas. Para essa estrutura a unidade que se repete pode ser representada por (Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)<sup>-2</sup>, sendo essa carga negativa a representação aos átomos de oxigênio. A neutralidade elétrica é constituída normalmente por uma segunda estrutura laminar plana com um excesso de cátions, que se ligam a esses átomos de oxigênio não ligados na lâmina de Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Esses minerais são conhecidos como de silicatos em lâminas ou em camadas, e sua estrutura base é característica das argilas e outros minerais. São os silicatos que são, predominantemente, os responsáveis fornecer ao cimento Portland a elevada resistência mecânica quando aplicados na produção de materiais cimentícios. A estrutura cristalina que mais os caracteriza são os arranjos de uma unidade fundamental, o tetraedro SiO<sub>4</sub><sup>-4</sup>.

## 2.2 Cimento Portland

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico, produzido pela moagem do *clínquer*. A matéria-prima para a sua produção é composta principalmente de óxido de cálcio e sílica em proporções adequadas.

As fontes mais comuns de óxido de cálcio são pedra calcária, giz e mármore. Já a sílica é originária preferencialmente das fontes de argilas e xistos argiloso. As argilas também possuem alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), e frequentemente óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e álcalis.

O cimento Portland, produzido pela moagem do *clínquer* e da adição de sulfatos de cálcio, se trata de um material cujas principais fases constituintes são do tipo silicato. A obtenção do *clínquer* se origina na mistura e moagem do calcário e da argila, sendo esta última responsável pelas fases de silicato. Sua composição comum em termos de óxidos é de 67% de CaO, 22% de  $\text{SiO}_2$ , 5% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 3% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e 3% de outros componentes, segundo Taylor (1997). De acordo com Illston e Domone (2010), convencionaram abreviaturas dos principais óxidos, apresentado na tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Simbologia dos óxidos e constituintes do cimento

Óxidos	Abreviação	Compostos	Abreviação
CaO	C	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
$\text{SiO}_2$	S	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\beta\text{C}_2\text{S}$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	A	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	F	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$
MgO	M	$4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_3$	$\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$
$\text{SO}_4$	$\bar{\text{S}}$	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
$\text{H}_2\text{O}$	H	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\bar{\text{C}}\text{S H}_2$

Fonte: Adaptado pelo autor de Carvalho (2002).

### 2.2.1 Tipos de Cimento Portland

Devido ao seu crescimento ser baseado na tradição europeia de fabricação, que, atualmente, conta com trinta e cinco tipos de cimento normalizados pelo CEN (EM 197-1:2014), o mercado brasileiro possui atualmente oito opções, atendendo com igual desempenho as diversas obras. O cimento Portland comum (CP I) é referência, por suas características e propriedades, a todos os tipos básicos de cimento Portland disponíveis no mercado brasileiro, embora praticamente não mais fabricado. São eles:

1. Cimento Portland Comum (CP I)
  - a. CP I – Cimento Portland Comum
  - b. CP I - s – Cimento Portland Comum com Adição

2. Cimento Portland Composto (CP II)
  - a. CP II – E – Cimento Portland Composto com Escória
  - b. CP II – Z – Cimento Portland Composto com Pozolana
  - c. CP II – F - Cimento Portland Composto com *Filer*
3. Cimento Portland de Alto-Forno (CP III)
4. Cimento Portland Pozolânico (CP IV)
5. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI)
6. Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS)
7. Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC)
8. Cimento Portland Branco (CPB)

Usualmente o teor dos compostos do cimento é dado a partir da análise dos óxidos, utilizando-se uma série de equações que foram desenvolvidas por BOGUE (HEWLETT, 1998), estimando assim a composição potencial do cimento, desde que atenda o requisito da relação de óxido de alumínio com óxido de ferro maior que 0.64; caso esta relação não seja atendida uma outra série de equações deve ser utilizada (HEWLETT, 1998). As equações de BOGUE admitem que todas as reações químicas ocorridas na formação do *clínquer* estejam completas, e que se pode ignorar a presença de impurezas tais como MgO e álcalis (CARVALHO, 2002).

#### - Normativa e Cenário de Consumo Brasileiro

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland, o cimento na construção civil ressalta-se como o material de mais extenso uso global, um pó fino, com propriedades aglomerantes e ligantes que endurece sob condições de hidratação.

O Cimento Portland (CP) é um ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais nos teores estabelecidos por norma, segundo a NBR 16.697 (2018). Esta norma trata os requisitos gerais e específicos dos Cimentos Portland (CSP). São designados por seu tipo, que corresponde à adição, e propriedades especiais, sendo identificados por siglas, seguidas de sua classe de resistência, acrescidas de sufixo RS (para resistente a sulfato) e BC (para baixo calor de hidratação), quando aplicáveis. Os quadros 2.1 e 2.2 apresentam os limites de composição em porcentagens de massa.

Para os específicos, trata-se de requisitos: químico, físicos e mecânicos, resistência a sulfatos e baixo calor de hidratação, além de determinações facultativas. Nos quadros 2.3 a 2.5 apresentam-se alguns destes requisitos específicos e determinações facultativas.

Para o requisito de resistência a sulfatos, além de atender aos requisitos apresentados nas tabelas acima, a expansão, ensaiada pela NBR 13.583, deve ser menor ou igual a 0,03%.

Quadro 2.1 – Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 <sup>c</sup>	RS <sup>a</sup> ou BC <sup>b</sup>
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E	25, 32 ou 40 <sup>c</sup>	RS <sup>a</sup> ou BC <sup>b</sup>
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI <sup>d</sup>	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 <sup>c</sup>	
	Não estrutural	CPB	-	-
<p><sup>a</sup> O sufixo RS significa resistente a sulfato e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.</p> <p><sup>b</sup> O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.</p> <p><sup>c</sup> As classes 25, 32 e 40 apresentam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (Mpa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.</p> <p><sup>d</sup> 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.</p>				

Fonte: Transcrito pelo autor de NBR 16.697 (2018).

Quadro 2.2 – Limites de composição do cimento Portland (Continua)

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer+ sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 - 100	0 - 5		
	CP I-S			90 - 94	0	0	6 - 10

Fonte: Transcrito pelo autor de NBR 16.697 (2018).

Quadro 2.2 – Limites de composição do cimento Portland (conclusão)

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer+ sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E			51 - 94	6 - 94	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>a</sup>	ARI		90 - 100	0	0	0 - 10
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40	75 - 100	-	-	0 - 25
	Não estrutural		-	-	50 - 74	-	-

<sup>a</sup> No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V - ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

Fonte: Transcrito pelo autor de NBR 16.697 (2018).

Quadro 2.3 – Requisitos químicos do CsP, em percentagem de massa

Sigla <sup>a</sup>	Resíduo insolúvel (RI)	Perda ao fogo (PF)	Óxido de magnésio (MgO)	Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )
CP I	≤ 5,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CO I-S	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP II-E	≤ 5,0	≤ 8,5	-	≤ 4,5
CP II-F	≤ 7,5	≤ 12,5	-	≤ 4,5
CP II-Z	≤ 18,5	≤ 8,5	-	≤ 4,5
CP III	≤ 5,0	≤ 6,5	-	≤ 4,5
CP IV	-	≤ 6,5	-	≤ 4,5
CP V <sup>b</sup>	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Estrutural	≤ 3,5	≤ 12,0	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Não estrutural	≤ 7,0	≤ 27,0	≤ 10,0	≤ 4,5

<sup>a</sup> Requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes a sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.

<sup>b</sup> No caso de cimentos resistentes a sulfatos derivados do cimento tipo CPV, não há limitação para RI e MgO.

Fonte: Transcrito pelo autor de NBR 16.697 (2018).

Quadro 2.4 – Requisitos físicos e mecânicos do CsP, em percentagem de massa

Sigla <sup>a</sup>	Classe	Finura # 75 µm (%)	Tempo de início de pega (min)	Expansibilidade a quente (mm)	Resistência à compressão (MPa)				Índice de brancura
					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
CP I CP I-S	25	≤ 12	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
CP II-E CP II-F	32	≤ 12	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-
CP II-Z	40	≤ 10	≥ 60	≤ 5	-	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	-
CP III	25	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
CP IV	32	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-
	40	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0	-
CP V	ARI	≤ 6,0	≥ 60	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-	
CPB Estrutural	25	≤ 12 <sup>b</sup>	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 78
	32	≤ 12 <sup>b</sup>	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
	40	≤ 12 <sup>b</sup>	≥ 60	≤ 5	-	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CPB Não Estrutural	-	≤ 12 <sup>b</sup>	≥ 60	≤ 5	-	≥ 5,0	≥ 7,0	≥ 10,0	≥ 82

<sup>a</sup> Requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes a sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguintes do sufixo RS ou BC, respectivamente.

<sup>b</sup> Resíduo na peneira 45 µm.

Fonte: Transcrito pelo autor de NBR 16.697 (2018).

Quadro 2.5 – Requisito do valor máximo do calor de hidratação para enquadrar-se como BC

Propriedade	Unidade	Valores máximos
		41 h
Calor de hidratação <sup>a</sup>	Joules por grama (J.g <sup>-1</sup> )	≤ 270

<sup>a</sup> Ver Anexo A.

Fonte: Transcrito pelo autor de NBR 16.697 (2018), valor determinado pela NBR 12.006.

Quadros 2.6 – Determinações facultativas (Continua)

Sigla <sup>a</sup>	Classe	Enxofre na forma de sulfeto (%)	Tempo de fim de pega (min)	Expansibilidade a frio (mm)	Resistência à compressão aos 91 dias (MPa)	Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> ) (%)
CP I CP I-S	25, 32 ou 40	-	≤ 600	≤ 5	-	≤ 3,0
CP II-E	23, 32 ou 40	≤ 0,5				≤ 5,5
CP II-F	25, 32 ou 40	-				≤ 7,5
CP II-Z	25, 32 ou 40	-				≤ 11,5
						≤ 7,5

Fonte: Copiado pelo autor de NBR 16.697 (2018), com determinação do teor do material pozolânico conforme NBR NM 22, considerando-se a insolubilidade parcial do clínquer e do material carbonático, bem como a solubilidade parcial do material pozolânico.

Quadros 2.6 – Determinações facultativas (Conclusão)

Sigla <sup>a</sup>	Classe	Enxofre na forma de sulfeto (%)	Tempo de fim de pega (min)	Expansibilidade a frio (mm)	Resistência à compressão aos 91 dias (MPa)	Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> ) (%)
CP III	25	≤ 1,0	≤ 720		≥ 32,0	≤ 5,5
	32				≥ 40,0	
	40				≥ 48,0	
CP IV	25	-			≥ 32,0	≤ 5,5
	32				≥ 40,0	
	40				≥ 48,0	
CP V	ARI	-	≤ 600		-	≤ 5,5
CPB Estrutural	25, 32 ou 40	-	≤ 600	≤ 5	-	≤ 12,0
CPB Não Estrutural	-	-			-	≤ 27,0

<sup>a</sup> Estes requisitos podem ser aplicáveis também aos cimentos resistentes a sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla original seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.

Fonte: Copiado pelo autor de NBR 16.697 (2018), com determinação do teor do material pozolânico conforme NBR NM 22, considerando-se a insolubilidade parcial do clínquer e do material carbonático, bem como a solubilidade parcial do material pozolânico.

No Brasil são produzidos, principalmente, sete tipos de cimento Portland, que estão apresentados na tabela 2.4, bem como os teores de adição permitidos por norma (Mehta, 2006).

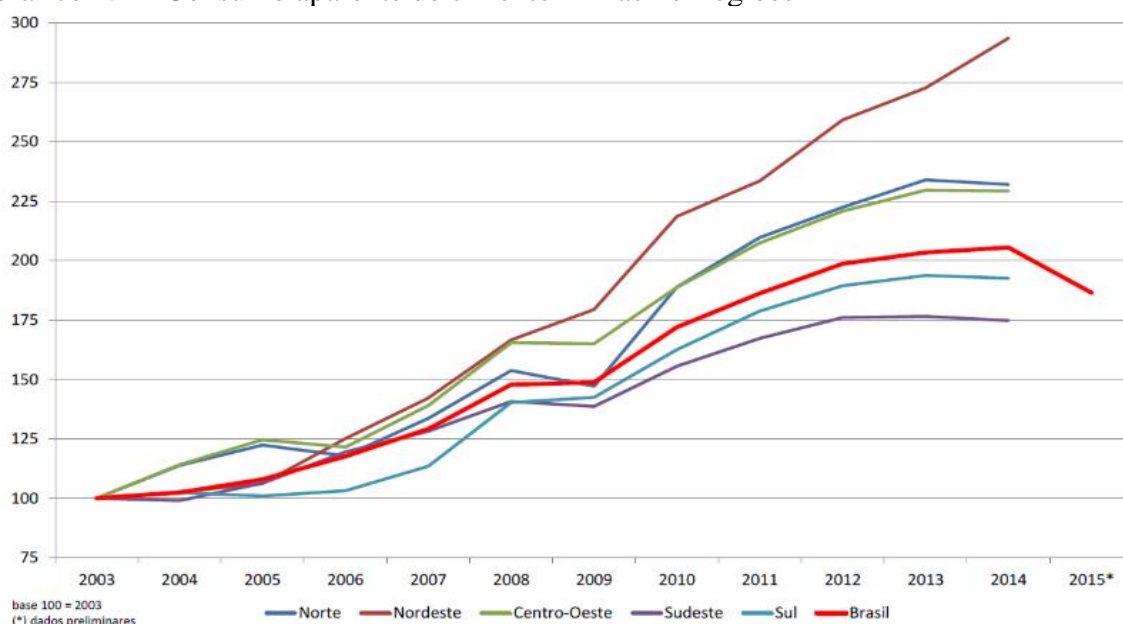
De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland o consumo aparente de cimento no ano de 2014 foi de 71,71 milhões de toneladas. O Nordeste é o segundo maior consumidor, com 23,1%, perdendo apenas para o sudeste, com 43,9% do total consumido. O Estado do Ceará é o terceiro maior consumidor, com 13,3%, atrás da Bahia e Pernambuco, ambos com 25,9%. No entanto, como apresentado no gráfico 2.1, a região nordeste vem em uma tendência crescente, bem diferente das demais regiões do Brasil.

Tabela 2.4 - Composição química aproximada dos principais componentes presentes em alguns silicatos cerâmicos

Denominação	Abreviação	Normatização	Clíquer + sulfato de cálcio	Filer	Pozolana	Escória
Portland comum	CP I - S	NBR 5.732	99-95	1-5	1-5	1-5
Portland composto com escória	CP II - E	-	94-56	0-10	-	6-34
Portland composto com filer	CP II - F	-	94-90	6-10	-	-
Portland composto com pozolana	CP II-Z	NBR 11.578	94-86	0-10	6-14	-
Portland de alto forno	CP III	NBR 5.735	65-25	0-5	-	35-70
Portland pozolânico	CP IV	NBR 5.736	85-45	0-5	15-50	-
Portland de alta resistência inicial	CP V ARI	NBR 5.733	100-95	0-5	-	-

Fonte: Adaptado pelo autor de MEHTA (2006).

Gráfico 2.1 – Consumo aparente de cimento – Brasil e Regiões



Fonte: Copiado pelo autor 2020, artigo link: <https://www.cimentoverdedobrasil.com.br/producao-e-consumo-de-cimento-no-brasil/>

Logo, o cenário é bastante desafiador para a indústria da construção civil no Nordeste, diante da disponibilidade hídrica cada vez escassa.

### 2.2.2 Reações de Hidratação

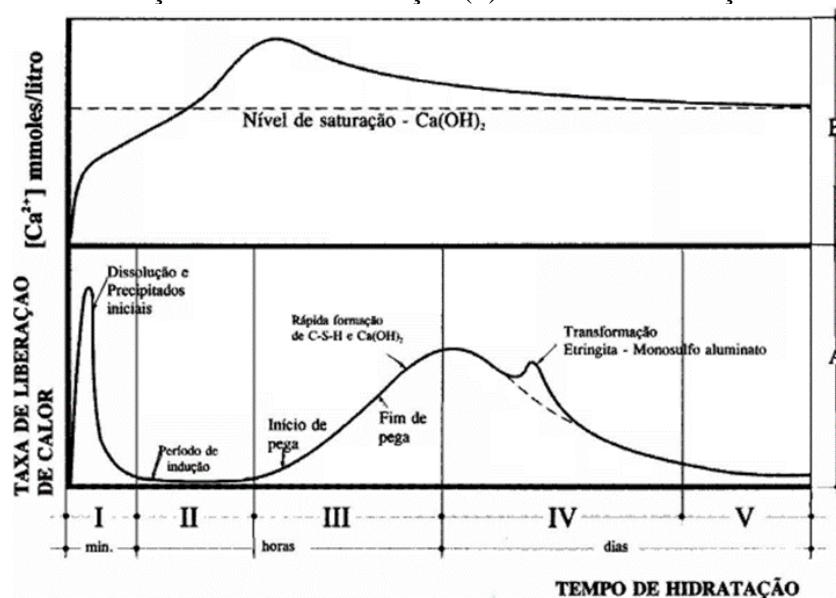
O mecanismo de hidratação do cimento pode ser dividido em cinco etapas, entre elas: estágio inicial (I), período de indução (II), período de aceleração (III), período de desaceleração (IV) e estágio final (V) (Taylor, 1990; Jawed, 1983). A figura 2.1 apresenta as etapas da hidratação associadas à variação da concentração de íons de cálcio em solução com tempo de hidratação.

Durante o estágio inicial, imediatamente após o contato do cimento com a água ocorre em primeiro lugar a dissolução dos sulfatos alcalinos, que liberam íons  $K^+$ ,  $Na^+$  e  $SO_4^{2-}$ . O sulfato de cálcio dissolve até a saturação liberando íons  $SO_4^{2-}$  e  $Ca^{2+}$ . Após a sua saturação ocorre a dissolução das fases anidras  $C_3S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$ . Estas reações, e um possível conversão do sulfato de cálcio hemihidratado em dihidratado e o efeito de molhamento das partículas são responsáveis pela formação do primeiro pico de liberação de calor. Além disso, nesse estágio há uma formação de uma camada de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) sobre as partículas de cimento, com liberação de íons  $(OH)^-$  e  $Ca^{2+}$  em solução. Em paralelo, ocorrem as reações do  $C_3A$  e  $C_4AF$  dissolvidos com os íons  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$ . Um gel amorfo, com abundância em



aluminato é formado sobre a superfície dos grãos de cimento com o aparecimento de espessas agulhas da fase etringita (AFt) sobre o gel e na solução (Taylor, 1990; Odler, 1984).

Figura 2.1 – Representação esquemática da liberação de calor (A) e a concentração de  $\text{Ca}^{+2}$  em solução (b) durante a hidratação



Legenda: (I) Estágio inicial; (II) Período de Indução; (III) Período de aceleração; (IV) Período de desaceleração; e (V) Estágio final.  
Fonte: Adaptado pelo autor de Jawer et al. (1983).

No segundo período de indução ocorre a hidratação do óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e uma reação com a alita de pequena intensidade. Este período dura por 30 minutos a 3 horas e é concluído no momento em que a camada formada sobre o grão de cimento se rompe ou quando se torna permeável, devido à transformação de fase, coincidindo com a nucleação e o crescimento de C-S-H e  $\text{Ca(OH)}_2$  (Taylor, 1990; Odler, 2006).

No período em que ocorre uma aceleração (III) a hidratação segue com uma intensa liberação de calor e rápida formação de C-S-H, além da formação de hidróxido de cálcio, com uma diminuição da concentração de íons de cálcio. Esse período é controlado pela velocidade de nucleação e crescimento do C-S-H (Taylor, 1990). É nesse período que ocorre o fenômeno da pega, quando a alita passa a se hidratar rapidamente até atingir a taxa máxima de hidratação (JAWED, 1983).

Durante o período de desaceleração a taxa de reação diminui de forma exponencial, sendo a hidratação controlada por mecanismos de difusão iônica ou por reação topoquímica. A hidratação da belita durante esse período torna-se mais importante e a formação do C-S-H e do hidróxido de cálcio ocorre de forma mais branda.

No último estágio ocorre a conversão das fases AFt em monossulfoaluminato de cálcio (AFm). A formação de placas hexagonais delgadas de AFm, por meio da reação da fase

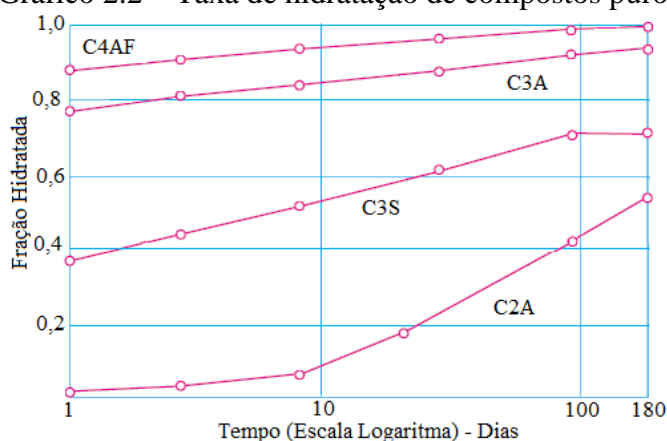
Aft com o C3A e o C4AF, é ocasionada devido a indisponibilidade de sulfato de cálcio no sistema e o prosseguimento da hidratação de C4AF, menos acelerada do que a hidratação do C3A (Taylor, 1990; Young, 1972).

O processo de hidratação se finaliza com o decorrer do tempo, contanto que haja contato com a água, e o fim do processo é finalmente atingido quando os grãos de cimento se hidratarem de forma completa ou quando não existir água para ocorrer as reações de hidratação. A cinética desse processo sofre influência direta da composição da matéria prima do cimento, o clínquer, devido as diferentes reatividades das fases e diferentes proporções. (Mehta, 2008; Taylor, 1990).

#### - Produtos da Hidratação

Como apresentado, os principais constituintes do cimento anidro são conhecidos como alita, belita, celita e ferrita, que pelas suas anotações químicas, respectivamente, C3S, C2S, C3A e C4AF (TENORIO et al., 2003). Tais constituintes hidratam-se em taxas diferente e liberam diferentes quantidades de calor. O gráfico 2.2 apresenta a taxa de hidratação dos constituintes mencionados, e o gráfico 2.3 as respectivas resistências à compressão ao longo do tempo.

Gráfico 2.2 – Taxa de hidratação de compostos puros

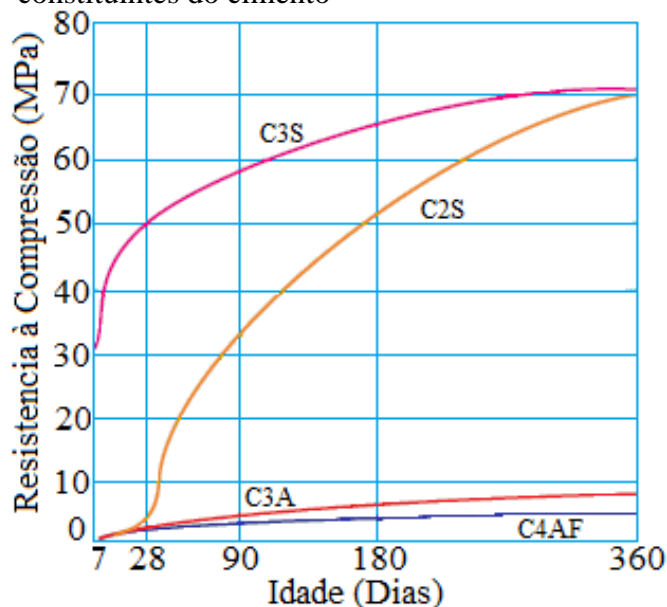


Fonte: Adaptado pelo autor de Shackelford (2000)

A alita é um silicato tricálcico,  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$  (ou  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), representando o constituinte mais importante do clínquer, com ocorrência na faixa de 50% a 70%, geralmente, sua composição representa em torno de 72% de CaO e 25% de  $\text{SiO}_2$ , podendo estar incorporados outros íons em sua estrutura. No contato com a água esse composto hidrata reagindo de forma rápida e originando silicatos de cálcio hidratados de composição variável

(C-S-H), pobremente cristalino, que constitui o principal responsável pela resistência da pasta de cimento nas primeiras idades.

Gráfico 2.3 – Desempenho da resistência dos constituintes do cimento



Fonte: Adaptado pelo autor de Shetty (2000)

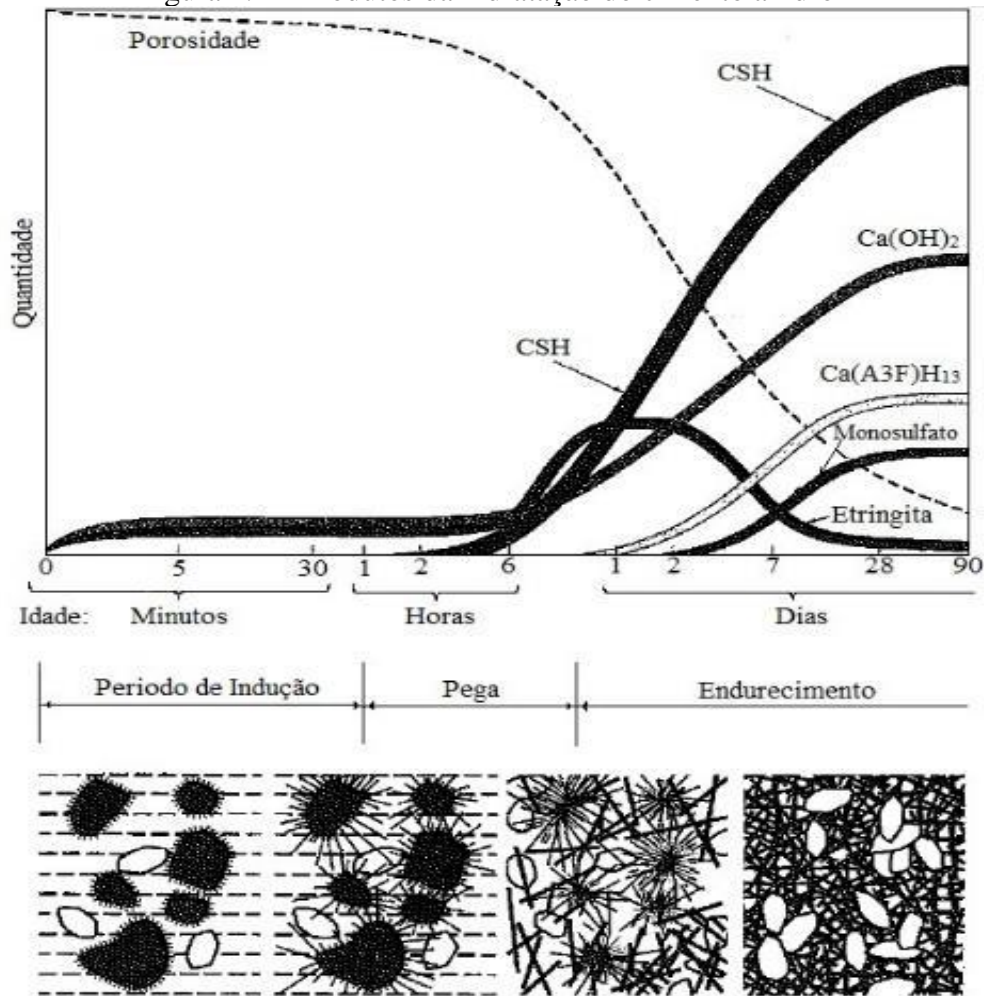
A belita é um silicato dicálcico,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  (ou  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), constituindo 15% a 30% do clínquer. Apresenta sem sua composição cerca de 63% de CaO e 31% de  $\text{SiO}_2$ , podendo estar incorporado com outros íons da mesma forma que a alita. De forma semelhante a alita, essa fase também gera C-S-H e  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , porém devido a sua reação mais lenta com a água pouco contribui com as resistências iniciais do cimento, mostrando-se mais importante nas idades mais avançadas.

A celita consiste na fase aluminato tricalcico,  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$  e  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , também chamada de fase intersticial. Representa cerca de 5% a 10% do clínquer, reagindo rapidamente com a água originando os aluminatos de cálcio hidratados, ou produzindo o trissulfoaluminato de cálcio hidratado – etringita ( $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ).

A ferrita é o ferroaluminato tetracálcico ( $\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$  ou  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), assim como a celita, é também considerado uma fase intersticial. Essa fase incorpora outros íons e representa cerca de 5 a 15% do clínquer, não possuindo uma uniformidade na velocidade de reação na hidratação. Tanto a ferrita como a celita, devido a incorporação com outros íons, possuem uma complexa estrutura ortorrômbica e de alta reatividade.

Na figura 2.2 está apresentado os produtos da hidratação do cimento anidro, com suas respectivas quantidades, ao longo do tempo, representado nos estágios de indução química, pega e endurecimento.

Figura 2.2 – Produtos da hidratação do cimento anidro



Fonte: Adaptado pelo autor de Shackelford (2000)

### 2.3 Técnicas de Paralisação da Hidratação de Cimento Portland

Durante o processo de hidratação do cimento, a água pode estar presente na suspensão de forma combinada, incorporada aos poros gel ou sob forma de água capilar (SCRIVENER; JUILLAND; MONTEIRO, 2015), sujeita da interação para a formação dos produtos da reação. A água combinada está intimamente ligada aos produtos formado as da hidratação, como os cristalinos (portlandita e etringita) e amorfos como entre as camadas de silicato de cálcio hidratado, e somente pode ser eliminada por meio da decomposição térmica. Em relação a água gel, essa está incorporada ao C-S-H gel, que é o principal hidrato do cimento nas primeiras horas após a hidratação.

No que diz respeito as águas capilares, estas não estão vinculadas a nenhum composto, permanecendo disponível para a hidratação durante o processo das partículas anidras (MULLER, et al., 2013; RIDI et al., 2009).

Para a realização da avaliação qualitativa e quantitativa, dos produtos produzidos pela reação do cimento, exige-se a paralisação da hidratação nos respectivos períodos de interesse, impedindo a disponibilidade de água para a continuação da reação. Porém essa técnica não pode ser agressiva a ponto de decompor os compostos químicos formados, muito menos afetar a microestrutura em processo de formação. Logo, o método escolhido deve eliminar a água capilar, com a menor alteração da quantidade de água combinada e incorporada aos poros gel (ZHANG; SCHERER, 2011).

Existem duas bases metodológicas para a paralisação da hidratação do cimento: os métodos de secagem direta, que provocam a eliminação da água por evaporação ou sublimação; e por meio de metodologias que utilizam solventes, geralmente em soluções orgânicas utilizadas para substituir a água presente na pasta, paralisando o processo de hidratação.

Em relação a classe de técnicas que utilizam a metodologias que usufruem de solventes, embora sejam aqueles que menos afetam a microestrutura do material, trabalhos apontam que há reação entre determinados solventes com a pasta. Por exemplo, existe interação do metanol com a portlandita, produzindo compostos que impedem uma medida mais precisa na faixa de temperatura e decomposição dos carbonatos pela termogravimétrica (DAY, 1981; TAYLOR; TURNER, 1987).

A metodologia que menos causa impactos as amostras por meio da secagem direta é o *Freeze drying* (DAY; MARSH, 1988), em que as amostras são submetidas ao congelamento em nitrogênio líquido a uma temperatura de  $-196^{\circ}\text{C}$ . Esse congelamento rápido previne o crescimento de cristais grandes de gelo, que danificariam a microestrutura do material (GALLÉ, 2001; ZHANG; SCHERER, 2011).

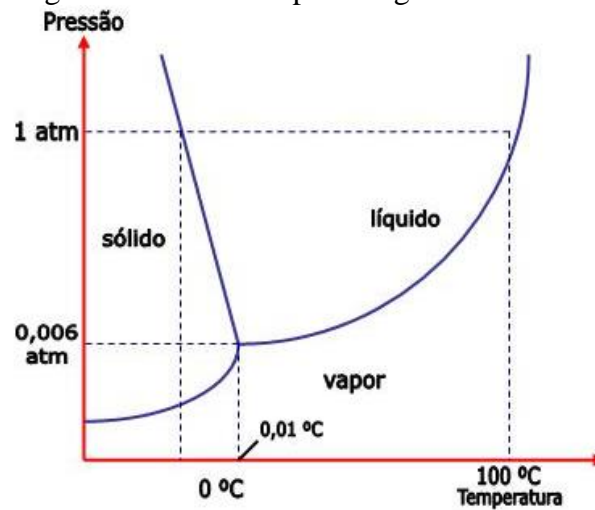
A técnica utilizada no presente trabalho, a liofilização, se baseia em um processo industrial de secagem por congelamento e sublimação do gelo sob vácuo, bastante utilizada para converter soluções de materiais lábeis em sólidos com grau de umidade relativamente baixa para diversas aplicações tais como distribuição e estocagem, segundo Franks (2000).

De acordo com Ayrosa (2011), produtos de materiais lábeis são compostos químicos de baixa estabilidade, principalmente em relação ao calor, sendo a liofilização vantajosa. O primeiro processo de liofilização aconteceu em 1911 com o vírus da raiva.

Em produtos alimentícios, o procedimento de liofilização foi impulsionado durante a Segunda Guerra, por meio de pesquisas do programa Apollo da NASA. Essa técnica se diferencia dos outros processos de desidratação, ocorrendo em condições especiais, em que a água previamente congelada passa diretamente ao estado gasoso, ou seja, a mudança de estado físico ocorre por sublimação (GARCIA-FUENTES, 2009).

De acordo com a figura 2.3, a uma pressão de 1 atm, a água está em seu estado líquido se a temperatura estiver entre o ponto de congelamento ( $0^{\circ}\text{C}$ ) e o ponto de ebulição ( $100^{\circ}\text{C}$ ). Porém, abaixo de  $0^{\circ}\text{C}$ , sob pressão reduzida, a água estará na forma de vapor.

Figura 2.3 – Ponto triplo da água



Fonte: Adaptado pelo autor de Shackelford (2000)

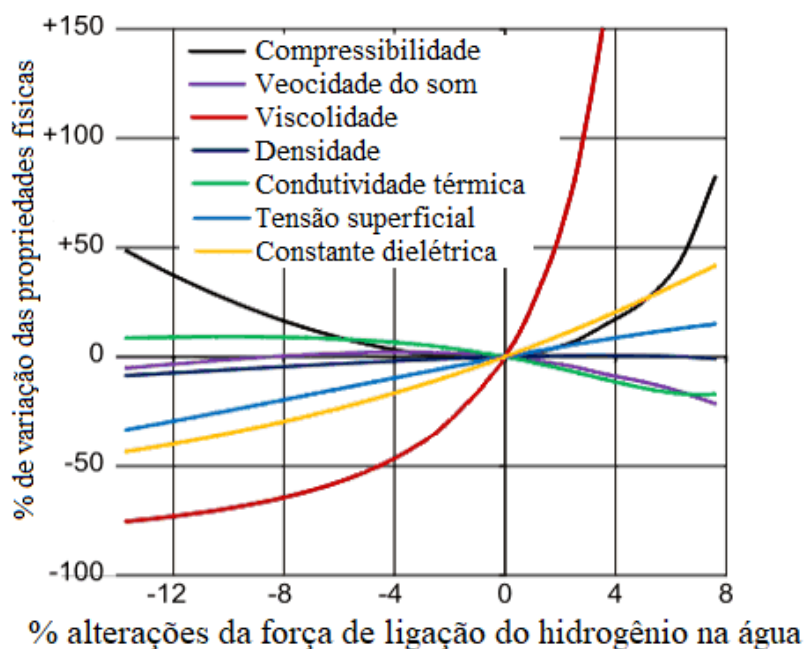
### 3. ÁGUA

#### 3.1 Água e suas Propriedades

A água, sob o ponto de vista técnico-científico nos efeitos físico-químicos das transformações na microestrutura dos silicatos cerâmicos, é imprescindível, pois regula as reações de hidratação e pozolânicas, as propriedades do concreto endurecido, fluência, mecanismos de transporte de massa, sendo um dos agentes mais importantes na degradação e processos patológicos de estruturas (ISAIA, 2011).

Quando o hidrogênio ( $H^{1+}$ ) está ligado ao oxigênio ( $O^{2-}$ ), a densidade eletrônica em torno do próton de H fica desbalanceada em relação ao de O. A distribuição de cargas elétricas na molécula de água torna-se assimétrica: os elétrons não compartilhados do oxigênio (negativos) ficam de um lado enquanto os dois núcleos de H do outro lado (positivos). Cria-se, assim, uma polaridade na molécula de  $H_2O$  que se chama dipolo, formando-se a ponte de hidrogênio que é a força que interliga as moléculas de água para satisfazer as cargas de sinais opostos – forças de van der Waals, sendo a Ponte de Hidrogênio um caso especial. Os efeitos da força de ligação do hidrogênio nas propriedades físicas da água, está apresentado no gráfico 3.1.

Gráfico 3.1 – Variação das propriedades físicas da água com relação a alterações da força de ligação do hidrogênio



Fonte: Adaptado pelo autor de Chaplin (2018)

O que faz com que a água tenha suas propriedades únicas é a quantidade de pontes de hidrogênio. Essas são de grande relevância para explicar algumas propriedades e

características de sua microestrutura, e explicar o modo de degradação do concreto sob certos agentes agressivos (ISAIA, 2011).

### 3.1.1 Propriedades da água

A água está em equilíbrio dinâmico nos três estados da matéria sob condições ambientais específicas de temperatura e pressão, sendo a única substância que apresenta tal característica. A seguir será apresentado as propriedades da água mais relevantes para explicar algumas propriedades ou características da microestrutura do concreto fresco ou endurecido, que sob determinadas circunstâncias em contato com fluidos, seja no estado líquido ou gasoso, explique o modo de degradação sob certos agentes agressivos. A tabela 3.1 apresenta algumas características da água em benefício da vida.

Tabela 3.1 – Características da água em benefício da vida

Propriedade	Comparação	Vantagens para seres vivos
Tensão superficial ( $7,2 \times 10^9 \text{ N.m}^{-1}$ ) <sup>1</sup>	A mais alta de todos os líquidos	Importante na fisiologia das células; controla certos fenômenos de superfície
Constante dielétrica (78,5 a 25°C) <sup>2</sup>	A mais alta de todos os líquidos, exceto H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> e GCN	Mantém íons separados em solução; permite a mobilidade iônica na fase aquosa
Calor de Vaporização ( $2,25 \text{ kJ.g}^{-1}$ ) <sup>1</sup>	O mais alto de todas as substâncias	Permite ser utilizada como um ótimo meio para transferência de calor.
Calor específico ( $4,18 \text{ J.g}^{-1}.\text{k}^{-1}$ ) <sup>1</sup>	Um dos mais elevados	Impede variações bruscas de temperatura ambiente; tende a manter a temperatura do organismo constante.

Fonte: Adaptado pelo autor: <sup>1</sup> A AGUA (2011) e <sup>2</sup> Borges (2019).

#### - Dissolução

A água em seu estado líquido tem a capacidade de dissolver substâncias polares ou iônicas para formar soluções aquosas, sendo considerado um solvente universal (A AGUA, 2011), aonde dificilmente encontra-se quimicamente pura, segundo Isaia (2011).

Outra peculiaridade intrínseca da água é ser anfótera, isto é, podendo agir tanto como ácido quanto como base. Em pH 7, neutro, a concentração de íons de hidroxila (OH<sup>-</sup>) é igual à dos íons H<sup>+</sup>. No entanto se esse equilíbrio for quebrado, a solução pode ser ácida, sendo maior concentração de H<sup>+</sup>, ou básica, caso a concentração de hidroxila seja maior (A AGUA, 2011).

A hidratação é um processo de dissolução de uma substância iônica, onde os cátions são atraídos pelo dipolo negativo da molécula e os ânions pelo dipolo positivo, promovendo a quebra do retículo cristalino da substância iônica, isto é, a dissolução, onde as forças existentes entre cátions e ânions nos sólidos são substituídas por forças entre a água e os íons (A AGUA, 2011).



#### - Condutividade elétrica

A água pura apresenta baixa condutividade elétrica, embora aumente significativamente com a adição de eletrólitos como ácidos ou bases ionizáveis. A propriedade elétrica advém dos íons dos sais minerais e dióxido de carbono dissolutos (A AGUA, 2011). Materiais orgânicos, como óleos, graxas, álcool, fenóis não possuem a capacidade de conduzir eletricidade. Assim quando se apresentam na forma dissolvida na água, a condutividade elétrica é severamente reduzida; e chega a zero, quando o produto está em fase livre, presença do produto em camada (AgSolve, 2013).

#### - Tensão superficial

As moléculas no interior do líquido estão ligadas por forças de coesão, isto é, atraídas igualmente em todas as direções pelas ligações de hidrogênio, apresentando uma resultante nula. Já na superfície existem ligações livres, que ocasionam o desbalanceamento das forças gerando excesso de energia associada a essa superfície. Esta energia é denominada de energia superficial ou interfacial (ISAIA, 2011). Um exemplo deste fenômeno físico-químico é a gota de água, que tenderá a tomar uma forma esférica para minimizar sua área superficial e, assim, a energia de superfície.

Segundo Aguilar (2010) a tensão superficial é a tendência natural de tornar mínima a energia de superfície pela minimização da área superficial. Já Lu e Likos (2004) definem a tensão superficial como o grau máximo de energia que um fluido é capaz de armazenar sem partir. A água possui uma tensão superficial mais intensa que a maioria dos líquidos, tais como óleos, solventes, álcool, ácidos, dentre outros. Tal característica se dá devido às ligações de hidrogênio que podem chegar até quatro pontes por molécula.

#### - Adsorção

A palavra adsorção está relacionada à interface sólido-fluido (PIGNATELLO, 2000). A adsorção é um processo no qual uma substância (gás, líquido ou sólido) fica presa à superfície sólida (SKOOG et al., 2006), ou seja, é provocada pelas interações entre o sólido e as moléculas na fase fluida, podendo ser física (fisiossorção) e/ou química (quimiossorção, a depender das forças envolvidas (ROBENS et al., 1999). Na tabela 3.2 apresenta as principais diferenças entre a adsorção física e adsorção química.

Tabela 3.2 – Principais diferenças entre adsorção física e adsorção química

Adsorção física	Adsorção química
Geralmente ocorre em multicamada e possui um grau de especificidade relativamente baixo.	Depende da reatividade do adsorvente (superfície) e adsorbato (água). Ocorre necessariamente em monocamada, visto as moléculas quimicamente adsorvidas estão ligadas a parte reativas da superfície.
Uma molécula adsorvida fisicamente mantém a sua identidade e na dessorção retorna à fase fluida em sua forma original.	Se uma molécula adsorvida quimicamente sofrer reação ou dissorção, ela perde sua identidade e não pode ser recuperada por dessorção.
É sempre exotérmica, mas a energia geralmente não é muito maior do que a energia de condensação do adsorbato. Mas é consideravelmente melhorada quando em poros estreitos.	A energia de quimiossorção é da mesma ordem de grandeza da mudança de energia em uma reação química.
Os sistemas tendem a alcanças o equilíbrio razoavelmente rápido.	Uma energia de ativação é frequentemente envolvida na quimiossorção, e em baixa temperatura o sistema pode não ter energia térmica suficiente para atingir o equilíbrio termodinâmico.

Fonte: Adaptado pelo autor de Robens et al. (1999).

### - Capilaridade

Um fenômeno físico importante gerado pela tensão superficial é a capilaridade sendo a ascensão ou depressão capilar (FOX et al. 2010). Capilaridade é o fenômeno de atração e repulsão onde se observa o contato dos líquidos com um sólido fazendo com que esse líquido suba ou desça, conforme molhe ou não a parede (PARANHOS et al., 2008).

A tendência de os líquidos subirem nos tubos capilares é chamada de capilaridade ou ação capilar, sendo isso consequência da tensão superficial (ATKINS, 2002).

A capilaridade é o resultado da coesão entre as moléculas, da adsorção e da tensão superficial, que dependem das forças intermoleculares, sejam pontes de hidrogênio, no caso da água, ou das forças de Van de Waals, no caso de sólidos (ISAIA, 2011). Este fenômeno é de grande importância para o transporte de umidade em meios porosos, por ser espontâneo. Ocorre devido a tensão superficial do líquido e o raio do menisco, sendo quanto menor o raio do menisco, maior será a tensão capilar, aonde é regida pela Lei Hagen-Poiseuille (KOLLMANN e CÔTE, 1968; PLUMB et al., 1984). A formula de Poiseuille está apresentada na equação (3.1).

$$\Delta P = \frac{128\eta L Q}{\pi d^4} \quad \text{Equação (3.1)}$$

Onde:  $\Delta P$  é a diferença de pressão entre os extremos do tubo,  $\eta$  é a viscosidade dinâmica do fluido;  $L$  é o comprimento do tubo;  $Q$  é a taxa volumétrica do fluxo;  $d$  é o diâmetro do tubo.

#### - Calor específico

A capacidade térmica é uma propriedade dos corpos, já o calor específico é uma propriedade das substâncias (MICHELENA, 2008). Assim, considerando tal definição, para a água devemos abordar seu calor específico, que é a razão entre a unidade de medida da energia e o produto das unidades de medida da massa e da temperatura. Pelo Sistema Internacional de medida (SI) a unidade é expressa em J/kg K.

A água é capaz de armazenar muito mais calor que as demais substâncias, visto esta propriedade está relacionada com as pontes de hidrogênio. A energia térmica, considerada como medida de movimentação molecular, é utilizada para quebrar as ligações intermoleculares, permitindo que as moléculas se movam mais rapidamente, fato que resulta na mudança do estado físico da substância (ISAIA, 2011).

A água, pelo seu elevado calor específico, exerce uma função primordial na regulação térmica. A maior parte dos microorganismos, quando não esporulados, morrem rapidamente pela dessecação (BORZANI et al., 2001).

#### - Viscosidade

A viscosidade é a propriedade associada a resistência que o fluido oferece à deformação por cisalhamento, ou seja, o atrito interno nos fluidos devido basicamente a interações moleculares, sendo em geral função da temperatura (ISAIA, 2011), estando relacionada com as forças de coesão entre as moléculas.

A água é um fluido newtoniano, isto é, obedece a Lei de Newton, aonde a viscosidade é constante. A viscosidade aumenta com o peso molecular, e diminuem com a temperatura. A presença de substâncias coloidais, como proteínas, aumenta a viscosidade da água. Compostos que possuem grupo de hidroxila, podem apresentar uma ponte de hidrogênio entre o H de uma molécula e o da outra, dificultando a movimentação das moléculas (KOBBER, 1969).

#### - Miscibilidade

Segundo Holm (1976) a miscibilidade é a habilidade de duas ou mais substâncias em formar uma fase simples e homogênea quando estão misturados em todas suas proporções. Deslocamentos miscíveis ocorrem com a formação de uma região de uma "única fase" entre os fluidos deslocante e deslocado, sem aparente descontinuidade ou interface entre eles. Assim, a tensão interfacial é nula e a superficial é zero (KLINS, 1984).

Na indústria do petróleo tal termo e propriedade é bastante discutido, tendo em vista a exploração de reservatórios de petróleo, onde é necessário fazer o injetamento de água, seja no estado líquido ou gasoso.

### **3.2 Água de Amassamento**

É antológica a expressão: “Se você pode beber a água, você pode usá-la no concreto”, sendo utilizada em normas técnicas e na literatura de tecnologia do concreto, mas materiais orgânicos presentes na biota da água podem prejudicar sua durabilidade.

A água é um dos materiais mais importantes, senão o de maior relevância no quesito materiais cimentícios, pouco foi escrito sobre sua qualidade como componente do concreto. Embora a maior parte dos concretos são produzidos com água proveniente do sistema de abastecimento urbano, já se sabe que existe a possibilidade da utilização de águas secundárias para a produção desse material, mesmo que estas não sejam apropriadas para o consumo humano.

No atual cenário em que o setor da construção civil assumiu de forma geral as reduções dos impactos ambientais provocados por ela tendo em vista as questões econômicas, sociais e as próprias questões ambientais envolvidas, a utilização de águas impuras tem sido impulsionada em atividades secundárias ligadas a produção do concreto, porém com pouca ou inexistente utilização dessas águas na produção direta por esse assunto ser pouco conhecido e estudado, segundo Isaia (2011).

Pelo motivo da água ser um diluente universal com a capacidade de diluir diversas substâncias ou de manter em suspensão partículas sólidas de pequeno tamanho, os requisitos condicionantes para manter a sua qualidade se relacionam a parâmetros físicos e químicos que podem influir nas propriedades dos concretos nos estados fresco e endurecido, conforme Isaia (2011). No entanto tais requisitos são superficiais, pois microorganismos presentes na água podem levar ações deletérias, tanto na matriz cimentícia quanto no aço do concreto armado, a biocorrosão.

No estado fresco, a água promove a diminuição do atrito entre as partículas por meio do envolvimento dos grãos, aglutinando-se por meio da coesão da pasta de cimento, sendo este estudo de manipulação desse material promovido pela Reologia, onde define a falta de homogeneidade do material provoca a diminuição da trabalhabilidade de materiais.

A presença de material orgânico pode exercer o atraso no tempo de pega, bem como sólidos em suspensão proveniente de águas de recuperação dos processos de produção do concreto podem alterar, além do início de pega, o fim de pega, motivo da recomendação da

ASTM C1602 da utilização de aditivos estabilizadores quando a densidade da água é superior a 1,05 mg/L.

No estado endurecido, para que haja a completa reação entre a água e o cimento, deve haver uma quantidade suficiente de água para as reações se processarem completamente.

Micro estruturalmente, Mehta e Monteiro (2008) fez uma abordagem quanto a presença da água no concreto, sendo assim uma evolução do apresentado por Ramachandran (1995).

Existem três aspectos a serem considerados para água de amassamento do concreto, segundo Neville (2000), sendo a sua qualidade, quantidade por volume de concreto e relação água por cimento ( $a/c$ ). Este último termo criado por Abrams (1924). Assim, é o aspecto da qualidade prepondera tanto na quantidade por volume de concreto quanto na relação  $a/c$ , sendo o mais relevante.

A presença da água no concreto, durante as etapas de hidratação que ocorrem ao longo do tempo, conforme capítulo 2, sabendo que o concreto não cessa seu processo de interação com o meio ambiente, é apresentada em 4 estágios, que são:

- Água quimicamente combinada: está relacionada a água que integra as moléculas dos produtos de hidratação da pasta cimentícia, que está fortemente ligada pelas ligações químicas sendo dissolvidas quando houver a decomposição dos produtos hidratados por aquecimento.
- Água interlamelar: está relacionada de forma direta à estrutura do C-S-H, entre as lamelas formadas durante a polimerização dos silicatos à medida que o grau de hidratação posterga.
- Água adsorvida: encontra-se aderida a superfície das moléculas de hidratação por meio de forças de Van der Waals proporcionadas pelas pontes de hidrogênio.
- Água capilar: está localizada entre os vazios existentes entre os grãos, sendo responsável pela retração devido a sua saída do material.

O fator responsável pela resistência mecânica no concreto se baseia na qualidade e na quantidade de materiais sólidos de compostos hidratados da pasta cimentícia, conforme apresentado no gráfico 2.2 e figura 2.2.

A água necessária para a completa hidratação dos hidratos é de aproximadamente uma relação  $a/c$  de 0,40. Nos concretos convencionais, esta relação, é mais elevada, fazendo com que a água, além da quantidade necessária para as reações químicas ao a água interlamelar,

se aloje nos interstícios dos produtos de hidratação formando vazios. Quanto maior for a relação a/c maior é a quantidade de vazios presente no concreto.

A água em excesso, capilar ou a adsorvida podem auxiliar no transporte de elementos deletérias a estrutura da pasta, assim os vazios provocados pela quantidade de água em excesso influem diretamente na durabilidade e na vida útil das estruturas.

Devido a esses fatores existe uma tendência de utilização de concretos com menor fator a/c, obtendo maiores resistências, além, por meio dessa redução, obter uma maior compacidade de um tempo de hidratação do cimento, melhorando propriedades gerais do concreto.

A ausência de controle da dosagem de água é uma das principais causas de fissuras no concreto, que surgem devido à retração que ocorre durante o endurecimento da estrutura. “O excesso de água é um catalisador da retração, mas não é a única e nem a mais importante causa. A falta de cura (procedimentos de proteção para minimizar a perda de água) e a exposição excessiva ao sol ou calor também influenciam o fenômeno”, diz Freitas Júnior (2016). Outro problema causado por misturas com água em demasia é o concreto com alto índice de vazios.

A água combinada aos elementos hidratados produz uma redução volumétrica ao longo de um certo período de tempo, sem trocas de umidade com o ambiente ou outras influências externas de temperatura ou carga. Além dessa retração química, existe também a diminuição da umidade relativa no interior da pasta endurecida, o que provoca um auto dessecação interna ou auto secagem.

A combinação desses fenômenos é denominada de retração autógena, por independe das condições ambientais externas, por ser isotrópico e por ocorre em qualquer gradiente de umidade. A retração que ocorre é diretamente ligada à relação a/c, quanto maior é essa relação maior é a retração. Segundo Helene (1986), a retração pode ocorrer por três mecanismos:

1. Retração hidráulica ou de secagem: devido à evaporação da água livre ou capilar que gera tensões capilares importantes nos poros remanescentes do concreto (pasta) que ainda possuem água.
2. Retração por hidratação do cimento ou retração química ou retração autógena: o volume total dos produtos hidratados é inferior à soma dos volumes de cimento anidro e de água. Este fenômeno também é chamado de contração Le Châtelier, em homenagem ao pesquisador<sup>13</sup> que primeiro o identificou e explicou. Pode ser incrementada pela remoção da água capilar para hidratação do cimento anidro remanescente. Isso ocorre quando a água livre já foi consumida. Este

processo também é chamado de auto secagem ou auto dessecamento. O resultado macroscópico final é a soma da retração por hidratação do cimento com o efeito físico da retração por depressão capilar.

3. Retração por carbonatação: decorrente da reação do  $\text{CO}_2$  presente na atmosfera com compostos hidratados do cimento. A portlandita,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , é o composto mais suscetível à carbonatação, e o resultado de sua reação com o  $\text{CO}_2$  é a deposição de  $\text{CaCO}_3$  (calcita) que tem volume molecular inferior ao hidróxido e à evaporação da água gerada nessa reação.

### ***3.2.1 Requisitos Normativos Mundiais para Qualidade da Água de Amassamento***

Até o século XX os parâmetros de qualidade da água para a produção do concreto eram, em sua grande parte, fatos qualitativos que não expressavam uma boa garantia de conformidade. Somente a partir do atual século é que foram criadas normativas que detalhavam sobre a qualidade da água a ser misturada no concreto.

A primeira delas foi a Norma Europeia CEN EN 1008 da Comunidade Europeia, que guiou as demais normas do continente europeu. Somente em 2004 foi publicada a norma ASTM 1602M nos Estados Unidos sobre a temática. No Brasil em 2009 entrou em vigor a norma brasileira ABNT NBR 15.900 composta por 11 partes, e em 2009 a norma ISO 12.439.

De acordo com a NBR 15.900 é possível classificar a água quanto a possibilidade da sua utilização para a produção de concretos, por meio de classificações devido a sua origem divididas em águas de abastecimento público, recuperada de processos de preparação do concreto, fontes subterrâneas, natural de superfície, salobra, esgoto, esgoto tratado, reuso proveniente de estação de tratamento de esgoto.

A norma apresenta um fluxograma com a sequência dos ensaios que possibilitam definir se é possível ou não a sua utilização, por meio de avaliação preliminar, das propriedades químicas, tempos de pega e resistência do cimento.

A ABNT NBR 15.900:2009 é similar às normas CEN EN 1008 e ISO 12439, possuindo apenas algumas singularidades, porém a norma brasileira prescreve de forma detalhada os procedimentos de ensaios a cada determinação, além de definir como deve ser feita a coleta das amostras a serem estudadas.

A Norma ASTM C1602M compreende a composição e as condições de desempenho da água empregada para o amassamento em concreto de cimento Portland, definindo a fonte, relata os requisitos e a frequência dos ensaios para a qualificação de águas de fontes individual bem como combinada, abrangendo os tipos de água de mistura: água para

amassamento, gelo, água de lavagem de carros, água dos agregados e água introduzida na forma de aditivos quando provoca aumento da relação água/materiais cimentícios maior que 0,01.

A seguir será apresentado panorama geral mundial das normas publicadas para requisitos de qualidade da água de amassamento do concreto.

#### - Parâmetros Normativos no Cenário Mundial

A *Indian Standart (IS) 3025* prescreve que os testes de água desempenham um papel importante no controle da qualidade do trabalho em concreto de cimento. Testes sistemáticos da água ajudam a obter maior eficiência do concreto de cimento e maior garantia do desempenho em termos de resistência e durabilidade.

As características das águas são suscetíveis a serem alteradas devido a reações físicas, químicas ou biológicas que podem ocorrer entre no momento da amostragem e análise. Portanto, é necessário testar a água antes de ser usada na produção de concreto.

No caso de águas residuais proveniente de sistemas de esgotamento sanitário e canais de efluentes, as amostras devem ser coletadas de um terço das profundidades da água a partir do topo. A velocidade do fluxo no ponto de amostragem deve ser suficiente para evitar a deposição de sólidos. A amostra deve ser coletada suavemente sem causar aeração ou liberação de gases dissolvidos.

Na maioria dos casos, os fluxos de esgoto são intermitentes e, portanto, é necessária à coleta de amostras a cada hora. As águas residuais geralmente se decompõem rapidamente à temperatura ambiente; portanto, certas configurações de teste, como oxigênio dissolvido, sulfetos, cloro residual, nitrito e pH, devem ser fixadas no local. Para realizar outros exames, deve-se adicionar conservantes imediatamente à amostra coletada.

A *Australian Standart (AS) 1379* define que a água de amassamento seja retirada de uma fonte de qualidade aceitável. As águas utilizadas nas operações de lavagem podem ser utilizadas se forem armazenadas de forma a evitar a contaminação por materiais prejudiciais ao concreto.

A qualidade aceitável, comparativamente, é identificada a partir de registros de serviço anteriores ou testada de acordo com os requisitos fornecidos nas Tabelas 3.3 a 3.8.



Tabela 3.3 – Levantamento bibliográfico normativo mundial de parâmetros de resistência a compressão

Parâmetros	Padrões	Limites	Observações
Resistência à compressão	IS 456-2000	Devem ser tomados $\geq 85\%$ da resistência à compressão média da amostra de controle.	Os resultados dos testes da amostra devem ser a média da força de três amostras. A variação individual não deve ser superior a $\pm 15\%$ da média. Se mais, os resultados do teste da amostra são inválidos
	AS 1379	$\geq 90\%$ da força média das amostras de controle preparadas com água de um suprimento estável de água potável.	Resistência à compressão de 7 dias e 28 dias do concreto feito com água de uma fonte sem registro de serviço. Procedimento de teste de acordo com AS 1012
	ASTM C94	$\geq 90\%$ da resistência média das amostras de controle preparadas com água destilada ou potável.	A resistência média à compressão de 7 dias das amostras de argamassa ou concreto preparadas com a água que deve ser controlada. Procedimento de teste de acordo com C109A.
	EN 1008	$\geq 90\%$ da resistência média das amostras de controle preparadas com água destilada ou deionizada.	A resistência média à compressão de 7 dias e 28 dias das amostras de argamassa ou concreto Preparado com água de lavagem
	NBR 15.900	$\geq 90\%$ da resistência média das amostras de controle preparadas com água destilada.	A resistência média à compressão de 7 dias das amostras de argamassa ou concreto preparadas com a água que deve ser controlada.

Fonte: Elaborado pelo autor 2020.

Tabela 3.4 – Levantamento bibliográfico normativo mundial de parâmetros de pH

Parâmetros	Padrões	Limites	Observações
pH	IS456-2000	$\geq 6.0$	- A água usada para misturar e curar deve estar limpa e isenta de quantidades prejudiciais de óleos, ácidos, álcalis, sais, açúcar, materiais orgânicos ou outras substâncias que possam ser prejudiciais ao concreto ou ao aço.
	AS 1379	$> 5.0$	-Água reciclada do misturador de concreto pronto para mistura, das operações de lavagem pode ser usada como água de mistura se for armazenada pela primeira vez e a água retirada da tomada de armazenamento for de qualidade aceitável.
	ACI 318M-08	-	Qualquer água natural potável e sem sabor ou odor pronunciado é satisfatória como a mistura de água para a fabricação de concreto.
	EN 1008	$\geq 4.0$	A água utilizada no concreto deve estar em conformidade com os requisitos da cláusula no. 4.2, 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3. A água também deve estar em conformidade com os requisitos químicos, conforme a cláusula no. 4.3.4
	NBR 15.900	$\geq 5$	Qualquer água natural potável e sem sabor ou odor pronunciado é satisfatória como a mistura de água para a fabricação de concreto.

Fonte: Elaborado pelo autor 2020.

Tabela 3.5 – Levantamento bibliográfico normativo mundial de parâmetros de tempos de pega

Parâmetros	Padrões	Limites	Observações
Tempo de início e fim de pega	IS 456-2000	$\geq 30$ min. $\leq 10$ h.	Tempo de início de pega Tempo de fim de pega Procedimento de teste de acordo com IS 4031 - Parte 5.
	AS 1379	60 min. mais cedo que a amostra de controle. 90 min. mais tarde que a amostra de controle	Tempo de início de pega; Tempo de fim de pega; Procedimento de teste de acordo com AS1012
	ASTM C94	1h antes da amostra de controle. 1½ h depois da amostra de controle.	Tempo de início de pega; Tempo de fim de pega; Procedimento de teste de acordo com C191A.
	EN 1008	Ajuste inicial $\geq 1$ h Conjunto final $\leq 12$ horas	Com ambos não diferindo em mais de 25%. Amostras feitas com água destilada ou deionizada. Procedimento de teste de acordo com a cláusula no. 6.1.4 do mesmo padrão.
	NBR 15900	Não devem diferir mais de 25 % dos tempos de início e fim de pega obtidos com amostras de pastas preparadas com água destilada ou água deionizada	Tempo de início de pega Tempo de fim de pega Procedimento de teste de acordo com a ABNT NBR NM 65.

Fonte: Elaborado pelo autor 2020.

Tabela 3.6 – Levantamento bibliográfico normativo mundial de parâmetros de sólidos suspensos

Parâmetros	Padrões	Limites	Observações
Sólidos Suspensos	IS 3025 -Part17	$\leq 2000$ mg/L	O método gravimétrico é utilizado para a determinação de resíduos não filtráveis.
	AS 1379	-	Os materiais que não são compatíveis não devem ser utilizados no mesmo volume de concreto plástico ou se utilizados.
	ASTM C94	$\leq 50,000$ mg/L	Requisito opcional de sólidos totais em massa. Método de teste AASHTO T26
	EN 1008	$\leq 1\%$ do total de agregado	Valor recomendado
	NBR 15900	$\leq 50\,000$ mg/L	Para água de fontes classificadas em 3.3, utilizar a metodologia da ABNT NBR 159.00-3. Para os demais tipos de água aplica-se o Projeto ABNT NBR 15900-3

Fonte: Elaborado pelo autor 2020.

Tabela 3.7 – Levantamento bibliográfico normativo mundial de parâmetros da presença de Sulfatos (Continua)

Parâmetros	Padrões	Limites	Observações
SO <sub>4</sub>	IS 3025 (Part24)	400 mg/L	Sulfato na forma SO <sub>3</sub>
	AS 1379	$\leq 500$ mg/L do cimento	Especificado como limite total para concreto

Fonte: Elaborado pelo autor 2020.

Tabela 3.7 – Levantamento bibliográfico normativo mundial de parâmetros da presença de Sulfatos (Conclusão)

Parâmetros	Padrões	Limites	Observações
SO <sub>4</sub>	ASTM C1602M	≤3000 mg/L	Sulfato como na forma SO <sub>4</sub> . Método de teste conforme D516
	EN 1008	≤2000 mg/L	Testado de acordo com 6.1.3 e expresso como SO <sub>4</sub>
	NBR 15900	≤2000 mg/L	Ensaída de acordo com ABNT NBR 15900-7, expresso como SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>

Fonte: Elaborado pelo autor 2020.

Tabela 3.8 – Levantamento bibliográfico normativo mundial de parâmetros da presença de Cloreto

Parâmetros	Padrões	Limites	Observações	
Cl <sup>-</sup>	IS 3025-Part 32	≤2000mg/L	Concretos que não contêm reforço, tendões, dutos, itens embutidos.	
	IS 456	≤500 mg/L	-Para concreto contendo aço incorporado	
	AS 1379	≤800 mg/L	-Concreto contém reforço, dutos, itens incorporados ou outros itens que exigem proteção.	
	ASTM C1602M	≤500 ppm ≤1000 mg/L	Concreto protendido Concreto reforçado	
	EN 1008	≤ 1000 mg/L	≤500 mg/L	Concreto / argamassa protendida
			≤ 1000 mg/L	Concreto reforçado ou metal incorporado.
	NBR 15900	≤ 4500 mg/L ≤500 mg/L ≤1000 mg/L	≤ 4500 mg/L	-Sem reforço ou metal incorporado.
≤ 4500 mg/L			Concreto protendido ou graute Concreto armado Concreto simples (sem armadura)	

Fonte: Elaborado pelo autor 2020.

O ASTM C94 permite o uso de água não potável ou de águas utilizadas de forma indireta na operação de produção de concreto, os limites qualificados para atender aos requisitos e os limites opcionais resumidos no código. Os níveis de impurezas permitidos na água de lavagem devem estar abaixo dos critérios de concentração máxima fornecidos na norma.

A EN 1008 recomendou os requisitos para a água, adequados para tornar o concreto em conformidade com a EN 206-1 e descreve métodos para avaliar sua adequação. Esse padrão considera o uso de água potável, água recuperada de processos na indústria de concreto, água de fontes subterrâneas, superfície natural e águas residuais industriais para concreto armado e água do mar ou água salobra na produção de concreto sem armadura ou com outro metal incorporado. A água de esgoto não é adequada para a produção de concreto. Os requisitos para a água estão resumidos na avaliação preliminar padrão, nas propriedades químicas, no tempo de ajuste e no desenvolvimento da resistência. A norma fornece requisitos específicos para o uso de água recuperada de processos na indústria de concreto.

Já a NBR 15.900 classifica a água em função de sua origem e estabelece todos os requisitos que devem ser obedecidos para que possa ser usada para a preparação do concreto. Entre esses requisitos estão a quantidade de cloretos e de sulfatos aceitáveis na água, além de outros elementos e características físicas, além de direcionar os procedimentos de coleta de amostras e prescrever como realizar a avaliação preliminar, destacando além disso os métodos de ensaios para se comprovar o atendimento aos requisitos.

### **3.3 A água nos processos de degradação do concreto**

O concreto pode sofrer fissurações por diversas condições, no seu estado fresco com uma grande quantidade de armaduras ou seções com dimensões muito variáveis podem acontecer o assentamento plástico causado pelo excesso de exsudação da água bem como a sua evaporação prematura, provocando fissuras ainda no seu estado plástico. Em condições não favoráveis como altas temperaturas, baixa umidade do ar e incidência de ventos fortes a retração plástica como fissuração do tipo mapeamento pode ser presente, que podem chegar a alguns milímetros de abertura.

#### **3.3.1 Fissuração**

Em construções em que há um contato direto entre o concreto e o solo as fissurações podem ser provocadas por meio de sais hidratáveis como sulfato de sódio ou carbonato de sódio, que podem ser solubilizados pela água e penetrar nos poros do concreto, causando expansão propiciando fissuração.

Além dessas possibilidades ainda podem ocorrer fissurações ocasionadas pelo congelamento de água presente nos poros do concreto, que expandem-se provocando um aumento do seu volume aumentando as tensões internas no material. Em um outro extremo, também podem ser decorrentes da evaporação da água presentes nos poros não permeáveis a qual geram uma elevação considerável da pressão interna. Segundo Purkiss (1996), estas tensões de origem térmica dentro da matriz de concreto, influem na desintegração das regiões superficiais dos elementos estruturais.

#### **3.3.2 Ataques Ácidos**

Não é usual o contato de concreto com ácidos em altas concentrações. Já a ação de chuvas ácidas nos grandes centros e em áreas industriais é mais frequente. Os ácidos atuam sobre o concreto destruindo seu sistema poroso e produzindo uma transformação completa na pasta de cimento endurecida. Com isso, tem-se uma perda de massa e conseqüentemente, a

redução da seção de concreto. Esta perda acontece em camadas sucessivas a partir da superfície exposta, sendo a velocidade de degradação proporcional à quantidade e concentração do ácido em contato com o concreto (ANDRADE, 2003 apud LAPA, 2008). Apesar de todos os componentes do cimento serem suscetíveis a este ataque, normalmente o hidróxido de cálcio é alvo de um ataque vigoroso (FERREIRA, 2000).

"As soluções ácidas contendo ânions, que formam sais solúveis de cálcio, são encontradas frequentemente em ambientes industriais" (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

As soluções ácidas minerais (sulfúrico, hidro clórico, nítrico e fosfórico) e orgânicas (lático, acético, fórmico, tânico, propiônico, entre outros) são as mais agressivas para o concreto" (FERREIRA, 2000). Segundo Mehta e Monteiro (2008), os ácidos clorídrico, sulfúrico ou nítrico podem ser encontrados em efluentes da indústria química.

A ação dos ácidos como agente agressivo do concreto endurecido promove a conversão de todos os compostos de cálcio, de modo semelhante à hidrólise: CH, C-S-H e CaH em sais e cálcio do ácido respectivo. A pressão provocada pelo crescimento dos cristais de etringita e a expansão devido à adsorção de água em meio alcalino por etringita pouco cristalina são as hipóteses mais prováveis para explicar o fenômeno da expansibilidade.

### ***3.3.3 Ataque por Sulfato***

O ataque por sulfatos é um fenômeno patológico que vem sendo investigado desde a década de 20 (SILVA FILHO, 1994). Apesar das inúmeras pesquisas realizadas e dos avanços decorrentes destas, ou seja, dos conhecimentos adquiridos sobre o assunto, existem ainda, mesmo em nível internacional, muitas questões a serem respondidas, principalmente sobre os mecanismos de deterioração do concreto, devidos à ação agressiva dos íons.

A reação dessas substâncias quando há uma quantidade de água suficiente podem provocar o fenômeno da expansão, os efeitos deletérios relacionados a esse tipo de ataque químico, como também a redução progressiva de resistência, rigidez e massa do concreto, podem interferir na vida útil das estruturas, podendo até ocasionar a completa deterioração destas (GOMIDES, 2001).

### ***3.3.4 Reações álcali-silica***

A reação álcali-silica é a mais comum forma de reação álcali agregado. Está relacionada a presença de sílica amorfa. A sílica amorfa está presente em agregados como opala, calcedônia, cristobalita, tridimita, certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais,

e o quartzo. Nessa reação há o ataque da sílica ativa pelo hidróxido de cálcio dissolvido a partir dos álcalis do cimento Portland, normalmente nos poros ou superfície dos agregados.

A reação álcali-agregado tem sido uma preocupação crescente nas obras de engenharia. Para evitar a deterioração do concreto e a redução da sua vida útil é importante estar atento a uma das reações que podem impactá-lo.

As reações álcali-agregados são processos químicos que envolvem álcalis (sódio e potássio), normalmente, provenientes do cimento e agregados reativos. Essas reações, de agentes que se encontram dentro do concreto, podem gerar deteriorações em barragens, pavimentos, pilares de pontes, concretos em contato com solo, como fundações de edifícios, muros de contenção, túneis, etc.

É possível classificar essas reações em três tipos, sendo eles: álcali-sílica, álcali-silicato e álcali-carbonato. De acordo com o Boletim Técnico realizado pela Votorantim Cimentos, denominado Reações álcali-agregado em concreto, as reações álcali-sílica e álcali-silicato geram produtos sílico-cálcico-alcálicos expansivos.

Já, a reação álcali-carbonato, por sua vez, leva à decomposição de dolomita e à formação de brucita, em um processo que pode provocar expansão. Por causa da expansão associada ao processo, as reações álcali-agregado levam à fissuração e deslocamentos estruturais.

### **3.3.5 Corrosão de armadura**

Pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos. A primeira também conhecida por corrosão seca ou oxidação é causada por uma reação gás metal, com formação de uma película de óxido. É um processo lento e não provoca deterioração substancial das superfícies metálicas, exceto quando se tratar de gases extremamente agressivos. Já a corrosão eletroquímica ou aquosa é que mais traz problemas às obras civis. Ela acontece devido a formação de uma pilha ou célula de corrosão, com eletrólito e diferença de potencial entre trechos da superfície do aço. O eletrólito é formado a partir da presença de umidade no concreto (GENTIL, 1996 e CASCUDO, 1997). A deterioração do material representa alterações prejudiciais indesejáveis, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o inadequado para o uso. Sendo a corrosão um processo espontâneo, ela constantemente transforma os materiais metálicos de modo que a durabilidade e desempenho dos mesmos deixem de satisfazer os fins a que se destinam (GENTIL, 1996).

A diferença de potencial pode ser causada por vários fatores de acordo com as literaturas: diferenças de umidade, aeração, concentração de salina, solicitações mecânicas distintas no concreto e aço, variações significativas nas características superficiais do aço, metais diferentes embutidos no concreto, entre outros. (HELENE, 1986).

Por fim, o oxigênio é necessário porque participa das reações químicas envolvidas na formação da ferrugem (óxidos e hidróxidos de ferro) e sua participação é dependente do teor de umidade do concreto (FRANCO, 2011).

### **3.3.6 Carbonatação**

A alta alcalinidade nas superfícies expostas do concreto, obtida principalmente às custas da presença de hidróxido de cálcio liberado das reações de hidratação do cimento, podem ser reduzidas com o tempo através da ação do gás carbônico do ar e outros gases ácidos como  $\text{SO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ . Este processo é chamado de carbonatação e felizmente, ocorre numa velocidade lenta enfraquecendo-se com o tempo. Esta característica pode ser explicada pela hidratação crescente do cimento, além do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), próprio produto da reação de carbonatação que preenche os poros superficiais dificultando o acesso do gás carbônico presente no ar, no interior do concreto. Geralmente, a carbonatação é uma condição fundamental para o início da corrosão das armaduras (CASCUDO, 1997). Para haver uma grande alteração das condições de estabilidade química da película passivadora do aço, o pH de precipitação do  $\text{CaCO}_3$  deve ser da ordem de 9,4 (à temperatura ambiente). Sobre este fato, muitos autores, segundo Cascudo (1997), têm proposto um valor crítico de pH entre 11,5 e 11,8, um pouco abaixo para que não se tenha quebra da passivação do aço (HELENE, 1986 e NOGUEIRA, 1989).

### **3.3.7 Resistividade do concreto**

A resistividade elétrica superficial do concreto, nos estados fresco e endurecido, pode ser influenciada por alguns fatores, como por exemplo: grau de hidratação, relação água/aglomerante (a/ag), procedimento de cura, teor de agregado e existência de armadura.

O concreto, quando saturado em água, comporta-se como um semicondutor, com valores de resistividade elétrica da ordem de  $10^2 \Omega \cdot \text{m}$ , enquanto que seco, pode ser considerado um isolante elétrico, com resistividade da ordem de  $10^6 \Omega \cdot \text{m}$  (HELENE, 1986).

### 3.3.8 Ataque Biológico

A presença de líquens, musgos, algas e raízes de plantas que penetrem em fissuras do concreto ou em locais menos compactados, podem resultar no desencadeamento de forças que aumentem a fissuração e deterioração. A atividade destes agentes biológicos pode reter água na superfície do concreto levando a saturação, e ao risco de congelamento se as condições permitirem.

O ácido húmico pode ocasionar dissolução da pasta, como relatado por Neville (1994), pois é um agente solubilizante e de transporte de compostos ativos hidrofóbicos (DE MELO, 2016), como também pode ser benéfico sua presença em águas residuárias pelas propriedades fungicida e bactericida (KHL'KO et al., 2011; SIDDQUI et al., 2009; FERRARA et al., 2006; HASSAETT, BISESI e HARTESTEIN, 1987).

Cabe, assim, saber quais microorganismos estão presentes na água residuárias, e se tem resistência a exposição à agentes e produtos antimicrobiano. No caso das bactérias é a capacidade de ficarem adormecidas até surgir ambiente favorável para se ativar, esporular.

### 3.4 Água Recuperada (Reuso)

Hermeneuticamente, o termo reutilização de água consiste na utilização de águas residuais tratadas para qualquer finalidade que constitua um benefício sócio-econômico. A água pode ser reutilizada múltiplas vezes e para finalidades diferentes, sempre correspondendo a uma utilização de água tornada residual e geralmente submetida a tratamento.

Na literatura especializada, designadamente na de língua espanhola, encontra-se frequentemente a expressão “reutilização de água regenerada”, em lugar de “reutilização da água”, denominação em correspondência mais direta com a terminologia norte - -americana “*reuse of reclaimed water*”. (MONTE e ALBUQUERQUE, 2010)

Existe uma necessidade premente de investimento em novas pesquisas de desenvolvimento de processos que tenham o intuito de ampliar a utilização da água de reuso e eliminação da utilização da água potável nos processos de produção (ESTENDER; TAKEUTI; JULIANO, 2015).

Os custos com recuperação de água de efluentes tratados através de processos de reuso são 50% inferiores do que dessalinização de água do mar. Esquemas de recuperação de água possuem diversas vantagens como uma maior recuperação com mais baixas pressões operacionais (economia de energia) ao longo da vida da planta industrial (GUDE, 2017).



### 3.4.1 Descrição dos tratamentos dos efluentes utilizados para pesquisa

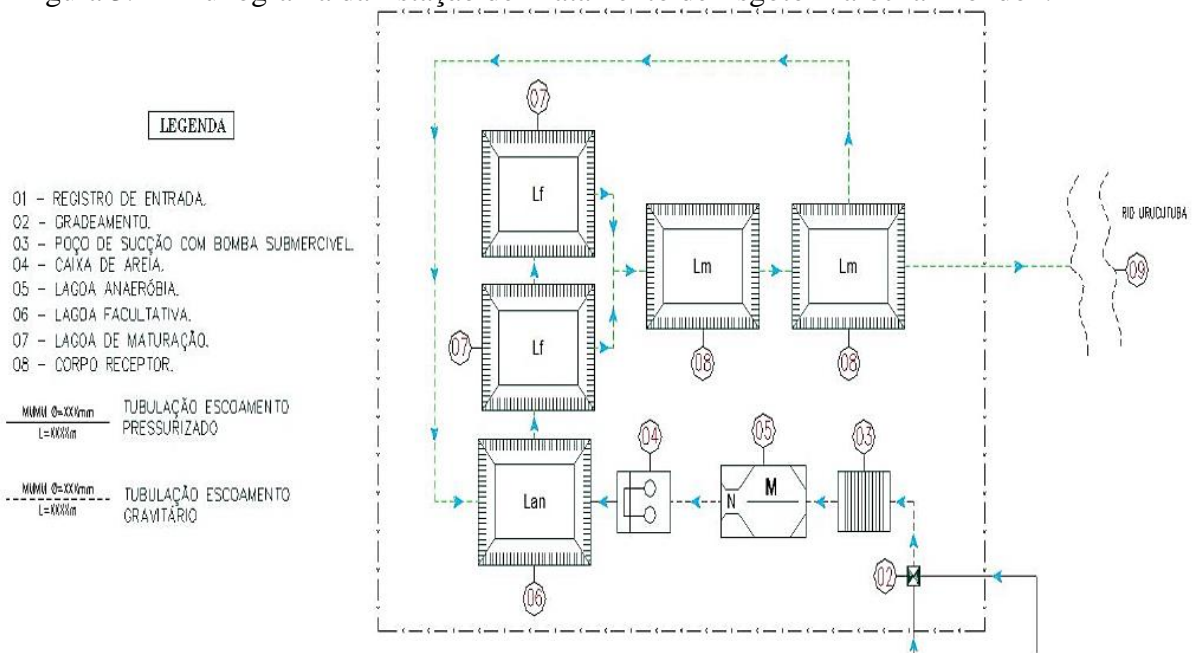
Em geral, as águas residuais domésticas incluem água negra (esgoto fecal) e água cinza (água de lavagem de máquinas de lavar louça, pias em geral, etc.). A água negra é responsável por 32,5% do efluente doméstico, enquanto a água cinza é responsável por 67,5%. As águas residuais domésticas são classificadas como poluentes orgânicos. As águas residuais da lavanderia contêm substâncias principalmente de três fontes (SINGH et al., 2016):

1. Substâncias da água bruta (torneira, poço etc.): Sais
2. Detergentes: sulfatos, fosfatos silicatos, etc.
3. Resíduos da roupa: partículas, óleos gordurosos, cor, metal, fios e linters, etc.

#### - Estação de Tratamento de Esgoto Marechal Rondon

A ETE Marechal Rondon se localiza no município de Caucaia, na região metropolitana de Fortaleza, e possui um sistema de lagoas de estabilização, com vazão de cerca de 57,4L/s. A figura 3.1 a seguir apresenta o fluxograma do processo de tratamento na estação, que conta com grade, caixa de areia, calha Parshall, uma lagoa anaeróbia, duas lagoas facultativas em paralelo e duas lagoas de maturação em série, sendo o Riacho Urucutuba o corpo receptor. A água para esta pesquisa será coletada ao fim da segunda lagoa de maturação, logo antes da saída para o corpo receptor.

Figura 3.1 - Fluxograma da Estação de Tratamento de Esgoto Marechal Rondon.



Fonte: Adaptado pelo autor de Companhia de Água e Esgoto do Ceará (2009).

Para o fácil entendimento das nomenclaturas dada neste trabalho, o esgoto tratado, efluente final da estação de tratamento, é chamado de efluente secundário ou simplesmente “E2”.

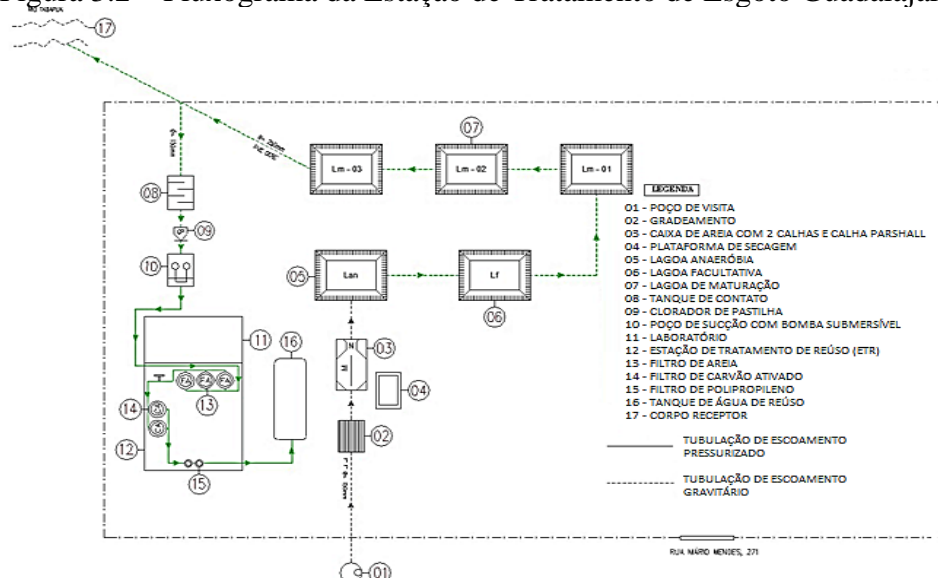
### - Estação de Tratamento de Esgoto Guadalajara

A ETE Guadalajara, composta por um tratamento preliminar formado por gradeamento, caixa de areia e calha Parshall e por lagoas de estabilização, sendo uma anaeróbia, uma facultativa e três de maturação, com processo oxidativo avançado, sendo o corpo receptor o Rio Tabapuá. A ETE conta também com uma Estação de Tratamento de Reuso compacta, que utiliza filtros de areia e de carvão ativado; a água oriunda desse tratamento terciário é armazenada em um tanque para água de reuso.

No processo de tratamento, após as lagoas de estabilização, o efluente passa por chicanas, evitando os problemas causados pelas vibrações, havendo posterior pré-cloração. Em seguida, é adicionado o coagulante policloreto de alumínio (PAC), que condiciona o efluente do ponto de vista físico-químico. O PAC é amplamente utilizado no tratamento de efluentes industriais, contendo em sua estrutura valores do ingrediente ativo entre 10 e 25% de  $Al_2O_3$ . Tem como principal vantagem a capacidade de gerar flocos em uma grande faixa de pH, contando com uma eficiência superior à dos sais de alumínio na remoção de sólidos e gerando um menor volume de lodo (FONSECA, 2011).

O efluente é direcionado para filtros de areia, depois passa por uma central de ultravioleta, seguindo para dois filtros de carvão ativado e por pré-cloração, antes de ser armazenada em reservatórios com capacidade de 16 mil litros, como mostramos na figura 3.2.

Figura 3.2 – Fluxograma da Estação de Tratamento de Esgoto Guadalajara



Fonte: Adaptado pelo autor de Companhia de Água e Esgoto do Ceará (2010).

Para o fácil entendimento das nomenclaturas dada neste trabalho, o esgoto tratado, efluente final da fase terciária de tratamento, é chamado de efluente terciário ou “E3”.

#### - Estação de Pré-Condicionamento de Esgoto (EPC)

O processo da Estação de pré-condicionamento de esgoto da região metropolitana de Fortaleza está apresentado no anexo C1 deste trabalho, cujo efluente final passa por fase de peneiramento de 1,5 milímetros.

### **3.4.2 Microbiologia Presente nos Efluentes das ETEs**

Afim de conceituar, o esgoto bruto é chamado de afluente e o esgoto tratado é chamado de efluente. Assim, as condições para o lançamento de efluentes de forma direta ou indireta em corpos de água é tratado pela Resolução do Conama 357/2005, que foi alterada pela Resolução 397/2008, onde estabelece os parâmetros de qualidade dos efluentes. O esgoto doméstico possui microorganismos, em especial, bactérias coliformes, com níveis de resistência variados aos processos de inibição, portanto é necessário selecionar microorganismos para monitorar a qualidade da água. Essa escolha consiste em um grupo de bactérias patogênicas provenientes do trato gastrointestinal, como os coliformes.

A presença de coliformes termos tolerantes no efluente indica a ocorrência de poluição fecal, enquanto a presença de bactérias heterotróficas reflete a população microbiana presente tipicamente em água bruta (BRASIL, 2004; WHO, 2004).

Apesar dos coliformes serem usados como padrão de contaminação fecal, uma das deficiências desse uso é o recrescimento deste grupo em ambientes aquáticos e sistemas de distribuição. O recrescimento, que ocorre mais em heterotróficas do que em coliformes, pode mascarar ou inibir a presença destes últimos, pois uma vez que as heterotróficas estejam em concentrações maiores, estas interferem na recuperação dos coliformes (LECHEVALLIER, 1990). O recrescimento pode ser causado pelo crescimento elevado de bactérias heterotróficas, bem como a desproporcionalidade da população com os protozoários e vírus, ambos de origem entérica (PEPPER et al., 2008).

#### - Grupo coliformes

Os grupos coliformes pertencem à família *Enterobacteriaceae* (*Citrobacter*, *Enterobacter*, *Escherichia*, *Hafnia*, *Klebsiella*, *Serratia* e *Yersinia*) e apesar do termo “coliforme fecal” ser utilizado, essa denominação é equivocada, pois somente *E. coli* é de origem exclusivamente fecal. Os outros gêneros de coliformes podem viver em outros habitats,

como no solo, e podem se desenvolver em águas eutróficas e biofilmes. Segundo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2009), os coliformes podem ser divididos em:

- Os coliformes totais são bacilos Gram-negativos, oxidase negativos, incapazes de formar esporos, com capacidade de crescer tanto aeróbica quanto anaerobicamente na presença de sais biliares ou tensoativos. São capazes de fermentar a lactose entre 35 e 37°C, produzindo ácido, gás e aldeído em até 48h. A enzima  $\beta$ -galactosidase é característica desse grupo.
- Os coliformes termos tolerantes possuem características similares às dos totais, caracterizados por serem bastonetes gram-negativos, anaeróbios facultativos e não formarem esporos. Entretanto apresentam como principais diferenças sua capacidade de fermentar a lactose entre 44 e 45°C, formando ácido e gás, além de provas positivas para indol,  $\beta$ -glucuronidase e ausência de uréase (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 1998). Os coliformes termos tolerantes constituem um grupo formado por alguns dos gêneros da família Enterobacteriaceae (*Citrobacter*, *Enterobacter*, *Escherichia* e *Klebsiella*).

Os critérios para selecionar bactérias mais adequadas como indicadoras de poluição fecal são: presença abundante em fezes humanas e animais; presença em efluentes residuais e ausentes em águas limpas; ser exclusivamente de origem fecal; ser de fácil cultivo; e ser detectável por métodos simples (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 1998; CARVALHO et al., 2009; DUARTE, 2011).

Dentre as coliformes, a *E. coli*, único membro da família Enterobacteriaceae de origem exclusivamente intestinal, satisfaz a maior parte dos critérios exigidos (VASCONCELLOS; IGANCI; RIBEIRO, 2006), portanto, sua presença pode indicar contaminação da água por outros patógenos intestinais, como enterococos. A *E. coli* é comum na microbiota do trato gastrointestinal e não representa perigo para o hospedeiro, pois vive em simbiose com ele. Esta espécie é a principal representante de coliformes termo tolerantes por ser facilmente detectável e ser dominante em amostras fecais, portanto, sua concentração na água tem relação direta com o grau de sua contaminação fecal. A *E. coli* está presente nas fezes de todos os grupos de mamíferos, em número elevado (109 por grama de fezes), representando entre 96 a 99% da massa bacteriana nas fezes humanas e animais (PEPPER et al., 2008; DUARTE, 2011). A presença desses organismos é utilizada como parâmetro de avaliação da distribuição de água (BRASIL, 2004; WHO, 2006).

Apesar da simbiose com o hospedeiro, algumas cepas de *E. coli* podem apresentar potencial patogênico, promovendo diarreias, septicemia, meningite e infecções, em especial do sistema urinário. Segundo Gorchev e Ozolins(1984), a classificação desses organismos varia de acordo com os seus fatores de virulência: *E. coli* enterohemorrágicas (EHEC), *E. coli* enteropatogênicas (EPEC), *E. coli* enteroagregativas (EAEC), *E. coli* enterotoxigênicas (ETEC), *E. coli* de adesão difusa (DAEC) e *E. coli* enteroinvasivas (EIEC). Em todas estas espécies a transmissão ocorre por via fecal-oral e podem causar desde diarreia até colite hemorrágica ou disenteria (PEPPER et al., 2008).

#### - Bactérias Heterotróficas

O grupo bactérias heterotróficas são microrganismos capazes de formar colônias na presença de matéria orgânica suprida por um meio de cultura apropriado, quase sempre estão presentes em concentrações maiores que coliformes (WHO, 2004).

O aumento na concentração de heterotróficas, em geral, indica falhas na estação de tratamento (tratamento, biofilmes ou corrosão) ou uma contaminação pós-tratamento (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2004). Apesar de servirem como indicadores funcionais do sistema de tratamento de esgoto, não existem evidências de que este grupo apresente efeitos deletérios na saúde por ingestão de água (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2004). No entanto, foi estabelecido que um limite máximo de até 500 UFC/100 mL no monitoramento da qualidade da água como norma.

#### - Outros grupos

As bactérias *Pseudomonasaeruginosa* e das espécies de *Enterococos* têm sido propostos como indicadores adicionais de qualidade para as águas, complementando a análise de coliformes, pois têm sido frequentemente detectadas em águas recreacionais e por sua presença provocar riscos à saúde por contato, inalação ou ingestão (CLESCERI; GREENBERG; EATON, 1998; MOTA; VON SPERLING, 2009).

As espécies de *Enterococos* consistem de estreptococos fecais, com alta tolerância às adversidades ou inibições de crescimento por fatores ambientais, pois são capazes de crescer em concentrações de 6,5% de cloreto de sódio, em pH 9,6 e em temperaturas entre 10°C a 45°C. (BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2001).

Os microorganismos podem advir dos seguintes parâmetros (HESPANHOL, 2002):

1. Resíduo Sólidos Totais: Os sólidos podem reter bactérias e resíduos orgânicos.

2. Turbidez: Devido a presença de sólidos em suspensão, tais como partículas inorgânicas (areia, silte, argila) e de detritos orgânicos, algas e bactérias, plâncton em geral.
3. Série de Nitrogênio (amônia, nitrato, nitrito e nitrogênio orgânico): Incorporação do nitrogênio por - fixação biológica advindo da atmosfera por bactérias e algas; fixação química que depende da presença de luz, amônia e nitratos nas águas (podem advir da lavagem da atmosfera poluída, drenagens de águas pluviais associadas as deficiências do sistema de limpeza pública).

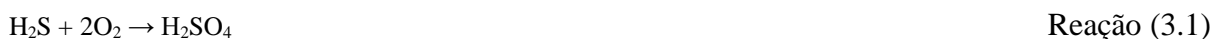
### ***3.4.3 Conceituação de Grupos Microbianos Presentes na Águas Utilizadas***

#### **- Bactérias Heterotróficas Aeróbia e Anaeróbia**

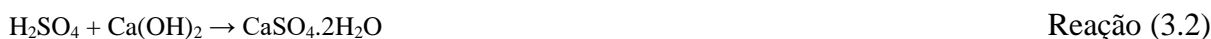
Como a água, o oxigênio (O<sub>2</sub>) atmosférico não é um nutriente e funciona apenas como receptor final de hidrogênio nos processos de respiração celular. O O<sub>2</sub> livre entra na célula por difusão e as bactérias têm comportamentos diferentes na sua presença. As bactérias aeróbias exigem a presença de oxigênio livre, já as anaeróbias não utilizam ou não toleram a presença de O<sub>2</sub> livre, podendo morrer rapidamente.

Tais bactérias são deletérias da microestrutura de materiais cimentícios ou metálicos, desenvolvendo os processos de degradação ou corrosão, respectivamente. Estes processos são chamados de biodeterioração.

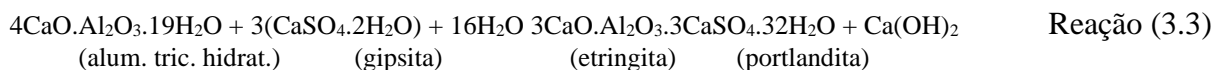
Em estruturas de saneamento encontra-se com bastante frequência o gás sulfídrico ou sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), resultante do metabolismo de sulfatos presentes no esgoto por bactérias anaeróbias. Trata-se de um gás fraco, que por si só é pouco nocivo ao concreto. Entretanto, quando se desprende do esgoto, é oxidado por bactérias aeróbias, presentes na superfície livre das estruturas, transformando-se em ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) (BAUER, 2000; BRANDAO, 2014), conforme reação 3.1.



O ácido sulfúrico produzido (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) é particularmente agressivo ao concreto, pois, na reação com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) da pasta de cimento, produz o sulfato de cálcio na forma de gesso ou gipsita (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), conforme a reação 3.2:



O sulfato de cálcio (na forma de gipsita), por sua vez, irá reagir com o aluminato tricálcico hidratado (C3A) (componente da pasta de cimento responsável pela resistência mecânica), produzindo etringita, conforme a reação 4, podendo gerar expansão, fissuração e desagregação do concreto.



#### - Bactérias Redutoras de Sulfato Aeróbias e Anaeróbias

As bactérias redutoras de sulfato (BRS) são microrganismos que conduzem a redução dissimilatória do sulfato, onde o íon sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) atua como um agente oxidante para a dissimilação da matéria orgânica. Estas bactérias são as únicas capazes de utilizar os compostos de enxofre (sulfato principalmente) como acceptor final de elétrons em sua respiração, tendo como produtos principais o sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (GOTTSCHALK, 1986).

As BRS são bactérias heterótrofas (ou seja, não produzem o próprio alimento), anaeróbios estritos (não usam o oxigênio para sua respiração), têm crescimento relativamente lento comparado aos demais organismos presentes no solo e na água, mas podem sobreviver em ambientes terrestres e aquáticos. Compõe-se de espécies mesofílicas (crescem em temperatura por volta de  $30^\circ\text{C}$ ) e espécies termofílicas (crescem em temperaturas entre  $50^\circ\text{C}$  e  $70^\circ\text{C}$ ) (POSTGATE, 1984).

No que tange os valores de pH, as BRS crescem em valor ótimo de 7,2, mas encontram-se também espécies que toleram ambientes altamente ácidos (pH 4) e alcalinos (pH 9,5). Destaca-se ainda a capacidade das BRS suportarem altas pressões, como valores em torno de 105 kPa (espécies barofílicas). Todas essas características demonstram a habilidade desse grupo de microrganismos para crescer em condições extremas e sua adaptabilidade a vários ambientes naturais (POSTGATE, 1984).

As BRS obtêm a energia necessária para o seu crescimento por meio da oxidação de matéria orgânica (proteínas ou lipídeos) ou do hidrogênio das águas residuais, reduzindo o sulfato em  $\text{H}_2\text{S}$ , de acordo com as reações 3.4 e 3.5:



Dois gêneros de bactérias foram conhecidos por muito tempo (Desulfovibrio e Desulfotomaculum), mas recentemente novos gêneros foram identificados (Desulfobacter,

Desulfonema e Desulfobulbus). O Gênero Desulfovibrio é mais conhecido porque seus membros são relativamente fáceis de isolar e purificar. São usualmente mesofílicos e gram-negativos (adquirem coloração vermelha na identificação). Recentemente foi identificado que as BRS podem tolerar a presença de oxigênio por períodos curtos, até no máximo 24h, o que faz com estas sejam as bactérias mais abundantes em águas residuais (HONDJUILLA MIOKONO, 2013).

Diferentes fatores influenciam na emissão de H<sub>2</sub>S produzido pelas BRS nas redes de esgoto: o pH das águas residuais (quanto mais ácido maior emissão), os efeitos mecânicos (quanto maior a turbulência maior a emissão), a presença de metal nas águas residuais (o H<sub>2</sub>S pode precipitar na presença de alguns metais, como ferro, cobre e chumbo) (ZHANG et al., 2008).

#### - Bactérias Acidofílicas

Os microrganismos acidófilos crescem de maneira ideal em ambientes com pH baixo (<3, no caso de acidófilos extremos), que podem variar em temperatura e concentrações de solutos dissolvidos (QUATRINI, 2016).

As bactérias do gênero Acidofílicas, *Acidophilium*, são células quimiotróficas (a capacidade de crescer usando doadores de elétrons inorgânicos) gram-negativas, não formam esporos, mesofílicas, ligadas a quimiotrofos, inibidas por certas concentrações de matéria orgânica (ARIAS et al., 2012). Essas bactérias podem viver em condições anaeróbias sob o mecanismo de troca iônica de compostos de ferro, favorecendo a lixiviação de sulfetos de cobre. Estas bactérias são caracterizadas por sua evolução à temperaturas entre 28 e 35 ° C. Utilizam o CO<sub>2</sub> como fonte de carbono e obtêm energia da oxidação de enxofre, ferro e sulfetos metálicos (Silverman, MP, 1959 e Mena, J. et al. 2003).

#### - Bactérias Oxidadoras de Sulfato Aeróbias

As bactérias oxidantes de enxofre (BOE) são bactérias quimioautotróficas (utilizam a energia das reações de oxidação de compostos inorgânicos para seu metabolismo), gram-negativas e de respiração aeróbia (precisam de oxigênio) (WAKSMAN e JOFFE, 1922). Elas obtêm a energia que necessitam para crescer oxidando compostos de enxofre como sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), enxofre elementar (S<sup>0</sup>), thiosulfato (S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>2-</sup>), tetrionato (S<sub>4</sub>O<sub>6</sub><sup>2-</sup>) e ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). A oxidação destes compostos é acompanhada por uma diminuição no pH (PARKER e PRISK, 1953).



Em 1945, Parker isolou de uma superfície de concreto deteriorada, pela primeira vez, as BOE e listou-as como sendo do gênero *Thiobacillus*, sendo, segundo o autor, a espécie *Thiobacillus concretivorus* a responsável pela deterioração do concreto. O autor constatou, então, que os danos encontrados nas redes de esgoto não eram causados pelo H<sub>2</sub>S e sim pelo ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) produzido por estas bactérias, por meio da oxidação do H<sub>2</sub>S, resultando em superfícies com pH abaixo de 1. Desde então cinco espécies do gênero *Thiobacillus* foram identificadas no processo de biodeterioração do concreto em redes de esgoto, dentre elas: *T. thioparus*, *T. novellus*, *T. neapolitanus*, *T. intermedius* e *T. thiooxidans* (ISLANDER et al., 1991) o que já foi confirmado por diversos autores (MORI et al., 1992; DAVIS et al., 1998; VINCKE et al., 1999; OKABE et al., 2007).

Segundo Kelly e Yood (2000), algumas espécies do gênero *Thiobacillus* sofreram uma reclassificação, baseada na composição de seu DNA, comparação da sequência genética e fisiologia.

Alguns membros deste gênero passaram a ser identificados como:

1. *Acidithiobacillus*: são as espécies *Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus caldus* e *Thiobacillus albertensis*.
2. *Halothiobacillus*: são as espécies *Thiobacillus neapolitanus*, *Thiobacillus halophilus* e *Thiobacillus hydrothermalis*.
3. *Thermithiobacillus*: é a espécie *Thiobacillus tepidarius*.

A espécie isolada por Parker (1945a) *Thiobacillus concretivorus* foi considerada sinônimo da espécie *Thiobacillus thiooxidans*, sendo retirada da lista oficial de espécies.

Segundo Pikaar (2014), a presença de cada uma das espécies no meio depende da disponibilidade de nutrientes e do pH da superfície do concreto. Entre estas espécies existem as bactérias oxidantes de enxofre neutrófilas (BOEN), as quais crescem em locais com pH mais básico e as bactérias oxidantes de enxofre acidófilas (BOEA), as quais crescem em locais com pH mais ácido.

As BOEN não representam risco imediato para a estrutura, porém agem como potencializados da sucessão de BOEA. Estas, por sua vez, estão associadas à deterioração severa do concreto (VINCKE et al., 1999; DAVIS et al., 1998).

As BOEN incluem as espécies *T. thioparus*, *T. novellus*, *H. neapolitanus*, *T. intermedius*, apresentam uma faixa de pH de crescimento entre 1,0 e 1,9. Já as BOEA compreendem as espécies *A. thiooxidans* e possuem um intervalo de pH de crescimento entre 0,5 e 4, descrito na tabela 3.9 (OKABE et al., 2007; ROBERTS et al., 2002; MORI et al., 1992).

Tabela 3.9 – Características de crescimento das BOE

Espécie	pH	pH ótimo	Temperatura ótima (°C)	Fonte de Enxofre
<i>T. thioparus</i>	4,5 a 10	7	28 a 30	H <sub>2</sub> S, S <sup>0</sup> , S <sub>4</sub> O <sub>6</sub> <sup>2-</sup> , S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
<i>T. novellus</i>	5,7 a 9	7	28 a 30	H <sub>2</sub> S, S <sup>0</sup> , S <sub>4</sub> O <sub>6</sub> <sup>2-</sup> , S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
<i>T. intermedia</i>	1,9 a 9	6,4 a 6,8	28 a 30	S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
<i>H. neapolitanus</i>	3 a 8,5	6	28 a 30	H <sub>2</sub> S, S <sup>0</sup> , S <sub>4</sub> O <sub>6</sub> <sup>2-</sup> , S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
<i>A. Thiooxidans</i>	0,3 a 4	2 a 3,5	28 a 30	H <sub>2</sub> S, S <sup>0</sup> , S <sub>4</sub> O <sub>6</sub> <sup>2-</sup>

Fonte: Adaptado pelo autor de Honjulila (2013)

#### - Bactérias Precipitadoras de Carbonato Aeróbias

A biomineralização é o processo perante o qual organismos vivos sintetizam minerais inorgânicos, tal como as bactérias precipitadoras de carbonato. A precipitação de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) é um exemplo conhecido de biomineralização promovida por células bacterianas e suas respectivas atividades metabólicas. Na precipitação de carbonato de cálcio induzida microbiologicamente os micro-organismos são capazes de secretar um ou mais produtos metabólicos que reagem com íons cálcio no ambiente resultando na precipitação de minerais (DHAMI et al., 2013a).

A biomineralização pode produzir diferentes fases de polimorfos anidros de carbonato de cálcio tais como calcita, aragonita e vaterita, bem como fases cristalinas hidratadas tais como monohidrocalcita, ikeita, e carbonato de cálcio amorfo (ACC) (DHAMI et al., 2013b; ANBU et al., 2016).

Dentre estes, vaterita e calcita são os polimorfos de carbonato de cálcio bacterianos mais comuns. A vaterita é uma fase menor, metaestável e transitória durante a formação de calcita. A calcita é o polimorfo de CaCO<sub>3</sub> mais termodinamicamente estável sendo o produto primário de CaCO<sub>3</sub> em diversos MICPs (DHAMI et al., 2014; GANENDRA et al., 2014).

O processo de precipitação de carbonato de cálcio induzida microbiologicamente (MICP, originário da língua inglesa, *microbially induced calcium carbonate precipitation*) é uma técnica efetiva e ambientalmente correta que pode ser aplicada em diversas formas, incluindo a remediação de íons cálcio, radionucleotídeos e metais potencialmente tóxicos, sequestro de CO<sub>2</sub>, restauração de calcário em prédios históricos, bio-estabilização de solos e taludes, biocimentação, proteção da superfície de argamassas e concreto, remediação de fissuras dentre outras aplicações (ABO-EL-ENIEN et al., 2013; CUNNINGHAM et al., 2013; PHILLIPS et al. 2013; MANI : KUMAR, 2014; RODRIGUEZ-NAVARRO et al., 2015).

De acordo com pesquisa realizada por De Muynck et al (2010), a precipitação de carbonato de cálcio por bactérias via hidrólise da ureia é um método mais amplamente utilizado, que pesquisadores Jiannng et al. em 2016 demonstraram sendo um processo químico controlado por quatro fatores a seguir:

1. Concentração de carbono inorgânico dissolvido (sequestro do carbono via dióxido de carbono);
2. Concentração dos íons cálcio;
3. pH; e
4. Presença de sítios de nucleação.

O quarto fator não é crucial, pois as bactérias podem se comportar como sítios ativos de nucleação (REIS et al., 2017).

O tipo de bactéria é essencial para a capacidade de produção da enzima urease. Várias bactérias produtoras de urease têm sido estudadas tais como *Aerobacter aerogenes*, *Bacillus megaterium*, *B. flexus*, *B. firmus*, *B. subtilis*, *B. cereus*, *Bacillus sp.*, *B. thuringiensis*, *Pseudomonas azotoformans*, *Sporosarcina pasteurii*, *S. soil* e *Artrhobacter crystallopoietes* (DHAMI et al., 2013b; GOROSPE et al., 2013; JAGADEESHA KUMAR et al., 2013; ACHAL e PAN, 2014; KANG et al., 2014; NONAKARAN et al., 2015; YANG et al., 2016; ZHU et al., 2016).

#### - Bactérias Produtoras de Esporos Aeróbias

Segundo Niall e Halket (2011), o termo esporulação bacteriana (*Bafes*) é utilizado para designar espécies que possuem a capacidade de, após uma intrincada sequência de eventos de diferenciação celular, produzir células metabolicamente dormentes e altamente resistentes, que podem germinar dentro de segundos quando as condições externas se tornam favoráveis. Suas características estão apresentadas no item 2.6.

#### - Bactérias do Grupo dos Coliformes Aeróbias

As bactérias do grupo coliforme são *Gram negativa*, que inclui os gêneros *klebsiella*, *Echerichia*, *Serratia*, *Erwenia* e *Enterobactéria*, predominantemente em colônias de cor amarela opaca, e só produzem ácido (BANNISTER et al., 2006).

Herson et al. (1991), provou que a presença de coliformes e outros organismos nativos são capazes de se acumular nas superfícies internas de tubulações, isto é, microorganismos entre a superfícies internas da tubulação e a água no seu próprio meio. As altas densidade de bactérias nas superfícies internas não pode ser detectadas por procedimentos padrão de determinação de qualidade de água que são baseados em amostras tomadas no meio aquoso constatadas por LeChevallier (1990).

### - Fungos

Dada a diferença nos mecanismos de sobrevivência, as bactérias são confinadas a microambientes, como nichos especialistas presentes nos poros da matriz do material ou ligados a superfícies em biofilmes (DAVEY e O'TOOLE, 2000), em comparação com fungos filamentosos (chamado de Bolor) que normalmente estão mais sujeitos às intempéries (SIMARD et al., 2012), em especial a temperatura (10°C a 35°C) e a umidade (ALUCCI et al., 1988). Sugere-se que (i) a redundância funcional é maior nos fungos e que (ii) tanto as diversidades de espécies e funcional na base de dados de códigos de genes de proteínas com anotações taxonômicas (nível 3 de KO da Uniprot, <https://www.uniprot.org/>) são maiores nas bactérias (STARKE et al., 2019).

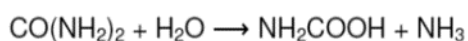
Os materiais da construção civil que sofrem biodeterioração pela ação dos fungos, alteram sua aparência visual devido a modificação de sua superfície, ocasionado pela ação de ácidos orgânicos e inorgânicos, que são produzidos durante o seu metabolismo e também pela penetração das *hyphae* (em português hifas) até 8,0 mm de profundidade, na estrutura cristalina dos materiais (PINHEIRO, 2003).

A atividade biológica é muito limitada em ambientes com pH elevado. Entretanto, algumas pesquisas identificaram a presença de fungos que podem também contribuir para a fase inicial da redução do pH do concreto, possibilitando o crescimento de bactérias oxidantes de enxofre acidófilas (BOEA), por meio da produção de vários ácidos, tais como ácidos acético, oxálico e glicurônico, além de poderem, por si só, causar danos graves ao concreto (GU et al., 1998; MORI et al., 1992; PINHEIRO, 2003). A duração desta fase pode ser de meses ou anos, dependendo da concentração de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S no meio, além de outros fatores ambientais, tais como temperatura e umidade relativa (DAVIS et al., 1998; KEMPFER e BERNDT, 1999; MONTENY et al., 2000; HERISSON, 2012; WELLS e MELCHERS, 2014; JIANG et al., 2015).

#### **3.4.4 Apresentação da hidrolização da Ureia**

A hidrolização da ureia está apresentada nas reações 3.1 a 3.5, conforme descrito a seguir, e as ilustrações das placas no anexo C2.

A urease, ao hidrolisar a ureia, produz amônia e carbamato, apresentado na reação química 3.1:

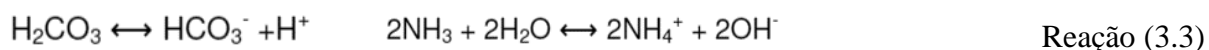


Reação (3.1)

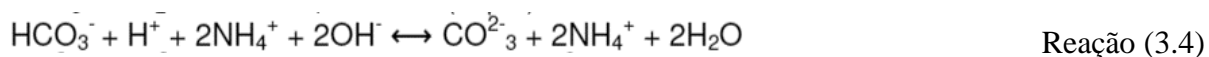
Que se hidrolisam espontaneamente para produzir outra molécula de amônia e ácido carbônico, apresentado na reação 3.2:



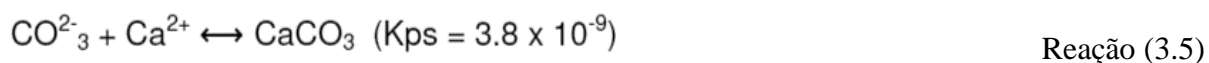
Estes produtos equilibram-se em meio aquoso formando bicarbonato e amônio, além de íons hidróxido que resultam na elevação do pH, apresentado na reação 3.3:



Esta alteração do pH pode alterar o equilíbrio do bicarbonato, gerando íons carbonato, como apresentado na reação 3.4:



E por fim, os íons de carbonato na presença de íons solúveis de cálcio, precipitam como carbonato de cálcio, como apresentado na reação 3.5:



## 4. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND COM ÁGUA RECUPERADA

### 4.1 Revisão Literária

A água, além de um componente vital a vida, é, juntamente com o cimento, imprescindível para produção de materiais cimentícios, pois produz uma matriz resistente que aglutina os agregados e confere a compacidade da matriz, dotando as estruturas de durabilidade e vida útil previstas em projeto. À luz do conhecimento atual, não é possível emitir uma especificação para água na produção de concreto, mas apenas para os métodos de teste dessa água (BSI, 1980).

Geralmente, qualquer água natural potável sem sabor ou odor pronunciado é considerado adequado para uso como água de mistura na produção de concreto (WHITE, 1991). Vários estudiosos, dentre eles Abrams (1924), Mamlouk e Der Merwe (1999), apresentaram em seus estudos que o uso de água não potável para o amassamento de concreto apresentou bons resultados. A qualidade da água de amassamento desempenha um papel significativo no concreto, pois impurezas presentes podem interferir com o tempo de endurecimento do cimento, podendo afetar a retração da secagem, a durabilidade e também podem levar à corrosão. Por esse motivo, a adequação da água para fins de mistura e cura deve ser considerado importante (NEVILLE, 1995). Desta forma monitorar sua qualidade é imprescindível (CIBECI

e SAATCI, 1989; MUJAHED, 1989; EL-NAWAWY e AHMAD, 1991; CHINI et al., 1999; TAHA et al. 2005; AL-JABRI et al., 2010).

Neville (2000) revisou extensivamente a literatura sobre o uso de águas residuais no concreto, e concluiu que muito trabalho deve ser feito e que é necessário revisar os padrões existentes sobre a qualidade da água à luz dos vários tipos de materiais cimentícios e aditivos redutores de água.

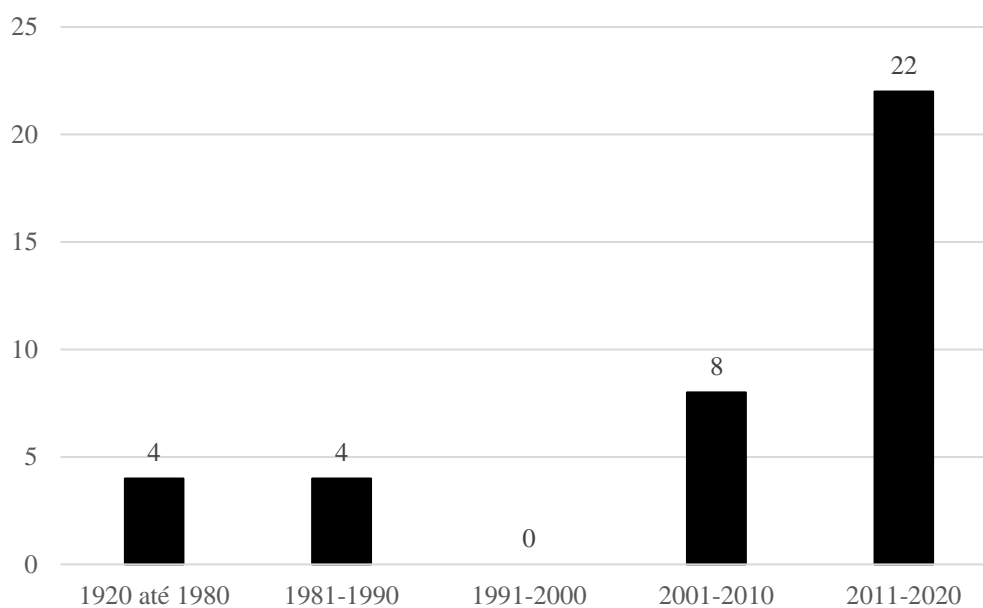
No levantamento bibliográfico realizado com aderência a pesquisa desenvolvida, onde buscou-se utilizar efluentes tratados ou não, oriundo de sistemas de esgotamento sanitário predominantemente de origem doméstica, para produção de concreto estrutural, identificou-se cerca de 34 trabalhos, sendo 2 teses de doutorado, 1 dissertação e 31 artigos correlatos, totalizando 34 publicações (nacionais e internacionais).

Em 1924 o engenheiro pesquisador Abrams foi o pioneiro no estudo de investigação de qualidade da água de amassamento, com o trabalho de título “*Tests of impure waters for mixing concrete*“, um *best seller*, avaliando em seu estudo todos os tipos de água de várias cidades norte americanas (curtume, industriais, salobra, marinha, efluente de esgoto bruto e tratado, potável, dentre outros). Esta pesquisa teve o apoio do *American Concrete Institute* (ACI), aonde estabeleceu-se os posteriores normativos no setor em todo mundo, servindo de referência por mais de 6 décadas. Até que em 1987, em Singapura, Tay e Yip realizaram estudo sobre “*Use of Reclaimed Wastewater for Concrete Mixing*“, sendo originalmente atribuído o “jargão” água recuperada para os efluentes domésticos utilizados à indústria da construção civil, em especial para produção de concreto. Em 1987 foram realizadas duas pesquisas na área, sendo uma delas já com a utilização do lodo do reator de tratamento de esgoto, em Singapura.

Já de 1990 a 2010 foram realizadas mais 9 pesquisas, sendo uma dissertação de mestrado e a outra tese de doutorado, sendo Brasil e Austrália, respectivamente. Na tese publicada, apesar da abordagem do uso de efluentes domésticos tratados para produção de concreto, finalizou o estudo dando ênfase às águas de lavagem, e o primeiro trabalho a investigar por métodos não convencionais à época, a cromatografia de líquidos. Já a dissertação não foi conclusiva. Vale ressaltar que em uma década, a partir de 1990, realizou-se somente uma pesquisa, aonde foi desenvolvida neste período, em Qatar, até 2001.

Partir de 2011, várias pesquisas foram desenvolvidas, total de 22 trabalhos, sendo apenas uma tese em 2018, realizada no Brasil, investigando o poder antimicrobiano do cimento. No gráfico 4.1 apresenta os estudos desenvolvidos correlatos ao tema a cada década.

Gráfico 4.1 – Evolução temporal de estudos correlatos ao tema da pesquisa



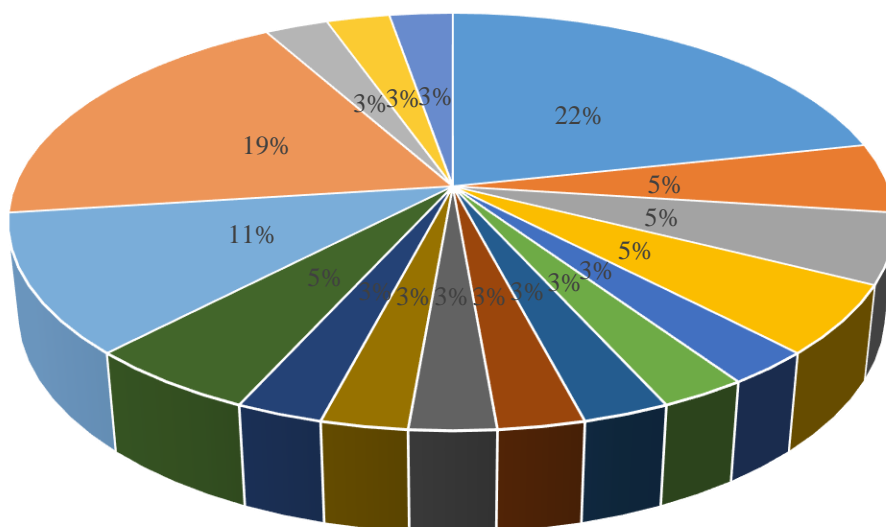
Fonte: Elaborado pelo autor de repositórios das universidades do Brasil, Google Scholar, ACADEMIA.edu, *Science Direct*, *Research Gate*, Scielo, *Material Research*, Elsevier, Scopus, ACI (2014 a 2020).

Nos gráficos 4.2 e 4.3, estão apresentados os países e continentes aonde tais estudos foram realizados. Na tabela 4.1 apresenta a tabela com o levantamento realizado em temas correlatos a pesquisa desenvolvida.

Assim está abordado a seguir os aspectos de qualidade da água para uso em concreto e cenário normativo vigente quanto a água para amassamento.

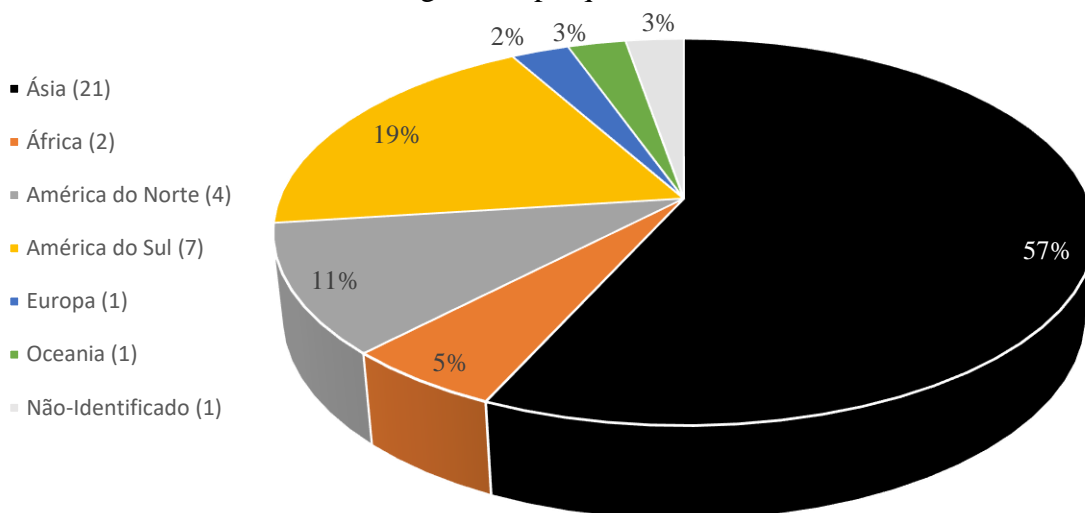
Gráfico 4.2 – Locais de origem das pesquisas realizadas

- Índia (8)
- Jordania (2)
- Malaysia (2)
- Singapura (2)
- Arabia Saldita (1)
- Irã (1)
- Kuwait (1)
- Paquistão (1)
- Catar (1)
- Taiwan (1)
- Oman (1)
- Nigéria (2)
- Estados Unidos (4)
- Brasil (7)
- Alemanha (1)
- Australia (1)
- Não-Identificado (1)



Fonte: Elaborado pelo autor de repositórios das universidades do Brasil, Google Scholar, ACADEMIA.edu, *Science Direct*, *Research Gate*, Scielo, *Material Research*, ACI (2014 a 2020).

Gráfico 4.3 – Continentes de origem das pesquisas realizadas



Fonte: Elaborado pelo autor de repositórios das universidades do Brasil, Google Scholar, ACADEMIA.edu, Science Direct, Research Gate, Scielo, Material Research, ACI (2014 a 2020).

Tabela 4.1 – Levantamento bibliográfico realizado (Continua)

Local	Ano da Publicação	Estudo	Autores
Alemanha	2003	<i>Influence of recycled water from fresh concrete recycling systems on the properties of fresh and hardened concrete</i>	RICKERT; GRUBE
Arábia Saudita	2008	<i>Testing of Treated Effluent for Use in Mixing and Curing of Concrete</i>	SARICIMEN; SHAMEEM; BARRY; IBRAHIM
Austrália	2010	<i>Analysis of alternative water sources for use in the manufacture of concrete</i>	MC CARTHY
Brasil	2019	Estudo de caso: uso de água recuperada na construção civil	BRANDAO et al.
	2008	Utilização de esgoto tratado em sistema de lagoas de estabilização como água de amassamento e cura do concreto	SILVA
	2018	Uso de água recuperada para produção de concreto	BRANDÃO et al.
	2019	Avaliação da viabilidade técnica do uso de água residuárias como água de amassamento	DA SILVA
	2018	Averiguação da viabilidade técnica do uso de água residuárias como água de amassamento para concreto	BRANDAO et al.
	2018	Avaliação da viabilidade técnica do uso de água residuárias como água de amassamento para concreto	SILVA et al.
	2018	Avaliação da ação antimicrobiana do cimento Portland (AACP) e do desempenho do concreto produzido com esgoto doméstico tratado e bruto	ARY JUNIOR

Legenda: NI\*: Não Identificado.

Fonte: Elaborado pelo autor de repositórios das universidades do Brasil, Google Scholar, ACADEMIA.edu, Science Direct, Research Gate, Scielo, Material Research, Scopus, ACI (2014 a 2020).



Tabela 4.1 – Levantamento bibliográfico realizado (Continuação)

Local	Ano da Publicação	Estudo	Autores
Índia	2016	<i>Feasibility as mixing water in cement</i>	BABU; RAMANA
	2014	<i>Study on Behavior of Paper Industry Treated Effluent as Mixing Water in Concrete for Pollution Control and Sustainable Development.</i>	ARUNVIVEK; PREETHA; BRAGADEESWARAN; MAHENDRAN
	2015	<i>Study the Feasibility of Use of Gray Water in Concrete</i>	ALRADHAWI; ANGALEKAR
	2015	<i>Experimental Investigation on Usage os Gray Water in Concrete Production</i>	ABDUL RAZAK; VENAKATESH
	2015	<i>Used of treated domestic effluent as mixing water for concrete: Effect on strength and water penetration at 28 days</i>	SWAMI; SARKAR; BHATTACHARJEE
	2014	<i>Curing of concrete with wastewater and curing compounds: Effect on strength and water absorption</i>	SARKAR; MIRETU; BHATTACHARJEE
	2014	<i>Investigations on ways for sustainable development by recycling treated wastewater in cement mortar</i>	GIRISH; PATHAK
	2018	<i>Effects of sulfates on cement and fly ash mortar made with treated domestic wastewater</i>	BABU; KUMAR
Iran	2012	<i>Use of biologically treated domestic waste water in concrete</i>	SHEKARCHI; YAZDIAN; MEHRDADI
Jordânia	2014	<i>Assessment of Replacing Wastewater and Treated Water with Tap Water in Making Concrete Mix</i>	MAHASNEH
	2016	<i>Domestic wastewater reuse in concrete using bench-scale testing and full-scale implementation</i>	GHRAIR; AL-MASHAQBEH
Kuwait	2003	<i>Mechanical properties of concrete made with treated wastewater at ambient and elevated temperatures</i>	TERRO; AL-GHUSAIN
Malásia	2001	<i>Reusing treated effluent in concrete technology</i>	LEE; SALIM; ISMAIL. ALI
	2016	<i>Efeito nas propriedades do concreto do uso de chorume como água de amassamento</i>	KADIR
NI*	1989	<i>Domestic Sewage as Mixing Water in Concrete</i>	CEBEI; SAATCI
Nigéria	2015	<i>Effects of sugar factory wastewater as mixing water on the properties of normal strength concrete</i>	GADZAMA et al.
	2019	<i>Total Dissolved Solids in Water in Makurdi along Benue Valley-Nigeria: Effects on Potability and Compressive Strengths of Solid Concrete</i>	AHIABA; IGOMU
Omã	2011	<i>Effect of using Wastewater on the Properties of High Strength Concrete</i>	AL-JABRI et al.
Paquistão	2019	<i>Impact analysis of water quality on the development of construction materials</i>	FARID et al
Qatar	1990	<i>Use of Treated Effluent in Concrete Mixing in na Arid Climate</i>	EL-NAWAWY; AHMAD
Singapura	1987	<i>Use of Reclaimed Wastewater for Concrete Mixing</i>	TAY; YIP
	1989	<i>Reclamation of Wastewater and Sludge for Concrete Making</i>	TAY

Legenda: NI\*: Não Identificado.

Fonte: Elaborado pelo autor de repositórios das universidades do Brasil, *Google Scholar*, *ACADEMIA.edu*, *Science Direct*, *Research Gate*, *Scielo*, *Material Research*, *Scopus*, *ACI* (2014 a 2020).

Tabela 4.1 – Levantamento bibliográfico realizado (Conclusão)

Local	Ano da Publicação	Estudo	Autores
Taiwan	2001	<i>Effect of wash water and underground water on properties of concrete</i>	SU; MIAO; LIU
USA	1920	<i>Effect of tannic acid on the strength of concrete</i>	ABRAMS
	1924	<i>Tests of impure waters for mixing concrete</i>	ABRAMS
	1960	<i>Concrete mix – How impure can it be?</i>	STEINOUR
	2010	<i>Sustainable use of recourced - Recycling os sewage treatment plant water in concrete</i>	SILVA; NAIK

Legenda: NI\*: Não Identificado.

Fonte: Elaborado pelo autor de repositórios das universidades do Brasil, *Google Scholar*, *ACADEMIA.edu*, *Science Direct*, *Research Gate*, *Scielo*, *Material Research*, *Scopus*, *ACI* (2014 a 2020).

## 4.2 Impacto das Impurezas Presentes na Água

As impurezas químicas dissolvidas e seus limites e possíveis efeitos adversos no concreto, não estão disponíveis nos padrões indiano, australiano, americano e britânico, sendo:

- a. A água natural ou água doce raramente contém mais de 2000 ppm de sólidos dissolvidos e geralmente é adequada para a fabricação de concreto.
- b. A água contaminada com resíduos industriais, mas livre de sólidos em suspensão, também é adequada em baixas concentrações para a fabricação de concreto.
- c. Teores muito maiores de impurezas na água natural podem ser tolerados, exceto os carbonatos e bicarbonatos alcalinos, que podem ter efeitos significativos ainda menores ou iguais a 2.000 ppm.
- d. As outras impurezas inorgânicas de possível origem industrial, que podem ser prejudiciais em concentrações moderadas, como sulfetos, iodetos, fosfatos, arseniados, boratos e compostos de chumbo, zinco, cobre, estanho e manganês, afetam negativamente as propriedades do concreto.
- e. As impurezas orgânicas também tendem a alterar as propriedades do concreto, principalmente no açúcar.

Tay e Yip (1987) estudam o efeito das águas residuais nas propriedades do concreto. A partir deste estudo, as águas residuais da Jurong Industrial foram coletadas e misturadas à potável nas seguintes proporções 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, mantendo a relação água/cimento 0,6. As idades de cura 3, 7, 21 e 28 são considerados para o teste de resistência à compressão. Para estudar o efeito a longo prazo das águas residuais na resistência à compressão, duas misturas são retiradas da água potável e outras de 100% de reposição da água potável com

cura por 3 meses, 6 meses e 12 meses. O resultado mostra um aumento geral na resistência à compressão, com o aumento na porcentagem de águas residuais recuperadas varia de 8% a 17%. O uso de águas residuais para a mistura de concreto parece influenciar o desenvolvimento de resistência do concreto em idades mais precoces, por idades de 3 meses e além do efeito, foi insignificante.

Neville (1994) especificou que a água potável pode ser inadequada como água de mistura quando a água contém uma alta concentração de sódio ou potássio, o que leva ao perigo de reação de agregados alcalinos. Embora o uso de água potável seja geralmente seguro, a água não adequada para beber também pode ser usada satisfatoriamente na fabricação de concreto. Como regra, qualquer água com pH de 6,0 a 8,0 que não tenha sabor salino ou salobra é adequada para uso. Cor e odor não significam necessariamente que substâncias nocivas estão presentes na água. As águas naturais levemente ácidas são inofensivas, mas as que contêm ácidos húmicos ou outros ácidos orgânicos podem afetar adversamente a resistência do concreto.

Gaynor (1998), Pakshir e Esmaili (1998) realizaram uma investigação para estudar a influência de diferentes cátions e íons cloreto na corrosão do concreto armado. Existem duas misturas diferentes, sendo a primeira com diferentes concentrações de cloretos de cálcio e sódio foram misturadas com água e as atividades de corrosão estudadas com processo de corrosão normal e acelerada. Na segunda mistura, amostras de concreto semelhantes foram expostas a soluções de diferentes concentrações de íons cloreto. Resultados foram observados que, o aumento da concentração de cloreto de sódio, aumenta a suscetibilidade à corrosão. A amostra em solução de NaCl a 0,1% mostra resistência máxima à corrosão após 60 dias de exposição. O íon cloreto presente na água pode atuar como um catalisador para a oxidação do ferro através da formação do complexo  $\text{FeCl}_3$ , que é instável e pode ser arrastado para a solução, onde reage com os íons hidróxido disponíveis para formar  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ . Isso resulta na liberação de íons Cl de volta na solução e no consumo de íons hidroxila, como mostrado, nas reações 4.1 e 4.2, a seguir:



Por causa do  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  em solução que resulta em menor pH, isso reduz o filme de óxido e permite uma penetração mais fácil dos íons cloreto, o que acaba resultando em aumento da corrosão.

Os estudiosos Peter A Claisse, Hanaa I Elsayad e Ibrahim G Shaaban (1999) realizaram uma investigação para estudar o efeito da carbonatação na permeabilidade e na estrutura dos poros do concreto. Dois diferentes traços de concreto foram realizados com diferentes relações água por cimento, sendo adotado a cura úmida e seca, e posteriormente expostos em câmara de carbonatação (5% de CO<sub>2</sub>) a 140 dias. Prismas foram moldados com as dimensões 50 x 50 x 300 mm para o estudo do grau de carbonatação e cubos de 150 mm para medição do índice de impermeabilidade, volume de poros e resistência à compressão do concreto. Os resultados mostram que o índice de impermeabilidade afeta as propriedades de resistência e a cura do concreto; a maior profundidade de carbonatação apresentaram baixa resistência e concreto curado a ar. A carbonatação reduz a permeabilidade e a porosidade. A redução foi maior no concreto de baixa qualidade. Quando comparada com os outros efeitos da carbonatação, a redução na permeabilidade é semelhante à redução na resistividade elétrica, justificada pela baixa permeabilidade e porosidade causada pela cura com a câmara de carbonatação até 28 dias. A carbonatação por íons de CO<sub>2</sub> não está abordada por nenhuma norma nacional ou internacional. A carbonatação reduz a permeabilidade e a porosidade, reduzindo conseqüentemente a resistividade elétrica, com efeito, tal reação química ocorre entre o dióxido de carbono atmosférico e os produtos de aplicação de hidratação, particularmente o Ca(OH)<sub>2</sub>, de acordo com a reação 4.3 e 4.4, a seguir:



Assim, é aceitável que os outros produtos de hidratação, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e até os compostos residuais de cimento não hidratados, presentes em todo o concreto, também causam carbonatação do concreto. (KUCCHE, 2015)

Lee (2001) descreveu que águas ácidas devido à presença de dióxido de carbono não combinado, de ácidos orgânicos ou inorgânicos é mais agressiva em sua ação, o grau e a taxa de ataque aumentando à medida que a acidez aumenta. Soluções ácidas que atacam argamassas de cimento ou concretos pela dissolução de parte do cimento endurecido não causam nenhuma expansão, mas enfraquecem progressivamente o material pela remoção do componente de cimentação.

Já Homam et al. (2001) realizaram uma investigação para estudar o efeito da durabilidade de polímero de fibra reforçada (FRP) e concreto FRP (CFRP). Os parâmetros ambientais aos quais as amostras foram submetidas incluem: ciclo de congelamento-degelo e variação de temperatura com soluções de Na(OH) com concentrações de pH 10, pH 12 e pH

13,7. As amostras compreendem cilindros de concreto envolto em FRP e prismas de concreto ligado a FRP. Os testes realizados nas amostras examinaram a influência de várias condições ambientais nos efeitos restritivos das bandas de FRP e no desempenho das ligações de FRP ao concreto. Os resultados indicam que o espécime exposto a ambientes alcalinos baixos, pH 10, tem efeitos mínimos nas propriedades de confinamento. No entanto, em ambientes alcalinos altos, a resistência de união e o degelo por congelamento são afetados negativamente.

Segundo Kosmatka (2002), pequenas quantidades de sacarose, entre 0,03% e 0,15% em massa de cimento, geralmente atrasam a pega do cimento, sendo o limite superior deste intervalo dependendo do tipo de cimento. A presença de açúcar, em uma concentração superior a 0,25% pode causar endurecimento rápido e uma redução substancial na resistência as 28 dias. Ainda conforme estudioso, cada tipo de açúcar tem influência no tempo de pega e resistência de forma diferente. Abaixo de 500 ppm de açúcar presente na água não apresenta efeito adverso na resistência. Acima desta concentração, deve fazer testes de tempo de pega e resistência, conclui o estudioso. Geralmente as águas industriais apresentam 4.000 ppm de sólidos totais, assim quando utilizada como águas de amassamento a resistência não é afetada entorno de 10% a 15%. Considerando que os elementos presentes na indústria não são totalmente conhecidos, recomenda-se realizar testes de resistência, tempos de pega e reação álcali-agregado quando os sólidos incomuns for acima de 100 ppm (KOSMATKA, 2002). Ainda segundo Kosmatka (2002) a presença de sólidos totais dissolvidos nas águas de amassamento em concentração inferior a 2.000 ppm, geralmente pode ser utilizada satisfatoriamente para a fabricação de concreto. Informações adicionais sobre os efeitos das impurezas da água de amassamento podem ser encontradas em Steinour (1960) e Abrams (1924), pois foram discutidos mais de 100 diferentes compostos e íons.

Reddy e Rao Sudarsana (2004) estudaram o efeito da alcalinidade no tempo de endurecimento e no desenvolvimento da resistência do concreto com cinzas volantes, sendo avaliado sob as condições do laboratório. Os resultados indicam que, os tempos de endurecimento inicial e final são atrasados ou postergados, dependendo do tipo de alcalinidade conferida pelo carbonato de sódio ou bicarbonato de sódio. O bicarbonato de sódio, quando presente na água, atrasou o tempo de endurecimento inicial e final, quando seu conteúdo é igual a 4 mg/L e 6 mg/L, respectivamente. A diminuição das resistências à compressão e tração com aumento da concentração de carbonato de sódio e bicarbonato de sódio com concentração superior a 6 mg/L e 10 mg/L, respectivamente.

Smaoui et al. (2005) estudaram o efeito do aumento do conteúdo alcalino do concreto com 0,6% e 1,25% de  $\text{Na}_2\text{O}_3$  por peso da massa de cimento, adicionando NaOH à

água. Os resultados mostram que existem efeitos nocivos nas propriedades mecânicas, como resistência à compressão e resistência ao gelo-degelo do concreto fabricado com uma relação de água-cimento de 0,41. Testes de contração mostram que o concreto com baixo teor de álcalis diminui mais do que o concreto com alto teor de álcalis. Os testes de congelamento e descongelamento realizados em concretos com arraste de ar mostram que os dois corpos de prova resistem mais ao congelamento e ao degelo. Quando examinados ao microscópio eletrônico de varredura, os hidratos dos dois corpos de prova apresentam microestrutura semelhante; no entanto, o concreto com alto teor de álcalis mostra uma microtextura mais reticular e porosa, o que resulta na redução da resistência à compressão.

Fanand et al. (2006) realizaram um experimento sobre resistência à compressão de concreto corroído, com o teste de corrosão acelerada. Soluções corrosivas, incluindo solução de ácido hidrúlico com pH 2 e 3, solução de NaCl 10% e 20% de água, solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10% e 20% de água, são usadas como meio corrosivo. Em seguida, as propriedades mecânicas de todas as amostras corroídas são testadas, respectivamente. As propriedades mecânicas das amostras corroídas são: resistência à compressão, relação tensão-deformação e módulo de elasticidade.

Low et al. (2007) teve como objetivo definir os limites e extensão em que a água de chorume à base de cimento da dosadora de concreto pode ser reciclada e totalmente reutilizada para a fabricação de concreto sem a necessidade de tratamento adicional. O estudo enfocou os efeitos do uso dessa água de mistura nas propriedades frescas e endurecidas do concreto, com referência aos critérios de aceitação das normas existentes ASTM C94-98C e BS 4550:1978. Os resultados mostraram que o concreto produzido com água de chorume foi capaz de atingir o desempenho critérios em termos de resistência à compressão, tempo de endurecimento e retração por secagem, quando ao peso específico da água da lama utilizada foi menor que 1,03 e o pH da amostra de água entre 12,3 e 13,3.

McPolinand et al. (2009) realizaram uma investigação sobre a medição do grau de carbonatação e a alteração do valor do pH. As argamassas foram fundidas com cimento Portland comum, cinza combustível pulverizada, escória granulada de alto forno, metacaulim e microsilica. As argamassas foram expostas a um ambiente rico em dióxido de carbono com 5% de CO<sub>2</sub> em peso de cimento para acelerar a carbonatação. A carbonatação resultante foi medida usando o indicador de fenolftaleína e análise termogravimétrica. Isso indica que a redução no valor do pH não é a esperada para 10 semanas de exposição na cura do ambiente com dióxido de carbono a 5%. Isso aconteceu devido ao alto conteúdo de material cimentício; havia mais hidróxido de cálcio e outros compostos que controlam o pH da água, como óxidos

de potássio e sódio. O pH da argamassa é constante na profundidade em que o dióxido de carbono não é capaz de penetrar no concreto. E, portanto, o valor do pH e o grau de carbonatação é uma função do design da mistura.

Alaejos e Bermudez (2010) estudaram o efeito da cura da água do mar nas propriedades do concreto armado. Os testes realizados foram: resistência à compressão, porosidade, taxa de penetração de cloretos e capilaridade. O resultado mostra que a cura com água do mar não afeta a resistência à compressão ou a porosidade de amostras de concreto produzidos com cimento resistente ao sulfato (RS). No entanto, aumenta a concentração de cloreto na superfície do concreto, o que resulta em efeitos higroscópicos e leva à absorção de água e sucção capilar. Os coeficientes de penetração do cloreto são inicialmente mais altos nos concretos de cura da água do mar, mas à medida que o tempo aumenta, a curva se torna constante. Pode existir vários tipos de óleos presente na água de amassamento, sendo os óleos minerais, não misturados com óleos animal e/ou vegetal, não afetam no ganho de resistência ao longo do tempo. No entanto, óleos minerais acima de 2,5% em massa de cimento podem reduzir a resistência em mais de 20%. Os demais óleos, tais como de origem animal ou vegetal, tem efeitos sobre as propriedades do concreto (SILVA e NAIK, 2010).

Reddy et al. (2011) investigaram o efeito do chumbo ( $Pb^{+}$ ) presente na mistura de água na resistência à compressão, tempos de endurecimento, consistência e ataque de sulfato de sódio em argamassas de cimento de alta resistência. As amostras de argamassa de cimento foram produzidas usando água deionizada e a concentração conhecida de chumbo, ou seja, 10, 50, 100, 500, 1.000, 2.000, 3.000, 4.000 e 5.000 mg/L, enquanto as amostras de argamassa de cimento produzidas com água deionizada usada para fins de referência. Em comparação com amostras de referência, em concentrações mais altas de chumbo na água, as amostras de teste haviam demonstrado considerável perda de força e também os tempos de pega aumentou significativamente. Contudo, na concentração de 2000 mg/L de chumbo, a resistência à compressão e o tempo de endurecimento aumentaram ligeiramente.

Já Reddy Venkateswara et al. (2011) estudaram o efeito do cloreto de magnésio no concreto de cimento Portland comum. O concreto de cimento Portland comum foi produzido com dosagem de  $MgCl_2$  de 200, 500, 1000, 1500 e 2000 mg/L e água deionizada foi usada na mistura de concreto. Além disso, amostras de controle foram preparadas com água deionizada sem  $MgCl_2$  para comparação. As forças de compressão e tração foram avaliadas por 28 e 90 dias. Os resultados mostram que, à medida que a concentração de  $MgCl_2$  aumenta, a resistência à compressão aumenta e a resistência à tração diminui. A reação 4.5, a seguir, ocorreu entre  $MgCl_2$  e óxido de cálcio:



A solução de  $\text{MgCl}_2$  reage com a cal absorvida para formar  $\text{CaCl}_2$  e  $\text{Mg(OH)}_2$ . A formação de  $\text{CaCl}_2$  solúvel leva à perda de força inicial. Como o  $\text{Mg(OH)}_2$  é insolúvel na água, sua formação não aumenta a porosidade e a permeabilidade do sistema. Assim, a formação de hidróxido de magnésio (brucita) desencadeando a perda de resistência. O tempo de endurecimento inicial e o tempo de endurecimento final são atrasados com o aumento de  $\text{MgCl}_2$ , é significativo em 1.500mg/L e 500mg/L, respectivamente.

Arunakanthi et al. (2012) realizaram uma investigação experimental para estudar o efeito do ambiente químico agressivo no concreto de alto desempenho com metacaulim. O cimento Portland comum é substituído em 20% em peso por metacaulim e simulado em ambiente quimicamente agressivo, submetendo o concreto a diferentes concentrações de água deionizada de ácido clorídrico 50mg/L, 100mg/L, 400mg/L e 800mg/L. As forças de compressão e de tração foram determinadas aos 7, 28 e 90 dias. Os resultados indicam que a resistência à compressão e a tração diminuem com o aumento da concentração de HCl quando comparado ao concreto sem HCl na água de mistura e cura. Já V.M. Galande (2012) disse que o concreto é o “escudo” para a armadura, pois protege-a quando o seu pH em torno de 12. Se o valor estiver abaixo de 12, a proteção diminuirá gradualmente. Quando o valor de pH está aproximadamente 9,5, o concreto não fornece nenhuma proteção ao aço contra a corrosão. A cal livre presente no concreto é o principal responsável pela proteção do aço, proporcionando um ambiente alcalino. Quando agentes externos como água, gases ácidos e outros compostos químicos reagem com a cal livre presente no concreto, este é convertido em diferentes compostos complexos. Isso resulta em acidez ou na redução da alcalinidade do concreto. Se o pH for inferior a 9,5, o aço é susceptível à corrosão. Os sais de dióxido de carbono e cloreto são os dois agentes responsáveis pela corrosão da armadura. As reações químicas 4.6 e 4.7 estão apresentadas a seguir:



Girish e Pathak (2014), investigaram o uso de efluente terciário como água de amassamento, onde constatou que os concretos moldados com o efluente 3º obteve resistência superior à água potável, atribuindo a presença maior de cloro residual na água, inerente a etapa do tratamento do efluente. Já Sarkar et al. (2014), investigaram o uso de efluente com tratamento secundário tanto para o amassamento do concreto como para sua cura, constatando



perda de trabalhabilidade pelo *Slump Test*, e adicionando superplastificante. Os resultados de resistência e adsorção em concretos produzidos e curados com efluente 2° foram superiores, bem como mapeado todos os parâmetros normativos da água utilizadas, bem como acidez total. Já Arunvivek et al. (2014), testou *blends* de água formada por efluente mais água potável, onde avaliou as resistências e tempos de pega, e inferindo que *blends* com 40% de efluente produzem os melhores resultados. Mahasneh (2014), utilizou água destilada como referência de água de amassamento, além da potável e efluente 2°, e realizou ensaios físico-químicos das águas avaliadas, bem como associou os resultados de resistência e tempo de pega com a Demanda Biológica de Oxigênio e Demanda Química de Oxigênio, encontrando resultados não tão exitosos com uso de efluente 2° no amassamento.

Alradhawi e Angalekar (2016), avaliaram o uso de água cinza e subterrânea, bem como ensaio em amostras curadas aos 28 dias de penetração acelerada de cloretos. Todas os ensaios foram realizados em triplicata, sendo a resistência a compressão do concreto com efluente 2° aos 56 dias de cura úmida com água potável superior às demais. Para o resultado de penetração de cloretos as amostras produzidas com água subterrânea foram superiores.

Já Abdul Razak e Venakatesh (2015), constatou perda da trabalhabilidade por *Slump Test* em concretos produzidos com efluente com tratamento primário. E recomendou o uso de efluente 2° para concretos planos não armados, bem como testes para o concreto armado devido a corrosão do aço pela presença de impurezas orgânicas e inorgânicas. Swami et al. (2015), realizaram testes de ultrassom nas amostras de concreto produzidos com efluente 2°, bem como esclerometria e arrancamento (dissociação do concreto), apresentando resultados satisfatórios e recomendando o uso, apesar da perda de trabalhabilidade que corrigiu utilizando superplastificante. Já Gadzama et al. (2015), analisou os efeitos da presença de açúcar nas propriedades de resistência do concreto, onde constataram aumento do tempo de pega com o uso de efluente, e inferiu que o tempo se eleva com o aumento percentual de efluente 2° no *blends* da mistura de água. O pH da água foi o único parâmetro que não se enquadrou dentro da norma americana. Foi observado também um aumento do volume do concreto dosado com efluente 2° em 3,03%. Já Babu e Ramana (2016), analisou argamassas padrão produzidas com efluentes de 14 estações de tratamento de esgoto (todos efluentes 2°), e constatou não haver nenhuma diferença significativa nos tempos de pega e resistência. Utilizou, também, a técnica de Difração de Raio X. Kadir (2016) foi audacioso, testando chorume do aterro sanitário em *blends* até 50%. E inferiu que *blends* com 20% de chorume atingem sua resistência máxima, e conseqüentemente maior modulo de elasticidade.

Ghrai (2016), além de testar argamassas e concreto, implantou em escala piloto, produzidos com efluente 1° e 2°, avaliando o E. Coli, DBO, DQO e NH<sub>3</sub>. Utilizou a água destilada como referência, e recomendou o uso do efluente 2°. Brandão et al. e Silva et al. (2018), analisaram efluente 2° e 3° na produção de concretos, analisado também a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura. Não constataram alterações significativas na resistência e tempo de pega, bem como na microscopia, utilizou o Cimento Portland tipo II 32 Z.

Ary Junior (2018), em sua tese, constatou o poder antimicrobiano do cimento Portland comercial testado, bem como recomendado o uso de efluente 2°, apesar de testado esgoto bruto.

Brandão et al. e Da Silva (2019), testou efluentes 3° e 2°, respectivamente, com Cimento Portland tipo III e tipo V, respectivamente, analisando a luz da NBR 15.900. Brandão et al. realizou ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica, não constatando diferença significativa entre as amostras testadas, bem com DBO e DQO, estando estes parâmetros de acordo com os padrões de lançamento de efluentes e reuso. Implantaram o efluente 3° nas reformas estruturais da mesma estação de tratamento, sendo monitorada. Ambas as pesquisas utilizaram técnica estatística ANOVA e teste de múltiplas médias. Farid (2019), avaliou além do efluente 2°, água superficial e subterrânea, constatando que apenas na idade inicial de 7 dias de cura úmida dos concretos produzidos com água subterrânea as resistências foram superiores aos demais concretos produzidos. Nas idades posteriores o concreto produzido com efluente 2° despontou, obtendo maiores ganhos de resistência final. Foram analisadas nas águas a DBO, DQO, Demanda de Oxigênio, Bicarbonatos e condutividade elétrica. Ahiaba e Igonu (2019), analisaram os efeitos dos sólidos totais sob as propriedades do concreto, constatando a relação direta no ganho de massa. As águas foram de poços as margens do rio local.

Segundo Reddy Babu et al. (2007), metais, tais como chumbo (Pb), zinco (Zn), mercúrio (Hg), cobre (Cu), níquel (Ni), ferro (Fe) e cromo (Cr) são toleráveis até 600mg/L, bem como manganês (Mn) até 500mg/L (MINDNESS e YOUNG, 1981).

Geralmente a presença de cloridratos, sulfúricos e outros ácidos inorgânicos, até concentrações de 10.000 ppm, não afetam a resistência do concreto. As águas alcalinas, como concentrações de hidróxido de sódio de 0,5% da massa do cimento, não afetam a resistência, bem como o hidróxido de potássio até 1,2%. No entanto deve-se ater ao tipo de cimento utilizado, pois, mesmo nestas concentrações, pode reduzir a resistência aos 28 dias (KOSMATKA, 2002).

Os pesquisadores Kosmatka (2002), Girish e Pathak (2015), relataram que a presença de sais de manganês (Mn), estanho (Sn), zinco (Zn) cobre (Cu) e chumbo (Pb) causam uma redução na resistência do concreto. Geralmente, as concentrações destes sais inorgânicos até 500 ppm, bem como o sulfeto de sódio inferior a 100ppm, são tolerados sem afetar a resistência e tempos de pega (KOSMATKA, 2002).

Carbonatos e bicarbonatos de sódio e potássio afetam os tempos de pega, bem como em altas concentrações reduzem a resistência (KOSMATKA, 2002). Já o iodato de sódio, fosfato de sódio e o borato de sódio reduz a resistência inicial de concreto de alto desempenho (GIRISH e PATHAK, 2015).

As impurezas presentes na água reagem de maneira diferente com os elementos do cimento. Essas reações afetam principalmente o tempo de endurecimento, a resistência à compressão e também podem causar tensão na superfície do concreto. Todas as impurezas podem não ter efeitos adversos nas propriedades do concreto.

Algumas impurezas reagem de modo que, o resultado pode ser inofensivo ou melhorar as propriedades do concreto, onde variam de acordo com o local (geologia e biota presente), o tempo, o ambiente (pluviometria e temperatura) e a interferência humana. Portanto, é difícil tirar uma conclusão comum sobre o uso da água para amassamento e curar do concreto.

O consenso é que as utilizações de águas impuras apresentaram redução na resistência do concreto aos 28 dias, porém projetos adequados de dosagem, atentando para os limites de tolerância aceitável de determinadas impurezas, é possível utilizá-la para amassamento e cura do concreto. Por outro lado, existe o risco de corrosão do aço no concreto armado, o que também é uma grande ponderação e potencial pesquisa futura.

Na prática, os possíveis efeitos de várias impurezas, sejam orgânicas ou inorgânicas, na água amassamento são testados simplesmente quanto aos tempos pega e resistência comparados à mesma mistura preparada com água potável ou destilada. Nesta pesquisa, um dos objetivos é disponibilizar no meio científico que tais análises ora vigentes nas normas e prática da engenharia não são suficientes para garantir a durabilidade das estruturas.

Na tabela 4.2 está apresentado algumas recomendações, limites, das impurezas químicas dissolvidas na água, não tratadas no capítulo 3.

Na tabela 4.3 a 4.7 está apresentado uma síntese, dividindo pelo material estudado, agregados, pasta, concreto e argamassa, de acordo com as impurezas presentes na água advinda da indústria do saneamento, uma vez já apresentado nos requisitos normativos no capítulo 3.

Tabela 4.2 – Efeitos ou recomendações das impurezas químicas dissolvidas na água de amassamento para o concreto

Impurezas	Limites	Efeitos
NaNO <sub>3</sub> e KNO <sub>3</sub>	ND	Nitratos de sódio e potássio conferem baixa perda de resistência obtida pelo cloreto de sódio. (NaCl)
CaSO <sub>4</sub>	ND	Águas saturadas com sulfato de cálcio é satisfatória na fase de indução na hidratação do cimento, onde normalmente se apresenta majoritariamente.
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1,7% *	Nitrato de cálcio adicionado até 1,7% da massa de cimento acelera a pega e reduz a resistência.
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , MgCl <sub>2</sub> , MgSO <sub>4</sub>	10.000 ppm	1% destes compostos de íons, exceto o carbonato e bicarbonato, não apresenta efeito na resistência.
FeSO <sub>4</sub>	ND	0,5, 1, 2, e 4 %, da massa de cimento, de sulfato de ferro apresentam aos 28 dias e 3 anos aumentam entre 10 e 15% da resistência à tração.
ZnO	0,01% *	Nenhum efeito significativo é apresentado, mas 0,1%, da massa de cimento, de óxido de zinco atrasa o tempo de pega e baixa a resistência.
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	ND*	O cloreto de amônia (Na <sub>4</sub> Cl) eleva a Resistencia. Já o nitrato de amônia (NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> ), em 0,4, 0,8 e altas concentrações em relação a massa de água, elava a resistência, semelhantemente ao cloreto de sódio (NaCl)
Ácido Tânico (C <sub>76</sub> H <sub>52</sub> O <sub>46</sub> ) <sup>1</sup>	0,5%**	Nenhum efeito na Resistencia até o momento encontrado, mas deve se consideras efeitos significativos nos tempos de pega.

Legenda: ND – Não Detectado; \* em relação a massa de cimento; \*\* em relação à massa da água; <sup>1</sup> Todas as fórmulas químicas foram extraídas da PubChem (*United States National Library of Medicine*)

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.1 Pasta

A tabela 4.3 apresenta a revisão literária e publicações no que trata aos efeitos na pasta de cimento Portland frente as impurezas presentes na água de amassamento.

Tabela 4.3 – Levantamento bibliográfico dos efeitos das impurezas presentes na água de amassamento para a pasta (Continua)

Publicação	Ano	Parâmetros	Propriedade	Efeito
ASTM C94	1992	Carbonatos e bicarbonatos alcalinos	Tempos de Pega	Afeta
		Sais inorgânicos (zinco, cobre, chumbo, dentre outros)	Tempos de Pega	Afeta
		Substâncias orgânicas	Tempos de Pega	Afeta
		Açúcar	Tempos de Pega	Atrasam
		Águas acidas (pH<3)	Tempos de Pega	Afeta
Neville	1994	Cor	Tempos de Pega	NA*
		Odor	Tempos de Pega	NA*
		Águas levemente acidas	Tempos de Pega	NA
Kosmatka	2002	Sacarose (0,03% a 0,15%)	Início de Pega	Atrasa
		Açúcar > 0,25%	Fim de Pega	Postergam
		Cada tipo de açúcar	Tempos de Pega	Afeta
Reddy e Rao Sudarmasa	2004	Alcalinidade (carbonato de sódio ou bicarbonato de sódio)	Tempos de Pega	?
Reddy et al.	2011	Pb <sup>+</sup> = 2.000mg/L	Tempos de Pega	Postergam
Reddy Venkateswara et al.	2011	Presença de MgCl <sub>2</sub>	Tempos de Pega	Atrasam
Gadzama et al.	2015	pH	Tempos de Pega	Postergam
Mahasneh	2016	“Esgoto Tratado 2°”	Tempos de Pega	Afeta*
Babu e Ramana	2016	“Esgoto Tratado 2°”	Tempos de Pega	NA

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.3 – Levantamento bibliográfico dos efeitos das impurezas presentes na água de amassamento para a pasta (Conclusão)

Publicação	Ano	Parâmetros	Propriedade	Efeito
Ghrair	2016	E.Coli, DBO, DQO e NH <sub>3</sub>	Tempos de Pega	NA
Brandão et al. e Silva et al.	2018	Cloreto maior que a ref Sulfato maior que a ref Nitrato maior que a ref Condutividade maior que a ref E. Coli maior que a ref “Esgoto Tratado 2º e 3º” Cor (não atendeu a norma) Odor (não atendeu a norma) DBO maior que a ref DQO maior que a ref	Tempos de Pega	Postergam
		Dureza total (ppm CaCO <sub>3</sub> ) maior que ref Dureza Cálcio (Ca <sup>+</sup> , como CaCO <sub>3</sub> (mg/l)) maior que a ref		
Brandão et al. e Silva et al.	2019	Condutividade (µs/cm) maior que a ref Sólidos totais dissolvidos (STD) maior que a ref Sólidos totais suspensos (mg/l) pHe menor que a ref RSI menor que a ref Alcalis maior que ref Açúcares maior que a ref Cloretos maior que a ref	Tempos de Pega	Postergam
Ary Junio	2018	“Esgoto Tratado 2º”	Microorganismos	Reduz

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.2 Concreto

A tabela 4.4 e 4.5 apresenta a revisão literária e publicações no que trata aos efeitos no concreto e concreto armado, respectivamente, de cimento Portland frente as impurezas presentes na água de amassamento.

Tabela 4.4 – Levantamento bibliográfico dos efeitos das impurezas presentes na água de amassamento para o concreto (Continua)

Autor	Ano	Parâmetro	Propriedade	Efeito
Parker	1945	<i>Thiobacillus sp.</i>	Micro estrutural	Afeta
Tay e Hip	1987	"Efluente 2º"	Resistencia à compressão	Aumenta
Neville	1994	Cor Odor	Resistencia	NA*
		Águas levemente ácidas		NA
		Ácidos Húmicos Ácidos orgânicos		Reduz

Legenda: \* Utilizado ao concreto cimento Resistente a Sulfatos (RS).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.4 – Levantamento bibliográfico dos efeitos das impurezas presentes na água de amassamento para o concreto (Continuação)

Autor	Ano	Parâmetro	Propriedade	Efeito
ASTM C94	1992	Carbonatos e bicarbonatos alcalinos	Resistencia	Reduz
		Sulfato	Expansibilidade	Aumenta
		Sais de ferro		
		Sais inorgânicos (zinco, cobre, chumbo, dentre outros)		Reduz
		Substâncias orgânicas		
		Sólidos suspensos ou silte		
		Óleos	Resistencia	
		Ácidos tânicos		Afeta
		Ácidos orgânicos		Afeta
		Águas ácidas (pH<3)		Afeta
		Na(OH) <sup>-</sup> > 0,5% peso do cimento		Afeta
K(OH) <sup>-</sup> > 1,2% peso do cimento		Afeta		
Águas alcalinas	Efeito Álcali-agregado	Aumenta		
Claisse, Hanaa e Ibrahim	1999	Câmara de 5% de CO <sub>2</sub> (28 dias)	Resistencia	Baixa
		Câmara de 5% de CO <sub>2</sub> (28 dias)	Permeabilidade	Reduz
		Câmara de 5% de CO <sub>2</sub> (28 dias)	Porosidade	Reduz
		Câmara de 5% de CO <sub>2</sub> (28 dias)	Resistividade elétrica	Reduz
Lee	2001	Ácidos presença de CO <sub>2</sub> combinado	Resistência	Reduz
		Ácidos orgânicos		Reduz
		Ácidos inorgânicos		Reduz
Kosmatka	2002	Açúcar > 0,25%	Resistencia aos 28 dias	Reduz
		Cada tipo de açúcar Açúcar < 500ppm	Resistência	? NA
Reddy e Rao Sudarmasa	2004	6mg/L de Carbonato de sódio	Resistencia Compressão	Reduz
		10mg/L de carbonato de sódio	Resistencia a tração	Reduz
Smaoui et al.	2005	Alto teor de álcalis, presença Na(OH)	Resistencia Compressão	Reduz
		Alto teor de álcalis, presença Na(OH)	Resistencia a Gelo-desgelo	NA
Gaylarde et al.	2005	<i>Cyanobacterium choococidiopsis</i>	Micro estrutural	Afeta
		<i>Cyanobacterium pleurocapsa</i>		Afeta
Fenand et al.	2006	Ácidos hidráulicos (NaCl e Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), 10 e 20% concentração	Resistencia	Reduz

Legenda: \* Utilizado ao concreto cimento Resistente a Sulfatos (RS)

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.4 – Levantamento bibliográfico dos efeitos das impurezas presentes na água de amassamento para o concreto (Continuação)

Autor	Ano	Parâmetro	Propriedade	Efeito
Low et al	2007	pH (12,3 a 13,3)***	Resistencia a compressão	NA
Aira et al.	2007	<i>Alternaria</i>	Micro estrutural	Afeta
		<i>Aspergillus</i>		Afeta
		<i>Cladosporium</i>		Afeta
		<i>Penicillium</i>		Afeta
Alaejos e Bermudez	2010*	Cura com 25g/L NaCl (água do mar)	Resistencia à compressão	NA
		Cura com 25g/L NaCl (água do mar)	Porosidade	NA
		Cura com 25g/L NaCl (água do mar)	Taxa de penetração de cloretos	Maior nas primeiras idades
		Cura com 25g/L NaCl (água do mar)	Capilaridade	Aumenta
		Cura com 25g/L NaCl (água do mar)	Absorção	Aumenta
Wey et al	2010	<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	Micro estrutural	Afeta
		<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>		Afeta
		<i>Acidiphilium cryptum</i>		Afeta
Reddy Venkateswara et al.	2011	Presença de MgCl <sub>2</sub>	Resistencia à compressão Resistencia à tração	Aumenta Diminue
Reddy Venkateswara et al.	2011	Presença de CaCl <sub>2</sub> solúvel	Resistencia inicial	Diminue
		Presença na reação de Mg(OH) <sub>2</sub> (Brucita)	Porosidade Permeabilidade Resistencia	Não aumenta Não aumenta Diminue
Arunakanthi et al.	2012 <sup>A</sup>	Presença de HCl	Resistencia em todas as idades	Reduz
Marques et al.	2013	<i>T. thioparus</i>	Micro estrutural	Afeta
		<i>T. novellus</i>		
		<i>T. neapolitanus</i>		
		<i>T. intermedius</i>		
		<i>A. cryptum</i>		
Girish e Pathka	2014	Esgoto 3°, presença de Cl <sub>2</sub>	Resistencia	Aumenta
Kucche	2015	Presença de CO <sub>2</sub>	Permeabilidade	Reduz
		Presença de CO <sub>3</sub>	Porosidade	
		Presença de CO <sub>4</sub>	Resistividade elétrica	
		Redução de pH 1% a 1,25% de Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Resistências	Aumenta
		1% a 1,25% de Na <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Retração	
		Temperatura 700C a 900°C	Resistencia ao gelo-desgelo Resistências	

Legenda: \* Utilizado ao concreto cimento Resistente a Sulfatos (RS). <sup>A</sup> Utilizou 20% de metakaolim.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.4 – Levantamento bibliográfico dos efeitos das impurezas presentes na água de amassamento para o concreto (Conclusão)

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Propriedade</b>	<b>Efeito</b>
Sarkar et al.	2014	“Esgoto Tratado 2°”	Trabalhabilidade Resistencia Absorção	Perda Aumenta
Arunvivek et al.	2014	“Esgoto Tratado”	Resistencia Tempos de pega	Aumenta
Mahasneh Abdul e Venakatesh	2014 2015	“Esgoto Tratado 2°” “Esgoto Tratado 1°”	Resistencia Trabalhabilidade	Diminue Perda
Swami et al.	2015	“Esgoto Tratado 2°”	Trabalhabilidade Resistencia à compressão (esclerometrica) Resistencia à tração (arranchamento) Compacidade (Ultrassom)	NA
Gadzama et al.	2015	Presença de açúcar pH	Volume	Aumenta
Alradhawi e Angalekar	2016	“Esgoto Tratado 2°” “Água subterrânea”	Resistencia a compressão Resistencia a penetração de cloretos	Aumenta Aumenta
Kadir	2016	“Blend com 25%****”	Resistencia Modulo de Elasticidade	Aumenta
Ghraiir	2016	E.Coli, DBO, DQO e NH <sub>3</sub>	Resistencia	NA
Brandão et al. e Silva et al.	2018	“Esgoto Tratado 2° e 3°”	Resistencia à compressão Trabalhabilidade Micro estrutural (MEV)	NA Afeta NA
Ary Junior	2018	“Esgoto Tratado 2°”	Trabalhabilidade Resistencia a compressão	NA NA
Brandão et al. e Silva et al.	2019	DBO e DQO dentro da normativa estadual Cor e Odor não atendeu a norma NBR 15.900 Cor e Odor não atendeu a norma NBR 15.901	Absorção Porosidade Massa especifica	NA
Farid	2019	“Efluente Tratado 2°”: DBO, DQO, OD e Bicarbonatos	Resistencia aos 28 dias Condutividade elétrica	Aumento NA
Ahiaba	2019	“Água subterrânea” “Água subterrânea”: Sólidos Totais	Resistencia aos 7 dias Peso	Superior Superior

Legenda: \* Utilizado ao concreto cimento Resistente a Sulfatos (RS)

Fonte: Elaborado pelo autor.



Tabela 4.5 – Levantamento bibliográfico dos efeitos das impurezas presentes na água de amassamento para o concreto armado

Autor	Ano	Parâmetro	Propriedade	Efeito
ASTM C94	1992	Cloreto Sulfato	Resistencia à corrosão	Reduz Aumenta
Gaynor, Pakshir e Esmaili	1998	Presença de CaCl <sub>2</sub>	Resistencia a corrosão	NA
		Presença de NaCl <sub>2</sub>	Resistencia a corrosão	Susceptível
		Concentração de 0,1% NaCl	Resistencia a corrosão	Máxima
Homam et al.	2001	Cl <sup>-</sup>	Resistencia a corrosão	Diminue
		Ambiente de Na(OH)	Resistencia de coesão	Reduz
		Ambiente de Na(OH)	Resistencia ao Gelo-desgelo	

Fonte: Elaborado pelo autor 2020.

#### 4.2.3 Argamassa e Agregados

As tabelas 4.6 e 4.7 apresentam a revisão literária e publicações no que trata aos efeitos na argamassa e agregados, respectivamente, de cimento Portland frente as impurezas presentes na água de amassamento.

Tabela 4.6 – Levantamento bibliográfico dos efeitos das impurezas presentes na água de amassamento para a argamassa (Continua)

Autor	Ano	Parâmetro	Propriedade	Efeito
ASTM C94	1992	Águas ácidas (pH<3) Águas alcalinas	Resistencia Efeito Álcali-agregado	Afeta Aumenta
Neville	1994	Cor	Resistencia	NA*
		Odor	Resistencia	NA
Lee	2001	Águas levemente ácidas	Resistencia	NA
		Ácidos presença de CO <sub>2</sub> combinado	Resistência	Reduz
		Ácidos orgânicos		
		Ácidos inorgânicos		
McPolinand et al.	2009 <sup>1</sup>	Ambiente rico em CO <sub>2</sub> (5%)	pH do concreto Carbonatação	NA
Reddy et al.	2011	Pb+ (elevadas concentrações)	Resistencia a compressão	Reduz
		Pb+ (elevadas concentrações)	Fim de pega	Postergam
		Pb+ = 2.000mg/L	Resistencia a compressão	Aumenta
Babu e Ramana	2016 <sup>2</sup>	“Esgoto Tratado 2°”	Resistencia Micro estrutural (DRX)	NA
Marques et al	2013	Cyanobacteria	Micro estrutural	Afeta
		Endoliths		
		Trentepholia		
		Thyera		
		Aspicilia		
		Verrucaria		
Caloplaca				

Legenda: <sup>1</sup> Aditivada; <sup>2</sup> Padrão

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.6 – Levantamento bibliográfico dos efeitos das impurezas presentes na água de amassamento para a argamassa (Conclusão)

Autor	Ano	Parâmetros	Propriedades	Efeito
Ghrair	2016	E.Coli, DBO, DQO e NH3	Resistencia	NA
Brandão et al. e Silva et al.	2019	Cor e Odor não atendeu a norma NBR 15.900	Resistência à compressão	NA

Legenda: <sup>1</sup> Aditivada; <sup>2</sup> Padrão

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.7 – Levantamento bibliográfico dos efeitos das impurezas presentes nos agregados que afetam as propriedades do concreto através da reação álcali-agregado

Autor	Ano	Parâmetro
Neville	1994	Presença de sódio Presença de Potássio
Miller	2006	<i>Stichococcus sp.</i> <i>Chlorella sp.</i> <i>Cyanobacteria gloeocapsa</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.3 Interação de Constituintes e Compostos da Hidratação do Cimento com Microorganismos

A maneira mais comum da presença dos micro-organismo na natureza é por meio da aderência microbiana sobre superfícies, especialmente sobre rochas e minerais, e está diretamente ligada à atividade microbiana e sua sobrevivência (EHRlich & NEWMAN, 2009).

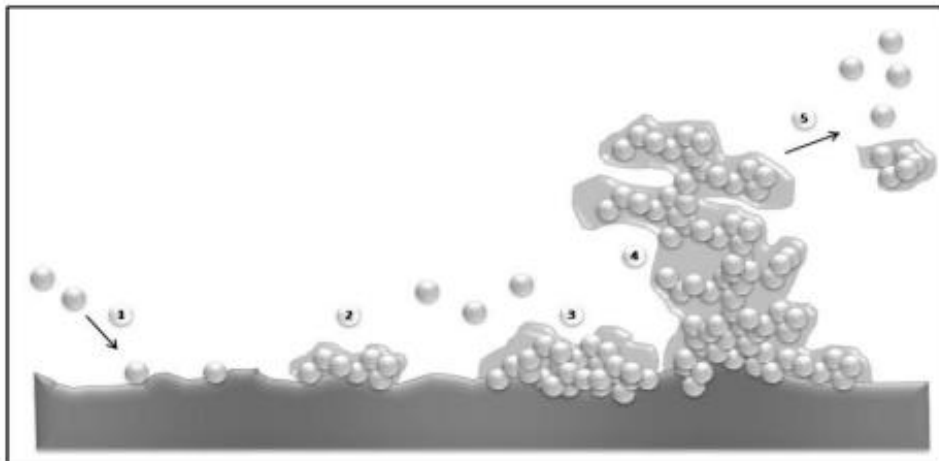
A fixação de bactérias em substratos sólidos é um processo físico-químico resultante das propriedades hidrofílicas e/ou hidrofóbicas da superfície celular, que é dependente do pH e força iônica da solução e também da composição da superfície do suporte (BOS et al., 1999).

A interação das bactérias com a superfície dos minerais pode ser dividida em duas etapas. A primeira etapa é observada a adsorção microbiana com produção de substâncias poliméricas extracelulares e, posteriormente, ocorre a formação de um biofilme que recobre a superfície mineral com células microbianas em uma camada contínua de substâncias poliméricas extracelulares (EPS) (STA, 2014), ilustrado na figura 4.1.

A interação entre os micro-organismos e a superfície mineral é regulada de regulada por um fator imprescindível aos processos biohidrometalúrgicos: a produção de EPS (VU et al., 2009). Os micro-organismos representam uma pequena fração da massa e do volume de um biofilme, menos que 10%, em sua fração predominante da matéria orgânica seca do biofilme é

constituída pelas EPS secretadas, as quais são de fundamental importância para o ciclo de vida deles.

Figura 4.1 – Ciclo de desenvolvimento e fases dos biofilmes microbianos sobre um substrato sólido



Fonte: Adaptado pelo autor de Crundwell (2003).

A afinidade bactéria-substrato é outro fator que tem sido considerado para as bactérias lixiviantes, como a *A. ferrooxidans*. Este micro-organismo oxidante de ferro adere preferencialmente a substratos contendo íons ferrosos, como a pirita e calcopirita. Já os micro-organismos que não produzem EPS e não têm a mesma capacidade de utilizar espécies iônicas de ferro como fonte de energia não aderem a esses substratos pois sua adesão é mediada apenas por interações hidrofóbicas (OHMURA et al., 1993; TAN & CHEN, 2012).

Trabalhos recentes realizados sob condições extremamente bem controladas mostraram que as bactérias ligadas podem aumentar a taxa de dissolução (nas mesmas condições em solução) em dois casos:

- (I) Se a taxa de dissolução do mineral for afetada pela formação de uma camada porosa de enxofre por um fenômeno conhecido como difusão da camada do produto, a remoção do enxofre pela bactéria resultará em um aumento na taxa de lixiviação; e
- (II) Se a dissolução do mineral aumentar com o aumento do pH na superfície mineral, a ligação de bactérias à superfície pode resultar em um aumento do pH na superfície, o que aumenta a taxa de reação. Em ambos os casos, o exame detalhado da cinética da lixiviação revela que, embora as bactérias ligadas aumentassem a taxa de dissolução sob algumas condições, o mecanismo da lixiviação era a dissolução química por íons férricos.

As propriedades do hidróxido de cálcio derivam de sua dissociação iônica em íons cálcio e íons hidroxila, sendo que as ações destes íons sobre as bactérias explicam as propriedades biológicas e antimicrobianas desta substância (PÉCORA e ESTRELA, 1997), tendo em vista a influência de um gradiente de pH existente na membrana citoplasmática. A liberação de íons promove uma alcalinização do meio, sendo responsável pela desnaturação proteica e agressão à membrana plasmática dos micro-organismos. (LENORDO et al. 2006).

Já o carbonato de cálcio, oriundo da reação de dióxido de carbono com hidróxido de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), nos organismos vivos, a transformação do polimorfismo do  $\text{CaCO}_3$  pode ser explicada pelo fato de a calcita ter termodinamicamente menos estabilidade que a aragonita e muito mais estabilidade que a vaterita, assim, ao longo do tempo, o polimorfismo menos estável tende a se dissolver, sendo precipitado novamente como calcita, logo, o resultado desse processo é uma tendência à redução da quantidade de vaterita (LOWENSTAM e WEINER, 1989). Existem três formas de apresentação cristalográfica do carbonato de cálcio, chamada de polimorfismo dos cristais, capacidade de uma molécula cristalizar em duas ou mais formas, sendo a vaterita, a aragonita e a calcita, respectivamente aqui relacionados em ordem crescente de estabilidade termodinâmica, sendo a aragonita e a calcita mais estáveis, aonde estão mais comumente presentes na natureza, pois a vaterita pode se transformar rapidamente em um destes dois polimorfos em solução aquosa, sendo em aragonita em 60 minutos a  $60^\circ\text{C}$  e em calcita em 24 horas à temperatura ambiente. Estas diferenças do polimorfismo do carbonato de cálcio apresentam diferenças significativas de solubilidade, processabilidade e estabilidade físico-química, onde afeta o comportamento biológico ou químico da molécula. Na tabela 4.8 estão apresentadas o descritivo estrutural dos polimorfos já relatados do carbonato de cálcio.

Tabela 4.8 – Descritivo estrutural dos polimorfos de carbonato de cálcio

Mineral	Calcita	Vaterita	Aragonita
ICDD	96-900-0966	96-300-0001	96-901-3801
COD	9000965	3000000	9013800
Sistema cristalino	Hexagonal	Ortorrômbico	
a (Å)	4,9880	8,4720	5,7420
b (Å)	4,9880	7,1570	4,9610
c (Å)	17,0610	4,1270	7,9700
a (Å)	90	90	90
b (Å)	90	90	90
g (Å)	120	90	90

Fonte: Adaptado pelo autor de Chotoli et al. (2017).

Íons metálicos específicos incorporados ao Silicato de Cálcio hidratado (C-S-H), controla a taxa de dissolução e acelera a formação de apatita, sendo também utilizado para aumentar a resistência mecânica e promover efeito antibacteriano (EL-KADY et al., 2012). Íons de prata, metal que possui função bactericida, pois possui um amplo espectro antibacteriano e um menor potencial para desenvolver resistência a cepas bacterianas (ZHAO et al. 2009).

Em processos oxidativos avançados (POAs) mostram-se muito eficientes tanto para degradação de compostos orgânicos presentes na água quanto a redução de íons metálicos e descontaminação microbiológica.

Tal processo é baseado na geração de radicais extremamente reativos, responsáveis pela oxidação dos compostos orgânicos poluentes, ativada pela presença de radiação solar, abundantemente em nossa região. Também oxida efluentes industriais, reduzindo íons com elevada toxicidade, atuando na destruição de bactérias pela oxidação da parede celular (NOGUEIRA et al., 1998).

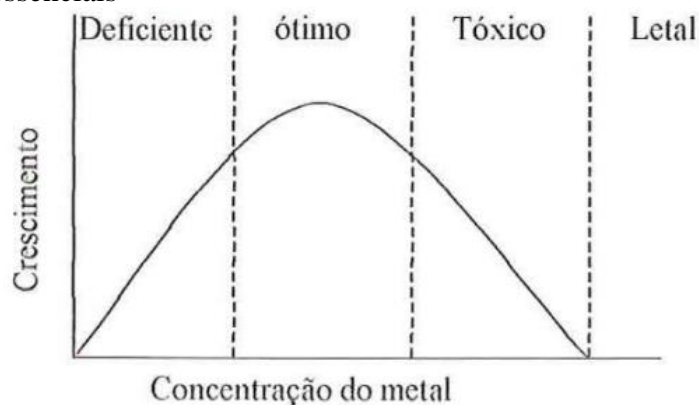
Íons metálicos, como o cobre e zinco, são essenciais ao crescimento celular, sendo que em altas concentrações leva a morte da célula, conforme apresentado na figura 4.2 (FORSTNER e WITTMANN, 1983), já o chumbo, mercúrio e cromo, apresentado na figura 4.3.

Estudos realizados na área médica, combinados a nanotecnologia e ciência dos materiais, comprovaram os efeitos antimicrobianos e desinfetantes das nanopartículas metálicas e óxidos metálicos, indicando que o tamanho da partícula determinava suas eficácias. Porém, sua toxicidade deve ser estudada (DIZAJ et al., 2014). Atividades antimicrobianas dos metais, tais como prata (Ag), cobre (Cu), ouro (Au), titânio (Ti) e zinco (Zn), é conhecida há séculos (MALARKODI, et al., 2014). Não diferente, as nanopartículas metálicas, tais como o óxido de prata ( $\text{Ag}_2\text{O}$ ), dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), silício (Si), óxido de cobre ( $\text{CuO}$ ), óxido de zinco ( $\text{ZnO}$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), foram identificados recentemente por exibir atividade antimicrobiana, onde estudo *In vitro* resultaram em inibição de várias espécies microbianas.

Recentemente, a nanotecnologia tem desempenhado um papel precursor e ofereceu possibilidades no campo da ciência e tecnologia. As nanopartículas de óxidos de zinco,  $\text{ZnO}$ , promovem efeitos bactericidas para as bactérias *gram-positivas* (formadoras de esporos) e *gram-negativas*, bem sendo a primeira resistente à elevadas temperatura e pressão (DIZAJ et al., 2014).

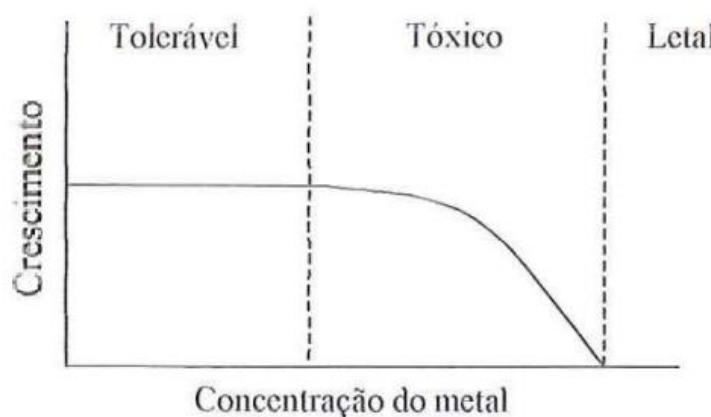
Os estudos sobre a ação de elementos metálicos sobre microorganismos é bastante recente, deste último século, deste modo, sendo bem atual. Não foram constatados estudos com ação direta de cimentos, nem tão pouco sua ação direta como apresentado na tabela 4.9, sendo somente resultados qualitativos até então.

Figura 4.2 – Rendimento celular e concentração de metais essenciais



Fonte: Adaptado pelo autor de Fostner e wittmann (2012).

Figura 4.3 – Rendimento celular e concentração de metais essenciais



Fonte: Adaptado pelo autor de Fostner e wittmann (2012).

Tabela 4.9 – Remoção de microorganismos vivos através de elementos metálicos (Continua)

	Microorganismos	Metais	pH ótimo	C*	R*	Literatura	Ano
Bactéria	<i>Brevibacterium sp.</i>	Zn(II)	2.0	41.9	ND	TANIGUCHI et al.	2000
	<i>Eichhornia spp.</i>	Cu(II)	5.0	28.5	ND	DAVE et al.	2010
	<i>Bacillus cereus</i>	Cd(II)	5.0	31.9	S	HUANG et al.	2013
	<i>Rhodobacter capsulatus</i>	Zn(II)	7.0	164	ND	MAGNIN et al.	2014
	<i>Ochrobactrum sp.</i>	Cd(II)	6.0	83.3	S	KHADIVINIA et al.	2014
	<i>Bacillus sp.</i>	Pb(II)	5.0	15.4	ND	REN et al.	2015
	<i>Pseudomonaaeruginosa</i>	Cd(II)	6.0	16.9	ND	LIMCHAROENSUK et al.	2015
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Hg(II)	7.0	180	S	YIN et al.	2016
	<i>Pseudomonas sp.</i>	Pb(II)	7.2	49.5	ND	D. LI et al.	2017
	<i>Arthrobacter viscosus</i>	Cr(VI)	2.0	1161	ND	HLIHOR et al.	2017
	<i>Staphylococcus epidermidis</i>	Cr(VI)	5.0	56	ND	QUITON et al.	2018

Legenda: C\* - Capacidade em mg/g; R\* - Regeneração; S - Sim; ND - Não Detectada.

Fonte: Adaptado pelo autor de Yin et al. (2018).

Tabela 4.9 – Remoção de microorganismos vivos através de elementos metálicos (Conclusão)

	Microorganismos	Metais	pH ótimo	C*	R*	Literatura	Ano
Fungos	<i>Penicillium brevicompactum</i>	Co(II)	5.0	54.6	ND	TSEKOVA et al.	2007
	<i>Penicillium simplicissimum</i>	Pb(II)	5.0	76.9	ND	FAN et al.	2008
	<i>Aspergillus niger</i>	Cd(II)	5.5	11	ND	TSEKOVA et al.	2010
	<i>Termitomyces clypeatus</i>	Cr(VI)	2.0	403	ND	RAMRALHIANI et al.	2011
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Cu(II)	5.5	16	S	AMIRNIA et al.	2015
	<i>Aspergillus niger</i>	Pb(II)	5.4	172	ND	IRAM et al.	2015
	<i>Trichoderma</i>	Cd(II)	6.0	21.7	ND	BAZRAFESHAN et al.	2016
	<i>Aspergillus fumigatus</i>	Cr(VI)	5.5	48.2	ND	DAHL et al.	2018
	Algas	<i>Cladophora fascicularis</i>	Pb(II)	5.0	198.5	ND	DENG et al.
<i>Ulva lactuca</i>		Cr(VI)	1.0	10.6	ND	EL-SIKAILY et al.	2007
<i>Spirogyra</i>		Cu(II)	5.0	87.2	ND	LEE et al.	2011
<i>Cystoseira crinitophylla</i>		Cu(II)	4.5	160	S	CHRISTOFORIDIS et al.	2015
<i>Sargassum</i>		Cu(II)	5.0	49	ND	BARQUILHA et al.	2017
<i>Sargassum filipendula</i>		Cd(II)	6.0	7.8	S	CARDOSO et al.	2017
<i>Fucus vesiculosus</i>		Pb(II)	4.0	229	S	DEMEY et al.	2018

Legenda: C\* - Capacidade em mg/g; R\* - Regeneração; S – Sim; ND – Não Detectada.

Fonte: Adaptado pelo autor de Yin et al. (2018).

Na tabela 4.10 estão apresentados os fatores que influenciam na atividade antimicrobiana das nanopartículas e óxidos.

O aluminato de cálcio é baseado na presença de aluminatos hidratáveis e mayenita ( $C_{12}Al_{14}O_{33}$ , ou  $C_{12}A_7$ ), sendo dois principais: (I) a branca, possuindo mais alumina ( $C_2A$ ); e (II) cinza escuro ou preto, possuindo mais ferro (BENSTED e BARNES, 2002). Existe no mercado cimento sulfo-aluminoso vários que contém um maior teor de mayenita. A mayenita está sendo amplamente estudada pelo efeito anti bactericida, através dos radicais de oxigênio livre e elétrons livre (PHROMPET, 2019).

Tabela 4.10 – Fatores que influenciam a atividade antimicrobiana das nanopartículas metálicas (Continua)

Tipo de nanopartícula	Fatores que influenciam a atividade antimicrobiana	Literatura
Prata (Ag)	Tamanho e forma da partícula	BUZEA et al. (2007); PAL et al.(2007); EGGER et al. (2009); YUN et al. (2013); IAVICOLI et al. (2013).
Óxido de zinco (ZnO)	Tamanho da partícula e concentração	RAVISHANKAR et al. (2011); SARAF (2013); LIU et al. (2014); AZAM et al. (2012); CIOFFI e RAI (2012); RASMUSSEN et al. (2010)
Dióxido de titânio (TiO <sub>2</sub> )	Estrutura cristalina, forma e tamanho	CIOFFI et al. (2012); ALLAHVERDIYEV et al. (2011); HAGHIGHI et al. (2013); ROY et al. (2010); CARRE et al (2014).

Fonte: Adaptado pelo autor de Dizaj et al. (2014).

Tabela 4.10 – Fatores que influenciam a atividade antimicrobiana das nanopartículas metálicas (Conclusão)

<b>Tipo de nanopartícula</b>	<b>Fatores que influenciam a atividade antimicrobiana</b>	<b>Literatura</b>
Ouro (Au)	Rugosidade e tamanho da partícula	LIMA et al. (2013); TIWARI et al. (2011); LOKINA et al. (2013); CUI et al. (2012).
Silício (Si)	Tamanho e forma da partícula	ROY et al. (2010); DHAPTE et al. (2014); MUKHA et al. (2010); YAMAMOTO et al. (2010)
Óxido de cobre (CuO)	Tamanho da partícula e concentração	AZAM et al. (2012); AHAMED et al. (2014); MAHAPATRA et al. (2008).
Óxido de magnésio (MgO) e CaO (Óxido de cálcio)	Tamanho da partícula, concentração e pH	YAMAMOTO et al. (2010); JIM e HE (2011); HEWITT et al. (2001); LEUNG et al. (2014); VIDIC et al. (2013).

Fonte: Adaptado pelo autor de Dizaj et al. (2014).

Na literatura, existem aplicações de materiais refratário com cimento sulfo-aluminoso. No entanto, durante a hidratação do cimento sulfo-aluminoso, igualmente o que acontece com a yelimita, a presença de gipsita e cal na reação de hidratação da mayenita pode formar a etringita expansiva como produto (LUZ, 2005), sendo assim benéfico contra microorganismos, mas danoso quanto ao comportamento mecânico, podendo ser aplicado em concretos não estruturais.

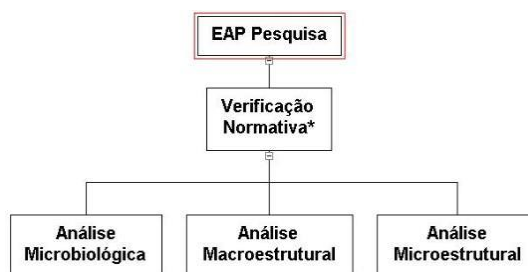
Segundo Alterthum (2015), os álcoois possuem muitas qualidades desejáveis dos desinfetantes: baratos, facilmente obtidos e bactericidas diante das formas vegetativas (*Gram positivo* e *Gram negativo*), bem como nanopartículas de óxidos de grafeno (RUPARELIA et al., 2008) e de zinco (MIZIELIŃKA et al., 2017).



## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

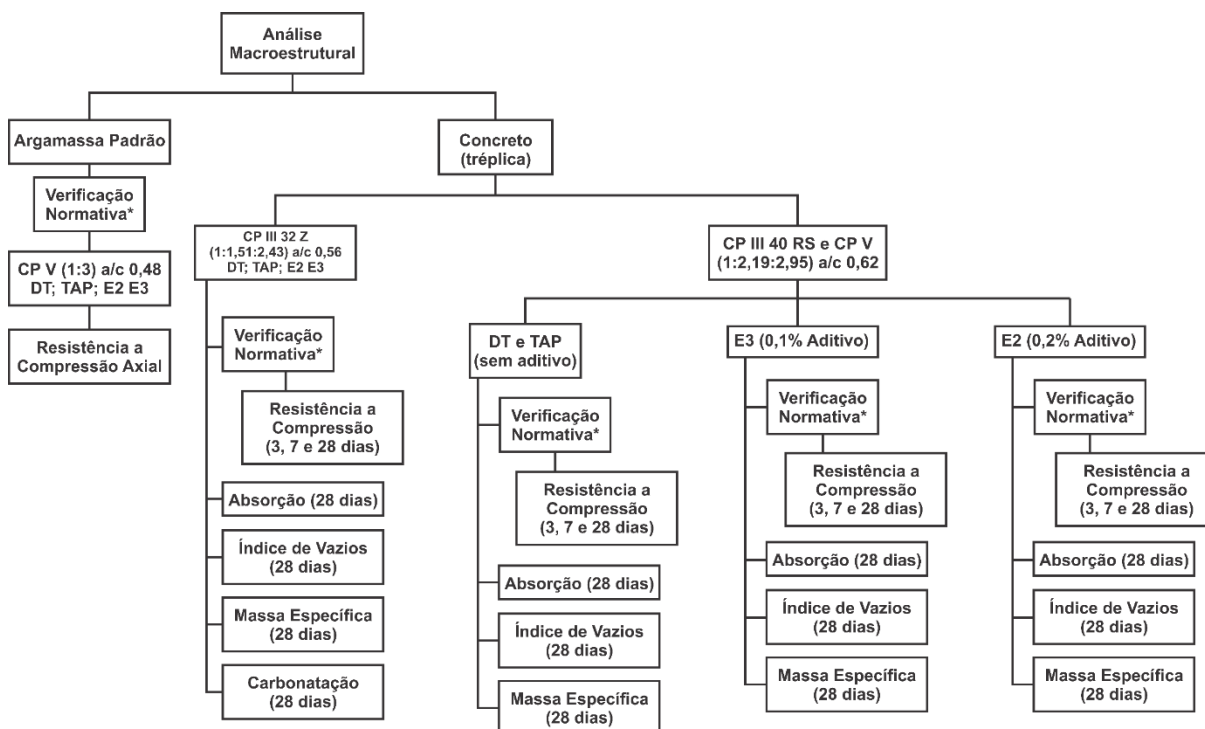
As figuras 5.1 a 5.4 estão apresentadas as estratégias para alcance dos objetivos da pesquisa, com todos os ensaios realizados.

Figura 5.1 – Estrutura Analítica do Projeto da Pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor baseado em PMBOK®

Figura 5.2 – Estratégia para alcance dos objetivos, avaliação da macroestrutura



Legenda: a/c – fator água por cimento; DT – água destilada do LPC; TAP – água da torneira do LMCC; E2 – água de amassamento da ETE Marechal Rondon; E3 – água de amassamento da ETE Guadalajara.

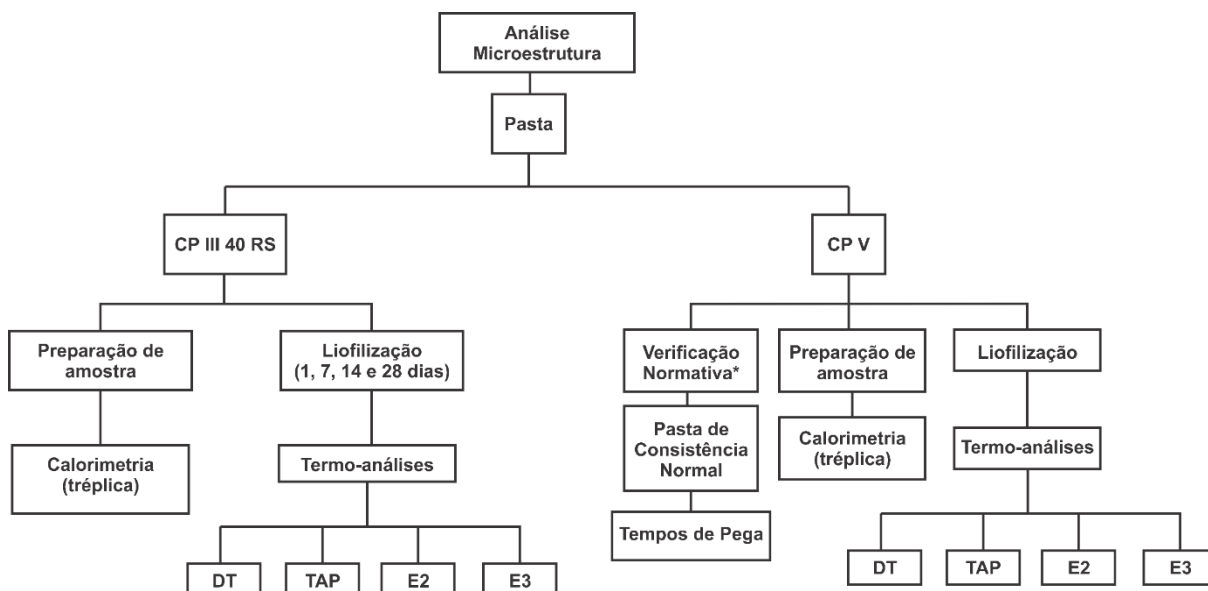
Fonte: Elaborado pelo autor

Primeiramente serão apresentados os materiais, equipamentos e métodos utilizados para avaliação à aderência às normas vigentes.

Os ensaios de durabilidade em corpos de prova de concreto (cimentos, águas, agregado miúdo e agregado graúdo), produzidos com as diferentes águas e cimentos do estudo, para as seguintes propriedades da macroestrutura: absorção de água, índice de vazios, massa específica e resistência à carbonatação.

Ainda no que trata a análise da microestrutura, na sequência, será apresentado os materiais, equipamentos e métodos para análise da argamassa padrão (cimento, águas e agregado miúdo padronizado).

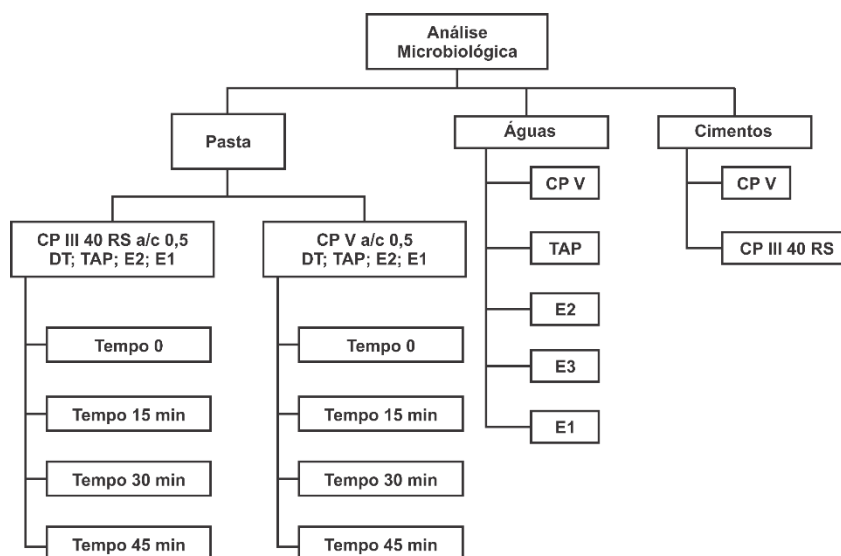
Figura 5.3 – Estratégia para alcance dos objetivos, avaliação da microestrutura



Legenda: a/c – fator água por cimento; DT – água destilada do LPC; TAP – água da torneira do LMCC; E2 – água de amassamento da ETE Marechal Rondon; E3 – água de amassamento da ETE Guadalajara.

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.4 – Estratégia para alcance dos objetivos, avaliação microbiológica



Legenda: a/c – fator água por cimento; DT – água destilada do LPC; TAP – água da torneira do LMCC; E2 – água de amassamento da ETE Marechal Rondon; E3 – água de amassamento da ETE Guadalajara.

Fonte: Elaborado pelo autor

Posteriormente serão apresentados os materiais, equipamentos e métodos utilizados para análise da liberação de compostos para formação da microestrutura, das pastas (cimentos e águas), tais como: calor de hidratação e termo-análises.

Por fim, os métodos utilizados para avaliação microbiana das pastas em diferentes tempos, para verificar a ação antimicrobiana dos cimentos utilizados.

Consonante com a figura 5.1 a 5.4, seguem as tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 respectivamente, verificação normativa, avaliação macroestrutural, avaliação microestrutural e avaliação microbiana, apresentando os ensaios realizados, os locais da realização, normas e/ou procedimentos utilizados e objetivos.

Tabela 5.1 – Verificação normativa dos constituintes (Continua)

Material	Local	Ensaio	Norma/Procedimento	Metodologia de análise
Águas do estudo*	Laboratório de Saneamento Ambiental (LABOSAN) da UFC	Óleos e gorduras	NBR 15.900-3	Colorimétrico
		Detergentes	NBR 15.900-3	Colorimétrico
		Cor	NBR 15.900-3	Colorimétrico
		Sólidos totais dissolvidos (STD)	NBR 15.900-3	Gravimétrico
		Odor	NBR 15.900-3	Sensorial
		pH	NBR 15.900-3	Potenciométrico
		Matéria Orgânica	NBR 15.900-3	Colorimétrico
		Cloretos	NBR 15.900-6	Cromatógrafo de íons
		Sulfatos	NBR 15.900-7	Cromatógrafo de íons
		Álcalis	NBR 15.900-9	Absorção atômica
		Açúcares	NBR 15.900-11	Espectrofotometria
		Fosfatos	NBR 15.900-8	Cromatógrafo de íons
		Nitratos	NBR 15.900-10	Cromatógrafo de íons
	Chumbo	NBR 15.900-5	Absorção atômica	
	Zinco	NBR 15.900-4	Absorção atômica	
	Conductividade ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	Próprio	Potenciométrico	
	Sólidos totais suspensos (mg/l)	Próprio	Gravimétrico	
	Dureza total (ppm $\text{CaCO}_3$ )	Próprio	Titulométrico	
	Dureza Cálcio ( $\text{Ca}^+$ , como $\text{CaCO}_3$ (mg/l))	Próprio	Titulométrico	
	Alcalinidade total (Alc, como $\text{CaCO}_3$ )	Próprio	Titulométrico	
	<i>E-Coli</i>	Próprio	Colilert	
	pHsat	Próprio	Potenciométrico ***	
	pH de equilíbrio (pHe)	Próprio	Aplicação de equação***	
Índice de Saturação de Ryznar (RSI)	Próprio	Aplicação de equação***		
Índice de Saturação de Langelier (LSI)	Próprio	Aplicação de equação***		
Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE)	Temperatura de Coleta (T, °C)	Próprio, <i>Standart Methods</i>	Medição direta	
Agregado Miúdo	Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFC	Demanda Biológica de Oxigênio (DBO, mg $\text{O}_2/\text{L}$ )	Próprio	<i>Winkler</i>
		Demanda Química do Oxigênio (DQO, mg $\text{O}_2/\text{L}$ )	Próprio, <i>Standart Methods</i>	Titulométrico
		Granulometria	ABNT MN 248	Peneiras sucessivas

Legenda: \*: Destilada (Ref), Torneira (TAP), Efluente 2° (E2) e Efluente 3° (E3); \*\*: Fornecida ao LMCC; \*\*\*: vide item 4.1.1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5.1 – Verificação normativa dos constituintes (Conclusão)

Material	Local	Ensaio	Norma/Procedimento	Metodologia de análise
Areia Normal	Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo**	Teor de sílica	ABNT NBR 13.956	Gravimétrico
		Granulometria	ABNT MN 248	Peneiras sucessivas
		Umidade	NBR 7.214, item 5.2	Gravimétrico
		Matéria Orgânica	ABNT NM 49	Colorimétrico
Agregado Graúdo		Granulometria	ABNT MN 248	Peneiras sucessivas
Pasta	LMCC	Consistência normal	NBR 16.606	Penetração da sonda de Temajer
		Tempos de pega	NBR 16.607	Penetração da agulha Vicat
Argamassa Padrão		Resistência à compressão axial	NBR 7.215	Método Destrutivo
Concreto		Resistência à compressão axial	NBR 5.739	Método Destrutivo

Legenda: \*: Destilada (Ref), Torneira (TAP), Efluente 2° (E2) e Efluente 3° (E3); \*\*: Fornecida ao LMCC; \*\*\*: vide item 4.1.1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para verificação normativa, utilizou-se somente o CP V, chamado puro e denominado de alta resistência inicial.

Para os prescritos na NBR 15.900, foram verificados também pelas normas apresentadas no item 3.2.1, normas no cenário mundial.

Tabela 5.2 – Avaliação macroestrutural

Material	Local	Ensaio	Norma/Procedimento	Metodologia de análise
Concreto	LMCC	Dosagem	ABCP ET-67	Prescrito na norma
		<i>Slump Test</i>	NBR NM 67	Prescrito na norma
		Carbonatação*	RILEM CPC 18	Destrutivo com aspensão de Fenolftaleína
		Massa Específica	NBR 9.778	Gravimétrico
		Índice de Vazios		
Absorção	NBR 7.215	Método Destrutivo		
Resistência a Compressão				

Legenda: \* ensaio realizado somente com CP II 32 Z.

Fonte: Elaborado pelo autor

Somente o ensaio de carbonatação, utilizou-se o CP II 32 Z. Os demais ensaios foram adotados nos cimentos CP III 40 e CP V, para todas as águas prescritas na tabela 5.1.

Os ensaios da tabela 5.3 foram adotados os cimentos CP III 40 e CP V, do mesmo fabricante, para todas as águas prescritas na tabela 5.1.

Tabela 5.3 – Avaliação da pasta

Local	Ensaio	Norma/Procedimento	Metodologia de análise
LMCC	Calorimetria	ASTM C1702 e	Prescrito no item 6.1.2 *
LTA	<i>Termo-analises</i>	HOPPE FILHO (2008)	Prescrito no item 6.1.2 *

Legenda: LTA - Laboratório de Termoanálises da UFC; CA - Central Analítica do Departamento de Física da UFC; \* nesta pesquisa.

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5.4 – Avaliação microbiológica

Material	Local	Ensaio	Norma/Procedimento	Metodologia de análise
Águas Cimento Pasta	LAMAP	Quantificação de Bactérias*	DOWNES e ITO (2001)	Contagem de Placa Padrão**

Legenda: \* e \*\*: Descrito nos itens 6.2.2 e 6.2.3

Fonte: Elaborado pelo autor

As avaliações microbiológicas foram realizadas nos cimentos CP III e CP V, sendo todos do mesmo fabricante, adicionados com todas águas do estudo, excetuando a E3, visto a problemas operacionais na etapa terciária da Estação de Tratamento de Esgoto do estudo, como apresentado na tabela 5.4.

No entanto, afim substituir a água de amassamento E3, incluímos o efluente pré-condicionado (E1), da Estação de Pré-Condicionamento de Esgoto da Região Metropolitana de Fortaleza, com a vazão média de 3 m<sup>3</sup>/s para emissário submarino.

A seguir está apresentada a preparação das amostras, bem como os materiais, métodos e equipamentos utilizados.

## 5.1 Materiais

### 5.1.1 Constituintes

#### - Agregados Miúdos

As caracterizações dos agregados miúdo foram realizados conforme prescrito pela norma nacional, ABNT NM 248, no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, produzindo dois traços (proporções de aplicação de materiais) distintos, onde suas características estão apresentadas na tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Características do agregado miúdo (1° e 2° Traços)

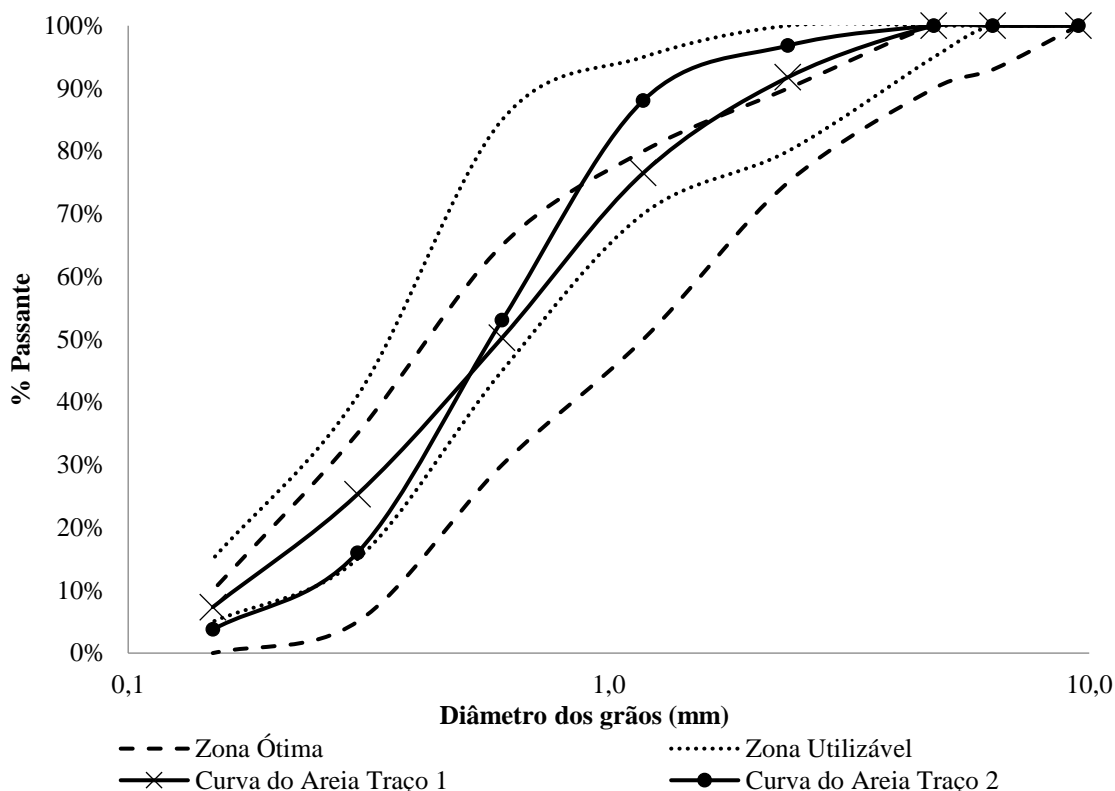
Traço	Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária solta (g/cm <sup>3</sup> )	Volume de vazios solto (%)	DMC	Modulo de finura
1	2,56	1,51	41,07	4,8	2,49
2	2,64	1,40	46,79	2,4	2,42

Legenda: DMC- Dimensão máxima característica.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dois agregados atenderam aos critérios normativos, estando dentro da faixa de utilização, conforme apresentado no gráfico 5.1.

Gráfico 5.1 – Avaliação da conformidade dos agregados miúdos



Fonte: Elaborado pelo autor

#### - Agregados Graúdos

As caracterizações dos agregados graúdos foram realizadas conforme prescrito pela norma nacional, ABNT NM 248, no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, produzindo dois traços (proporções de aplicação de materiais) distintos, onde suas características estão apresentadas na tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Características do agregado graúdo (1° e 2° Traços)

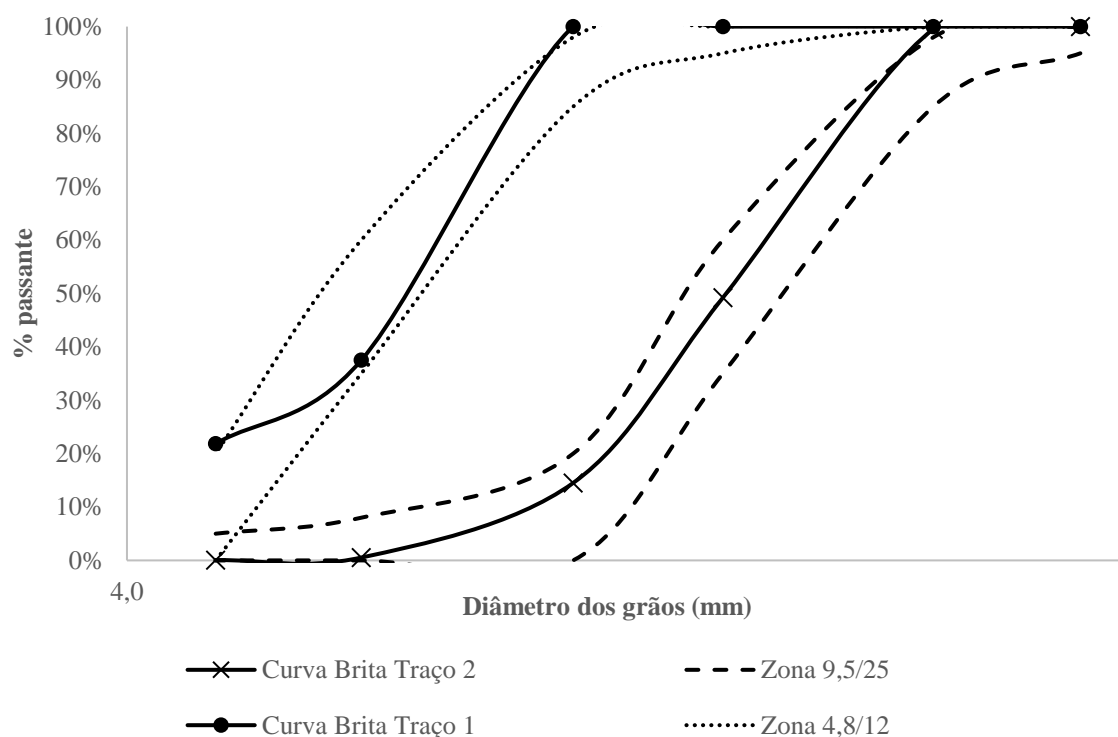
Traço	Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária solta (g/cm <sup>3</sup> )	Modulo de finura	Absorção (%)	Volume de vazios solto (%)	DMC
1	2,67	1,40	2,60	0,8	47,68	19
2	2,66	1,41	2,42	0,43	46,99	19

Legenda: DMC- Dimensão máxima característica.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os agregados utilizados atenderam os prescritos normativos, estando dentro da Zona Utilizável, apresentada no gráfico 5.2.

Gráfico 5.2 – Avaliação da conformidade dos agregados graúdos



Fonte: Elaborado pelo autor

#### - Aditivo

O aditivo utilizado foi o MAXIMENT NT 14 da fabricante Matchem, sendo este o plastificante polifuncional para concreto, de pega normal.

De acordo com a fabricante, o aditivo é compatível com todos os tipos de cimento, em especial aqueles com baixa quantidade de adição, como o CP V utilizado na pesquisa. As características técnicas do aditivo estão apresentadas na tabela 5.7.

Tabela 5.7– Características técnicas e propriedades do plastificante

Ação principal	Plastificante polifuncional
Aspecto	Líquido
Cor	Marrom escuro
Odor	Característico
Solubilidade	Solúvel em água
pH a 25°C	5,5 a 7,5
Massa específica	1,14 a 1,2 Kg/cm <sup>3</sup>
Viscosidade a 25°C	< 20 cP
Teor de cloretos	Não contém cloretos
Lignossulfonatos	20 – 40%
Naftalenossulfonato de sódio	< 5%
Açúcares	<15%
Ponto de ebulição	~105°C

Fonte: Adaptado pelo autor de ficha técnica Matchem, 2018

### - Cimentos

Foram utilizados cimentos encontrados no mercado local dos tipos CP II 32 Z, CP III 40 RS e CP V, para produzir os concretos em dois traços distintos, onde o primeiro traço utilizou o primeiro cimento mencionado e o segundo os dois últimos.

As características dos mesmos estão apresentadas nas tabelas 5.8 a 5.13, a seguir, fornecidas pelos fabricantes, conforme número de lote. Tais cimentos foram realizados ensaios microbiológicos.

Tabela 5.8 – Propriedades químicas do CP II 32 Z

Propriedades Químicas			
PF (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	RI (%)
5,55	2,66	3,53	11,73

Fonte: Adaptado pelo autor da ficha técnica do fabricante.

Tabela 5.9 – Propriedades físicas e mecânicas do CP II 32 Z

Propriedades Físicas e Mecânicas								
Exp. Q (mm)	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	H <sub>2</sub> O Cons. (%)	I. Pega (hh:mm)	F. Pega (hh:mm)	#200 (%)	R3 (Mpa)	R7 (Mpa)	R28 (Mpa)
0,38	4928,94	29,20	2:29	3:28	1,23	26,51	30,58	36,31

Fonte: Adaptado pelo autor da ficha técnica do fabricante.

Tabela 5.10 – Propriedades químicas do CP III 40 RS

Propriedades Químicas									
PF (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	RI (%)
3,73	26,79	9,07	1,56	49,74	5,30	2,69	0,19	0,56	0,88

Fonte: Adaptado pelo autor da ficha técnica do fabricante.

Tabela 5.11 – Propriedades físicas e mecânicas do CP III 40 RS

Propriedades Físicas e Mecânicas								
M.ESP (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	H <sub>2</sub> O Cons. (%)	I. Pega (hh:mm)	F. Pega (hh:mm)	#200 (%)	R3 (Mpa)	R7 (Mpa)	R28 (Mpa)
2,97	4270,00	31,15	3:15	4:10	0,70	23,00	34,85	46,35

Fonte: Adaptado pelo autor da ficha técnica do fabricante.

Tabela 5.12 – Propriedades químicas do CP V

Propriedades Químicas									
PF (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	RI (%)
4,54	17,91	4,37	2,88	59,94	5,68	3,39	0,18	0,70	0,88

Fonte: Adaptado pelo autor da ficha técnica do fabricante.



Tabela 5.13 – Propriedades físicas e mecânicas do CP V

Propriedades Físicas e Mecânicas									
M.ESP (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	H2O Cons. (%)	I. Pega (hh:mm)	F. Pega (hh:mm)	#200 (%)	R1 (Mpa)	R3 (Mpa)	R7 (Mpa)	R28 (Mpa)
3,08	4525,00	28,85	2:15	3:10	0,45	30,65	35,30	42,05	48,30

Fonte: Adaptado pelo autor da ficha técnica do fabricante

#### - Águas Utilizadas

As coletas das amostras das águas foram realizadas no período da manhã, 24 horas antes da dosagem dos traços, bem como encaminhadas, no dia da coleta, aos Laboratórios de Saneamento Ambiental, LABOSAN, da Universidade Federal do Ceará, e de Controle de Qualidade (GECOQ) da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), para realização dos ensaios, prescritos pela norma nacional NBR 15.900, tais como presença de óleos e gorduras, presença de detergentes, cor, sólidos totais dissolvidos, odor, pH, matéria orgânica, cloretos, sulfatos, álcalis, açúcares, fosfatos, nitratos, chumbo e zinco, bem como outros parâmetros requeridos, tais como: pH de saturação em carbonato de cálcio (pH<sub>sat</sub>), temperatura de coleta (T), condutividade, sólidos totais suspensos, dureza total em carbonato de cálcio, dureza cálcio em íons de cálcio como carbonato, alcalinidade total como carbonato (*Alc*), *Escherichia Coli* (*E-coli*), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO). As águas de amassamento utilizadas neste estudo, foram:

- a) Água Destilada: Também chamada de água de referência (Ref), devido a sua pureza e estabilidade, foram coletas do destilador do Laboratório de Pesquisa de Corrosão (LPC) da Universidade Federal do Ceará.
- b) Água Potável: Também chamada de água da torneira (TAP), foram coletadas da torneira do Laboratório de Materiais de Construção Civil, originária de reservatório abastecido pela rede pública de abastecimento de água da CAGECE.
- c) Esgoto Tratado: Também chamada de Efluente Secundário (E2), tendo em vista a etapa de tratamento, foram coletadas ao final do tratamento da ETE Marechal Rondon, apresentada no item 3.4.1. Tal efluente, ao longo dos últimos 5 anos, vem atendendo aos parâmetros monitorados da resolução do Conselho Estadual de Meio Ambiente número 02 de 2017, onde dispõe sobre os padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras.
- d) Água Recuperada: Também chamada de água de reuso ou Efluente Terciário (E3), devido ao polimento recebido após o tratamento secundário, foram

coletadas ao final do tratamento, antes da etapa de armazenamento, da ETE Guadalajara, apresentada no item 3.4.1. Tal sistema foi pioneiro na região Norte-Nordeste quando na sua implantação, em 2009.

- e) Esgoto Bruto: Também chamado de Efluente Primário (E1) ou Pré-Condicionado, foram coletadas ao final da etapa de pré-condicionamento, antes do lançamento em emissário submarino, da Estação de Pré-Condicionamento de Esgoto (EPC) da CAGECE, com vazão média de 3m<sup>3</sup>/s. Esta água foi somente utilizada nos ensaios microbiológicos, devido a elevada concentração de microorganismos presentes, avaliando a eficácia antimicrobiana dos cimentos CP III 40 RS e CP V.

Para o primeiro traço, onde utilizou-se o CP II 32 Z, não foram caracterizadas as águas destilada e potável, visto ao prescrito pelas normas vigentes mundiais, assim, apesar disto, para o segundo traço, foram realizadas tais caracterizações afim de investigar os efeitos na hidratação do cimento com diferentes tipos de água de amassamento.

Os resultados dos parâmetros da água destilada (Ref) e potável (TAP) estão apresentados neste capítulo 6, nas tabela 6.1 a 6.3. Todas as águas de amassamento do segundo traço, tiveram sua caracterização micro biológica, a fim de conhecer os microorganismos presentes.

### **5.1.2 Pasta**

As pastas foram constituídas para cada tipo de cimento apresentado no item 5.1.1, adicionado as diferentes águas do estudo, sem misturas entre elas (*blends*), conforme apresentado na tabela 5.14.

Para avaliar os requisitos normativos da pasta foram realizados ensaio de pasta de consistência normal, prescrito na norma brasileira NBR 16.606, método de penetração da sonda Temajer, para assim determinar os tempos de pega, prescrito pela norma brasileira NBR 16.607, método de penetração da agulha Vicat. Os resultados serão apresentados no capítulo 6.

A preparação das amostras para realização do ensaio de calor de condução, ou calorimetria, está apresentada a seguir.

Tabela 5.14 – Ensaio realizados para cada tipo de pasta

		Cimentos		
		CP II 32 Z	CP III 40 RS	CP V
Águas	Ref	Tempos de Pega	Tempos de Pega, Calorimetria, TG e DSC	Tempos de Pega, Calorimetria, TG e DSC
	TAP	Tempos de Pega	Tempos de Pega, Calorimetria, TG e DSC	Tempos de Pega, Calorimetria, TG e DSC
	E2	Tempos de Pega	Tempos de Pega, Calorimetria, TG e DSC	Tempos de Pega, Calorimetria, TG e DSC
	E3	Tempos de Pega	Tempos de Pega, Calorimetria, TG e DSC	Tempos de Pega, Calorimetria, TG e DSC
	E1	-	-	-

Legenda: Ref – água destilada; TAP – água proveniente do sistema público de abastecimento de água, potável; E2 – água proveniente da ETE Marechal Rondon (esgoto tratado na fase secundária); E3 – água proveniente da ETE Guadalajara (esgoto tratado na fase terciária); E1 – água proveniente da EPC (esgoto pré-condicionado), somente para ensaios microbiológicos.

Fonte: Elaborado pelo auto.

#### - Preparação das amostras para ensaio de Calorimetria

Este ensaio foi realizado com os constituintes: águas de amassamento Ref, TAP, E2 e E3, com os cimentos: CP III 40 RS e CP V, todas em triplicata. O procedimento de ensaio foi baseado na ASTM C1702 (ASTM, 2017), se inicia com a pesagem de ampolas de vidro de 20 ml vazias e posteriormente preenchidas pelas pastas que foram preparadas com uma relação água/cimento de 0,4. Antes do preparo as ampolas são identificadas e pesadas secas, assim, procede-se com a preparação da pasta, onde foi feita com um agitador, *Mixer* de potência 300W, sendo homogeneizado durante um minuto.

Após a homogeneização a pasta é moldada em uma ampola de vidro já identificadas, enchendo-as com cautela para evitar presença de ar e no tempo prescrito pela norma, pesá-las com a mesma balança de precisão utilizada no início do experimento e tampar hermeticamente as ampoulas com as esperas.

Posteriormente, colocá-las nas devidas células do calorímetro isotérmico, que se encontra a uma temperatura de 25°C, junto com uma ampola vazia de referência, permitindo assim retirar o efeito do recipiente durante a liberação de calor.

Já para preparação das amostras para avaliação das fases da hidratação, foram realizados os ensaios de termigravimetria (TG), análise térmica diferencial (DTG) e calorimetria exploratória diferencia (DSC), como apresentados a seguir.

#### - Preparação das amostras para avaliação das fases de hidratação

Para avaliação das fases de hidratação da pasta foi realizada a preparação das amostras conforme descrito na análise da calorimetria, no item anterior, com os mesmos constituintes, porém para nas idades de 1 dia, 7 dias, 14 dias e 28 dias, todos em triplicata.

Tais idades são os tempos usuais de estudo da ciência do concreto, devido a evolução do carbonato de cálcio e formação de etringita (C-S-H + aluminatos), podendo assim avaliar a potencialidade da carbonatação e evolução de ganho de resistência mecânica.

Assim, o fator água/cimento adotado foi de 0,62 para permitir comparação com o concreto dosado, e no lugar da ampola de vidro foram utilizadas fôrmas poliméricas de fazer gelo, para a moldagem, figura 5.5.

Após 24 horas da moldagem, as amostras foram retiradas das fôrmas poliméricas e colocadas em 4 pequenos tanques de vidro, como aquários, separados por natureza da água de amassamento, para cura úmida em água destilada, e dentro de sala climatizada, controlada a temperatura, figura 5.6.

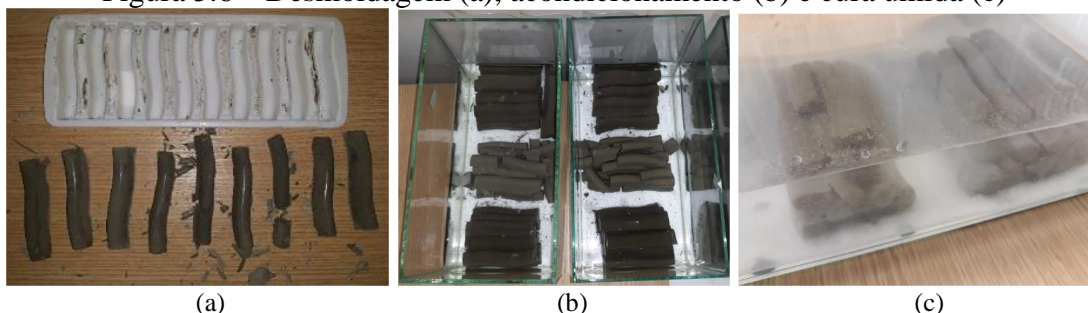
Porém, estes pequenos blocos precisam estar em pó, micronizados, para realizar os ensaios de avaliação das fases de hidratação. Logo, foi adotado o prescrito na tese de doutoramento de Hoppe Filho (2008), para preparação desse pó nas idades desejadas, de 1 dia, 7 dias, 14 dias e 28 dias.

Figura 5.5 – Moldagem das pastas



Fonte: Elaborador pelo autor.

Figura 5.6 – Desmoldagem (a), acondicionamento (b) e cura úmida (c)



Fonte: Elaborador pelo autor.

Os pequenos blocos das pastas foram micronizado com o auxílio de um almofariz, nas respectivas idades de cura, no dia de encaminhá-los para adoção da técnica de liofilização,

visto no item 2.3, e peneirado nas peneiras de aberturas 75  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ , sendo a amostra usada o passante da 150  $\mu\text{m}$  e o retido da 75  $\mu\text{m}$  (APAZA MEDINA, 2011), utilizando luvas cirúrgicas em laboratório climatizado.

Para evitar contaminação das amostras liofilizadas, além da limpeza do almofariz e peneiras, foi realizada a seguinte sequência: primeiro a micronização da pasta com a água Ref, segundo da pasta com a água TAP, terceiro da pasta com a água E3 e quarto da pasta com a água E2, pois as moldagens não ocorreram nos mesmos dias.

Em seguida as amostras liofilizadas micronizadas foram armazenadas em pequenos sacos de *zip* diferentes e identificadas, colocando-as dentro de um dessecador de sílica, para evitar a umidade do ar.

Os dessecadores foram acondicionados em sala de controle de temperatura (a mesma dos ensaios calorimétricos).

A fim de melhorar o transporte, parte das amostras foram retiradas dos pequenos sacos *zip* e colocadas dentro de *ependorfs* identificados, e armazenados novamente nos dessecadores. Os dessecadores foram levados aos laboratórios para realização das análises e identificação da formação dos compostos.

A liofilização foi realizada em um equipamento da marca Labconco do modelo *FreeZone 6*, com temperatura do condensador de  $-40^{\circ}\text{C}$  e vácuo final de 1  $\mu\text{m}$  de mercúrio ( $\mu\text{mHg}$ ), durante o período de 24 horas, assim, paralisando a hidratação, retirando a água livre e água congelada da estrutura da pasta e parte da interlamelar (HOPPE FILHO 2008). O equipamento está localizado no Laboratório de Proteínas Vegetais de Defesa (LPVD) do Departamento de Biologia da UFC.

Após liofilizadas, as amostras que contêm água quimicamente combinada como hidratos e uma parcela de água interlamelar, foram determinadas por termogravimetria, para acompanhar a evolução da liberação de compostos durante a hidratação.

### **5.1.3 Concreto**

As dosagens dos dois traços do concreto, foram:

- a) 1° Traço com agregados das tabelas 5.5 e 5.6, utilizando as águas de referencia (Ref), do sistema público de abastecimento de água (TAP), o E2 e E3, todas com cimento CPII 32 RS, sem a necessidade de utilização de aditivo, pois atenderam ao requisito do *Slump Test*, sendo  $(100\pm 20)\text{mm}$
- b) 2° Traço com agregados das tabelas 5.5 e 5.6, utilizando as águas de referencia (Ref), do sistema público de abastecimento de água (TAP), o E2

e E3, com os cimentos CP III 40 RS e CP V. Somente os concretos dosados com as águas E2 e E3 necessitaram de aditivo, tabela 5.7, a fim de fixar a relação água/cimento do traço, para efeitos comparativos, conforme apresentado na tabela 5.15, pois não atenderam ao requisito do *Slump Test*, sendo  $(100\pm 20)$ mm, igual ao 1º traço.

Tabela 5.15 – Dosagem de materiais adotado

CP II 32 Z						
Período	Cimento	Areia	Brita	Água	Aditivo	Teor de Argamassa
Kg/m <sup>3</sup>	419,64	634,37	1019,49	235		
1º Kg por betonada*	16,03	24,21	39,03	8,98	-	52%
Unitário	1	1,51	2,43	0,56		
CP III 40 e CP V						
Período	Cimento	Areia	Brita	Água	Aditivo	Teor de Argamassa
Kg/m <sup>3</sup>	351,63	772,02	1034,05	218	0,1%**	
2º Kg por betonada*	13,43	29,42	39,61	8,33	e	50,8%
Unitário	1	2,19	2,95	0,62	0,2%***	

Legenda: \* 0,0382 m<sup>3</sup> por betonada (volume total das amostras); \*\* adicionado 500 gramas do aditivo para traço com água E3; \*\*\* adicionado 1kg do aditivo para traço com da água E2.

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.1.4 Argamassa

Os constituintes utilizados para avaliação macroestrutural da argamassa padrão, foi utilizada o cimento CP V, com agregado padrão fornecido pelo Instituto de Pesquisas de São Paulo, IPT, e moldados com as águas do 2º traço, com traço 1:3, e a/c igual 0,48.

## 5.2 Métodos e Equipamentos

A seguir serão apresentados os métodos utilizados na realização das caracterizações dos agregados miúdos e graúdos (5.2.1), técnica microbiológica realizada para análise dos cimentos (5.2.2), normativos utilizados com novas proposituras física e microbiológica para avaliação das águas utilizadas na pesquisa para amassamento (5.2.3), técnicas com novas proposituras físicas e microbiológicas para avaliação das pastas (5.2.4), métodos utilizados para avaliação do concreto nos estados fresco e endurecido (5.2.5) e método utilizados para avaliação da argamassa padrão (5.2.6).

As técnicas de calor de condução (ou Calorimetria isotérmica), bem como as técnicas de termo-análises: termogravimetria (TG), análise térmica diferencia (DTA) e calorimetria exploratória diferencial (DSC), foram as utilizadas na pesquisa.

Para análises microbiológicas adotada na pesquisa para analisar os constituintes, cimentos e águas de amassamento, a quantificação das bactérias nas amostras foi realizada de acordo com metodologia estabelecida por Downes e Ito (2001).

O método utilizado foi a Contagem Padrão em Placas usando meios de cultura específico para cada grupo microbiano. As amostras foram diluídas serialmente em solução salina 0,85% de cloreto de sódio (NaCl) e alíquotas de 1 ml das diluições ( $10^{-1}$  a  $10^{-5}$ ) foram inoculadas pela técnica de *Pour Plate*. Para inoculação das amostras no meio seletivo para coliformes (Agar EMB) foi usada a técnica de spread plate.

O procedimento foi feito em duplicata e após inoculação nos meios de cultura as amostras foram incubadas em temperaturas e por tempos específicos para cada grupo, conforme tabela 5.16.

Os grupos aeróbicos foram incubados em estufas bacteriológicas enquanto os anaeróbios foram colocados em jarras de anaerobiose.

Tabela 5.16 - Especificações de exigência de O<sub>2</sub>, meio de cultura, tempo e temperatura de incubação utilizados para cada grupo microbiano analisado

Grupos microbianos	Exigência de O <sub>2</sub>	Meio de cultura	Temperatura	Tempo
Bactérias Heterotróficas Cultiváveis	Aeróbias	Agar PCA	35°C	48h
	Anaeróbias		28°C	120h
Bactérias Redutoras de Sulfato	Aeróbias	Agar BRS	35°C	48h
	Anaeróbias		28°C	78h
Bactérias Acidofílicas	Aeróbias	Agar BAC	35°C	48h
Bactérias Oxidadoras de Sulfato	Aeróbias	Agar Y10	35°C	48h
Bactérias Precipitadoras de Carbonato	Aeróbias	Agar Ureia Christensen	35°C	48h
Bactérias Produtoras de Esporo	Aeróbias	Agar PCA	35°C	48h
Bactérias do Grupo dos coliformes	Aeróbias	Agar BEM**	35°C	48h
Fungos	Aeróbias	Agar Batata	28 °C	120h

Legenda: \*aquecido em banho maria a 70°C por 1h; \*\* *spread plate*

Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir podem ser observadas as siglas utilizadas neste trabalho quanto a identificação dos microorganismos cultiváveis:

- BHC-AE: Bactérias heterotróficas aeróbia cultiváveis;
- BHC-AN: Bactérias heterotróficas anaeróbia cultiváveis;
- BRS-AE Bactérias redutoras de sulfato aeróbias;
- BRS-AN: Bactérias redutoras de sulfato anaeróbias;
- BAC: Bactérias acidofílicas;
- BOS: Bactérias oxidadora de sulfato;
- BPC: Bactérias precipitadoras de carbonato;
- BPE: Bactérias produtoras de esporos (PE);
- Coliformes: Grupo dos coliformes;
- FUNGO: Fungos.

### **5.2.1 Agregados miúdos e graúdos**

Os agregados miúdo (areia) e graúdo (brita) foram caracterizados conforme norma brasileira de ensaios granulométricos para agregados, a NBR NM 248/2003, técnica das peneiras sucessivas, no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), lotado no Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (Estruturas e Construção Civil) da Universidade Federal do Ceará. Para o agregado padrão utilizada na argamassa, foi fornecido pelo IPT através do LMCC.

### **5.2.2 Cimento**

#### - Microbiologia

Foram realizados teste microbiológico no cimento anidro (não hidratado), através do ensaio de Contagem de Placa Padrão, com quantificação de bactérias, prescrito por Downes e Ito (2001), conforme apresentado acima.

### **5.2.3 Água Recuperada**

As águas de amassamento utilizadas no 1º traço, apenas foram realizados os ensaios prescritos em toda NBR 15.900/2009, Requisitos para águas de amassamento

Já para as águas de amassamento utilizadas no 2º traço, foram utilizadas técnicas adicionais, além do utilizado no 1º traço, que são os seguintes parâmetros: pH de saturação em carbonato de cálcio (pH<sub>sat</sub>), temperatura de coleta (T), condutividade, sólidos totais suspensos, dureza total em carbonato de cálcio, dureza cálcio em íons de cálcio como carbonato, alcalinidade total como carbonato (*Alc*), *Escherichia Coli (E-coli)*, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), bem como ensaios microbiológicos com isolamento de bactérias, apresentadas a seguir.

Na tabela 5.17 estão apresentadas as respectivas variáveis e métodos utilizados para análise das águas.



Tabela 5.17 – Métodos utilizados, normas, parâmetros e locais das análises das águas de amassamento pesquisadas

Material	Local	Ensaio	Norma/Procedimento	Metodologia
Águas do estudo	Laboratório de Saneamento Ambiental (LABOSAN) da UFC	Óleos e gorduras	NBR 15.900-3	Colorimétrico
		Detergentes	NBR 15.900-3	Colorimétrico
		Cor	NBR 15.900-3	Colorimétrico
		Sólidos totais dissolvidos (STD)	NBR 15.900-3	Gravimétrico
		Odor	NBR 15.900-3	Sensorial
		pH	NBR 15.900-3	Potencio métrico
		Matéria Orgânica	NBR 15.900-3	Colorimétrico
		Cloretos	NBR 15.900-6	Cromatógrafo de íons
		Sulfatos	NBR 15.900-7	Cromatógrafo de íons
		Álcalis	NBR 15.900-9	Absorção atômica
		Açúcares	NBR 15.900-11	Espectrofotometria
		Fosfatos	NBR 15.900-8	Cromatógrafo de íons
		Nitratos	NBR 15.900-10	Cromatógrafo de íons
		Chumbo	NBR 15.900-5	Absorção atômica
		Zinco	NBR 15.900-4	Absorção atômica
		Condutividade ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )*	Próprio vide <i>Standart Methods</i>	Potencio métrico
		Sólidos totais suspensos (mg/l)*	Próprio vide <i>Standart Methods</i>	Gravimétrico
		Dureza total (ppm $\text{CaCO}_3$ )*	Próprio vide <i>Standart Methods</i>	Titulométrico
		Dureza Cálcio ( $\text{Ca}^+$ , como $\text{CaCO}_3$ (mg/l))*	Próprio vide <i>Standart Methods</i>	Titulométrico
	Alcalinidade total (Alc, como $\text{CaCO}_3$ )*	Próprio vide Literatura	Titulométrico	
	E-Coli*	Próprio vide <i>Standart Methods</i>	Colilert	
	pHs*	Próprio vide Literatura	Potencio métrico	
	pH de equilíbrio*	Próprio vide Literatura	Aplicação de equação, item 6.2.2	
	Índice de Saturação de Ryznar (RSI)*	Próprio vide Literatura	Aplicação de equação, item 6.2.2	
	Índice de Saturação de Langelier (LSI)*	Próprio vide Literatura	Aplicação de equação, item 6.2.2	
	Temperatura de Coleta (T, °C)*	Próprio vide <i>Standart Methods</i>	Medição direta	
	Laboratório de Microbiologia Ambiental e do Pescado (LAMAP)	Quantificação de Bactérias*	DOWNES e ITO (2001)	Contagem de Placa Padrão

Legenda: \* parâmetros avaliados somente nas águas de amassamento do 2º traço.

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### - Formulação do pH de equilíbrio das águas do estudo

Para identificar o pH de Saturação (pH<sub>sat</sub>) em Carbonato de Cálcio, utilizou-se os seguintes materiais:

- a) Aparato para filtração, suporte com argola e funil.

- b) Papel de filtro faixa branca, abertura de  $8\mu\text{m}$  (reter o excesso de carbonato de cálcio).
- c) Frasco de DBO.
- d) Coletar no mínimo 500 ml da amostra de água.
- e) Carbonato de Cálcio P.A.
- f) pHmetro potenciométrico (marca Digimed, modelo DM23).

Assim, adotamos o seguinte experimento:

- a) Separou-se 200 ml da amostra de água e medir pH com pHmetro (medida direta);
- b) Colocou-se o remanescente da água no frasco de DBO, e adicionou-se 0,3 gramas de carbonato de cálcio;
- c) Em seguida completou-se o frasco com a tampa de vidro esmerilhada;
- d) Agitou-se o frasco com a solução vigorosamente, em um intervalo de 2 horas;
- e) Depois da agitação, deixou-se o frasco com a solução em repouso no laboratório por 24 horas;
- f) Após este período, filtrou-se a solução utilizando o aparato e papel de filtro;
- g) Mediu-se a solução filtrada com pHmetro, e obtemos o pHsat.

O pHe, foi obtido matematicamente por dois estudiosos, John Ryznar (1944) e W. Langelier (1936), sendo representados pelas equações 5.1 e 5.2.

$$2(pH_{\text{sat}}) - pH = \text{Índice de Estabilidade Ryznar (RSI)} \quad \text{Equação (5.1)}$$

$$pH - pHe = \text{Índice de Saturação Langelier (LSI)} \quad \text{Equação (5.2)}$$

A fim de validar o experimento, confrontou-se os dados obtidos com o método matemático para identificar o pHe, e posteriormente o pHsat, e desta forma pode-se avaliar o método. Assim, segundo Brandão (2019), o pHe é descrito conforme equação 5.3:

$$pHe = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad \text{Equação (5.3)}$$

Onde:

$$A = [\log(STD) - 1] / 10 \quad \text{Equação (5.3.1)}$$

$$B = [-13,12 \log(T + 273)] + 34,55 \quad \text{Equação (5.3.2)}$$

$$C = \log(Ca^{2+}) - 0,4 \quad \text{Equação (5.3.3)}$$

$$D = \log(Alc) \quad \text{Equação (5.3.4)}$$

### - Microbiologia

Foram realizados teste microbiológico nas águas do 2º traço, através do ensaio de Contagem de Placa Padrão, com quantificação de bactérias, prescrito por Downes e Ito (2001), conforme já apresentado.

### **5.2.4 Pasta**

Os métodos utilizados para análise da pasta estão suscintamente apresentados na tabela 5.18. As técnicas utilizadas para preparação das amostras para avaliação da calorimetria e termoanálises, este ultimo nas idades de 1, 7, 14 e 28 dias (idades usuais no controle tecnológico de materiais cimentícios) já foram apresentados no item 5.1.2.

Tabela 5.18 – Métodos utilizados, normas, parâmetros e locais das análises das pastas produzidas pelas águas de amassamento pesquisadas

Local	Ensaio	Norma/Procedimento
LMCC	Pasta de Consistência Normal	NBR 16.60
LMCC	Tempo de pega	NBR 16.607
LMCC	Calorimetria	ASTM C1702
LTA	<i>Termo-analises</i>	HOPPE FILHO (2008)

Legenda: \* parâmetros avaliados somente nas águas de amassamento do 2º traço.

Fonte: Elaborado pelo autor.

### - Pasta de Consistencia Normal e Tempos de Pega

Para realizar os tempos de pega, é necessário fazer o ensaio de pasta de consistência normal conforme prescrito na norma brasileira, NBR 16.606, tempo de início de pega determina o momento em que iniciou o enrijecimento da estrutura hidratada da pasta. O fim de pega, o momento de início do estado endurecido. Os tempos de pega foram realizado seguindo as recomendações da norma NBR16.607 para todas as águas. No entanto, utilizou-se apenas o cimento CP V, visto seu grau de pureza, sem aditivos.

### - Calorimetria de condução

O ensaio de calorimetria de condução, foram adotados os cimentos CP III 40 RS e o CP V, para todas as águas do estudo no 2º traço, com fator a/c de 0,4, conforme prescrito na norma. O equipamento utilizado é do modelo *Tam Air Isothermal Calorimeter*, TA *Instruments*, com uma precisão de 20 microwatts ( $\mu\text{W}$ ) com oito canais de ensaio, com um uso de um computador, com nobreak, para registro do calor de hidratação das misturas até 168 horas (7dias), do Laboratório de Calorimetria de Condução do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará.

Ressalta-se que durante os sete dias do ensaio, não se pode interromper o fornecimento de energia e o uso do ar condicionado, uma vez que a utilização do calorímetro exige uma variação de temperatura ambiente inferior a 1°C e o uso ininterrupto do computador para registro das informações geradas.

#### - Análises Termicas TG, DTG e DSC

As termo análises foram realizadas com o equipamento STA 449 F3 da Jupiter (NETZSCH), do Laboratório de Materiais Avançados do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFC, em atmosfera de nitrogênio (N<sub>2</sub>). As amostras foram aquecidas numa faixa de 25°C a 1000°C em uma variação de 10°C/min, com um fluxo de 60 mL/min de N<sub>2</sub>, utilizando cadinho de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Para as análises termogravimétricas dos cimentos CP III 40 RS e CP V hidratados com as águas de amassamento estudadas, nas idades de 1, 7, 14 e 28 dias de cura úmida, onde as amostras foram preparadas pelo método da liofilização, destaca-se três faixas de perda de massa onde, a primeira, entre 30°C a 450°C representa a decomposição do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), das duas fases: aluminato e dos compostos de magnésio. A segunda faixa, entre 450°C e 605°C representa a decomposição do hidróxido de cálcio e, a terceira faixa entre 605°C e 1.000°C, a decomposição do carbonato de cálcio (RAMACHADRAN, 1995; HOPPE FILHO, 2008). Nas duas primeiras faixas, entre 30°C e 650°C, a perda de massa se deve a água quimicamente combinada como compostos hidratados e portlandita e, na terceira, ao anidro carbônico do carbonato de cálcio (TAYLOR, 1997).

O pico em 150°C da DTG é atribuído, em especial, à máxima taxa de decomposição do C-S-H e da etringita; o pico em 194°C, às demais fases do aluminato (monossulfoaluminato de cálcio hidratado e aluminato de cálcio hidratado); o pico em 388°C, aos compostos de magnésio hidratado (hidrogranada). O hidróxido de cálcio tem maior taxa de decomposição a 515°C, seguido da decomposição do carbonato de cálcio, com pico de 781°C. Assim, a determinação do teor de portlandita liberado na hidratação do cimento nas idades estudadas requer a aplicação do fator que relaciona a massa molecular da portlandita e a massa molecular da água, conforme equação 5.4.

$$\text{Ca(OH)}_2 = \frac{M_{\text{Ca(OH)}_2}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \text{H}_2\text{O} \quad \text{Equação (5.4)}$$

Onde:

Ca(OH)<sub>2</sub> – é o teor de portlandita (%);

M<sub>Ca(OH)2</sub> – é a massa molecular da portlandita (74);

M<sub>H2O</sub> – é a massa molecular da água (18);

H<sub>2</sub>O – é a perda de massa referente à decomposição da portlandita (%).

Já o teor de carbonato de cálcio nos cimentos estudados nas idades de hidratação mencionadas, foram determinados de forma análoga ao teor de portlandita, conforme equação 5.5.

$$\text{CaCO}_3 = \frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CO}_2}} \text{CO}_2 \quad \text{Equação (5.5)}$$

Onde:

$\text{CaCO}_2$  – é o teor de carbonato de cálcio (%);

$M_{\text{CaCO}_2}$  – é a massa molecular do carbonato de cálcio (100);

$M_{\text{CO}_2}$  – é a massa molecular do anidro carbônico (44);

$\text{CO}_2$  – é a perda de massa referente à decomposição da anidro carbônico (%).

#### - Análises Microbiológicas (Mbio)

Foram realizados teste microbiológico nas pastas (água + cimento) do 2º traço, por meio do ensaio de Contagem de Placa Padrão, com quantificação de bactérias, prescrito por Downes e Ito (2001), durante a mistura de cimento nas águas, nos tempos zero segundo, 15 minutos, 30 minutos e 45 minutos, com agitador magnético da marca *cole parmer* na mesma frequência, buscando avaliar o decaimento dos microorganismos, isolados por grupo microbiano. Para todos estes tempos foram utilizados o método apresentado no capítulo 5 deste trabalho.

#### **5.2.5 Concreto**

Para avaliação do concreto, os agregados miúdo (areia) e graúdo (brita) foram adquiridos no comercio local para esta pesquisa, bem como realizada as respectivas caracterizações granulométricas de acordo com a norma ABNT vigente, para obtenção da dosagem. A resistência nominal do concreto utilizada para encontrar o traço ajustado em laboratório foi de 25MPa, seguindo ao prescrito da NBR 6118/2014 quanto a classe de agressividade II.

#### - Dosagem e Slump Test

Nos dois traços, o método de dosagem foram os mesmos, conforme NBR NM 67 seguindo o método da *American Concrete Institute* (ACI), adotando uma trabalhabilidade de abatimento de tronco de cone, ou *Slump Test*, de  $(100 \pm 20)$  mm e uma resistência característica de 25MPa aos 28 dias. O *Slump Test* segundo prescrito na norma brasileira NBR NM 67. Na tabela 5.15 foram apresentadas as dosagens dos constituintes para os dois traços, já ajustados em laboratório, com o abatimento do tronco de cone apresentado na tabela 5.19.

Tabela 5.19 – *Slump Test*, para as águas de amassamento do estudo (1º Traço)

Tipo de Água	Abatimento (cm)	A <sub>i</sub> /A <sub>R</sub>
Ref (A <sub>R</sub> )	8,3	1
TAP	11,4	1,37
E2	11,1	1,34
E3	10,4	1,25

Nota: a água destilada é a referência, logo a variação apresentada é em relação a mesma.

Legenda: A<sub>R</sub>: Abatimento do concreto usando a água de referencia (destilada); A<sub>i</sub>: Abatimento do concreto usando as águas de amassamento em estudo

Já para o segundo traço, durante a dosagem e ajuste do traço, com os respectivos agregados apresentados anteriormente e cimentos CP III e CP V, não se alcançaram o abatimento requerido para as águas E2 e E3. Logo buscando não afetar as propriedades mecânicas dos materiais no estado endurecido, nem tão pouco os mecanismos de hidratação com a presença de água, utilizou-se um plastificante, para evitar a necessidade de acrescentar água na mistura, o que levaria a alterar significativamente a relação (a/c). Assim utilizou-se o plastificante do item 5.1.1, onde obteve os abatimentos da tabela 5.20.

Tabela 5.20 – *Slump test*, para as águas de amassamento do estudo (2º Traço)

Tipo de Água	CP III		CP V	
	Abatimento (cm)	A <sub>i</sub> /A <sub>R</sub>	Abatimento (cm)	A <sub>i</sub> /A <sub>R</sub>
Ref (A <sub>R</sub> )	9	-	9	-
TAP	8	0,89	9	1
E2	9***	1	10****	0,9
E3*	9***	1	10****	0,9

Legenda: A<sub>R</sub>: Abatimento do concreto usando a água de referencia (destilada); A<sub>i</sub>: Abatimento do concreto usando as águas de amassamento em estudo; \*\*\* com aditivo, sendo 0,1% (13,42 g); \*\*\*\* com aditivo, sendo 0,2% (26,84 g).

Os abatimentos do tronco de cone nos dois traços, através da acomodação da massa, foram classificados como verdadeiros na figura 5.7, (a) e (b).

Figura 5.7 – Abatimento típico verdadeiro do 1º traço (a) e 2 traço (b)



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### - Resistência a Compressão Axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados conforme prescrito na norma brasileira NBR 5.739 vigente, onde foram produzidos 144 corpos de prova, cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, segundo a NBR 5.738, para cada traço tipo, com as águas de amassamento do estudo e cimentos CP II 32 Z, CP III 40 RS e CP V. Os corpos de prova foram colocados em cura úmida após 24 horas da moldagem, utilizando a mesma água de cura, TAP.

Os corpos de prova do primeiro traço foram compactados nos cilindros metálicos manualmente e capeados com enxofre, para garantir sua planicidade. Já os corpos de prova do segundo traço foram compactados nos cilindros metálicos com vibrador e não foi necessário utilizar o capeamento de enxofre.

Os ensaios de resistência a compressão foram realizados em tréplica, no LMCC, com os equipamentos: 1º traço em prensa hidráulica do fabricante WPM, de capacidade de até 300 toneladas, com marcador analógico, calibrado, da marca Dinatest; 2º traço em equipamento EMIC modelo PCE100C.

Os resultados foram analisados estatisticamente segundo a técnica intitulada “Análise de Variância (ANOVA)”, e foi realizado o teste de Duncan (MONTGOMERY, 2017), anexo D, havendo comparação de múltiplas médias.

#### - Ensaios de Absorção, Índice de Vazios e Massa Específica

Os ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica foram realizados conforme norma brasileira NBR 9.778, aos 28 dias e 450 dias, aquecidos, com resistores, imersos em água tratada.

Os resultados foram analisados estatisticamente segundo a técnica intitulada “Análise de Variância (ANOVA)”, anexo D, e foi realizado o teste de Duncan (MONTGOMERY, 2017), havendo comparação de múltiplas médias.

#### - Profundidade de Carbonatação

O ensaio de carbonatação seguiu o prescrito por Rilem CPC 18, destrutivo com aspersão de fenolftaleína, aos 28 dias de cura (corpos de prova provenientes do ensaio de resistência a compressão, somente no primeiro traço, no LMCC da UFC).

Foi utilizada máquina fotográfica digital, modelo Nikon coolpix com resolução de 12,1 megapixels, em bancada com cartolina branca, em uma altura média de 10cm ± 2cm. As fotos se encontram no anexo C.

Os resultados foram analisados estatisticamente segundo a técnica intitulada “Análise de Variância (ANOVA)”, anexo D, e foi realizado o teste de Duncan (MONTGOMERY, 2017), havendo comparação de múltiplas médias.

#### **5.2.6 Argamassa Padrão**

Para avaliação da argamassa padrão, o agregado padronizado foi adquirido no Instituto de Pesquisas Tecnológicas, no estado de São Paulo, no LMCC da UFC, onde foi realizado somente o ensaio de resistência à compressão axial, conforme NBR 7.215, em 6 corpos de prova cilíndricos, utilizando o CP V com agregado padrão IPT, de 5 cm de diâmetro com 10 cm de altura, e máquina EMIC modelo PCE100C, adaptada para o ensaio.

Os resultados foram analisados estatisticamente segundo a técnica intitulada “Análise de Variância (ANOVA)”, anexo D, e foi realizado o teste de Duncan (MONTGOMERY, 2017), havendo comparação de múltiplas médias.



## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Os Constituintes

#### 6.1.1 Águas Utilizadas

Os resultados físico-químicos e microbiológicos das águas de amassamento Ref, TAP, E2 e E3, estão apresentados respectivamente nas tabelas 6.1, 6.2 e 6.3

Tabela 6.1 – Propriedades físico-químicas e biológicas das águas destilada e potável (Continua)

2º Traço					
Parâmetro	Norma	Ref	TAP	Limite de tolerância	Metodologia
Óleos e gorduras	NBR 15.900-3	Ausente	Ausente	Não mais do que traços visíveis	Colorimétrico
Detergentes	NBR 15.900-3	Ausente	Ausente	Qualquer espuma deve desaparecer em 2 min	Colorimétrico
Cor	NBR 15.900-3	Incolor	Incolor	A cor deve ser comparada qualitativamente com água potável devendo ser: amarelo claro a incolor	Colorimétrico
STD	NBR 15.900-3	NI	322	< 50000 mg/L	Gravimétrico
Odor	NBR 15.900-3	Inodoro	Inodoro	Não deve apresentar cheiro, exceto um leve odor de cimento e, onde houver escória, um leve odor de sulfeto de hidrogênio após a adição de ácido clorídrico.	Sensorial
pH	NBR 15.900-3	9,56	6,6	Entre 6 e 9	Potenciométrico
Matéria Orgânica	NBR 15.900-3	Mais Claro	Mais Claro	A cor da água deve ser mais clara ou igual a da solução-padrão, após a adição de NaOH	Colorimétrico
Cloretos	NBR 15.900-6	NI	111,3	Concreto protendido (< 500 mg/L); Concreto armado (< 1000 mg/L); Concreto simples (sem armadura (<4500 mg/L).	Cromatógrafo de íons
Sulfato	NBR15.900-7	NI	8,21	<2.000 mg/L	Cromatógrafo de íons
Alcalis	NBR 15.900-9	NI	20	< 1.500mg/L	Absorção atômica
Açúcar	NBR 15.900-11	NI	4,56	< 100mg/L	Espectrofotometria
Fosfato	NBR 15.900-8	NI	<LD	< 100mh/L	Cromatógrafo de íons
Nitratos	NBR 15.900-10	NI	<LD	< 500 mg/L	Cromatógrafo de íons
Chumbo	NBR 15.900-5	NI	<LD	< 100 mg/L	Absorção atômica
Zinco	NBR 15.900-4	NI	<LD	< 100 mg/L	Absorção atômica

Legenda: Ref – água destilada; TAP – água proveniente do sistema público de abastecimento de água, potável; STD – sólidos totais dissolvidos; NI – Não Identificado; NE – Não Expresso; T – Temperatura da água; STS – sólidos totais suspensos; DT – Dureza Total; DCa – Dureza Cálcio; Alc – Alcalinidade; E-coli - *Escherichia Coli*; DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; DBO – Demanda Biológica de Oxigênio.

Fonte: Elaborado pelo autor dos laudos LABOSAN e GECCOQ/CAGECE.

Tabela 6.1 – Propriedades físico-químicas e biológicas das águas destilada e potável (Conclusão)

2° Traço					
Parâmetro	Norma	Ref	TAP	Limite de tolerância	Metodologia
pHsat	Saturação de CaCO <sub>3</sub> após 24h	9,9	8,04	NE	Potencio métrico
A	[log(STD)-1]/10	0,00	0,25	NE	Aplicação de formula
B	$[-13,12 \log(T+273)]+34,55$	2,13	2,03	NE	Aplicação de formula
C	$\log(\text{Ca}^+)-0,4$	0,60	1,16	NE	Aplicação de formula
LSI**	pH - pHs	-0,34	-1,44	LSI > 0 (Tendência a Incrustação) LSI < 0 (Tendência a Corrosão) Fonte: Adaptado AL-RAWAJFEH (2004)	Langelier Index
	Classificação	Tendência a Corrosão	Tendência a Corrosão		
	pH - pHe	-1,27	-1,96		
	Classificação	Tendência a Corrosão	Tendência a Corrosão		
T (°C)	Próprio	23	28	NE	Termômetro
Cond (µs/cm)	Próprio	1	376	NE	Potencio métrico
STS (mg/l)	Próprio	NI	10	NE	Gravimétrico
DT (ppm CaCO <sub>3</sub> )	Próprio	NI	110	NE	Titulométrico
DCa (mg/l)	Próprio	10	36	NE	Titulométrico
Alc	Próprio	NI	74	NE	Titulométrico
E-Coli	Próprio	Ausência	Ausência	NE	Colilert
DBO (mg O <sub>2</sub> /L)	Standart Methods	NI	NI	NE	Standart Methods
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	Standart Methods	NI	NI	NE	Standart Methods

Legenda: Ref – água destilada; TAP – água proveniente do sistema público de abastecimento de água, potável; STD – sólidos totais dissolvidos; NI – Não Identificado; NE – Não Expresso; T – Temperatura da água; STS – sólidos totais suspensos; DT – Dureza Total; DCa – Dureza Cálcio; Alc – Alcalinidade; E-coli - *Escherichia Coli*; DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; DBO – Demanda Biológica de Oxigênio.

Fonte: Elaborado pelo autor dos laudos LABOSAN e GECCOQ/CAGECE.

Tabela 6.2 – Resultados das análises físico-químicas das águas residuárias (Continua)

Parâmetro	Limite de tolerância	E2		E3	
		1° Traço	2° Traço	1° Traço	2° Traço
Óleos e gorduras	Não mais do que traços visíveis	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Detergentes	Qualquer espuma deve desaparecer em 2 min	Ausente	Presença	Ausente	Ausente
Cor	A cor deve ser comparada qualitativamente com água potável devendo ser: amarelo claro a incolor	Amarelo Claro	Verde	Amarelo Claro	Amarelo claro

Legenda: E2 – água de amassamento da ETE Marechal Rondon; E2 – água de amassamento da ETE Guadalajara; STD – sólidos totais dissolvidos; STS – Sólidos Totais Suspensos; NI – Não Identificado; LD (Limite de Detecção) - zinco = 0,1203mg/l, chumbo = 0,1339mg/l, açucares = 10mg/l; NE – Não Expresso; DCa – Dureza Cálcio, em íons de cálcio como carbonato; Alc – Alcalinidade; E-coli - *Escherichia Coli*; DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; DBO – Demanda Biológica de Oxigênio.

Fonte: Elaborado pelo autor dos laudos LABOSAN e GECCOQ/CAGECE.

Tabela 6.2 – Resultados das análises físico-químicas da água residuária (Continuação)

Parâmetro	Norma	E2		E3	
		1° Traço	2° Traço	1° Traço	2° Traço
STD	< 50000 mg/L	1786	1036	716	660
Odor	Não deve apresentar cheiro, exceto um leve odor de cimento e, onde houver escória, um leve odor de sulfeto de hidrogênio após a adição de ácido clorídrico.	Inodoro	Odor de Clorofila	Inodoro	Inodoro
pH	Entre 6 e 9	8,13	7,93	9,11	7,4
Matéria Orgânica	A cor da água deve ser mais clara ou igual a da solução-padrão, após a adição de NaOH	Mais Claro	Mais Claro	Mais Claro	Mais Claro
Cloretos	Concreto protendido (< 500 mg/L); Concreto armado (< 1000 mg/L); Concreto simples (sem armadura (<4500 mg/L).	28,08	213,2	137,43	199,8
Sulfatos	< 500 mg/L	52,04	39,4	31,73	47,9
Álcalis	< 100 mg/L	28,7	35	458,92	17,5
Açúcares	< 100 mg/L	<LD	42,06	<LD	10,07
Fosfatos	NE	0,25	4,6	NI	2
Nitratos	NE	0,73	1,33	1,18	1,1
Chumbo	NE	<LD	<LD	<LD	<LD
Zinco	NE	0,13	<LD	<LD	<LD
pHsat	NE	NM	8,56	NM	8,06
A	NE	NM	0,30	NM	0,28
B	NE	NM	2,07	NM	2,07
C	NE	NM	1,18	NM	1,18
D	NE	NM	2,44	NM	2,32
pHe	NE	NM	8,05	NM	8,15
RSI*	NE	NM	9,19	NM	8,72
	NE	NM	Tendência a Corrosão	NM	Tendência a Corrosão
	NE	NM	8,17	NM	8,91
	NE	NM	Tendência a Corrosão	NM	Tendência a Corrosão
LSI**	NE	NM	-0,63	NM	-0,66
	NE	NM	Tendência a Corrosão	NM	Tendência a Corrosão
	NE	NM	-0,12	NM	-0,75
	NE	NM	Tendência a Corrosão	NM	Tendência a Corrosão
T (°C)	Próprio	NM	26	NM	26
Cond (µs/cm)	Próprio	NM	1142	NM	688
STS (mg/l)	Próprio	NM	156	NM	36
DT (ppm CaCO <sub>3</sub> )	Próprio	NM	174	NM	140
DCa (mg/l)	Próprio	NM	38,4	NM	37,6

Legenda: E2 – água de amassamento da ETE Marechal Rondon; E3 – água de amassamento da ETE Guadalajara; STD – sólidos totais dissolvidos; STS – Sólidos Totais Suspensos; NI – Não Identificado; LD (Limite de Detecção) - zinco = 0,1203mg/l, chumbo = 0,1339mg/l, açúcares = 10mg/l; NE – Não Expresso; DCa – Dureza Cálcio, em íons de cálcio como carbonato; Alc – Alcalinidade; E-coli - *Escherichia Coli*; DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; DBO – Demanda Biológica de Oxigênio.

Fonte: Elaborado pelo autor dos laudos LABOSAN e GECCOQ/CAGECE.

Tabela 6.2 – Resultados das análises físico-químicas da água residuária (Conclusão)

Parâmetro	Norma	E2		E3	
		1° Traço	2° Traço	1° Traço	2° Traço
Alc (como CaCO <sub>3</sub> )	Próprio	NM	273	NM	210
<i>E-Coli</i>	Próprio	NM	1x10 <sup>3</sup>	NM	1,96x10 <sup>4</sup>
DBO (mg O <sub>2</sub> /L)	Standart Methods	NM	64	NM	59.74
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	Standart Methods	NM	273,5	NM	165.70

Legenda: E2 – água de amassamento da ETE Marechal Rondon; E2 – água de amassamento da ETE Guadalajara; STD – sólidos totais dissolvidos; STS – Sólidos Totais Suspensos; NI – Não Identificado; LD (Limite de Detecção) - zinco = 0,1203mg/l, chumbo = 0,1339mg/l, açúcares = 10mg/l; NE – Não Expresso; DCa – Dureza Cálcio, em íons de cálcio como carbonato; Alc – Alcalinidade; E-coli - *Escherichia Coli*; DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; DBO – Demanda Biológica de Oxigênio.

Fonte: Elaborado pelo autor dos laudos LABOSAN e GECCOQ/CAGECE.

Tabela 6.3 – Análise quantitativa de grupos microbianos relacionados com a qualidade da água utilizada para formulação do concreto

Grupos Bacterianos (conforme capítulo 5, item 5.7)	Contagem de UFC/mL				
	Amostras				
	Ref	TAP	E2	E3	E1
BHC-AE	1,115x10 <sup>4</sup>	1,5x10	2,86x10 <sup>6</sup>	2,5x10 <sup>4</sup>	1,0x10 <sup>4</sup>
BHC-AN	<10	<10	1,77x10 <sup>6</sup>	2,4x10 <sup>4</sup>	<10
BRS-AE	<10	<10	2,66x10 <sup>6</sup>	1,75x10 <sup>4</sup>	5,5x10 <sup>4</sup>
BRS-AN	<10	<10	1,06x10 <sup>6</sup>	5,8x10 <sup>4</sup>	3,0x10 <sup>4</sup>
BAC	<10	<10	2,51x10 <sup>8</sup>	3,08x10 <sup>8</sup>	7,19x10 <sup>4</sup>
BOS	1,115x10 <sup>4</sup>	<10	1,22x10 <sup>6</sup>	5,8x10 <sup>4</sup>	1,75x10 <sup>4</sup>
BPC	<10	<10	1,475x10 <sup>6</sup>	3,3x10 <sup>4</sup>	5,5x10 <sup>4</sup>
BPE	<10	1,0x10 <sup>4</sup>	<10	<10	5,0x10 <sup>2</sup>
FUNGOS	<10	<10	2,7x10 <sup>2</sup>	<10	<10
Coliformes ( <i>E. coli</i> )	<1,8	<1,8	2,3x10 <sup>7</sup>	6,8x10 <sup>3</sup>	<1,8

Legenda: Ref – água de amassamento destilada; TAP – água de amassamento advinda do sistema público de abastecimento; E2 – água de amassamento da ETE Marechal Rondon; E3 – água de amassamento da ETE Guadalajara; E1 – água da EPC.

Fonte: Elaborado pelo autor dos laudos LABOSAN e GECCOQ/CAGECE.

Para as análises físico-químicas, apresentadas na tabela 6.2, a água de amassamento E2 para o 2° traço não atendeu ao requisito normativo, apresentado na tabela 6.10, dos parâmetros cor e odor. No entanto, todas atenderam o prescrito na resolução do COEMA 02/2017, para lançamento de efluentes em corpo receptor.

Mesmo tendo sido constatado bactérias possivelmente nocivas as propriedades requeridas no concreto e argamassas, porém, foi identificado uma concentração razoável de bactérias precipitadoras de carbonato, (BPC), onde advém da reação de urease, apresentada no item 3.4.4.

### 6.1.2 Cimentos Utilizados

Os resultados da caracterização microbiológica dos cimentos CP III 40 RS e CP V, estão descritos na tabela 6.4.

A presença de grupos bacterianos aeróbios e precipitadores de carbonato pode ser possível, tendo em vista a resistência dos mesmos em altas temperaturas, característica dos microorganismos gram positivos, devido a capacidade bacteriana de esporular.

Tabela 6.4 – Análise quantitativa de grupos microbianos presentes nos cimentos

Grupos	Unidade	Amostras	
		CP III	CP V
BHC-AE	UFC/g	3,5x10	<10
BHC-AN	UFC/g	<10	<10
BRS-AE	UFC/g	<10	<10
BRS-AN	UFC/g	<10	<10
BAC	UFC/g	<10	<10
BOS	UFC/g	<10	<10
BPC	UFC/g	7,5 x10	9,9x10 <sup>2</sup>
BPE	UFC/g	<10	<10
Fungos	UFC/g	*	*
Coliformes	NMP/100 mL	*	*

Legenda: \* não foi feita a análise; AE – aeróbia; AN – anaeróbia.

Fonte: Elaborado pelo autor do laudo LAMAP.

## 6.2 Pasta

### 6.2.1 Pasta de Consistência Normal e Tempos de Pega

Nas tabelas 6.4 e 6.5 estão apresentados os resultados da pasta de consistência normal e tempo de pega, respectivamente, dos cimentos CP II 32 Z e CP V, utilizando as águas dos respectivos traços 1 e 2.

Tabela 6.4 – Resultados de quantidade de água e penetração da sonda Tamajer no ensaio de pasta de consistência norma

CP II 32 Z						
Quantidade de Água				Sonda Tamajer		
Peso	Relação (%) [(fr/fi)-1]	Relação (%) [(TAP/fi)-1]	Penetração (mm)	Relação (%) [(fr/fi)-1]	Relação (%) [(TAP/fi)-1]	
Ref	147,5	-	-	5	-	-
TAP	147,5	0,00%	-	6	20%	-
E2	147	-0,34%	-0,34%	5	0%	-16,67%
E3	147,2	-0,20%	-0,20%	5	0%	-16,67%
CP V						
Ref	149	-	-	7	-	-
TAP	149	0,00%	-	5	-28,57%	-
E2	150,3	0,87%	0,87%	6	-14,29%	20%
E3	149,5	0,34%	0,34%	5	-28,57%	0%

Legenda: fr – água de amassamento Ref; fi – águas de amassamento de teste; TAP/fi – utilizando a água potável como água de referência, para fins comparativos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6.5 – Resultados dos tempos de pega e penetração da sonda

		Início de Pega (min)			Penetração (mm)			Fim de Pega (min)		
		T	[(fr/fi)-1]	[(TAP/fi)-1]	P	[(fi-fr)/fr]	[(TAP/fi)-1]	T	[(fr/fi)-1]	[(TAP/fi)-1]
CPII 32 Z	Ref	115	-	-	5	-	-	170	-	-
	TAP	120	5,26%	-	5	0%	-	150	-11,76%	-
	E2	127	11,40%	6,72%	5	0%	0%	179	5,29%	19,33%
	E3	114	0,00%	-4,20%	5	0%	0%	175	2,94%	16,67%
CPV	Ref	114	-	-	7	-	-	176	-	-
	TAP	119	4,39%	-	6	-14,29%	-	172	-2,27%	-
	E2	134	17,54%	12,61%	5	-28,57%	-16,67%	207	17,61%	20,35%
	E3	141	23,68%	18,49%	5	-28,57%	-16,67%	209	18,75%	21,51%

Legenda: fr – água de amassamento Ref; fi – águas de amassamento de teste; TAP/fi – utilizando a água potável como água de referência, para fins comparativos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados acima apresentados das tabelas 6.4 e 6.5 atenderam os requisitos normativos, pois as diferenças dos tempos de pega não podem exceder à 25% da água de referência, onde comparativamente na tabela 6.5 além da água destilada, utilizamos também a potável.

### 6.2.2 Calorimetria de Condução

A calorimetria de isotérmica de condução, conforme prescrito 6.2.4, onde foram adotados os cimentos CP III 40 RS e o CP V, para todas as águas do estudo no 2º traço, com fator a/c de 0,4. Os resultados são apresentados na tabela 6.6 a 6.7, e suas dissipações de calor temporal nos gráficos 6.1 e 6.2, respectivamente.

Tabela 6.6 – Resultados dos valores de calor de hidratação (C\*) por tempo, com suas respectivas comparações com a água de referência (destilada)

Cimento	Tempo (horas)	Ref (fr)		TAP		E2		E3	
		C*(J/g)	fi/fr	C*(J/g)	fi/fr	C*(J/g)	fi/fr	C*(J/g)	fi/fr
CP III	12	103,51	100%	83,19	80,37%	77,71	75,07%	94,87	91,65%
	24	163,88	100%	134,54	82,09%	128,11	78,18%	148,53	90,63%
	41	206,55	100%	169,13	81,88%	160,79	77,85%	182,26	88,24%
	72	240,20	100%	196,20	81,68%	186,74	77,75%	209,12	87,06%
	120	258,61	100%	210,91	81,55%	200,98	77,71%	223,95	86,60%
	168	267,54	100%	218,73	84,58%	208,05	77,77%	231,41	86,50%
CP V	12	203,64	100%	171,93	84,43%	160,33	78,73%	178,92	87,86%
	24	279,62	100%	235,44	84,20%	214,53	76,72%	240,55	86,03%
	41	318,12	100%	265,04	83,31%	242,17	76,12%	270,19	84,93%
	72	339,94	100%	281,90	82,93%	258,20	75,95%	286,73	84,35%
	120	353,87	100%	293,01	82,80%	268,65	75,92%	297,55	84,08%
	168	361,92	100%	299,90	82,86%	274,84	75,94%	304,00	84,00%

Legenda: fr – água de amassamento Ref; fi – águas de amassamento testadas da série; C\* - Média da tréplica.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6.7 – Resultados dos valores máximos de calor de hidratação ( $C^*$ ) e seu início temporal, com suas taxas comparativas, em relacionando os valores com as águas de amassamento Ref e TAP e seus respectivos cimentos

Cimento	Águas	$C_{Max}$ (W/Kg)	Tempo (h:m)	Para $C^*_{Max}$		Para o Tempo de $C_{Max}$	
				fi/fr	fi/TAP	fi/fr	fi/TAP
CP III	Ref	2,99	03:40	-	-	-	-
	TAP	2,61	08:14	87,30%	-	104,05%	-
	E2	2,65	32:31	88,56%	101,44%	90,66%	87,13%
	E3	2,86	09:38	95,38%	109,26%	90,91%	87,37%
CP V	Ref	6,43	02:40	-	-	-	-
	TAP	5,86	21:08	91,16%	-	95,81%	-
	E2	5,36	35:43	83,31%	91,39%	71,85%	74,99%
	E3	5,68	22:33	88,25%	96,81%	91,83%	95,84%

Legenda: fr – água de amassamento Ref; fi – águas de amassamento testadas da série;  $C^*_{Max}$  - Média da tréplica do calor máximo de hidratação em W/kg.

Fonte: Elaborado pelo autor.

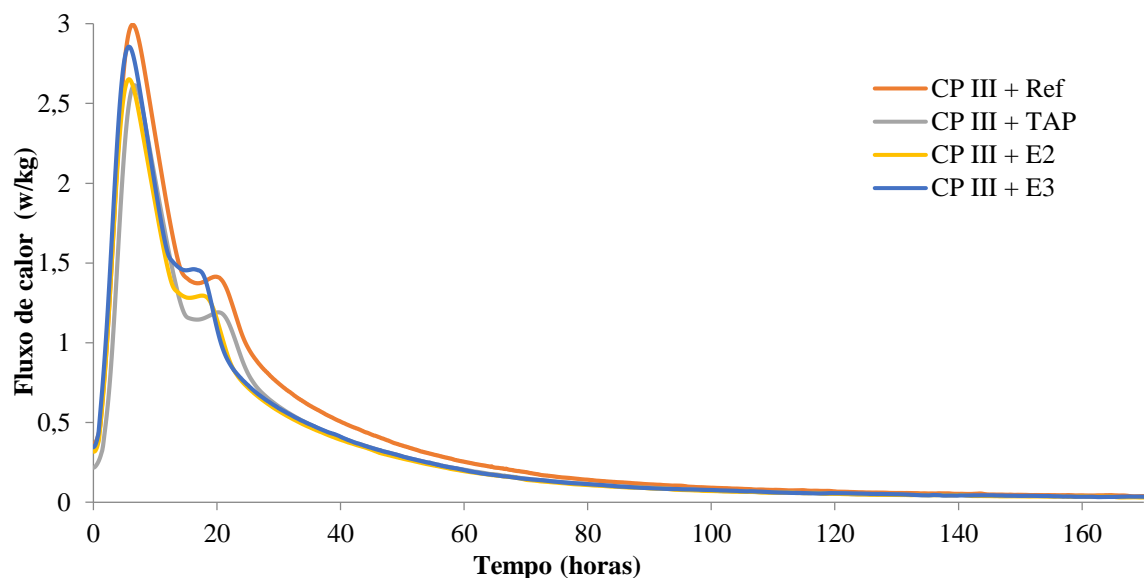
Cincotto e Isaia (2011) [Gonçalves (2018)] também analisaram a geração de calor ao longo do tempo dos cimento CP III e CP V, bem como identificaram, nas curvas de fluxo de calor obtidas por calorimetria isothermica, picos máximos de calor em W/kg de 2,1 [3,34] e 2,5 [4,21], e calor de hidratação acumulado em J/g durante 72 horas, aproximadamente, 170 [230] e 280 [260], respectivamente. Assim, os valores encontrados nas tabelas 6.6 e 6.7 foram confrontados com a literatura.

Na perspectiva da norma americana, ASTM C150 (ASTM, 2018), quanto a classificação do calor de hidratação, o CP III 40 RS é classificado como moderado calor de hidratação quando misturadas com a água de referência. No entanto, houve um fenômeno que baixou o calor de hidratação com as demais águas, onde o maior percentual de redução foi com a água de amassamento E3, 87,06% aos 3 dias e 86,5% aos 7 dias. Já para o cimento CP V é classificado como alto calor de reação, sendo constatado o mesmo fenômeno do CP III, havendo uma redução no calor de hidratação, onde a maior queda foi com a água de amassamento E3, 84,35% aos 3 dias e 84% aos 7 dias.

Analisando os valores máximos do calor de hidratação, podemos inferir que a variação não ultrapassou a 10% do esperado, visto que tomando como referência a água de amassamento TAP, que a NBR 15.900, requisitos gerais, bem como a literatura mundial, que água oriunda de sistema público de abastecimento pode ser utilizada como água de amassamento, sem necessitar de avaliações prescritas. Logo, os valores são aceitáveis e conservadores, uma vez que há uma redução no calor máximo. Ainda no tocante a tabela 6.7, quanto aos tempos de início dos picos de calor encontrados, estes, comparados com a água de

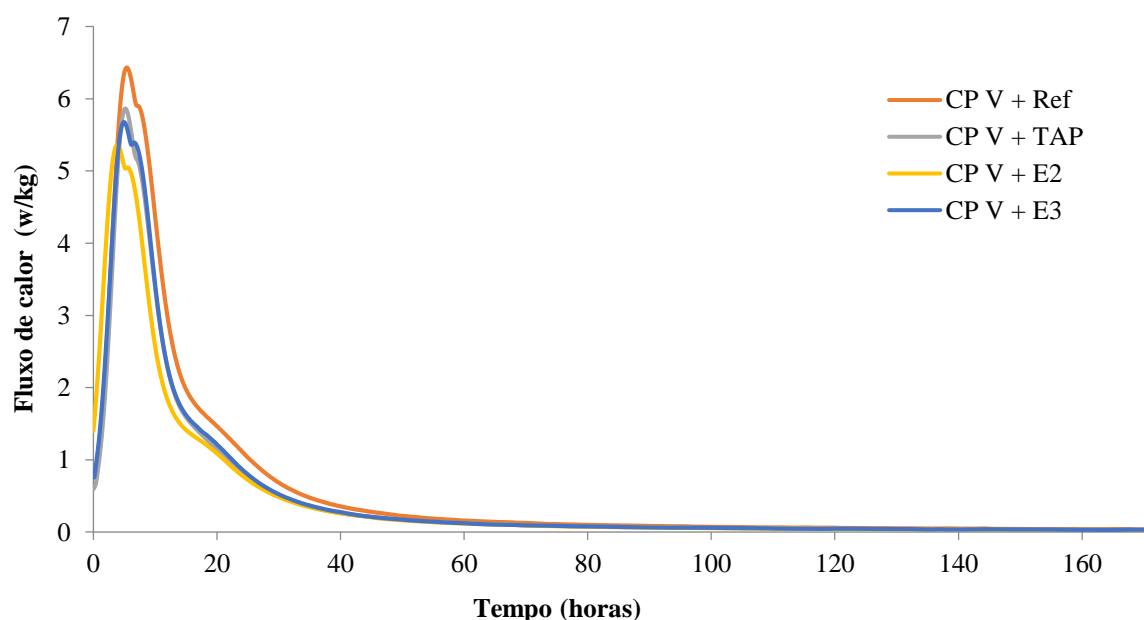
amassamento TAP, não excederam a 25%. Utilizando a as premissas da literatura e normas mundiais esta variação é aceitável.

Gráfico 6.1– Gráfico dos ensaios calorimétricos de indução das águas do 2º traço com o CP III 40 RS, após o período de indução



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6.2– Gráfico dos ensaios calorimétricos de indução das águas do 2º traço com o CP V, após o período de indução



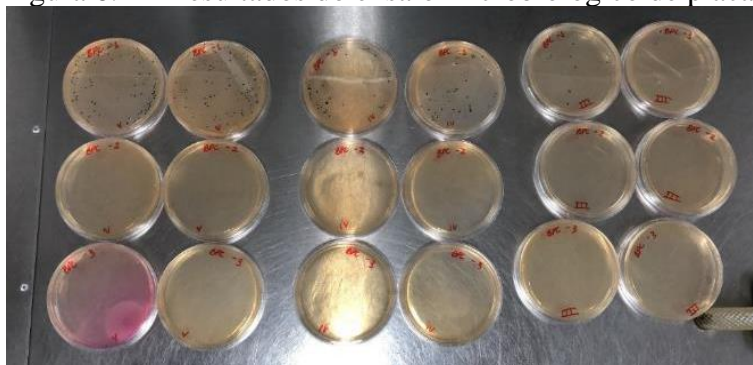
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 6.2.3 Análises Microbiológicas (Mbio)

Os resultados microbiológicos das pastas dos constituintes do 2º traço, conforme prescrito no item 6.2.4 (Mbio), estão ilustradas na figura 6.1 e apresentadas na tabela 6.8.



Figura 6.1 – Resultados do ensaio microbiológico de placas



Fonte: Elaborador pelo autor.

Tabela 6.8 – Resultados das quantidades dos grupos microbianos, relacionados com decaimento bacteriológico

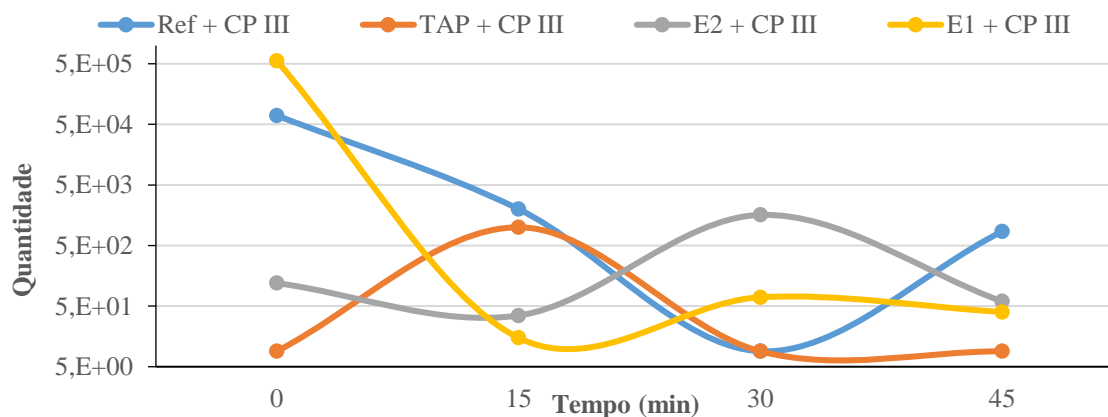
Cimento	Águas	Tempo (T) em minutos							
		BH				Coliformes			
		T0	T15	T30	T45	T0	T15	T30	T45
III	Ref	$70 \times 10^3$	$20 \times 10^2$	<10	$85 \times 10$	-	-	-	-
	TAP	<10	$1,0 \times 10^3$	<10	<10	-	-	-	-
	E2	$12 \times 10$	$3,5 \times 10$	$1,6 \times 10^3$	$6 \times 10$	<10	<10	$5 \times 10$	<10
	E1	$56 \times 10^4$	$1,5 \times 10$	$7 \times 10$	$4 \times 10$	$5,5 \times 10^2$	$2 \times 10^5$	<10	<10
V	Ref	$3,0 \times 10^3$	$2 \times 10$	$4,0 \times 10^2$	$3,5 \times 10$	-	-	-	-
	TAP	<10	<10	$5,5 \times 10^2$	$2,0 \times 10^2$	-	-	-	-
	E2	$5,5 \times 10$	$7,5 \times 10$	$1,3 \times 10^2$	$6,0 \times 10$	$6,5 \times 10^2$	<10	<10	$5,0 \times 10^1$
	E1	$1,0 \times 10^2$	$2,5 \times 10$	$1,5 \times 10$	$3,0 \times 10$	$13,5 \times 10^3$	$5,0 \times 10$	$9,5 \times 10^4$	$5,0 \times 10^3$

Legenda: Ref – água de amassamento de referência, destilada; TAP – água oriundo do sistema público de abastecimento de água; E2 – água de amassamento de tratamento secundário, ETE Marechal Rondon; E1 – Água de amassamento proveniente do tratamento primário da EPC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de melhor representar os dados acima, e auxiliar na interpretação do comportamento microbiano ao longo do tempo, foram construídos gráficos, 6.3 a 6.6.

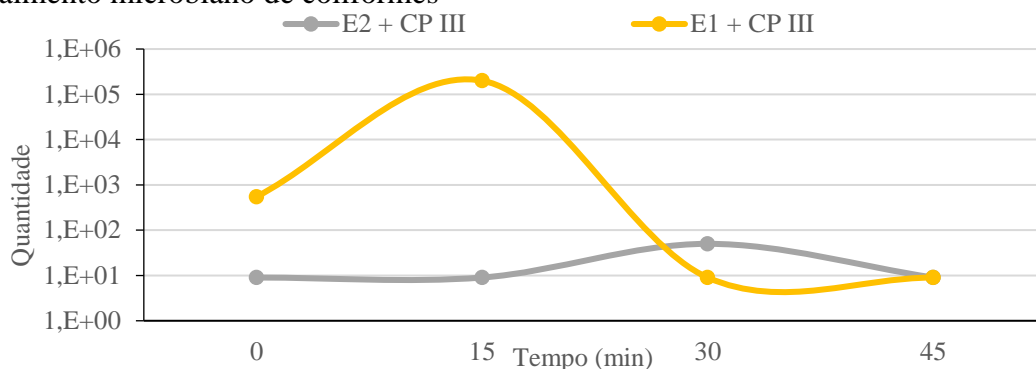
Gráfico 6.3 – Resultados das quantidades dos grupos microbianos, relacionados com decaimento microbiano das Bactérias Heterotróficas



Legenda: Ref – água de amassamento de referência, destilada; TAP – água oriundo do sistema público de abastecimento de água; E2 – água de amassamento de tratamento secundário, ETE Marechal Rondon; E1 – água de amassamento proveniente do tratamento primário da EPC.

Fonte: Elaborado pelo autor, eixo Y em escala logarítmica.

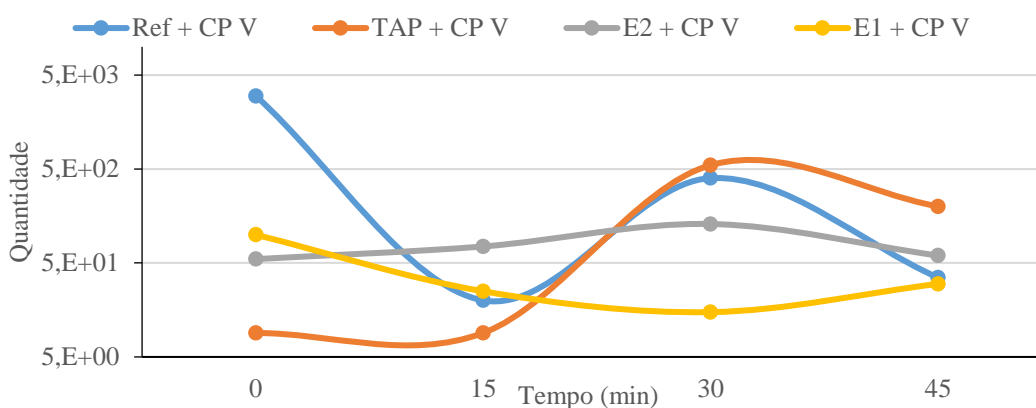
Gráfico 6.4 – Resultados das quantidades dos grupos microbianos, relacionados com decaimento microbiano de coliformes



Legenda: E2 – água de amassamento de tratamento secundário, ETE Marechal Rondom; E1 – água de amassamento proveniente do tratamento primário da EPC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

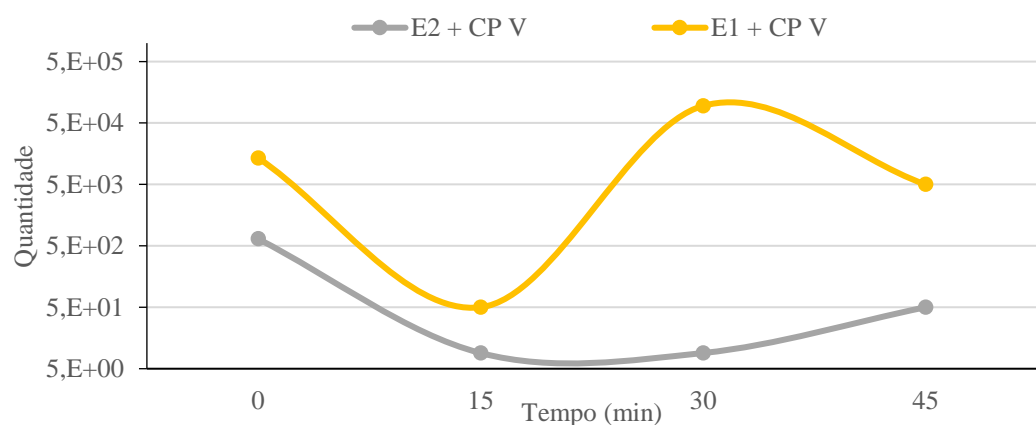
Gráfico 6.5 – Resultados das quantidades dos grupos microbianos, relacionados com decaimento microbiano das Bactérias Heterotróficas



Legenda: Ref – água de amassamento de referência, destilada; TAP – água oriundo do sistema público de abastecimento de água; E2 – água de amassamento de tratamento secundário, ETE Marechal Rondom; E1 – água de amassamento proveniente do tratamento primário da EPC.

Fonte: Elaborado pelo autor, eixo Y em escala logarítmica

Gráfico 6.6 – Resultados das quantidades dos grupos microbianos, relacionados com decaimento microbiano de coliformes



Legenda: E2 – água de amassamento de tratamento secundário, ETE Marechal Rondom; E1 – água de amassamento proveniente do tratamento primário da EPC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A quantidade de agentes microbianos reduziu significativamente com para os dois cimentos aplicados, corroborando os dados qualitativos apresentados por Ary Junior (2018).

Não obstante, para as bactérias heterotróficas, houve um comportamento abrupto de queda até, aproximadamente, 15 minutos, excetuando o TAP + CP III e E2 + CP V, onde tiveram uma tendência de crescimento deste grupo microbiano em uma ordem de  $10^2$  e  $10^1$ , respectivamente.

Para o intervalo de 15 a 20 minutos foi constatado tendência de estabilização da quantidade ainda presente de microorganismos, não chegando as mesmas quantidades iniciais, excetuando o Ref + CP III, TAP + CP III e E1 + CPV, onde tiveram decaimentos menores na ordem de  $10^1$ , sendo o E1 + CP V 4 vezes mais. No intervalo de 30 a 45 minutos, todos voltaram a decair suas quantidades presentes de bactérias, excetuando a Ref + CP III e E1 + CP V, onde apresentaram uma tendência de aumento, sendo maior o Ref + CP III a maior diferença. Na tabela 6.9 apresenta claramente as perdas (em vermelho) e ganhos (em azul) nos intervalos de tempo da tabela 6.8.

Tabela 6.9 – Resultados das quantidades dos grupos microbianos, relacionados com decaimento bacteriológico

	Bactérias Heterotróficas			Coliformes		
	0-15	15-30	30-45	0-15	15-30	30-45
Ref + CP III	■	■	■			
TAP + CP III	■	■				
E2 + CP III	■	■	■		■	■
E1 + CP III	■	■	■	■	■	
Ref + CP V	■	■	■			
TAP + CP V		■	■			
E2 + CP V	■	■	■	■		■
E1 + CP V	■	■	■	■	■	■

Legenda: **Vermelho**: significa decaimento de concentração dos grupos microbianos, e **Azul**: significa crescimento de concentração dos grupos microbianos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 6.2.4 Análises Térmicas: TG, DTG e DSC

##### - Análise CP III 40 RS

Nos gráficos 6.7 a 6.9, estão apresentando a evolução dos compostos hidratados do CP III 40 RS, com as águas do estudo utilizadas no 2º traço, ao longo do tempo até os 28 dias, onde foi adotado a metodologia já apresentada no item 6.2.4, vide gráficos e tabelas que basearam as interpretações, que estão nos anexos A1 à A4 e B1 à B4, respectivamente.

Nas tabelas 6.10 e 6.11, auxiliam as interpretações, comparativamente com a água de referência (Ref), destilada, e coletada do sistema público de abastecimento de água, TAP,

no que concerne ao aumento ou redução dos compostos hidratados nas idades de 1 dia, 7 dias, 14 dias e 28 dias.

Tabela 6.10 – Resultados do aumento (azul) e redução (vermelho) de compostos através da hidratação do CP III com a água de amassamento E2 comparativamente com a Ref e TAP

Idades	C-S-H + Aluminatos		Ca(OH) <sub>2</sub>		CaCO <sub>3</sub>	
	Dest	TAP	Dest	TAP	Dest	TAP
1 dia	■	■	■	■	■	■
7 dias	■	■	■	■	■	■
14 dias	■	■	■	■	■	■
28 dias	■	■	■	■	■	■

Legenda: **Vermelho**: significa redução de compostos hidratados, e **Azul**: significa aumento de compostos hidratados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

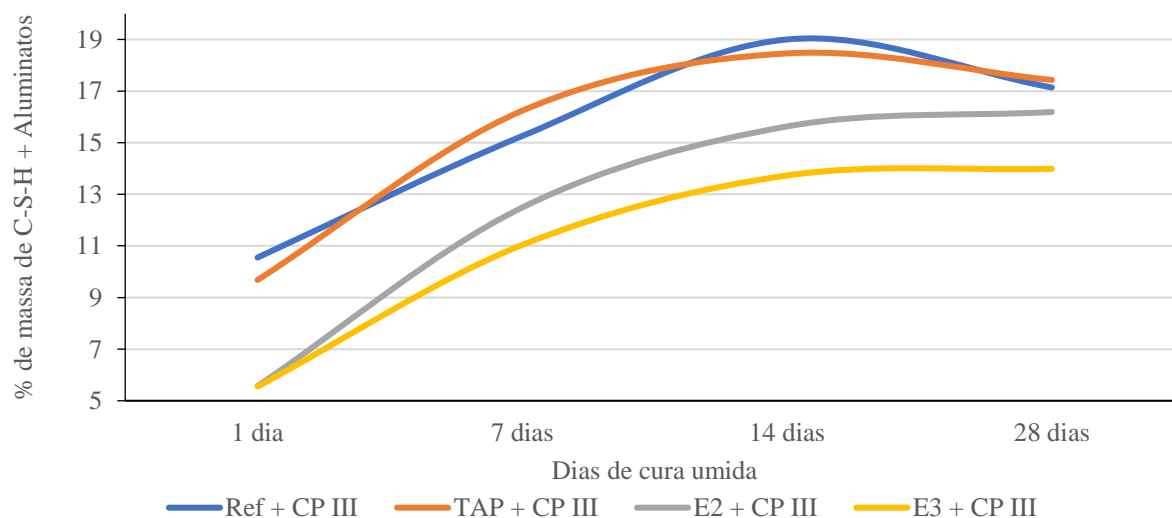
Tabela 6.11 – Resultados do aumento (azul) e redução (vermelho) de compostos através da hidratação do CP III com a água de amassamento E3 comparativamente com a Ref e TAP

Idades	C-S-H + Aluminatos		Ca(OH) <sub>2</sub>		CaCO <sub>3</sub>	
	Dest	TAP	Dest	TAP	Dest	TAP
1 dia	■	■	■	■	■	■
7 dias	■	■	■	■	■	■
14 dias	■	■	■	■	■	■
28 dias	■	■	■	■	■	■

Legenda: **Vermelho**: significa redução de compostos hidratados, e **Azul**: significa aumento de compostos hidratados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6.7 – Percentual de massa do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) mais aluminatos, advindos da hidratação do CP III 40 RS com as águas do estudo, ao longo dos 28 dias

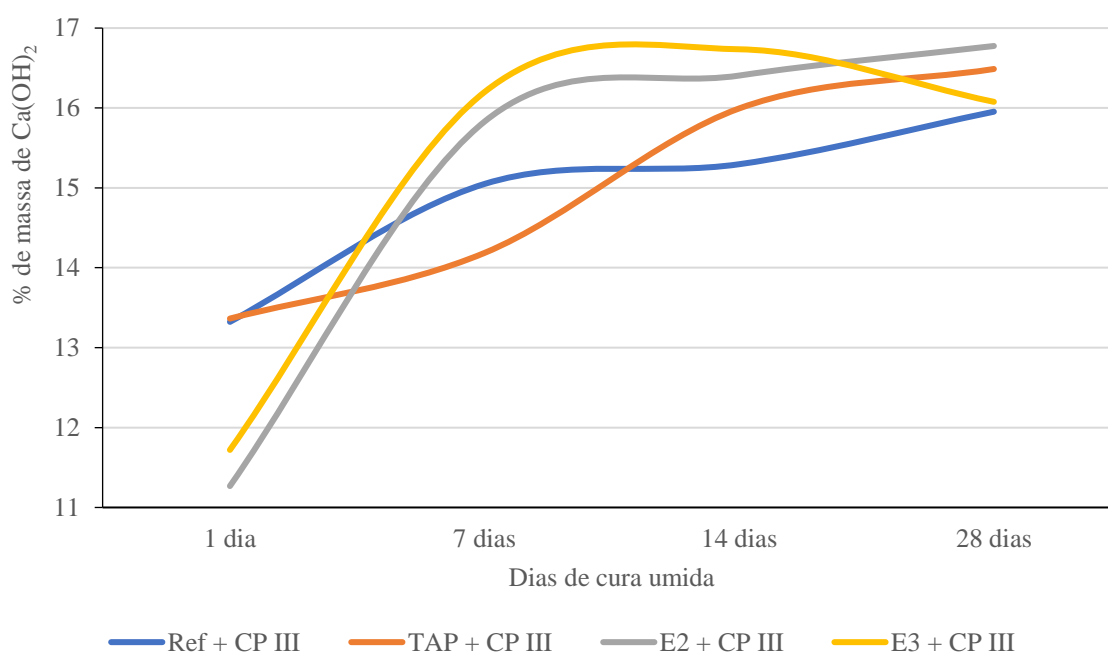


Legenda: Ref – água de amassamento de referência, destilada; TAP – água oriundo do sistema público de abastecimento de água; E2 – água de amassamento de tratamento secundário; E3 – água de amassamento proveniente do tratamento terciário.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme a literatura (RIBAS, 1991; RAMACHANDRAN, 1995; SHACKELFORD, 2000; MEHTA e MONTEIRO, 2006; RIDI et al., 2009; ISAIA, 2011) a evolução temporal do C-S-H com aluminatos ocorreu dentro do esperado, para as águas de amassamento. Porém, as águas E2 e E3 iniciaram com uma redução substancial de aproximadamente 51% comparativamente com a água Ref e TAP. A diferença entre a E2 e a E3 é desprezível, dentro do desvio padrão. Estas perdas foram reduzindo ao longo do tempo, mas sempre menores na ordem de 16% a 25%, chegando ao final dos 28 dias com perda, não tão significativa para E2, na ordem de aproximadamente 6%, e significativa para E3, na ordem aproximada de 22%.

Gráfico 6.8 – Percentual de massa de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ , ou portlandita), advindos da hidratação do CP III 40 RS com as águas do estudo, ao longo dos 28 dias

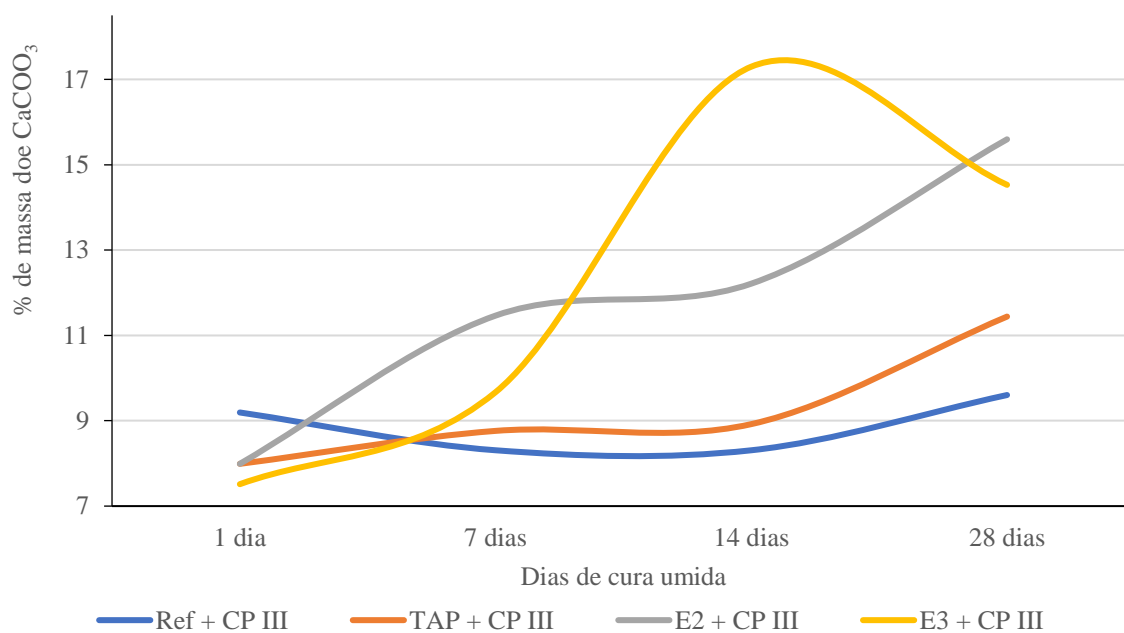


Legenda: Ref – água de amassamento de referência, destilada; TAP – água oriundo do sistema público de abastecimento de água; E2 – água de amassamento de tratamento secundário, ETE Marechal Rondon; E1 – água de amassamento proveniente do tratamento primário da EPC.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

No que trata a produção de portlandita, comparativamente com a literatura (RIBAS, 1991; RAMACHANDRAN, 1995; SHACKELFORD, 2000; MEHTA e MONTEIRO, 2006; RIDI et al., 2009; ISAIA, 2011), sua evolução temporal ocorreu dentro do esperado, para as águas de amassamento. Porém, as águas E2 e E3 iniciaram com uma redução substancial de aproximadamente 18% comparativamente com a água Ref e TAP. Já a diferença entre a E2 e a E3 é desprezível, dentro do desvio padrão.

No entanto, houve maior produção de portlandita nas águas E2 e E3 aos 7 dias (14 dias), sendo 4% (9%) respectivamente em relação as águas Ref e TAP. Aos 28 dias, a E3 continuou na tendência de perda, sendo 1% (5%) em relação a Ref (TAP). Já a E2, houve uma tendência inflexão na tendência, obtendo um ganho de massa de portlandita, sendo 8% (3%) em relação a Ref (TAP).

Gráfico 6.9 – Percentual de massa de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), advindos da hidratação do CP III 40 RS com as águas do estudo, ao longo dos 28 dias



Legenda: Ref – água de amassamento de referência, destilada; TAP – água oriundo do sistema público de abastecimento de água; E2 – água de amassamento de tratamento secundário, ETE Marechal Rondon; E1 – água de amassamento proveniente do tratamento primário da EPC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No que trata a produção de carbonato de cálcio, comparando com a literatura (RIBAS, 1991; RAMACHANDRAN, 1995; SHACKELFORD, 2000; MEHTA e MONTEIRO, 2006; RIDI et al., 2009; ISAIA, 2011), sua evolução temporal ocorreu dentro do esperado para as águas de amassamento Ref e TAP, porém para E2 e E3 houveram discrepâncias menor, na ordem de 20% e 25% em relação a Ref, bem como 5% e 11% em relação a TAP, respectivamente.

Houve uma tendência de aumento da produção de carbonato, mais abrupto na E2 em relação a Ref (TAP), de aproximadamente 38% (29%) aos 7 dias, 47% (37%) aos 14 dias e 70% (39%).

























Já para o E3 também houve um aumento na produção de carbonato, sendo 13% (5%) aos 7 dias, 112% (97%) aos 14 dias e 52% (25%) aos 28 dias, em relação a Ref (TAP).

- Análise CP V

Nos gráficos 6.10 a 6.12, estão apresentadas a evolução dos compostos hidratados do CP V, com as águas do estudo utilizadas do 2º traço, ao longo do tempo até os 28 dias, onde foi adotado a metodologia já apresentada no item 6.2.4, vide gráficos e tabelas que basearam as interpretações, que estão nos anexos A5 à A8 e B5 à B8, respectivamente.

Nas tabelas 6.12 e 6.13, auxiliam as interpretações, comparativamente com a água de referência (Ref), destilada, e coletada do sistema público de abastecimento de água, TAP, no que concerne ao aumento ou redução dos compostos hidratados nas idades de 1 dia, 7 dias, 14 dias e 28 dias.

























Tabela 6.12 – Resultados do aumento (azul) e redução (vermelho) de compostos através da hidratação do CP V com a água de amassamento E2 comparativamente com a Ref e TAP

Idades	C-S-H + Aluminatos		Ca(OH) <sub>2</sub>		CaCO <sub>3</sub>	
	Dest	TAP	Dest	TAP	Dest	TAP
1 dia						
7 dias						
14 dias						
28 dias						

Legenda: **Vermelho**: significa redução de compostos hidratados, e **Azul**: significa aumento de compostos hidratados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

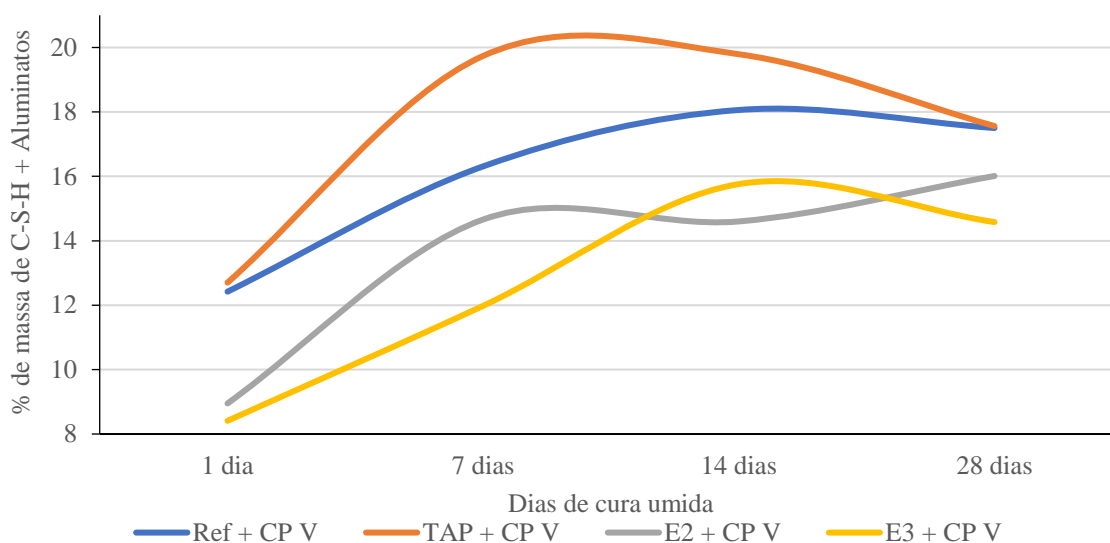
Tabela 6.13 – Resultados do aumento (azul) e redução (vermelho) de compostos através da hidratação do CP V com a água de amassamento E3 comparativamente com a Ref e TAP

Idades	C-S-H + Aluminatos		Ca(OH) <sub>2</sub>		CaCO <sub>3</sub>	
	Dest	TAP	Dest	TAP	Dest	TAP
1 dia						
7 dias						
14 dias						
28 dias						

Legenda: **Vermelho**: significa redução de compostos hidratados, e **Azul**: significa aumento de compostos hidratados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6.10 – Percentual de massa do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) mais aluminatos, advindos da hidratação do CP V com as águas do estudo, ao longo dos 28 dias



Legenda: Ref – água de amassamento de referência, destilada; TAP – água oriundo do sistema público de abastecimento de água; E2 – água de amassamento de tratamento secundário, ETE Marechal Rondon; E1 – água de amassamento proveniente do tratamento primário da EPC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

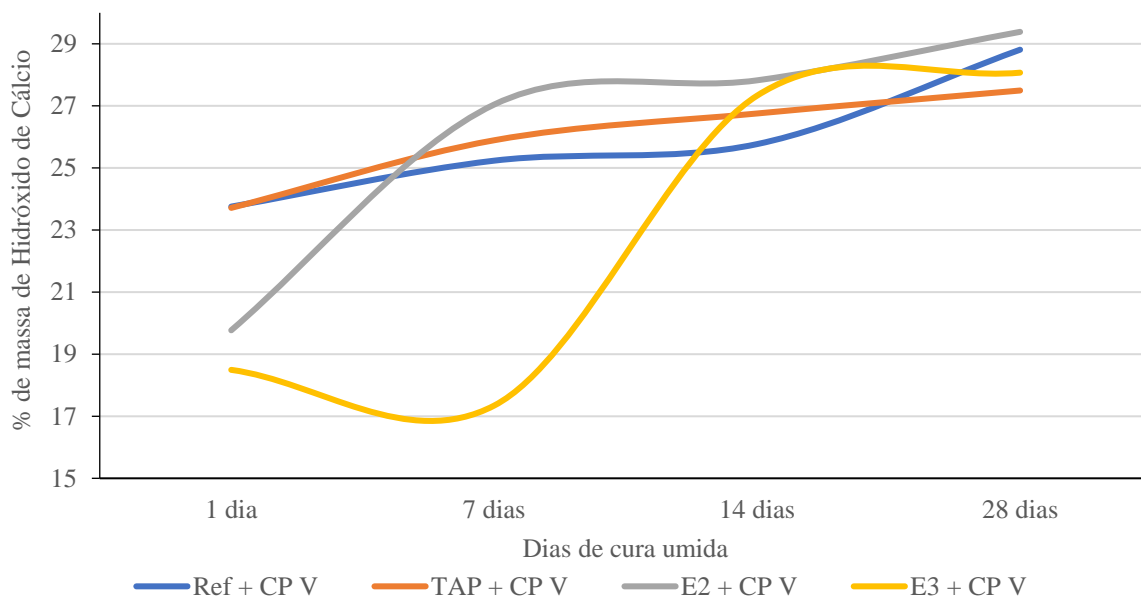
As águas de amassamento Ref e TAP, conforme a literatura (RIBAS, 1991; RAMACHANDRAN, 1995; SHACKELFORD, 2000; MEHTA e MONTEIRO, 2006; RIDI et al., 2009; ISAIA, 2011) a evolução temporal do C-S-H mais aluminatos ocorreu dentro do esperado. Porém as demais águas, E2 e E3 não, tendo diferenças significativas.

Para a E2 com cimento CP V, houve uma redução de produção de C-S-H mais aluminatos no início da reação, 1 dia, de 31% (33%) em relação a Ref (TAP). Nas demais idades, continuaram as perdas de produção, comparativamente a Ref (TAP), sendo 11% (30%) aos 7 dias, 21% (30%) aos 14 dias e 10% (11%) aos 28 dias.

Já para E3 com cimento CP V, também foi constatado o mesmo fenômeno da E2, sendo para: 1 dia de cura úmida 37% (38%), 7 dias de cura úmida 34% (48%), 14 dias de cura úmida 12% (22%) e 28 dias de cura úmida 18% (19%), em relação a água de amassamento Ref (TAP).



Gráfico 6.11 – Percentual de massa de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ , ou portlandita), advindos da hidratação do CP V com as águas do estudo, ao longo dos 28 dias



Legenda: Ref – água de amassamento de referência, destilada; TAP – água oriundo do sistema público de abastecimento de água; E2 – água de amassamento de tratamento secundário, ETE Marechal Rondon; E1 – água de amassamento proveniente do tratamento primário da EPC.

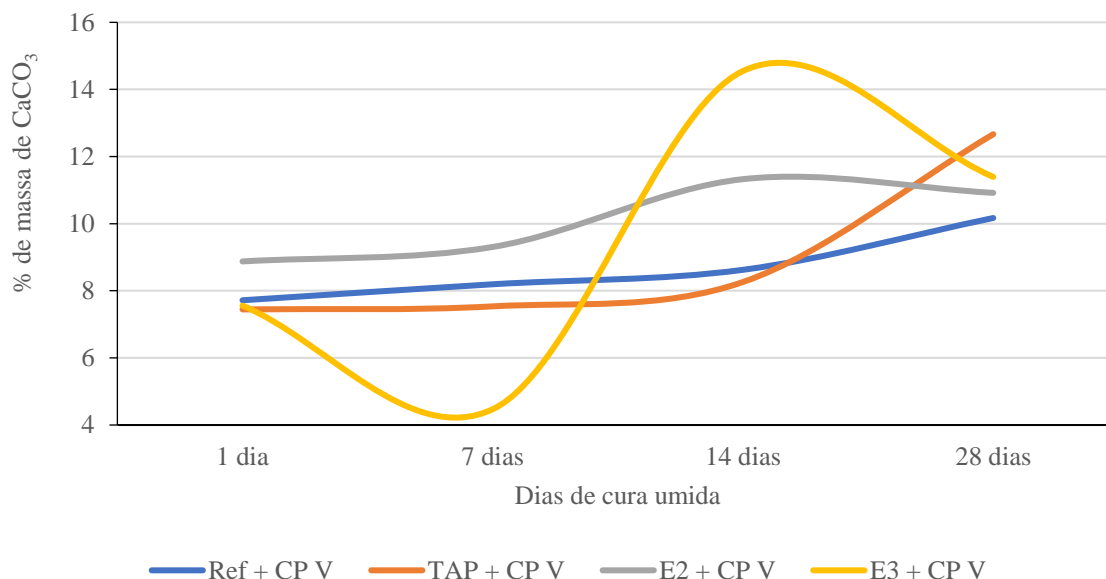
Fonte: Elaborado pelo autor.

No que trata a produção de portlandita, comparativamente com a literatura (RIBAS, 1991; RAMACHANDRAN, 1995; SHACKELFORD, 2000; MEHTA e MONTEIRO, 2006; RIDI et al., 2009; ISAIA, 2011), sua evolução temporal ocorreu dentro do esperado, para as águas de amassamento Ref e TAP. Porém, as águas E2 e E3 iniciaram, 1 dia, com uma redução substancial.

Para água de amassamento E2 houve uma redução de produção de portlandita de 21% para ambas as águas, Ref e Tap, nas 24 horas. Aos 7 dias um ligeiro aumento (redução) de 6% (1%), 14 dias um aumento (redução) de 5% (1%) e 28 dias um aumento de 1% (4%) em relação a Ref (TAP).

Já para a água de amassamento E3, também houve uma redução do mesmo composto de sendo 27% no primeiro dia para ambas as águas. Já para os 7 dias mais uma redução de 38% (42%) em relação a Ref (TAP). Aos 14 dias, um ligeiro aumento de 7% (1%) em relação a Ref (TAP). Por fim, aos 28 dias houveram uma ligeira redução de 4% (1%) em relação a Ref (TAP).

Gráfico 6.12 – Percentual de massa de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), advindos da hidratação do CP V com as águas do estudo, ao longo dos 28 dias



Legenda: Ref – água de amassamento de referencia, destilada; TAP – água oriundo do sistema público de abastecimento de água; E2 – água de amassamento de tratamento secundário, ETE Marechal Rondon; E1 – água de amassamento proveniente do tratamento primário da EPC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No que trata a produção de carbonato de cálcio, comparando com a literatura (RIBAS, 1991; RAMACHANDRAN, 1995; SHACKELFORD, 2000; MEHTA e MONTEIRO, 2006; RIDI et al., 2009; ISAIA, 2011), sua evolução temporal ocorreu dentro do esperado para as águas de amassamento Ref e TAP, porém para E2 e E3 houveram ligeiras discrepâncias

Para E2 com o CP V, houve aumento na produção de carbonato de cálcio até os 14 dias, sendo 10% (13%) no 1º dia, 13% (17%) no 7º dia e 28% (30%) no 14º dia, em relação a Ref (TAP). Já aos 28 dias, houve um aumento (redução) de 6% (16%) em relação a Ref (TAP).

Já para E3 com CP V, houve redução da produção de carbonato até os 7 dias, sendo 8% (5%) no primeiro dia, 51% (49%) no 7º dia. Porém no 14º dia houve um aumento significativo de 70% (73%) em relação a Ref (TAP). Por fim, aos 28 dias houve um aumento (redução) de 10% (13%) de carbonato em relação a Ref (TAP).

## 6.3 Concreto

### 6.3.1 Resistência a Compressão Axial

Os resultados dos ensaios de resistência a compressão axial, dos dois traços, estão apresentados nos gráficos 6.13 a 6.15, sendo respectivamente o 1º traço, CP II 32 Z, e 2º traço, CP III 40 RS e CP V. As tabelas com os resultados da avaliação estatística ANOVA, estarão

apresentadas nas tabelas 6.15 a 6.19, para o 1º traço, todas comparadas com a água de amassamento Ref, bem como as tabelas 6.23 a 6.28 comparadas como a água de amassamento TAP, excetuando-se a Ref.

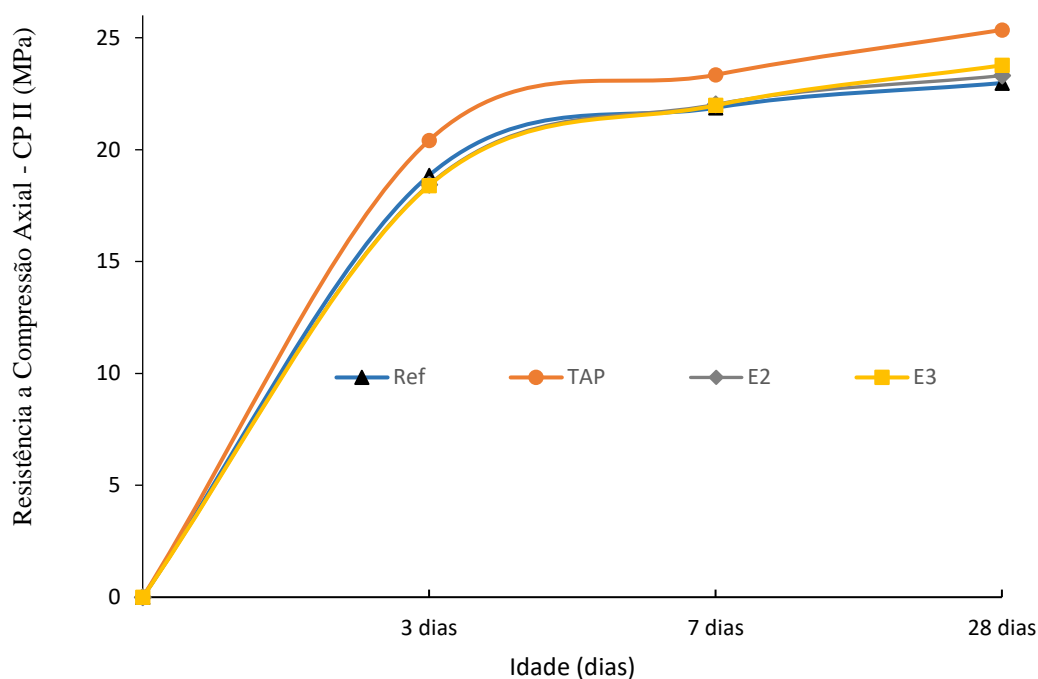
Os dados primários das tabelas que originaram os gráficos, todos em tréplica, estarão no anexo B, sendo B9 à B20.

Tabela 6.14 – Resultados da média, tréplica, do ensaio de resistência a compressão (MPa) para o 1º traço com CP II 32 Z

Idades	Ref	TAP	E2	E3
3 dias	18,85	20,42	18,44	18,4
7 dias	21,87	23,34	22,02	21,98
28 dias	22,98	25,35	23,31	23,77

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6.13 – Resistência à compressão axial do 1º traço, CP II 32 Z



Legenda: Ref – água de amassamento de referência, destilada; TAP – água oriundo do sistema público de abastecimento de água; E2 – água de amassamento de tratamento secundário, ETE Marechal Rondon; E3 – água de amassamento proveniente do tratamento terciário.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados dos testes de resistência a compressão axial para o 1º traço, com CP II 32 Z, foi satisfatório. Porém, conforme o método aplicado para verificação de diferenças significativas, apontou que a água de amassamento TAP tem diferença significativa em relação a Ref.

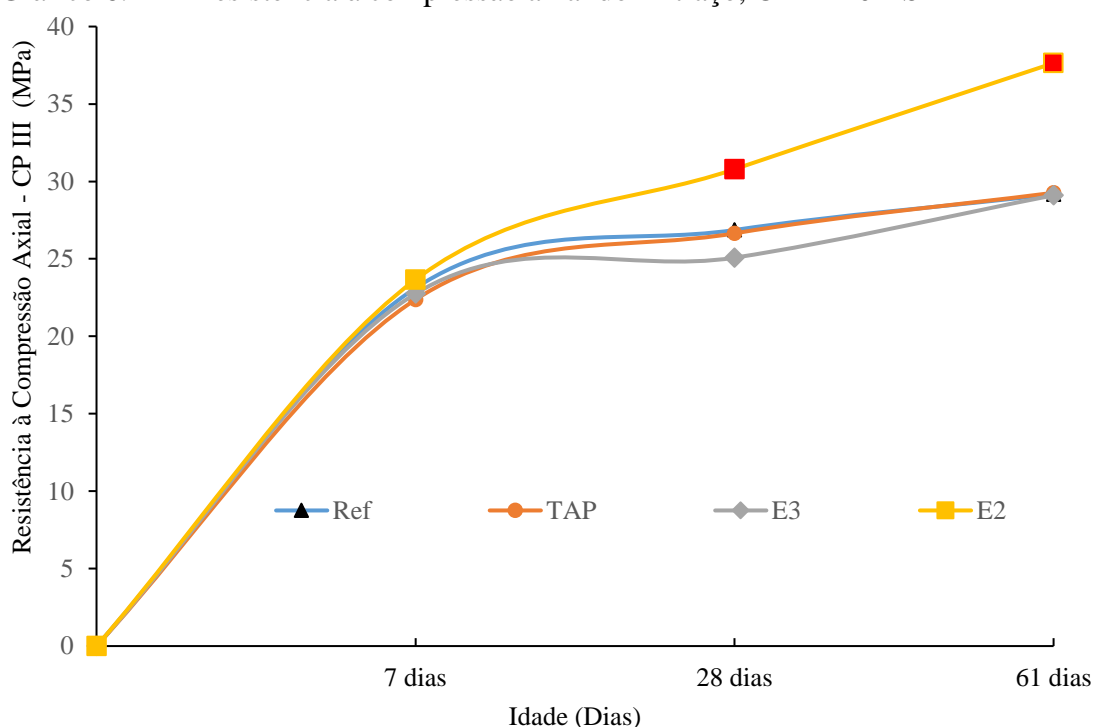
Não obstante, já as águas de amassamento E2 e E3, ambas, tem diferença em relação a TAP, porém não significativa. A média dos resultados para fazer a curva do gráfico 6.14, está apresentada na tabela 6.15.

Tabela 6.15 – Resultados da média, tréplica, do ensaio de resistência a compressão (MPa) para 2º traço com CP III 40 RS

Idades	Ref	TAP	E2	E3
7 dias	23,12	22,37	22,75	23,66
28 dias	26,86	26,65	25,08	30,79
61 dias	29,16	29,27	29,10	37,64

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6.14 – Resistência à compressão axial do 2º traço, CP III 40 RS



Legenda: Ref – água de amassamento de referência, destilada; TAP – água oriundo do sistema público de abastecimento de água; E2 – água de amassamento de tratamento secundário, ETE Marechal Rondon; E3 – água de amassamento proveniente do tratamento terciário.

Fonte: Elaborado pelo autor.

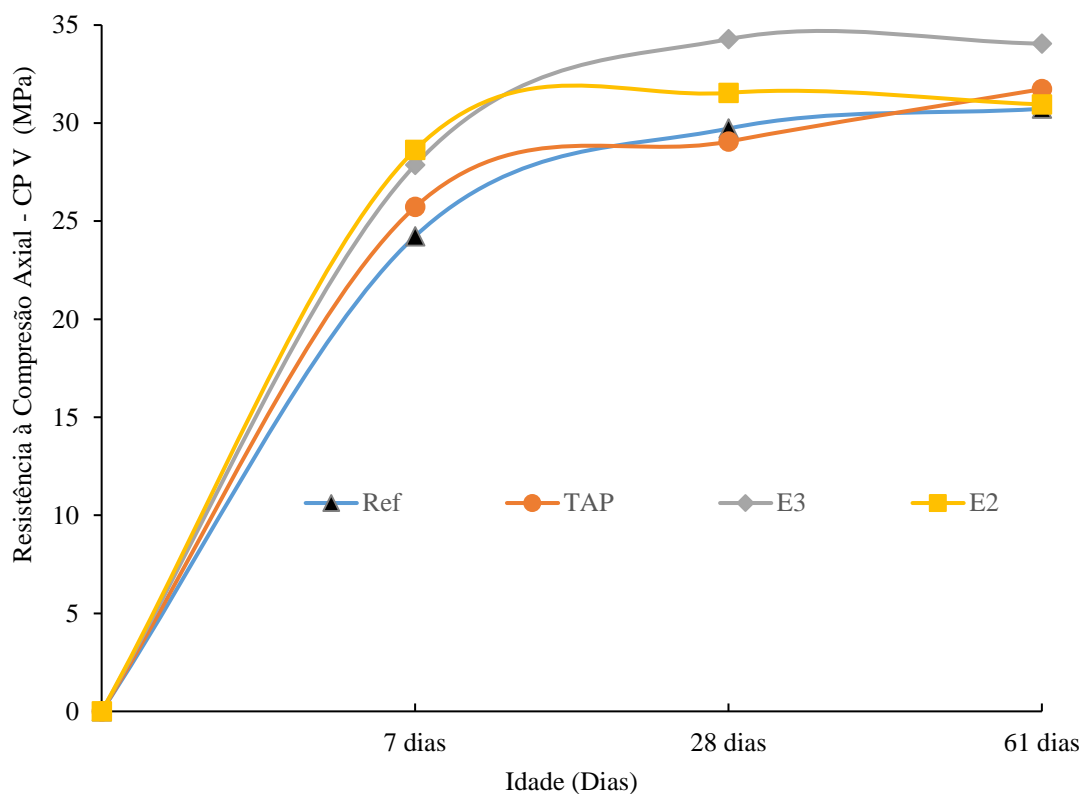
Os resultados dos testes de resistência a compressão axial para o 2º traço, com CP III 40 RS, foi satisfatório. Porém, conforme o método aplicado para verificação de diferenças significativas, apontou que a água de amassamento E2 há diferença significativa em relação as demais, bem como tomando como referência a água de amassamento TAP, houve diferenças significativas nas idades de 28 dias e 61 dias. Já a água de amassamento E3 não houve diferenças significativas nas idades em relação à água TAP.

Tabela 6.16 – Resultados da média, tréplica, do ensaio de resistência a compressão (MPa) para 2º traço com CP V

Idades	Ref	TAP	E2	E3
7 dias	24,23	25,72	28,63	27,34
28 dias	29,72	29,06	31,54	34,28
61 dias	30,73	31,73	30,95	34,05

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6.15 – Resistência à compressão axial do 2º traço, CP V



Legenda: Ref – água de amassamento de referência, destilada; TAP – água oriundo do sistema público de abastecimento de água; E2 – água de amassamento de tratamento secundário, ETE Marechal Rondon; E3 – água de amassamento proveniente do tratamento terciário.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelo método estatístico adotado não houve diferença significativa das águas de amassamento TAP, E2 e E3 em relação a Ref, nem tão pouco a E2 e E3 em relação a TAP.

### 6.3.2 Índice de Vazios, Absorção e Massa Específica

Os resultados dos ensaios de índice de vazios estão apresentados na tabela 6.17. Para o 1º traço, os ensaios foram realizados a 28 dias de cura úmida. Já para o 2º traço, os ensaios foram realizados com 450 dias de cura úmida. A água utilizada para cura úmida foi adotada do sistema público de abastecimento de água, TAP.

Tabela 6.17 – Resultados da média, tréplica, do ensaio de índice de vazios (%)

	CP II 32 Z			CP III 40 RS			CP V		
	I <sub>vaz</sub>	fi/fr	fi/TAP'	I <sub>vaz</sub>	fi/fr	fi/TAP'	I <sub>vaz</sub>	fi/fr	fi/TAP'
Ref	10,23	-	-	16,18	-	-	16,68	-	-
TAP	9,73	95%	-	18,89	117%	-	12,17	73%	-
E2	10	98%	103%	16,64	103%	88%	15,78	95%	130%
E3	10,28	101%	106%	16,18	100%	86%	15,53	93%	128%

Legenda: I<sub>vaz</sub> – Índice de Vazios (%); fr – Água de amassamento destilada, Ref; fi – A série de dados excetuando-se o denominador. Texto em vermelho representa redução significativa, utilizando o método estatístico para análise de dados; Texto em azul representa aumento significativo, utilizando o método estatístico para análise de dados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para todos os traços, 1º e 2º, com todos os cimentos adotados, utilizando o método estatístico proposto, a água de amassamento TAP apresentou diferença significativa, sendo menores com CP II 32 Z e CP V, respectivamente, 95% e 73%, e maior para o CP II 40 RS, 117%, comparativamente com a água de amassamento destilada, Ref. Tal fenômeno foi o mesmo para a E2, sendo menor, 98% e 95%, e maior 103%. Para água de amassamento E3, a diferenças não foram significativas em relação ao uso da água destilada.

Já, adotando a água de amassamento do sistema público de abastecimento como referência, TAP, os índices de vazios, para os cimentos CP II 32 Z com E2 apresentou diferença significativa, diferente com E3, onde não apresentou diferença significativa.

Quanto ao 2º traço com cimento CP III 40 RS, os resultados foram menores, sendo 88% para E2 e 86% para E3. Para o 2º com cimento CP V, todos os resultados foram maiores, com 130% para E2 e 128% para E3.

Os resultados dos ensaios de absorção estão apresentados na tabela 6.18. Os tempos de cura úmida são os mesmos do ensaio de índice de vazios, bem como a água de cura utilizada.

Tabela 6.18 – Resultados da média, tréplica, do ensaio de absorção (%)

	CP II 32 Z			CP III 40 RS			CP V		
	Abs	fi/fr	fi/TAP'	Abs	fi/fr	fi/TAP'	Abs	fi/fr	fi/TAP'
Ref	4,67	-	-	7,43	-	-	7,76	-	-
TAP	4,40	94%	-	8,48	114%	-	5,47	71%	-
E2	4,57	98%	104%	7,65	103%	90%	7,17	93%	131%
E3	4,62	99%	105%	7,46	101%	88%	7,07	92%	129%

Legenda: Abs – Absorção (%); fr – Água de amassamento destilada, Ref; fi – A série de dados excetuando-se o denominador. Texto em vermelho representa redução significativa, utilizando o método estatístico para análise de dados; Texto em azul representa aumento significativo, utilizando o método estatístico para análise de dados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para todos os traços, 1º e 2º, com todos os cimentos adotados, utilizando o método estatístico proposto, a água de amassamento TAP apresentou diferença significativa, sendo menores com CP II 32 Z e CP V, respectivamente, 94% e 71%, e maior para o CP II 40 RS, 114%, comparativamente com a água de amassamento destilada, Ref. Tal fenômeno foi o

mesmo para a E2, sendo menor, 98% e 93%, e maior 103%. Para água de amassamento E3, a diferenças não foram significativas para CP II 32 Z e CP III 40 RS, excetuando com CP V, onde houve uma redução de 92% em relação a Ref.

Já, adotando a água de amassamento do sistema público de abastecimento como referência, TAP, a absorção, para os cimentos CP II 32 Z com E2 e E3 apresentam diferenças significativas, sendo 104% e 105%, fenômeno similar ao ocorrido com CP V, sendo 131% e 129%, respectivamente. Já para o CP III 40 RS, a água de amassamento E2 e E3 houveram reduções, sendo 90% e 88%, respectivamente.

Os resultados dos ensaios de massa específica real estão apresentados na tabela 6.19. Os tempos de cura úmida são os mesmos do ensaio de índice de vazios, bem como a água de cura utilizada.

Tabela 6.19 – Resultados da média, tréplica, do ensaio de massa específica (g/cm<sup>3</sup>)

	CP II 32 Z			CP III 40 RS			CP V		
	Mesp	fi/fr	fi/TAP'	Mesp	fi/fr	fi/TAP'	Mesp	fi/fr	fi/TAP'
Ref	2,44	-	-	2,18	-	-	2,18	-	-
TAP	2,45	100%	-	2,23	102%	-	2,23	102%	-
E2	2,43	100%	99%	2,18	100%	98%	2,20	101%	99%
E3	2,45	100%	100%	2,17	100%	97%	2,20	101%	99%

Legenda: Mesp – Massa Espessífica (%); fr – Água de amassamento destilada, Ref; fi – A série de dados excetuando-se o denominador. Texto em vermelho representa redução significativa, utilizando o método estatístico para análise de dados; Texto em azul representa aumento significativo, utilizando o método estatístico para análise de dados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados para o 1° traço, não houve diferenças entre os grupos analisado, mesmo considerando a água destilada e do sistema público de abastecimento como referências do amassamento do concreto. Porém, para o CP II 40 RS, a água de amassamento E3 houve uma redução, quando comparada com a TAP. E para o CP V, a água de TAP apresentou resultado superior à água de referência destilada, Ref.

Todos os resultados aqui apresentados, mesmo considerando agregados, águas e cimentos diferentes, estão em faixas aceitáveis, comparativamente com a literatura (SHACKELFORD, 2000; MEHTA e MONTEIRO, 2006; ISAIA, 2011).

### 6.3.3 Carbonatação

Os resultados da penetração da carbonatação, somente para o 1° traço, estão apresentados na tabela 6.20.

Tabela 6.20 – Resultados da média, tréplica, de penetração de carbonatação (mm)

Corpos de Prova	Ref	TAP	E2	E3
1	82	85	91	88
2	87	90	89	87
3	86	87	86	88
Média	84	88	89	88
DesvPad	2,14	2,23	1,96	0,63
Mínimo	82	85	86	88
Máximo	87	90	91	87

Legenda: DesvPad – Desvio Padrão

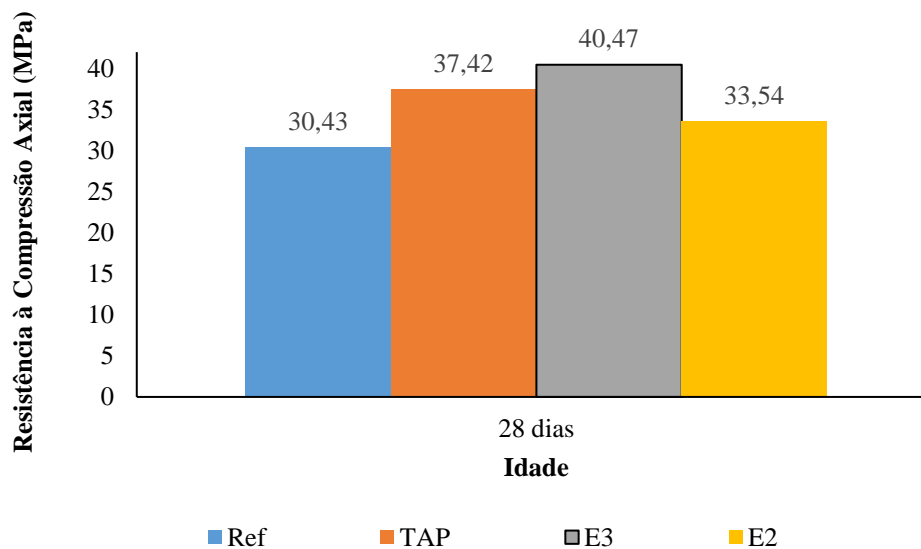
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados foram também interpretados com o método descrito anteriormente, não apresentando diferença significativa entre todo grupo de amostras analisada. Porém, a água de amassamento E2, apresentou a penetração maior, comparativamente a águas Ref e TAP como referência, sendo mais susceptível a carbonatação.

#### 6.4 Argamassa

Os resultados do ensaio de compressão axial, aos 28 dias, estão apresentados na no gráfico 6.16.

Gráfico 6.16 – Resultados da média, tréplica, da resistência a compressão axial (MPa) aos 28 dias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os resultados pelo método estatístico, o resultado da resistência a compressão axial com a água de amassamento E3 obteve diferença significativa das demais. Bem como a água de amassamento TAP comparando unicamente com a água destilada, Ref.



## 6.5 Análise Geral

A água destilada utilizada, Ref, apresentou níveis de bactérias heterotróficas anaeróbias (BHC-AE) e oxidadoras de sulfatos (BOS) acima do esperado. Já a água proveniente do sistema público de abastecimento, apresentou níveis acima do esperado de bactérias heterotróficas aeróbias e precipitadoras de esporos, esta última classificada com *gram positiva*. As bactérias que esporulam são bastante resistentes, pois preservam seu DNA, onde os esporos são capazes de resistir a extremos de temperatura, radiação, agentes químicos e tempo (DRIKS, 1999; DRIKS, 2002; LE DUC et al., 2004), tais propriedades são conferidas aos esporos graças às características de composição química e ultraestrutura. No anexo B9 apresenta a presença de esporos após 45 minutos da reação da pasta.

A água de amassamento E2 do 2º traço não atendeu aos requisitos normativos de cor e odor, sendo esverdeado e odor característico de clorofila, sendo constatado na análise microbiológica, tabela 6.2, aonde apresentou níveis superiores dos grupos microbianos estudados, na ordem de  $10^2$ , excetuando coliformes, na ordem de  $10^7$ .

Os resultados da pasta de consistência normal para os cimentos CP II 32 Z e CP V, atenderam aos requisitos normativos quanto aos tempos de fim e início de pega, com diferenças não superiores a 25%. No entanto para água de amassamento E2 do 2º traço, com cimento CP V, apresentou maior postergação em relação a Ref e TAP, conforme tabela 6.5. Assim, considerando a presença microbiológica, bem como os níveis de nitrato da água de amassamento E2, superior às demais, corrobora-se ao afirmado por Neville (1995), onde relata que concentrações de amônia postergam o tempo de início de pega devido a formação de sais de amônia, bem como compostos ativos hidrofóbicos (DE MELO, 2016), possivelmente advindo do ácido húmico na dissolução da pasta (NEVILLE, 1994), que possui uma ação fungicida e bactericida (KHL'KO et al., 2011; SIDDIQUI et al., 2009; FERRARA et al., 2006; HASSAETT, BISESI e HARTESTEIN, 1987). Esta hidrofobia é atribuída as bactérias *gram* negativas, pois citologicamente, existem ácidos graxos dos lipídeos na porção interna da membrana citoplasmática, ver ilustração anexo C3. A tendência a corrosão, apontadas pelos índices de *Ryznar* e *Langelier*, são justificadas pela presença destes ácidos.

O fenômeno acima descrito também justifica a adoção do aditivo plastificante, afim de atender ao requisito de abatimento do tronco de cone, *Slump Test*, aonde a água de amassamento E2 utilizou mais plastificante, sendo duas vezes ao adotado, conforme tabela 6.15.

O tempo para se ter o pico de calor da reação da hidratação dos cimentos com a água E2, foi maior (32:31 com CPIII e 35:43 com CP V), seguida da água de amassamento E3,

sendo 9:38 para o CP III e 22:33 para o CP V, conforme apresentado na tabela 6.7, assim o fenômeno acima também justifica tais resultados, postergando os picos de calor de hidratação, que são característicos dos tempos de pega.

Ressalta-se que mesmo atendendo aos requisitos normativos quanto a concentração de açúcares, não podemos também descartar este residual, onde para o E2 foi superior, bem como a DBO e DQO.

Para o fenômeno ocorrido na postergação dos tempos de pega da pasta e a utilização de aditivo plastificante para o concreto, respectivamente, com a água de amassamento E3, é justificado pela matéria orgânica dissolvida, apontada pela DBO e DQO próximas à E2, pois segundo Neville (1995) há o arraste de ar (o  $O_2$ ) na matriz da pasta prejudicando a interação dos silicatos com a água, postergando no tempo das reações. Tal fenômeno também apontado por Cebeci e Saatchi (1989) e Tero e Al-Ghusain (2003), tratando que a DQO afeta os tempos de pega. Outro ponto interessante, apontado pelos resultados das análises complementares das águas, e que deve ser considerado é o pHe, se apresentou superior em E3 em relação aos demais encontrados.

O efeito da postergação da hidratação do cimento decresce na seguinte ordem: ácido glucônico ( $C_6H_{12}O_7$ ) > carboidrato ( $C_n(H_2O)_n$ ) > lignosulfonato (agente redutor de água) (RAMACHANDRAN, 1995).

No(s) cimento(s) CP III 40 RS (CP V) apresentou níveis de BHC-AE em 35UFC/g (<10) e bactérias precipitadoras de carbonato, BPC, em 75UFC/g (990UFC/g). Tais bactérias são benéficas na matriz cimentícia.

A ação antimicrobiana do cimento pode ser explicada durante a reação de hidratação de materiais cimentícios, onde há a liberação cátions e ânions, com desencadeamento de reações químicas para formação dos compostos minerais. Tais compostos podem ser inertes e/ou ter propriedades antimicrobianas. A preocupação é se os microorganismos são resistentes aos compostos presentes. Park et al. (2004), desenvolveu um estudo de purificação da água pelos poros do concreto, onde os resultados foram exitosos, apresentando uma relação de eficiência de remoção de fósforo total e nitrogênio total (elementos que causam a eutrofização, proliferação de microorganismos) em relação à proporção cimento por agregado, tendo mais eficiência com os agregados menores pelo aumento da área específica, e consequentemente o tamanho dos poros. Tal eficiência foi atribuída pela queda da taxa de consumo de oxigênio do meio, onde os microorganismos não estão mais ativos pela falta de oxigênio. Ary Junior (2018), também constatou a ação antimicrobiana e sanitizante do cimento, com fator água/cimento de 1, em efluentes bruto e

tratado oriundos de sistema de esgotamento sanitário predominantemente doméstico. Assim, o efeito antimicrobiano do cimento foi constatado neste trabalho com decaimento de microorganismos presentes no meio em relação ao tempo, constatado na tabela 6.9, perdas e ganhos. Os ganhos são associados a morfologia celular das bactérias, pois as bactérias que esporulam são mais resistentes.

As pastas com as águas de amassamento E2 e E3, para os cimentos CP III 40 RS e CP V, carbonataram, conforme apresentado nas tabelas de perdas e ganhos, 6.10 a 6.13, e também justificado pelos resultados apresentados do índice de vazios e absorção, onde o carbonato de cálcio preenche os poros do concreto, e não tem função estrutural. O efeito da carbonatação “mascara” algumas propriedades do concreto, tais como a resistência a compressão axial, índice de vazios, massa específica e absorção, pois tem aparentes “ganhos” ou não tantas “perdas”, mas prejudicam sua durabilidade, onde o pH do concreto é reduzido, podendo comprometer as armaduras e sua função estrutural.

Cloreto e sulfato são os mais importantes ânions que afetam a performance da durabilidade do concreto (SARICIMEN, 2008). A ligeira queda da portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) é justificada pela presença de cloretos, aonde formou o ácido clorídrico (HCl), nas primeiras idades, reagindo com o hidróxido de cálcio, e formando o cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), que é um produto solúvel, deixando o concreto mais susceptível a lixiviação e deterioração (MAHASNEH, 2014). A acidez induzida é o maior responsável pela porosidade, perturbando sua superfície e núcleo (ALRADHAWI, 2015), assim ocorre uma formação estruturada e segmentada dos poros, tendo assim um efeito de bloqueio na absorção de água do meio, além de influenciar no elevado grau de hidratação (SAWAMI, 2015), sendo corroborado nos resultados apresentados no item 6.3.2.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1 Conclusão

Em várias partes do mundo efluentes tratados biologicamente, buscando a redução de patógenos aos seres humanos, tais como bactérias e vírus, são utilizados para limpeza de ruas e jardinagem. Contudo a maioria dos efluentes tratados são, atualmente, descartados no solo (wetlands), dentro de rios, lagos, mares e oceanos (VIESSMAN e HAMMER, 1985; METCALF e EDDY, 1979)

Assim, tornar as ETEs mais atraentes economicamente, dando fins adequados durante o processo de tratamento, além de reduzir ou mitigar o impacto ambiental lançando-o em corpos hídricos, é um dos principais objetivos para o desenvolvimento sustentável econômico-ambiental das cidades. Assim, algumas diretrizes devem ser seguidas, para escolha das tecnologias de tratamento de esgoto. Fatores importantes a serem considerados, tais como: níveis de reutilização para definir a qualidade dos efluentes, sua quantidade, se há contribuição de águas de processos industriais, confiabilidade do sistema e possível necessidade de instalações suplementares (como: armazenamento, bombeamento e transmissão).

Existem aspectos que devem ser levados em consideração ao fazer reutilização de águas residuárias, para mitigar ou reduzir os riscos de contaminação laboral, durante seu reuso, tais como: o forma de manuseio (manual, mecânico ou misto), possíveis áreas de contato durante a atividade laboral (olhos, pele, ouvidos, dentre outros) e o seu tempo de exposição; a concentração dos agentes microbiológicos e/ou químicos de risco; a(s) tecnologias de tratamento utilizadas para adequação do efluente para reuso; e os níveis de monitoramento da água recuperada. Das vias de transmissões de doenças de veiculação hídricas, a mais predominante é a fecal-oral, pois uma grande variedade de microorganismos patogênicos podem estar presentes nas águas de reuso, principalmente de fezes de animais infectados.

A literatura pesquisa sobre o uso de águas residuais no concreto revela que muito trabalho precisa ser feito, sendo necessário revisar os padrões existentes sobre a água qualidade à luz do surgimento de pesquisas, novos tipos de materiais cimentícios e aditivos redutores de água.

A água tem efeitos benéficos e prejudiciais sobre o concreto, onde a qualidade da água tem sido relativamente desprezada em relação aos aditivos e aglomerantes na construção civil, constatado pelo número de pesquisas ligadas ao tema, bem como ausência de grupos de pesquisa.

A água de reuso é normalmente utilizada para aplicações não potáveis, principalmente como irrigação, e em menor quantidade no controle de poeira, supressão de incêndio, produção de concreto e construção.

Os óxidos metálicos, bons antimicrobianos, presentes nas cinzas volantes dos cimentos, possuem elevada porosidade, conseqüentemente, maior área superficial (SHAKHAPURE et al, 2005), aumentando assim o contato com microorganismos e elementos inorgânicos, elevando o mecanismo de adsorção. Tais cinzas também são constituídas de partículas ocas, chamadas cenosferas (SHIGEMETO et al. 1993), que podem reter partículas contaminantes, devido sua elevada área superficial, removendo as impurezas da solução.

Sabões e detergentes consistem em longas cadeias orgânicas de ácido graxo (hidrofóbica) e um cátion, geralmente de sódio (Na) ou potássio (K) ou qualquer outro metal alcalino ou alcalino-terroso, onde na parte de ácido graxo é adsorvido nos interstícios ativos de sílica, alumina e mulita (ALINNOR, 2007; TABREZ et al., 2009; SHAKHAPURE et al., 2005; SHIGEMETO et al., 1993) e os cátions metálicos devem aderir às cenosferas (SHIGEMETO et al., 1993). Assim se dá o mecanismo de adsorção, dos microorganismos pelos constituintes do cimento Portland, promovendo uma capacidade antimicrobiana.

Outro ponto a destacar, é a redução substancial da atividade patogênica dos microorganismos, uma vez que o pH do concreto excede a 12 (AL-GHUSAIN e TERRO, 2003; CEBECI, 1989), visto a saturação de portlandita na hidratação inicial do cimento (GADZAMA et al., 2015).

A indústria do saneamento utiliza zeólitos para tratamento de água e esgoto (WOOLARD, 2000). Estes zeólitos, comercialmente, são compostos por aluminossilicatos, mulita ( $\text{Al}_6\text{Si}_3\text{O}_3$ ) e sílica ( $\text{SiO}_2$ ), todos presentes nos produtos da hidratação do cimento.

O polimorfismo do carbonato de cálcio também foi detectado nas termoanálises, que são a calcita, 650 a 800°C, aragonita, 530 a 760°C, e vaterita, 500 a 700°C, porém ensaios de difração de raio X e espectroscopia infravermelho Raman se faz necessária para quantificar qual polimorfo está mais presente no meio. Segundo Ramachandran (1995), a aragonita pode ser produto da quebra do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável principal pela resistência dos materiais cimentícios, via dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) com monossulfato aluminato de cálcio, formando aragonita e sílica. A calcita, presente nas cinzas volantes como uma das matérias prima do cimento, durante sua calcinação dá origem ao óxido de cálcio (CaO), susceptível à ataque externo tendo perda de resistência na presença de cloretos e sulfetos, hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), portlandita, e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), podendo dá origem ao ácido carbônico, que é deletério nas matrizes cimentícios. Resumidamente, a calcita é um

produto da carbonatação da portlandita e do silicato de cálcio hidratado, os responsáveis pelas propriedades requeridas dos materiais cimentícios.

A mayenita (C12A7), outro excelente bactericida, mencionada nesta pesquisa, está sendo amplamente estudada para aplicações na medicina e odontologia. Historicamente tal composto faz parte de uma das fases de hidratação, comum, do cimento Portland, e recentemente teve seu interesse renovado pela capacidade da mobilidade de oxigênio, condutividade iônica (SCHMIDT et al., 2014) e propriedades sorventes (CUCCINIELLO et al., 2017). No entanto para avaliar sua presença quantitativamente, ensaios complementares devem ser realizados, como o DRX e espectroscopia de massa.

As bactérias menos resistentes, *gram* negativas, quando mortas, liberam ácidos graxos proveniente dos lipídios presentes na membrana citoplasmática, prejudicando assim as interações de hidratação dos minerais. Já as mais resistentes, como as *gram* positivas, esporulam e ficam encapsuladas na matriz cimentícia, em estado de hibernação, até que o meio seja favorável para ativa-la e assim iniciar reações em cadeia, seja degradativa ou não.

Os objetivos tecnológicos deste trabalho foram alcançados, onde foram investigados os efluentes das principais tecnologias utilizadas para tratamento de esgoto no Nordeste brasileiro, que são predominantemente as lagoas de estabilização, fase biológica chamada neste trabalho de secundária. Na busca avaliar adequação dos efluentes com um pouco mais de sofisticação, estudou-se a estação tratamento de reuso, pioneira no norte-nordeste, com uma fase terciária (polimento) após a fase biológica (de lagoas. E por fim, complementar aos estudos realizados pelo engenheiro Ary Junio (2018) utilizou investigação microbiológica da estação de tratamento de maior vazão da região metropolitana de Fortaleza, onde há apenas a fase de pré-condicionamento, retirando materiais até 1,5 milímetros e dessarenação.

No item 6.5 foram apresentados a análise integrada dos resultados obtidos na investigação, nas propriedades da pasta, concreto e argamassa padrão, comparativamente com águas consideradas próprias para uso na construção civil e amassamento de produtos cimentícios, como o concreto estrutural.

As termoanálises são bastante poderosas na investigação de produtos da hidratação do cimento, mas não totalmente suficientes, visto a variedade de composto cristalinos e amorfos produzidos, sendo necessários outras técnicas de análise microestrutural para chegar a conclusão precisas. Até aonde chegou-se, oferece um indicativo de uso destas águas para produção do concreto não estrutural, isto devido aos graus de carbonatação da pasta encontrados, deixando o concreto susceptível a lixiviação e deterioração da armadura, apesar

da água de reuso, E3, ter atendido plenamente aos requisitos normativos prescritos mundialmente.

Assim, buscando fechar o escopo da investigação dos fenômenos envolvidos nas reações de hidratação do cimento com os efluentes, nos itens seguintes, serão apresentados os potenciais trabalhos futuros e sugestões.

## 7.2 Trabalhos Futuros

1. Realizar ensaios de DRX e espectroscopia Raman, em idades distintas da hidratação do cimento, para correlacionar com os dados obtidos nesta pesquisa na busca de identificar compostos racionais deletérios a matriz cimentícia e armadura, bem como os agentes antimicrobianos, como as ações de óxidos metálicos, pHe, mayenita, e outros minerais.
2. Investigar o comportamento das reações de hidratação dos silicatos na presença de diferentes classes de hidratos de carbono ( $C_n(H_2O)_n$ ), tratado na norma somente como açúcares, tais como: Oses ou monossacarídeos, osídeos, dissacarídeos e polissacarídeos.
3. Investigar o comportamento das reações de hidratação dos silicatos na presença de diferentes tipos de ácidos de hidratos de carbono ( $C_n(H_2O)_n$ ), tal como ácido glucônico ( $C_6H_{12}O_7$ ).
4. Investigar o comportamento das reações de hidratação dos silicatos na presença de diferentes origens de óleos (mineral, vegetal e animal).
5. Avaliar as propriedades do concreto curados com diferentes tipos de efluentes (primário, secundário e terciário).
6. Avaliar as propriedades do concreto com a prolongação de cura úmida com diferentes tipos de efluentes (primário, secundário e terciário).
7. Avaliar as propriedades do concreto e argamassa na presença de ácidos minerais (nitríco e fosfórico) e orgânicas (lático, acético, fórmico, tânico, propiônico e húmico) orgânicos, tais como ácido tânico.
8. Avaliar o aumento de massa e volume de concretos produzidos com efluentes.
9. Avaliar a influência das concentrações de cálcio (Ca), potássio (K) e sódio (Na) presentes na água de amassamento para as propriedades no concreto fresco e endurecido.
10. Avaliar as propriedades do concreto diante do comportamento dos agregados na presença de efluentes como água de amassamento.

### 7.3 Sugestões

- ✓ Inserir nos requisitos normativos a avaliação do pH de equilíbrio da água, segundo método utilizado neste trabalho, tendo índice de Ryznar entre 5 e 7 e índice de Langelier entorno de zero com uma casa decimal.
- ✓ Inserir nos requisitos normativos a avaliação de ácido tânico, pois comprovadamente por Abrams (1920) tem efeito adverso na resistência, sugerindo menor que 0,1% em relação a massa de água.
- ✓ Inserir nos requisitos normativos a avaliação do sulfato de magnésio, por não oferecer capacidade aglomerante e prejudicar as propriedades mecânicas.
- ✓ Inserir nos requisitos normativos os limites para o sulfato de sódio, onde em excesso causa a instabilidade na coesão visto a expansão da matriz cimentícia.
- ✓ Inserir nos requisitos normativos os limites para metais, tais como: chumbo (Pb), zinco (Zn), mercúrio (Hg), cobre (Cu), níquel (Ni), ferro (Fe) e cromo (Cr), toleráveis até 600mg/L, bem como manganês (Mn) até 500mg/L;
- ✓ Inserir nos requisitos normativos a análises quanto a presença de ácidos inorgânicos, onde não devem exceder a 500ppm, bem como sulfeto de sódio inferior a 100ppm;
- ✓ Inserir nos requisitos normativos a análise de hidróxidos de sódio e potássio, não excedendo a 0,5% e 1,2%, respectivamente.



## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

A AGUA – H2O. Ecologia: Tudo dobre a água. Disponível em: <https://www.coladaweb.com/biologia/ecologia/tudo-sobre-a-agua>. Acesso em: dez 2019.

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland. Produção e Consumo de Cimento no Brasil. Disponível em <https://www.cimentoverdedobrasil.com.br/producao-e-consumo-de-cimento-no-brasil/>, março de 2016. Acessado em jan 2020.

ABDUL RAZAK .B.H; BABU, D.L.V. “Experimental investigation on usage of grey water in concrete production”, International Journal of Scientific and research publications. (2015), International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) e-ISSN: 2395-0056 Volume: 02 Issue: 08 | Nov-2015 www.irjet.net p-ISSN: 2395-0072 © 2015, IRJET ISO 9001:2008 Certified Journal Page 783.

ABNT NBR 15.900 - Água para amassamento do concreto. Partes de 1 a 11: Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnica – ABNT, 2009. 54p.

ABNT NBR 9935 - Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2011.

ABNT. NBR 13.583 - Cimento Portland - Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, (2014).

ABNT. NBR 13.957 - Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 2: Ensaio químico. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.

ABNT. NBR 15.900-1 - Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009a.

ABNT. NBR 15.900-10 - Água para amassamento do concreto. Parte 10: Análise química - Determinação de nitrato solúvel em água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009i.

ABNT. NBR 15.900-11 - Água para amassamento do concreto. Parte 11: Análise química - Determinação de açúcar solúvel em água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2009.

ABNT. NBR 15.900-3 - Água para amassamento do concreto. Parte 3: Avaliação preliminar. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009b.

ABNT. NBR 15.900-4 - Água para amassamento do concreto. Parte 4: Análise química - Determinação de zinco solúvel em água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009c.

ABNT. NBR 15.900-5 - Água para amassamento do concreto. Parte 5: Análise química - Determinação de chumbo solúvel em água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009d.

ABNT. NBR 15.900-6 - Água para amassamento do concreto. Parte 6: Análise química - Determinação de cloreto solúvel em água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009e.

ABNT. NBR 15.900-7 - Água para amassamento do concreto. Parte 7: Análise química - Determinação de sulfato solúvel em água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009f.

ABNT. NBR 15.900-8 - Água para amassamento do concreto. Parte 8: Análise química - Determinação de fosfato solúvel em água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009g.

ABNT. NBR 15.900-9 - Água para amassamento do concreto. Parte 9: Análise química - Determinação de álcalis solúveis em água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009h.

ABNT. NBR 16.697 - Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.

ABNT. NBR 5.739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndrico. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.

ABNT. NBR 65 - Cimento portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003

ABNT. NBR 7.214 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1996.

ABNT. NBR 7.215 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1996

ABNT. NBR NM 248 - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.

ABNT. NBR NM 49 - Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.

ABO-EL-ENEIN, S. A.; ALI, A. H.; FATMA, N. T.; ABDEL-GAWWAD, H. A. Application of microbial biocementation to improve the physico-mechanical properties of cement mortar. *HBRC Journal*, v. 9, n. 1, p. 36-40, 2013. Disponível em: . doi: 10.1016/j.hbrcj.2012.10.004

ABRAMS, D. A.. Effect of Tannic Acid on the Strength of Concrete, Bulletin 7, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, [http://www.cement.org/pdf\\_files/LS007.pdf](http://www.cement.org/pdf_files/LS007.pdf), 1920, 34 pages (available through PCA as LS007).

ABRAMS, D.A.. "Tests of Impure Waters for Mixing Concrete". *Proceedings of The American Concrete Institute*, Vol. 20, 442–486. 1924

ACHAL, V.; PAN, X. Influence of calcium sources on microbially induced calcium carbonate precipitation by *Bacillus* sp. CR2. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 173, n. 1, p. 307-317, 2014. Disponível em: . doi: 10.1007/s12010-014-0842-1

ACI 222. Protection of metals in concrete against corrosion. American Concrete Institute, Detroit, MI. 2001.

ACI 318M-08 — Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.

ACI Committee 318-89. Building code requirements for structural plain concrete, *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 3: Use of concrete in buildings, American Concrete Institute, Detroit.

AGSOLVE. Como e porque medir a Condutividade Elétrica com sondas multiparâmetros. Por Mariana Villas e Mauro Banderali, da Ag Solve. Publicado em 26/02/2013. Disponível em: <https://www.agsolve.com.br/dicas-e-solucoes/como-e-porque-medir-a-condutividade-eletrica-com-sondas-multiparâmetros/>

AGSOLVE. O que representa a condutividade elétrica em uma amostra de água. Notícias. Disponível em: <https://www.agsolve.com.br/noticias/como-e-porque-medir-a-condutividade-eletrica-ce-com-sondas-multiparametros>. Acesso em: dez 2019.

ÁGUA: O líquido vital. Revista eletrônica do Departamento de Química da Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: [https://alonsogoes.files.wordpress.com/2008/07/www-qmc-ufscr\\_qmcweb\\_artigos\\_agua.html.pdf](https://alonsogoes.files.wordpress.com/2008/07/www-qmc-ufscr_qmcweb_artigos_agua.html.pdf). Acesso em: dez 2019.

AGUILAR, M. T. P. Superfícies e interfaces. In: ISAIA, G. C. (Ed.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. V. 1. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto, 2010, p. 183-206.

AHAMED, Maqsood et al. Synthesis, characterization, and antimicrobial activity of copper oxide nanoparticles. *Journal of Nanomaterials*, v. 2014, p. 17, 2014.

AHIABA; IGOMU. Total Dissolved Solids in Water in Makurdi along Benue Valley-Nigeria: Effects on Potability and Compressive Strengths of Solid Concrete. Nigeria, 2019.

Ahmed, Yokota, A., Yamazoe, A., and Fujiwara T. 2007. Proposal of *Lysinibacillus boronitolerans* gen. nov.sp. nov., and transfer of *Bacillus fusiformis* to *Lysinibacillus fusiformis* comb. nov. and *Bacillus sphaericus* to *Lysinibacillus sphaericus* *Int Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*

AIRA, M. J. et al. Aeromycological study in the Cathedral of Santiago de Compostela (Spain). *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 60, n. 4, p. 231-237, 2007.

AJAYI, S. O. et al. Optimising Material Procurement for Construction Waste Minimization: an exploration of success factors. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 11, p. 38-46, 2017.

ALAEJOS, Pilar; BERMÚDEZ, Miguel A. Influence of seawater curing in standard and high-strength submerged concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 23, n. 6, p. 915-920, 2010.

Al-Amoudi, O.S.B. (2002). Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments *Cement and Concrete Composites*. Vol. 24, pp. 305–316.

Al-Dulaijan S.U.; Maslehuddin M.; Al-Zahrani M.M.; Sharif A.M.; Shameem M.; Ibrahim M. (2003). Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 25, pp. 429–437.

ALINNOR, I.J. (2007). Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by fly ash. *Fuel* 86(5-6) 853-857.

Al-Jabri KS, Taha R and Al-Saidy AH (2010). Effect of using non-fresh water on the mechanical properties of cement mortars and concrete. *Proceedings The Third International fib Congress and PCI Annual Convention & Exhibition, May 29 – June 2, Washington D. C., USA.*

ALLAHVERDIYEV, Adil M. et al. Antimicrobial effects of TiO<sub>2</sub> and Ag<sub>2</sub>O nanoparticles against drug-resistant bacteria and leishmania parasites. *Future microbiology*, v. 6, n. 8, p. 933-940, 2011.

AL-RAWAJFEH, A. E. Modelling and simulation of CO<sub>2</sub> release in multiple-effect distillers for seawater desalination. Doctor thesis approved by the Mathematics, Natural Sciences and Technology (Engineering), the Martin Luther University Halle-Wittenberg. June, 2004.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington, D.C.: American Public Health Organization, 1998.

AMIRNIA, Shahram; RAY, Madhumita B.; MARGARITIS, Argyrios. Heavy metals removal from aqueous solutions using *Saccharomyces cerevisiae* in a novel continuous bioreactor–biosorption system. *Chemical Engineering Journal*, v. 264, p. 863-872, 2015.

ANBU, P.; KANG, C. H.; SHIN, J. Y.; SO, J.S. Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications. *SpringerPlus*, v. 5, n. 1, p. 250, 2016. Disponível em: . doi: 10.1186/s40064-016-1869-2.

ANA, Agência Nacional de Águas do Brasil. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil. Pagina 28, capítulo Água. Brasília, 2013.

ANDRADE, J.J.O. et al. Avaliação das características do concreto quando submetido à degradação de origem química. In: Congresso Brasileiro do Concreto– REIBRAC, 45, 2003, Vitória - ES. Anais. São Paulo: IBRACON, 2003 (CD Rom)

APAZA MEDINA. Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento portland e hidróxido de cálcio. 2011. 151p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo .

ARIAS, V. et al. Aislamiento de bacterias acidófilas a partir del drenaje ácido proveniente de las inmediaciones a las unidades mineras de Julcani y Recuperada, Huancavelica. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, v. 15, n. 30, p. 59-66, 2012.

ARUNAKANTHI, E.; RAO, H. Sudarsana; REDDY, IV Ramana. Effects of hydrochloric acid in mixing and curing water on strength of high performance metakaolin concrete. *International Journal of Applied Engineering and Technology*, v. 2, n. 2, p. 68-76, 2012.

ARUNVIVEK, G. K.; PREETHA, A.; BRAGADEESWARAN, T. ; MAHENDRAN, D. Study on Behavior os Paper Industry Treated Effluent as Mixing Water in Concrete fo Pollution Control and Sustainable Development. Publish in *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. ISSN: 2278-0181. Vol. 3 Issue 8. Aug 2014.

ARY JUNIOR, I. J. Avaliação da Ação Antimicrobiana do Cimento Portland (AACP) e do Desempenho do Concreto Produzido com Esgoto Doméstico Tratado e Bruto. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental. Fortaleza, Ceará. 2018.

AS 1012, Australian Standart. Methods of testing concrete- Method for serucing and testing cores from hardened concrete for compressive strength. 1991.

AS 1379, Australian Standart. “Specification and supply of concrete Standards Australia”. 2007.

ASTM 1602M-06 - Standard Test Method for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete.

ASTM C1702-17, Standard Test Method for Measurement of Heat of Hydration of Hydraulic Cementitious Materials Using Isothermal Conduction Calorimetry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017,

ASTM C-403-70. Standart proctor penetration resistance for concrete. (revogada pela norma ASTM C403M, 2016)

ASTM C94 – 1992. Standard specification for ready-mixed concrete, American society for testing and materials, Philadelphia.

ATKINS, P. Físico Química volume 1, 2002

AYROSA, A. M. I. B. Liofilização Ciência ou arte? Disponível em: [www.fAAP.br/revista\\_faap/engenharia](http://www.fAAP.br/revista_faap/engenharia). Acesso em janeiro de 2020.

AZAM, Ameer et al. Antimicrobial activity of metal oxide nanoparticles against Gram-positive and Gram-negative bacteria: a comparative study. *International journal of nanomedicine*, v. 7, p. 6003, 2012.

AZAM, Ameer et al. Antimicrobial activity of metal oxide nanoparticles against Gram-positive and Gram-negative bacteria: a comparative study. *International journal of nanomedicine*, v. 7, p. 6003, 2012.

BABU, G. R.; KUMAR, P.G. Effects of sulfates on cement and fly ash mortar made with treated domestic wastewater. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)* ISSN: 2277-3878, V. 7. Issue 4. November 2018.

Barbara Bannister; Stephen Gillespie, Jane Jones. *Infection Microbiology and Management*. Third Edition.

BARNES, Paul; BENSTED, John. *Structure and performance of cements*. CRC Press, 2002.

BARQUILHA, C. E. R. et al. Biosorption of nickel (II) and copper (II) ions in batch and fixed-bed columns by free and immobilized marine algae *Sargassum* sp. *Journal of Cleaner Production*, v. 150, p. 58-64, 2017.

BATISTA C. Tensão superficial da água. Artigo disponível em: <https://www.todamateria.com.br/tensao-superficial-agua/>, revisado em out 2019. Acesso em: dez 2019.

BAZRAFESHAN, Edris; ZAREI, Amin Allah; MOSTAFAPOUR, Ferdos Kord. Biosorption of cadmium from aqueous solutions by *Trichoderma* fungus: kinetic, thermodynamic, and equilibrium study. *Desalination and Water Treatment*, v. 57, n. 31, p. 14598-14608, 2016.

Bender, G.R. and Marquis, R.E., 1985. Spore heat resistance and specific mineralization. *Appl Environ Microbiol* 50, 1415–1421.

BERTHELIN, J. Microbial weathering process in natural environments. *Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles*, p. 33-59, 1988.

BICUDO, C. E. de M. et al. *Barnsley Scheuenstuhl. Águas do Brasil: análises estratégicas – São Paulo, Instituto de Botânica, 2010.*

BLOEM, D.L. (1954) “Preliminary tests on the effect of sugar on strength of mortar” National Ready-mixed Concrete Association Publication, Washington DC, August 1954.

BORGES, J. C. Aula de bioquímica I, tema : água. Departamento de química e física molecular, Instituto de química de São Paulo da Universidade de São Paulo – USP. Disponível em [http://graduacao.iqsc.usp.br/files/Aula03BioqI\\_%C3%81gua.pdf](http://graduacao.iqsc.usp.br/files/Aula03BioqI_%C3%81gua.pdf). Acesso em: dez 2019.

BORZANI, W.; SCHMIDELL, W.; LIMA, U. de A.; AQUARONE, E. *Biotechnologia industrial*. Blucher, São Paulo-SP, 2001.

BRANDÃO, A. M. S.; PINHEIRO, L. M. (1999). Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*. n.8. EESC. Universidade de São Paulo.São Carlos.

BRANDÃO, A. S. Estudo de degradação de poços do visita de polietileno rotomoldado reciclado aplicados em redes coletoras de esgoto. *Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais,*

Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. Fortaleza-CE, Brasil. 2014.

BRANDÃO, A. S. et al. Averiguação da Viabilidade Técnica do Uso de Água Residuária como Água de Amassamento para Concreto. Publicado nos anais do 29º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente. 2018.

BRANDÃO, A. S. et al. Estudo de caso: uso de água recuperada na construção civil. Revista DAE. N. 217. V. 67. DOI: 10.4322/dae.2019.021. Edição Especial maio de 2019.

BRANDÃO, et al. Metodologia de Estimativa da dida útil das adutoras e sub-adutoras de água para avaliação de ativos. Artigo aceito em 2019 para publicação na revista DAE. ISSN 0101-6040, São Paulo.

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil 2017. Brasília: ANA, 2017.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução No. 274, de 25 de janeiro de 2001. Define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2001.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução No. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005.

BROCK, T. D.; MADIGAN, M. T. Biology of Microorganisms. 5. Ed. London – UK: Butterworths, 1985.

BS 4550. Methods of testing cement. 1978 (Revogada pela BS 4550-3, 2014).

BSI - British Standards Institution. 1980. Water for Making Concrete. BS 3148. London: Bristish Standard Institution.

BUZEA, Cristina; PACHECO, Ivan I.; ROBBIE, Kevin. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. Biointerphases, v. 2, n. 4, p. MR17-MR71, 2007.

CAIXETA, Cláudia Elizângela Tolentino. Avaliação do atual potencial de reúso de água no estado do Ceará e propostas para um sistema de gestão. 2010. 323 p. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

CALMA, E. G. M.; GUIAM, J. M. B.; KUIZON, M. L. D.; RUAZOL, N. A. Chapter 4: Mixing water for concrete. Department of Civil Engineering. College of Engineering, Technological University of the Philippines. TE 41 – Concrete Technology. Philippines. Feb 2018.

Cano, R.J., Borucki, M.K. 1995. Revival and identification of bacterial spores in 25- to 40-million-year-old Dominican amber. Science, 268(5213):1060-4.

CARDOSO, Saulo Luiz et al. Biosorption of toxic metals using the alginate extraction residue from the brown algae *Sargassum filipendula* as a natural ion-exchanger. Journal of cleaner production, v. 165, p. 491-499, 2017.

CAGECE, Companhia de Água e Esgoto do Ceará. Esgoto – Além de fornecer os serviços de tratamento e distribuição de água no Estado, a Cagece também é a concessionária responsável por realizar a coleta e o tratamento de esgoto em todo o Ceará. [www.cagece.com.br](http://www.cagece.com.br), 2020. Disponível em: <<https://www.cagece.com.br/produtos-e-servicos/esgoto/>>. Acesso em: 18 de janeiro de 2020.

- CARRÉ, Gaëlle et al. TiO<sub>2</sub> photocatalysis damages lipids and proteins in Escherichia coli. *Appl. Environ. Microbiol.*, v. 80, n. 8, p. 2573-2581, 2014.
- CARVALHO, A. dos G. Energia de ativação dos concretos: experimentação e modelagem. Tese da COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.
- CARVALHO, D. R.; FORTUNATO, J. N.; VILELA, A. F.; BADARÓ, A. C. L. Avaliação da Qualidade Físico-Química e Microbiológica da Água de um Campus Universitário de Ipatinga - MG. *NUTRIR GERAIS - Revista Digital de Nutrição*, v. 3, n. 5, p. 417–427, 2009.
- CASADO, M. (2010) Apresentação – Construção Sustentável: Tendências e Realidade no Brasil. Green Building Council Brazil (GBCB). Link: <https://docplayer.com.br/661610-World-green-building-council.html>. Acessado em 2020.
- CASCUDO, O. O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas. São Paulo: PINI, 1997.
- CAVALCANTE, DANILO. Ultraestrutura e termorresistência de esporos e identificação de proteínas de bactérias aeróbias de solo do Distrito Federal. 2014. 109p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília Instituto de Ciências Biológicas
- Cebeci OZ, and Saatci AM (1989). Domestic sewage as mixing water in concrete, *ACI Materials Journal*. 86(5), pp. 503-506
- CEBECI, Z.; SAATCI, A. M. Domestic sewage as mixing water in concrete. *Materials Journal*, v. 86, n. 5, p. 503-506, 1989
- CHAPLIN, M. Water structure and science. Disponível em [http://www1.lsbu.ac.uk/water/water\\_life.html#bb](http://www1.lsbu.ac.uk/water/water_life.html#bb), revisado em nov 2018. Acesso em dez 2019.
- CHINI, A.R.; MUSZYASTI, L.C.; and ELLIS, P.S. Recycling process water in ready-mixed concrete operations. Final Report Submitted to the Florida Department of Transportation, University of Florida, Gainesville, FL. 1999.
- CHOTOLI, Fabiano Ferreira et al. Quantificação de polimorfos de carbonato de cálcio cristalizados em laboratório. Publicação no VII Encontro Nacional de Hidráulica de Perfuração de Poços de Petróleo e Gás (ENAHPE). Domingos Martins - ES. Setembro de 2017.
- CHRISTOFORIDIS, A. K. et al. Study of Cu (II) removal by *Cystoseira crinitophylla* biomass in batch and continuous flow biosorption. *Chemical Engineering Journal*, v. 277, p. 334-340, 2015.
- CINCOTTO, M. A. Reações de hidratação e pozolânicas. *Concreto: ciência e tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2011.
- CIOFFI, Nicola; RAI, Mahendra (Ed.). *Nano-antimicrobials: progress and prospects*. Springer Science & Business Media, 2012.
- CLESCERI, L. S.; GREENBERG, A. E.; EATON, A. D. Microbiological Examination - Detection of enteric viruses. In: AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (Ed.). *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 20. ed. Washington, DC: APHA. AWWA.WEF, 1998. p. 9–131.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. *Técnicas de análises bacteriológicas da água: membrana filtrante*. São Paulo: CETESB, 2009.
- COSTA, Carla Neves; SILVA, Valdir Pignatta e. Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio. In: XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. Anais. PECC-UnB/ASAEE. Brasília, 2002.

- COWAN, A.E., Koppel, D.E., Setlow, B. and Setlow, P., 2003. A soluble protein is immobile in dormant spores of *Bacillus subtilis* but is mobile in germinated spores: implications for spore dormancy. *Proc Natl Acad Sci U S A* 100, 4209–4214.
- COWAN, A.E., Olivastro, E.M., Koppel, D.E., Loshon, C.A., Setlow, B. and Setlow, P., 2004. Lipids in the inner membrane of dormant spores of *Bacillus* species are immobile. *Proc Natl Acad Sci U S A* 101, 7733–7738
- CRUNDWELL, F. K. How do bacteria interact with minerals?. *Hydrometallurgy*, v. 71, n. 1-2, p. 75-81, 2003.
- DAVEY, M.E.; O'TOOLE, G.A. Microbial biofilms: from ecology to molecular genetics. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2000; 64 (4):847
- CUI, Yan et al. The molecular mechanism of action of bactericidal gold nanoparticles on *Escherichia coli*. *Biomaterials*, v. 33, n. 7, p. 2327-2333, 2012.
- CUNNINGHAM, A. B.; LAUCHNOR, E.; ELDRING, J.; ESPOSITO, R.; MITCHELL, A. C.; GERLACH, R.; PHILLIPS, A. J.; EBIGBO, A.; SPANGLER, L. H. Abandoned well CO<sub>2</sub> leakage mitigation using biologically induced mineralization: current progress and future directions. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, v. 3, n. 1, p. 40-49, 2013. Disponível em: . doi: 10.1002/ghg.1331
- DAVE, Shailesh; DAMANI, Maitry; TIPRE, Devayani. Copper remediation by *Eichhornia* spp. and sulphate-reducing bacteria. *Journal of hazardous materials*, v. 173, n. 1-3, p. 231-235, 2010.
- DAVIS, B.D.; DULBECCO, R.; EISEN, H.; and GINSBERG. Bacterial architecture. In *Microbiology*, Eds., p. 47. Philadelphia, PA: J.B. Lippincott. 1990.
- DAVIS, J. L.; NICA, D.; SHIELDS, K.; ROBERTS, D. J. Analysis of concrete from corroded sewer pipe. *Int Biodeterioration & Biodegradation*, 42(1):75, 1998.
- DAY, R. L. Reactions between methanol and portland cement paste. *Cement and Concrete Research*, v. 11, n. 3, p. 341-349, Maio 1981.
- DAY, R. L.; MARSH, B. K. Measurement of porosity in blended cement pastes. *Cement and Concrete*, v. 18, n. 1, p. 63-73, 1 jan. 1988.
- DE MELO, B. A. G.; MOTTA, F. L.; SANTANA, M. H. A. Humic acids: Structural properties and multiple functionalities for novel technological developments. *Materials Science and Engineering: C*, v. 62, p. 967-974, 2016.
- DE MUYNCK, W.; DE BELIE, N.; VERSTRAETE, W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. *Ecological Engineering*, v. 36, n. 2, p. 118-136, 2010. Disponível em: . doi: 10.1016/j.ecoleng.2009.02.006
- DEMEY, H.; VINCENT, T.; GUIBAL, E. A novel algal-based sorbent for heavy metal removal. *Chemical Engineering Journal*, v. 332, p. 582-595, 2018.
- DENG, Liping et al. Sorption and desorption of lead (II) from wastewater by green algae *Cladophora fascicularis*. *Journal of Hazardous Materials*, v. 143, n. 1-2, p. 220-225, 2007.
- DHAL, Biswaranjan et al. Mechanism elucidation and adsorbent characterization for removal of Cr (VI) by native fungal adsorbent. *Sustainable Environment Research*, v. 28, n. 6, p. 289-297, 2018.
- DHAMI, N. K.; REDDY, M. S.; MURKHERJEE, A. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review. *Frontiers in microbiology*, v. 4, p. 314, 2013b. Disponível em: . doi: 10.3389/fmicb.2013.00314



- DHAPTE, Vividha et al. Versatile SiO<sub>2</sub> nanoparticles@ polymer composites with pragmatic properties. *ISRN Inorganic Chemistry*, v. 2014, 2014.
- DIZAJ, Solmaz Maleki et al. Antimicrobial activity of the metals and metal oxide nanoparticles. *Materials Science and Engineering: C*, v. 44, p. 278-284, 2014.
- DOUKI, T.; SETLOW, B. and SETLOW, P. Effects of the binding of a/b-type small, acidsoluble spore proteins on the photochemistry of DNA in spores of *Bacillus subtilis* and in vitro. *Photochem Photobiol* 81, 163–169. 2005.
- DRIKS, A. Maximum shields:the assembly and function of the bacterial spore coat. *TRENDS in Microbiology* Vol.10 No.6. 2002.
- DRIKS, A. The *Bacillus subtilis* spore coat. *Microbiol Mol Biol Rev* 63, 1–20. 1999.
- DUARTE, P. B. Microrganismos indicadores de poluição fecal em recursos hídricos. 2011. Universidade Feral de Minas Gerais. Instituto de Ciências Biológicas, Belo Horizonte, 2011.
- DUBOSC, A.; ESCADEILLAS, G.; BLANC, P.J. Characterization of biological stains on external concrete walls and influence of concrete as underlying material. *Cement and Concrete Research*, v.31, p.1613-1617, 2001.
- EGGER, Salome et al. Antimicrobial properties of a novel silver-silica nanocomposite material. *Appl. Environ. Microbiol.*, v. 75, n. 9, p. 2973-2976, 2009.
- EGUCHI, S. Y. Agentes antimicrobianos. Pontos críticos microbiológicos em usinas de açúcar e álcool, p. 1–22, 1989.
- EL-KADY, Abeer M. et al. Synthesis, characterization and microbiological response of silver doped bioactive glass nanoparticles. *Ceramics International*, v. 38, n. 1, p. 177-188, 2012.
- EL-NAWAWY, O.A.; AHMAD, S. Use of treated effluent in concrete mixing in an arid climate. *Cement and Concrete Composites*. 13(2), pp. 137-141. 1991.
- EL-SIKAILY, Amany et al. Removal of toxic chromium from wastewater using green alga *Ulva lactuca* and its activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, v. 148, n. 1-2, p. 216-228, 2007.
- EN 1008, BS. Mixing water for concrete – specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete. 2002.
- EN 206-1, BS. Concrete: Specification, performance, production and conformity. (2000)
- EPA, Environmental Protection Agency . “Guidelines for water reuse technical issues in planning water reuse systems” Washington, DC: U.S Agency for International Development. EPA/625/R-04/108, chapter 3. 2004.
- ESTENDER, A. C.; TAKEUTI, C. H. S; JULIANO, M. C. Gestão ambiental e a utilização da água de reúso em tinturarias. *Revista de Geografia e Interdisciplinaridade*, v. 1, n. 2, p. 237-255, 2015.
- ESTRELA, Carlos; PECORA, J. Características químicas do hidróxido de calcio. Internet: <http://www.forp.usp.br/restauradora/calcio/quimica.htm>, 2003.
- FAN, Ting et al. Biosorption of cadmium (II), zinc (II) and lead (II) by *Penicillium simplicissimum*: Isotherms, kinetics and thermodynamics. *Journal of hazardous materials*, v. 160, n. 2-3, p. 655-661, 2008.

FANAND, Y. F.; CHEN, Y. S.; HU, Z. Q.; and LI, X. Experimental Study on Compressive Strength of Corroded Concrete. CI-Premier PTE LTD 31st Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES 16 - 17 August 2006, Singapore.

FARID, H. et al. Impact Analysis of Water Quality on the Development of Construction Materials. *Processes*, v. 7, n. 9, p. 579, 2019.

FERRARA, G. et al. Humic acids reduce the genotoxicity of mitomycin C in the human lymphoblastoid cell line TK6. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, v. 603, n. 1, p. 27-32, 2006.

FERREIRA, R. M. Avaliação de ensaios de durabilidade do betão. 2000. 246f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2000.

FILHO, ERNST. Água de reúso: estudo para fornecimento como água de amassamento. 2014. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro.

FILLA, J. C.; AUDIBERT, J. L.; MORALES, G. Biodeterioração de concretos e argamassas. *Téchne*, n.157, 2010.

FIORI, S.; FERNANDES, V. M. C.; PIZZO, H. Avaliação qualitativa e quantitativa do reúso de águas cinzas em edificações. *Ambiente Construído*, v. 6, n. 1, p. 19–30, 2006.

FONSECA, C. F. Uso combinado de processos de separação visando a destoxificação de hidrolisado hemicelulósico. 2011. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

FÖRSTNER, Ulrich; WITTMANN, Gottfried TW. Metal pollution in the aquatic environment. Springer Science & Business Media, 2012.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. Introdução à Mecânica dos Fluidos. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

FRANCO, A.P.G. Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido ao ataque de íons cloreto. Caruaru: FAVIP, 2011. 42p. Trabalho de conclusão de curso, engenharia civil, Faculdade Vale do Ipojuca.

FRANKS, F. Freeze-drying: from empiricism to predictability. The significance of glass transitions. *Dev Biol Stand*, v. 74, p. 9-18; discussion 19. 1998.

FREITAS JUNIOR, J. Traço de concreto: a importância do controle de água. Artigo publicado em 2016 no site Mapa da Obra. Link: <https://www.mapadaobra.com.br/inovacao/traco-de-concreto-a-importancia-do-controle-de-agua/> Acessado em 2020.

Fritze, D. 2004. Taxonomy of the Genus *Bacillus* and related genera: the aerobic endospore-forming bacteria. *Phytopatology*, 94(11). 1245-1248

GADZAMA, E. W. et al. Effects of sugar factory wastewater as mixing water on the properties of normal strength concrete. Civil Engineering Department. Modibbo Adama University of Technology, PMB, v. 2076, 2015.

GALLÉ, C. Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry: A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 10, p. 1467-1477, Outubro 2001.

Galperin, M.Y. 2013. Genome diversity of spore-forming Firmicutes. *Microbiology Spectrum*, 1(2): 1-15.

GANENDRA, G.; DE MUYNCK, W.; HO, A.; ARVANITI, E. C.; HOSSEINKHANI, B.; RAMOS, J. A. RAHIER, H. BOON, N. Formate oxidation-driven calcium carbonate precipitation by *Methylocystis parvus* OBBP. *Applied and environmental microbiology*, v. 80, n. 15, p. 4659-4667, 2014. Disponível em: . doi: 10.1128/AEM.01349-14

GARCIA-FUENTES, M., TORRES, D., ALONSO, M. J. New surface-modified lipid nanoparticles as delivery vehicles for salmon calcitonin. *Int J Pharm*, v.296, n. 1-2, p. 122-32. 2009.

GASSERT, F., M. LUCK, M. LANDIS, P. REIG, and T. SHIAO. *Aqueduct Global Maps 2.1: Constructing Decision-Relevant Global Water Risk Indicators*. Working Paper. Washington, DC: World Resources Institute, 2014. Disponível em: <<http://www.wri.org/publication/aqueduct-globalmaps-21-indicators>>Acesso em: 26 Jun. 2018.

GAYLARDE, Christine C.; GAYLARDE, Peter M. A comparative study of the major microbial biomass of biofilms on exteriors of buildings in Europe and Latin America. *International biodeterioration & biodegradation*, v. 55, n. 2, p. 131-139, 2005.

GAYNOR, R. D., “Calculating Chloride Percentages” *Concrete Technology Today*, PL983, Portland Cement Association, [http://www.cement.org/pdf\\_files/PL983.pdf](http://www.cement.org/pdf_files/PL983.pdf), December, 1998, 2 pages.

GEHRMANN, C. K.; PETERSEN, K.; KRUMBEIN, W. E. Silicone and calcicole lichens on jewish tombstones – interactions with the environment and biocorrosion. In: *INTERNATIONAL CONGRESS ON DETERIORATION AND CONSERVATION OF STONE*, 6, 1988, Torun. *Proceedings...* Torun: Nicholas Copernicus University – Institute of Conservation and Restoration of Cultural Property, 1988. p. 33-38.

GENTIL, V. *Corrosão*. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GERHARRDT, P.; MARQUIS, R.E. 1989. Spore thermoresistance mechanisms. In *Regulation of Prokaryotic Development* ed. Smith, I., Slepecky, R.A. and Setlow, P. pp. 43–63. Washington, DC: American Society for Microbiology.

GHORAB, H. Y.; HILAL, M. S.; ANTAR, A. Effect of mixing and curing waters on the behaviour of cement pastes and concrete Part 2: Properties of cement paste and concrete. *Cement and concrete research*, v. 20, n. 1, p. 69-72, 1990.

GHRAIR, A.; AL-MASHAQBEH, O. Domestic Wastewater Reuse in Concrete Using Bench-Scale Testing and Full-Scale Implementation. *Water*, v. 8, n. 9, p. 366, 2016.

Gibbons, N.E., and Murray, R.G.E., 1978. Proposals concerning the higher taxa of bacteria. *Int J Syst Bacteriol* 28:1-6

Giorno, R., Bozue, J., Cote, C., Wenzel, T., Sulayman, M., Krishna, M., Michael, R.M., Wang, R., Zielke, R.R., Maddock, J., Friedlander, A., Welkos, S., and Driks, A. 2007. Morphogenesis of the *Bacillus anthracis* Spore. *Journal of bacteriology*, p. 691–705 Vol. 189, No. 30021-9193

GIRISH, S.; PATHAK, K. *Investigations on Ways for Sustainable Development by Recycling Treated Wastewater in Cement*. 2015.

GOMIDES, M. J. *Ataque por sulfatos ao concreto compactado com rolo*. 2001. Tese de Doutorado. Tese de M. Sc, Postgraduate Course in Civil Engineering/Federal University of Goiás (UFG), Goiânia, Brazil.

GONÇALVES, L. de F. *Avaliação de propriedades térmicas do concreto com cinza volante em fundação de aerogeradores*. Dissertação publicada através do Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-Ce, Brasil. 2018.

GORCHEV, H. G.; OZOLINS, G. WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. WHO Chronicle, v. 38, n. 3, p. 104–108, 1984.

GOROSPE, C. M.; HAN, S. H.; KIM, S. G.; PARK, J. Y.; KANG, C. H.; JEONG, J. H.; SO, J. S. Effects of different calcium salts on calcium carbonate crystal formation by *Sporosarcina pasteurii* KCTC 3558. Biotechnology and bioprocess engineering, v. 18, n. 5, p. 903-908, 2013. Disponível em: . doi: 10.1007/s12257-013-0030-0

GRAZIANO DA SILVA, J. Coodç KAGEYAMA, A. et ali. A irrigacao e a problematica fundiaria do nordeste. Campinas Instituto dwe Economia, BrasiliaÇ PROUNI.

GU, J. D; FORD, T. E; BERKE, N. S; MITCHELL, R. Biodeterioration of concrete by the fungus *Fusarium*. International Biodeterioration & Biodegradation. 41, 101 -109, 1998.

GUDE, V. G. Desalination and Water Reuse to Address Global Water Scarcity. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, v. 16, n. 4, p. 591–609, 1 dez. 2017.

GUILLETTE, O.; DREESEN, R. Laboratory chamber studies and petrographical analysis as bioreceptivity assessment tools of building materials. The Science of the Total Environment, v.167, p.365-374, 1995.

HAGHIGHI, Farnoosh et al. Antifungal activity of TiO<sub>2</sub> nanoparticles and EDTA on *Candida albicans* biofilms. Infection, Epidemiology and Microbiology, v. 1, n. 1, p. 33-38, 2013.

HASPARYK, N. P. Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado. Porto Alegre. 2005. 326p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HELENE, P.R.L. Corrosão em armaduras para concreto armado. São Paulo: PINI, 1986.

HEWAYDE, H.; NEHDI, M.; ALLOUCHE, E.; NAKHLA, G. Effect of mixture design parameters and wetting -drying cycles on resistance of concrete to sulphuric acid. Ame. Society of Civil Eng. 19 (2): 155-163, 2007.

HEWITT, Christopher J. et al. An evaluation of the anti-bacterial action of ceramic powder slurries using multi-parameter flow cytometry. Biotechnology Letters, v. 23, n. 9, p. 667-675, 2001.

HEWLETT, P. C. The Chemistry of Cement and Concrete. Chemical Publishing Company, Inc., New York, 1998.

HLIHOR, Raluca Maria et al. Biosorption potential of dead and living *Arthrobacter viscosus* biomass in the removal of Cr (VI): batch and column studies. Process Safety and Environmental Protection, v. 108, p. 44-56, 2017.

HOLM, L.W.; Status of CO<sub>2</sub> and hydrocarbon miscible oil recovery methods. Journal of Petroleum Engineering, v.28, n.1., p.76-84. paper SPE 5560-PA, 1976

HOMAM, S. M.; SHEIKH, S.; MUKHERJEE, P. Durability of fibre reinforced polymers (FRP) wraps and external FRP–concrete bond. In: Proceedings of the 3rd international conference on concrete under severe conditions. 2001. p. 1866-1873.

HONDJUILA MIOKONO, E. D. Biodétérioration de mortiers avec une succession de bactéries sulfo-oxydantes neutrophiles et acidophiles, 2013.

HOPPE FILHO, Juarez. Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

HUANG, Fei et al. Biosorption of Cd (II) by live and dead cells of *Bacillus cereus* RC-1 isolated from cadmium-contaminated soil. *Colloids and surfaces b: biointerfaces*, v. 107, p. 11-18, 2013.

HWA, T. J.; KWONG, Y. W. 1987. Use of Reclaimed Wastewater for Concrete Mixing. *Journal of Environmental Engineering*. 113(5): 1156 – 1161.

IAVICOLI, Ivo et al. The effects of nanomaterials as endocrine disruptors. *International journal of molecular sciences*, v. 14, n. 8, p. 16732-16801, 2013.

ILLSTON, J. M.; DOMONE, P.. *Construction Materials: Their nature and behavior*. Fourth Edition. London and New York, 2010.

IRAM, Shazia et al. Biosorption and bioaccumulation of copper and lead by heavy metal-resistant fungal isolates. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 40, n. 7, p. 1867-1873, 2015.

IS 3025(1-56 parts) —Methods of sampling and test (physical and chemical) for water and wastewater.

IS 456-2000 - Plain and reinforced concrete code of practice (fourth revision).

ISAIA, G. C. *Concreto: Ciência e tecnologia*. 1v. São Paulo: IBRACON, 2011.

ISAIA, G. C. *Concreto: Ciência e tecnologia*. 2v. São Paulo: IBRACON, 2011.

JAGADEESHA KUMAR, B. G.; PRABHAKARA, R.; PUSHPA, H. Bio mineralisation of calcium carbonate by different bacterial strains and their application in concrete crack remediation. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, Março, 2013. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.384.8054&rep=rep1&type>.

JAWED, I., et al., *Hidration of Portland Cement, Structure and Performance of Cements*. P. Barnes ed., Applied Science Publishers, 1983, pp. 232-317.

JIN, Tony; HE, Yiping. Antibacterial activities of magnesium oxide (MgO) nanoparticles against foodborne pathogens. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 13, n. 12, p. 6877-6885, 2011.

KANG, C. H.; HAN, S. H.; SHIN, Y. J.; OH, S. J.; SO, J. S. Bioremediation of Cd by microbially induced calcite precipitation. *Applied biochemistry and biotechnology*, v. 172, n. 6, p. 2907-2915, 2014. Disponível em: . doi: 10.1007/s12010-014-0737-1

KHADIVINIA, Elnaz et al. Cadmium biosorption by a glyphosate-degrading bacterium, a novel biosorbent isolated from pesticide-contaminated agricultural soils. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 20, n. 6, p. 4304-4310, 2014.

KHIL'KO, S. L.; EFIMOVA, I. V.; SMIRNOVA, O. V. Antioxidant properties of humic acids from brown coal. *Solid Fuel Chemistry*, v. 45, n. 6, p. 367-371, 2011.

KOBER, L. M. *Princípios de físico-química aplicados a enfermagem: Estudo dos líquidos*. Publicado na revista da escola de enfermagem da Universidade de São Paulo. V. 3 no. 2. Cap. III. São Paulo-SP, 1969.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTE, W. A. *Principles of wood science and technology solid wood*. New York: Springer, 1968. V.1

- KOSMATKA, S. H. et al. Design and control of concrete mixtures. Skokie, IL: Portland Cement Association, 2002.
- KUCCHE, K. J.; JAMKAR, S. S.; SADGIR, P. A. Quality of water for making concrete: a review of literature. *International Journal of Scientific and Research Publications*, v. 5, n. 1, p. 1-10, 2015.
- KUMAR, R.; KUMAR, A. V. Biodeterioration of stone in tropical environments: an overview. Los Angeles: J. Paul Getty Trust, 1999.
- KUPWADE-PATIL, K.; ALLOUCHE, E. N. Examination of chloride-induced corrosion in reinforced geopolymer concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 25, n. 10, p. 1465-1476, 2012.
- LANGLIER, W.F. The analytical control of anti—corrosion water treatment. *J Am Water Work Assoc* 28:1500–1521. *Journal*, 1936.
- LAPA, J. S. Patologia, Recuperação e Reparo das estruturas de concreto. 2008. 56p. Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- LAWRENCE, D. D. Changes in composition of the aqueous phase during hydration of cement paste an suspension. *Higw. Res. Board Spec. Rep.* 1966, 90, 378-391.
- LECHEVALLIER, M. W. Coliform Regrowth in Drinking Water: A Review. *Journal - American Water Works Association*, v. 82, n. 11, p. 74–86, 1 nov. 1990.
- LEE, O. S.; SALIM, M. R.; ISMAIL, M.; ALI, M. I. Reusing, treated effluent in concrete technology. *Jurnal Teknologi*, 34 (F). Universiti Teknologi Malaysia. P. 1-10, June 2001.
- LEE, Yi-Chao; CHANG, Shui-Ping. The biosorption of heavy metals from aqueous solution by *Spirogyra* and *Cladophora* filamentous macroalgae. *Bioresource technology*, v. 102, n. 9, p. 5297-5304, 2011.
- LEONARDO et al. Effect of a calcium hydroxide-based root canal dressing on periapical repair in dogs: a histological study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Radio Endod.* 2006 Nov; 102(5):680-5.
- LEUNG, Yu Hang et al. Mechanisms of antibacterial activity of MgO: non-ROS mediated toxicity of MgO nanoparticles towards *Escherichia coli*. *Small*, v. 10, n. 6, p. 1171-1183, 2014.
- LEWANDOWSKI, Z, L.: CUNNINGHAM, A. B. Biofilm process fundamentals. In: SIKDAR, S. K.; IRVINE, R. L (Ed.) *Bioremediation: principles and practice*. Pennsylvania: Technomic Publishing, 1998. v.1. p. 511-546.
- LI, Dandan et al. Characterization of Pb<sup>2+</sup> biosorption by psychrotrophic strain *Pseudomonas* sp. I3 isolated from permafrost soil of Mohe wetland in Northeast China. *Journal of environmental management*, v. 196, p. 8-15, 2017.
- LI, P.; GAO, Y.; SUN Z.; CHANG, D.; GAO, G.; DONG, A. Synthesis, Characterization, and Bactericidal Evaluation of Chitosan/Guanidine Functionalized Graphene Oxide Composites. *Molecules*. 2017;22:12. Doi: 10.3390/molecules22010012
- LIMA, Enrique et al. Gold nanoparticles as efficient antimicrobial agents for *Escherichia coli* and *Salmonella typhi*. *Chemistry Central Journal*, v. 7, n. 1, p. 11, 2013.
- LIMCHAROENSUK, Tossapol et al. Bioaccumulation and biosorption of Cd<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> by bacteria isolated from a zinc mine in Thailand. *Ecotoxicology and environmental safety*, v. 122, p. 322-330, 2015.

- LIU, Qian et al. Effects of ZnO nanoparticles and microwave heating on the sterilization and product quality of vacuum-packaged Caixin. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 94, n. 12, p. 2547-2554, 2014.
- LOKINA, S.; NARAYANAN, V. Antimicrobial and anticancer activity of gold nanoparticles synthesized from grapes fruit extract. *Chemical Science Transactions*, v. 2, n. S1, p. S105-S110, 2013.
- LOWENSTAM, H. A.; WEINER, S. Mollusca. In: \_\_\_\_\_. *On Biomineralization*. Oxford University Press, Inc, 1989. Chapter 6, p. 88-110.
- LU, N.; LIKOS; W. J. *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley & Sons. 2004.
- LUZ, Caroline Angulski da et al. Comportamento do cimento sulfo-aluminoso (CSA) e da cinza pesada (CZP) no tratamento de resíduos: fosfogesso e lodo galvânico. 2005.
- MAGNIN, Jean-Pierre; GONDREXON, Nicolas; WILLISON, John C. Zinc biosorption by the purple non-sulfur bacterium *Rhodobacter capsulatus*. *Canadian journal of microbiology*, v. 60, n. 12, p. 829-837, 2014.
- MAHAPATRA, Ojas et al. Ultrafine dispersed CuO nanoparticles and their antibacterial activity. *Journal of Experimental Nanoscience*, v. 3, n. 3, p. 185-193, 2008.
- MAHASNEH, B. Z. Assessment of Replacing Wastewater and Treated Water with Tap Water in Making Concrete Mix. *EJDE*. V. 19. P. 2379-2386. 2014.
- MALARKODI, C. et al. Biosynthesis and antimicrobial activity of semiconductor nanoparticles against oral pathogens. *Bioinorganic chemistry and applications*, v. 2014, 2014.
- MARQUEZ, JORGE F.; SANCHEZ-SILVA, MAURICIO; HUSSERL, JOHANA. Review of reinforced concrete biodeterioration mechanisms. In: *Proceeding of VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures-FraMCoS-8*, Toledo. 2013.
- MATOUQ, M.; AL-BALQA. Applied University, Maan College, Jordan, study about The Prospect of Reusing Treated wastewater for Irrigation in the Hashemite Kingdom of Jordan. 2011.
- MCCARTHY, L. M. Analysis of alternative water sources for use in the manufacture of concrete. 2010. Tese de Doutorado. Queensland University of Technology.
- MCPOLINAND, D. O., BASHEER, P. A. M. and LONG, A. E. Carbonation and pH in Mortars Manufactured with Supplementary Cementitious Materials. *Journal Of Materials In Civil Engineering, Asce / May 2009 / 217-225*.
- MEHTA P. K.; MONTEIRO, P. F. M. *Concrete, Microstructures, Properties and Materials*. 3th ed, Mc. Grow Hill, Book Co. New York, 2006.
- MEHTA P.K. (1973). Mechanism of expansion associated with ettringite formation. *Cement and Concrete Research Vol.3*, pp. 1-6.
- MEHTA, P. K. Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete international*, 23/ No. 10: 61-66. 2000.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Ibracon, 2008. 674p.
- MENA, J. et al. Aislamiento y determinación de cepas bacterianas con actividad nematocida. Mecanismo de acción de *C. paurometabolum* C-924 sobre nematodos. *Bioteología Aplicada*, v. 20, n. 4, p. 248-252, 2003.

METCALF & EDDY, Inc. Waste water engineering: treatment, disposal, reuse. 2th Ed. Mc. Grow Hill Book Co. New York, 1979.

MICHELENA, J. B. Física térmica: Uma abordagem histórica e experimental. Dissertação de mestrado do Programa de pós-graduação em ensino de física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2008.

MILLER, Ana; DIONÍSIO, Amélia; MACEDO, Maria Filomena. Primary bioreceptivity: a comparative study of different Portuguese lithotypes. *International biodeterioration & biodegradation*, v. 57, n. 2, p. 136-142, 2006.

MINDNESS, S.; YOUNG, J. F. 1981. *Concrete*. New Jersey: Prentice-Hall. 1981

MIODOWNIK, Mark. *Stuff Matters: Exploring the Marvelous Materials that Shape Our Man-made World*. Houghton Mifflin Harcourt, 2014.

MIZIELNSKA, M., ŁOPUSIEWICZ, Ł., MEZYNSKA, M., BARTKOWIAK, A. The Influence of Accelerated UV-A and Q-SUN Irradiation on the Antimicrobial Properties of Coatings Containing ZnO Nanoparticles. *Molecules*. 2017;22:1556. doi: 10.3390/molecules22091556

MONTGOMERY, Douglas C. *Design and analysis of experiments*. John wiley & sons, 2017.

MONTENY, J.; VINCKE, E.; BEELDENS, A.; DE BELIE, N.; TAERWE; L.; VAN GEMERT, D. Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement and Concrete Research*. vol. 30(4), p. 623–34, 2000.

MUKHA, Iu et al. Antibacterial action and physicochemical properties of stabilized silver and gold nanostructures on the surface of disperse silica. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 2, n. 02, p. 131, 2010.

MULLER, A. C. A. et al. Densification of C-S-H Measured by <sup>1</sup>H NMR Relaxometry. *The Journal of Physical Chemistry C*, v. 117, n. 1, p. 403-412, 10 jan. 2013.

NEVILLE, A. M. 1995. *Properties of Concrete*. Fourth and Final Edition. England: Addison Wesley Longman.

NEVILLE, A. M. *Properties of Concrete*. Longman scientific & Technical publication, 1994, pp 10-87.

NEVILLE, A.M. Water, Cinderella ingredient of concrete. *ConcrInt Am ConcrInst* 2000; 22(9):66-71.

NOGUEIRA, R.P. A corrosão do aço em concreto: influência do pH e do potencial de eletrodo. Rio de Janeiro: 1986/1989. 112p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro.

NOGUEIRA, Raquel FP et al. Heterogeneous photocatalysis and its environmental applications. *Química Nova*, 1998.

NONAKARAN, S. H.; PAZHOUHANDEH, M.; KEYVANI, A.; ABDOLLAHIPOUR, F. Z.; SHIRZAD, A. Isolation and identification of *Pseudomonas azotoformans* for induced calcite precipitation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 31, n. 12, p. 1993-2001, 2015. Disponível em: . doi: 10.1007/s11274-015-1948-5

OETTERER, M. *Fundamentos de ciência e tecnologia de alimentos*. Barueri: Manole, 2006. 664p

ONU (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS). Governo Brasileiro e PNUD Publicam Vídeos Didáticos Sobre Eficiência Energética na Construção Civil. 2016. Disponível em:



<<https://nacoesunidas.org/governo-brasileiro-e-pnud-publicam-videos-didaticos-sobre-eficiencia-energetica-na-construcao-civil/>>. Acesso em: 23 setembro 2019

ONU, ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos, 2018. Disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0026/002615/261594por.pdf> Acesso em: 20 setembro 2019.

ONU, ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Video (3 minutos e 56 segundos). Forum do Dia Mundial da Água. Painel de Alto Nível sobre a Água: O mundo enfrenta uma crise de água e precisa reagir. Década Internacional de Ação: “Água para o desenvolvimento sustentável”. Brasília – Brasil, março de 2018. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=1RLhXg\\_7bKw](https://www.youtube.com/watch?v=1RLhXg_7bKw). Acesso em: 13 maio 2018.

PAKSHIR, M.; ESMAILI, S. The effect of chloride ion concentration on the corrosion of concrete. *Scientia Iranica*, v. 4, n. 4, p. 201-205, 1998.

PAL, Sukdeb; TAK, Yu Kyung; SONG, Joon Myong. Does the antibacterial activity of silver nanoparticles depend on the shape of the nanoparticle? A study of the gram-negative bacterium *Escherichia coli*. *Appl. Environ. Microbiol.*, v. 73, n. 6, p. 1712-1720, 2007.

PARANHOS, A.; VECHIA, D., BELTRAME, M. Capilaridade: Um fenômeno de superfície com aplicações cotidianas. In: Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP. XII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, VIII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e II Encontro de Iniciação Científica Júnior; 2008 Oct. 16 e 17; São José dos Campos, Brasil. São José dos Campos: UNIVAP; 2008. p. 1-2.

PARK, S.; TIA, M. An experimental study on the water-purification properties of porous concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 2, p. 177-184, 2004.

PAULA, H. M.; FERNANDES, C. E. Gestão da água em usina de concreto: análise do risco das atividades e monitoramento da qualidade da água residuária para fins de reuso. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, vol 10, n. 1, 2015.

PESSARELLO, R. G. Estudo exploratório quanto ao consumo de água na produção de obras de edifícios: avaliação e fatores influenciadores. Monografia (MBA em Tecnologia e Gestão da Produção de Edifícios). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

PHROMPET, Chaiwat et al. Effect of free oxygen radical anions and free electrons in a Ca<sub>12</sub>Al<sub>14</sub>O<sub>33</sub> cement structure on its optical, electronic and antibacterial properties. *Heliyon*, v. 5, n. 5, p. e01808, 2019.

PIGNATELLO, J. J. The measurement and interpretation of sorption and desorption rates for organic compounds in soil media. *Advances in Agronomy*, v.69, p.1-173, 2000.

PINHEIRO, S. M. De M.; SILVA, M. R. Da. Ações de agentes biológicos no concreto. In: ISAIA, Geraldo C. *Concreto: Ciência e tecnologia*. 2v. São Paulo: IBRACON, 2011, cap.

PLUMB, O. A.; BROWN, C. A.; OLMSTEAD, B. A. Experimental measurements of heat and mass transfer during convective drying of southern pine. *Wood Science and Technology*, New York, v.18, p.187-204, 1984.

POLSON, E. J. et al. Biofilms on porous building materials: friend or foe? In INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF MATERIALS AND COMPONENTS, 9<sup>o</sup>, Brisbane, 2002. Proceeding. Brisbane: VCSIRO, 2002 (Paper 114). Disponível em: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB9951.pdf>>. Acesso em 07 jan. 2020.

PURKISS, J. A. *Fire Safety Engineering Design of Structures*. Butterworth Heinemann. Oxford, 1996.

QUATRINI R.; JOHNSON, D.B. Acidophiles: life in extremely acidic environments. Haverhill: Caistor Academic Press; 2016.

QUITON, Kyle Glainmer et al. Removal of chromium (VI) and zinc (II) from aqueous solution using kaolin-supported bacterial biofilms of Gram-negative *E. coli* and Gram-positive *Staphylococcus epidermidis*. Sustainable Environment Research, v. 28, n. 5, p. 206-213, 2018.

QUSIM S. R. Wastewater treatment plants-planning, design and operation. Holt Rinehart and Winson, New York, 1985.

RAMACHANDRAN, V. S. Concrete admixtures handbook: properties, science and technology. Second Edition, Noyes Publication. Library of Congress Catalog Card number: 95-22676. ISBN: 0-8155-1373-9. United States of America (USA), 1995.

RAMRAKHIANI, Lata; MAJUMDER, Rajib; KHOWALA, Suman. Removal of hexavalent chromium by heat inactivated fungal biomass of *Termitomyces clypeatus*: Surface characterization and mechanism of biosorption. Chemical Engineering Journal, v. 171, n. 3, p. 1060-1068, 2011.

RAO, H. S.; REDDY, I. V.; VAISHALI, S. G. Effects of acidity present in water on strength and setting properties of concrete. In: 29th Conference on our World in Concrete & Structures. 2004.

RAO, K. S.; RAJU, M. P.; RAJU, P. S. N. A Study on Variation of Compressive Strength of High Strength Concrete at Elevated Temperatures. 29th, 2004.

RASMUSSEN, John W. et al. Zinc oxide nanoparticles for selective destruction of tumor cells and potential for drug delivery applications. Expert opinion on drug delivery, v. 7, n. 9, p. 1063-1077, 2010.

RAVISHANKAR RAI, V.; JAMUNA BAI, A. Nanoparticles and their potential application as antimicrobials. A Méndez-Vilas A, editor. Mysore: Formatex, 2011.

REDDY, M. B.; BABU, R. G.; REDDY, R. Effect of heavy metal present in mixing water on properties and sulfate attack on blended cement mortar. International Journal of Civil and Structural Engineering, v. 1, n. 4, p. 804, 2011.

REDDY, V. V. et al. Effect of Magnesium Chloride (MgCl<sub>2</sub>) on Ordinary Portland Cement Concrete. Indian Journal of Science and Technology, v. 4, n. 6, p. 643-645, 2011.

REN, Guangming et al. Characteristics of *Bacillus* sp. PZ-1 and its biosorption to Pb (II). Ecotoxicology and environmental safety, v. 117, p. 141-148, 2015.

RIBAS S. M. Étude de la microstructure du béton sous l'influence de variations hygrométriques importantes. Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1991. Série Ouvrage d'Art OA10. 220p.

RIBAS S. M. La diversification climatique et la dégradation du béton par les microorganismes. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DEALING WITH DEFECTS IN BUILDINGS. International Council for Building Research Studies Document, 1994, Varenna – Italy, 1994. p. 471-479.

RIBAS S. M. Microbiological identification of microorganisms responsible for degradation of concrete. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 10, 1997, Gothenburg – Sweden. Proceedings... Norway: SINTEF Civil and Environmental Engineering, Cement and concrete, 1997. 4 p.

RICKERT, J.; GRUBE, H. Influence of recycled water from fresh concrete recycling systems on the properties of fresh and hardened concrete. VDZ, Concrete Technology Reports, 2003.

- RIDI, F. et al. Water Confined in Cement Pastes as a Probe of Cement Microstructure Evolution. *The Journal of Physical Chemistry B*, v. 113, n. 10, p. 3080-3087, 12 mar. 2009.
- ROBENS, E., ROUQUEROL, F., ROUQUEROL, J., SING, K. Adsorption by powders and porous solids. Academic Press, London, UK, 1999.
- RODRIGUES, P. P. F. Parametros de Dosagem de Concreto. ET-67. São Paulo: ABCP, 1998.
- ROY, Aashis S. et al. Effect of nano-titanium dioxide with different antibiotics against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, v. 1, n. 01, p. 37, 2010.
- RUPARELIA, J.P., CHATTERJEE, A.K., DUTTAGUPTA, S.P. & MUKHERJI, S. 2008. Strain specificity in antimicrobial activity of silver and copper nanoparticles. *Acta Biomater.* 4(3):707-716. PMID:18248860. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actbio.2007.11.006>.
- RULAND, W. X-ray determination of crystallinity and diffuse disorder scattering. *Acta Crystallographical*, v. 14, 11: p. 1180, 1961.
- RYZNAR, John W. A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water. *Journal-American Water Works Association*, v. 36, n. 4, p. 472-483, 1944.
- SAND, W.: BOCK, E. Biodeterioration of ceramic materials by biogenic acids. *International Biodeterioration*, Slough, v. 27, n. 2, p. 175-183, 1991b.
- SANGOJU, B. et al. Chloride-induced corrosion of steel in cracked OPC and PPC concretes: Experimental study. *Journal of materials in civil engineering*, v. 23, n. 7, p. 1057-1066, 2011.
- SANTOS, A. C. Dos. Ensaio para análise da interface entre o concreto e polímero reforçado com fibra. 2003. 179p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2003.
- SARAF, R. Cost effective and monodispersed zinc oxide nanoparticles synthesis and their characterization. *International Journal of Advances in Applied Sciences*, v. 2, n. 2, p. 85-88, 2013.
- SARICIMEN, H. et al. Testing of treated effluent for use in mixing and curing of concrete. e-prints <https://eprints.kfupm.edu.sa/1745/> (Sep. 21, 2009), 2008.
- SBM, Sociedade Brasileira de Metrologia. Trabalhos: umidade relativa. Disponível em: <http://www.sbmet.org.br/ecomac/pages/trabalhos/umidade%20relativa.pdf>. Acesso em dez 2019.
- SCHERER, G. W.; ZHANG, J.; THOMAS, J. J. Nucleation and growth models for hydration of cement. *Cement and Concrete Research*, v. 42, n. 7, p. 982-993, jul. 2012.
- SCHNEIDER, U., Verhalten Bon Beton Bei Hohen Temperaturen Dtsch. Ausschuss Stahlb., pp 337 (1982)
- SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M. Advances in understanding hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, Keynote papers from 14th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC 2015), v. 78, Part A, p. 38-56, Dezembro 2015.
- SEZER, G. İ. et al. Effect of elevated temperatures and time on compressive and tensile properties of concretes. 2008.
- SHACKELFORD, J. F. *Material Science and engineering Handbook*. Boca Raton: CRC Press LLC, Third Edition. 2000.

- SHAKHAPURE, J. et al. Uses of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and fly ash as solid adsorbents. *Bulletin of Materials Science*, v. 28, n. 7, p. 713-718, 2005.
- SHEKARCHI, M.; YAZDIAN, M.; MEHRDADI, N. Use of biologically treated domestic waste water in concrete. *Kuwait Journal of Science and Engineering*, v. 39, p. 97-111, 2012.
- SHETTY, M.S. *Concrete Technology: Theory and Practice*. New Delhi: S. Chand & Company LTD, 2000.
- SHIGEMOTO, N.; HAYASHI, H.; MIYAURA, K. Selective formation of Na-X zeolite from coal fly ash by fusion with sodium hydroxide prior to hydrothermal reaction. *Journal of materials science*, v. 28, n. 17, p. 4781-4786, 1993.
- SHIRAKAWA, M. A. et al. A biodeterioração de materiais de construção civil. *Revista Técnica*, São Paulo, v. 5, n. 33, p. 36-39, 1998.
- SIDDIQUI, Y et al. In vitro fungicidal activity of humic acid fraction from oil palm compost. *Int. J. Agric. Biol*, v. 11, p. 448-452, 2009.
- SILVA FILHO, L. C. P. Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica. Porto Alegre, 1994. 143 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SILVA, J. L. M. Utilização de Esgoto Tratado em Sistemas de Lagoas de Estabilização com Água de Amassamento e Cura de Concreto. 2008. Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza, 2008.
- SILVA, M.; NAIK, T. R. Sustainable use of resource – Recycling of sewage treatment plant water in concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES, II, 2010, Ancona, Itália. Proceedings... . Ancona, Itália: SCMT, 2010. p. 1731 - 1740.
- SILVA, W. M. et al. Avaliação da viabilidade técnica da utilização de água residuária para produção de concreto. Trabalho de conclusão de curso de engenharia civil da Universidade Federal do Ceará (2018) e Publicado nos anais do 61º Congresso Brasileiro de Concreto promovido pelo Instituto Brasileiro de Concreto – IBRACON (2019)
- SILVERMAN, Melvin P.; LUNDGREN, Donald G. Studies on the Chemoautotrophic Iron Bacterium *Ferrobacillus Ferrooxidans* II: Manometric Studies. *Journal of bacteriology*, v. 78, n. 3, p. 326, 1959.
- SINGH, P.; TRIPATHI, P.; CHAUHAN, S.; MISHRA, A. Domestic waste treatment using fly ash alone or in combined form. *IOSR Journal os Electrical and Electronics Engineering*. E-ISSN: 2278-1676, p-ISSN: 2320-3331, v. 11, Issues 3 ver. III, p. 34-39. June 2016.
- SKOOG, D. A, WEST, D. M., HOLLER, F. J., CROUCH, S. R. *Fundamentos de Química Analítica*, Editora Thomson, tradução da 8ª edição, 2006.
- SMAOUI, N. et al. Effects of alkali addition on the mechanical properties and durability of concrete. *Cement and concrete research*, v. 35, n. 2, p. 203-212, 2005.
- STEFANOU, G. D.; LARSINOS, C. H. Influence of mixing water on the setting time of concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, v. 3, n. 1, p. 45-48, 1981.
- STEINOUR, H. H.. *Concrete Mix Water—How Impure Can It Be?*, Research Department Bulletin RX119, Portland Cement Association, [http://www.cement.org/pdf\\_files/RX119.pdf](http://www.cement.org/pdf_files/RX119.pdf), 1960, 20 pages.

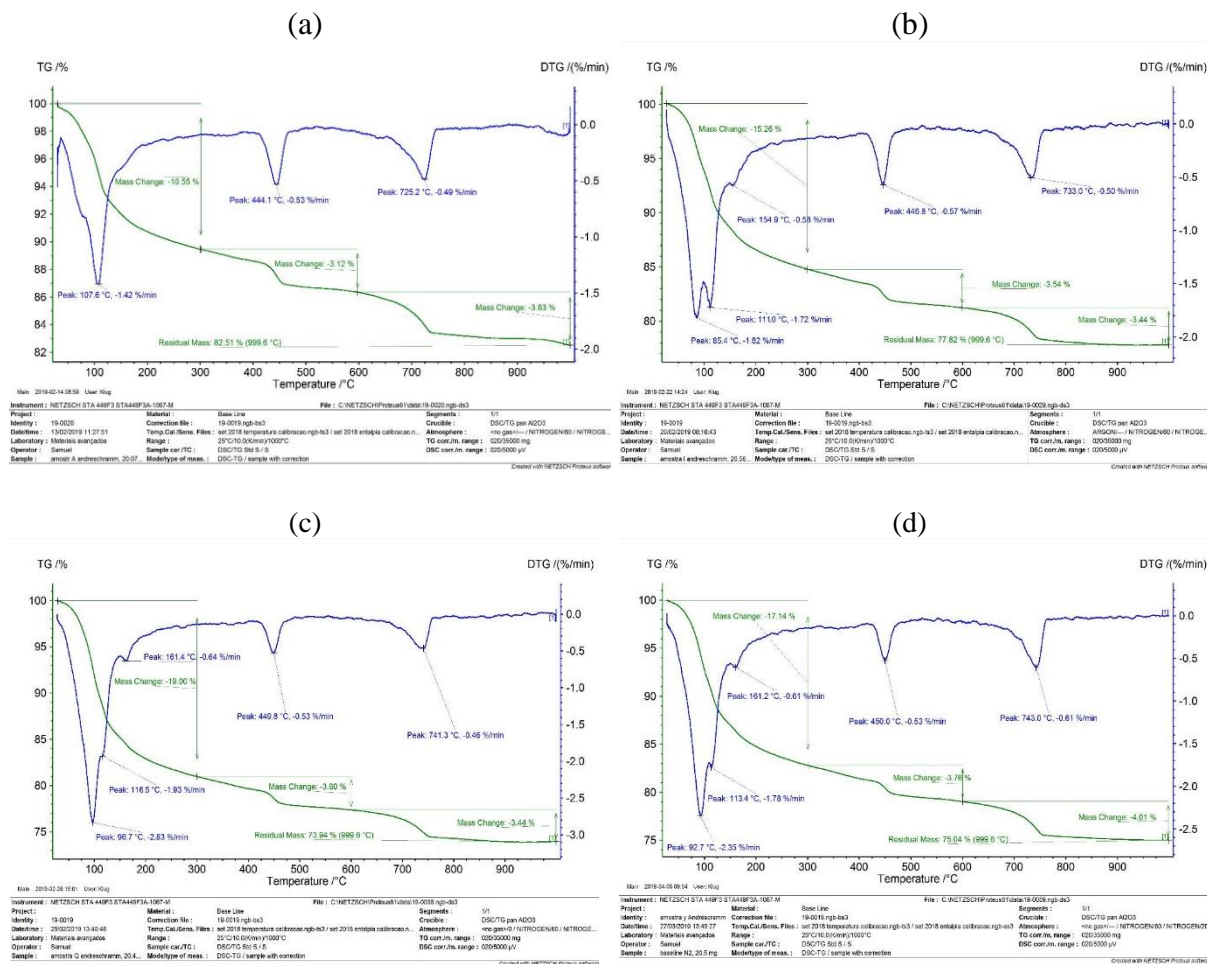
- TABREZ A Khan, Imran Ali and Ved Vati Singh (2009). Sorption of Cd(II), Pb(II), and Cr(VI) metal ions from waste water using bottom fly ash as low cost sorbent. *Journal of Environmental Protection Science* 3 124-132.
- TANG, F.J.; GARTNER, E.M. Influence of sulphate source on Portland cement hydration. *Adv. Cem. Res.* 1988, 11 67-74.
- TANIGUCHI, J. et al. Zinc biosorption by a zinc-resistant bacterium, *Brevibacterium* sp. strain HZM-1. *Applied microbiology and biotechnology*, v. 54, n. 4, p. 581-588, 2000.
- TAY, J.; YIP, W. Use of reclaimed wastewater for concrete mixing. *Journal of environmental engineering*, v. 113, n. 5, p. 1156-1161, 1987. *engineering1987.113 pp 1156-1161.*
- TAYLOR, Harry FW et al. *Cement chemistry*. London: Thomas Telford, 1997.
- TAYLOR, H. F. W.; TURNER, A. B. Reactions of tricalcium silicate paste with organic liquids. *Cement and Concrete Research*, v. 17, n. 4, p. 613-623, 1 jul. 1987.
- TENÓRIO, Jorge Alberto Soares et al. Decomposição da fase majoritária do cimento Portland-Parte II: alita com adições de Fe e Al. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 56, n. 2, p. 113-117, 2003.
- TERRO, M.; AL-GHUSAIN, I. Mechanical properties of concrete made with treated wastewater at ambient and elevated temperatures. *Kuwait Journal of Science and Engineering*, v. 30, n. 1, p. 229-244, 2003.
- TERRONI, H. C. et al. Liofilização. *Revista Científica UNILAGO*, v. 1, n. 1, p. 271-284, 2013.
- THOMAS, K.; LISK, W. E. Effect of SeaWater from Tropical areas on Settings Times of Cements, *Material et Construction*. *Bull. Rilem*, n. 4, p. 131-132, 1970.
- TIWARI, Pooja et al. Functionalized gold nanoparticles and their biomedical applications. *Nanomaterials*, v. 1, n. 1, p. 31-63, 2011.
- TRABULSI, L.R.; ALTERTHUM, F. *Microbiologia*, 4.ed. São Paulo: Atheneu, 2004.
- TSEKOVA, K. et al. Biosorption of copper (II) and cadmium (II) from aqueous solutions by free and immobilized biomass of *Aspergillus niger*. *Bioresource technology*, v. 101, n. 6, p. 1727-1731, 2010.
- TSEKOVA, Kolishka et al. Biosorption of binary mixtures of copper and cobalt by *Penicillium brevicompactum*. *Zeitschrift für Naturforschung C*, v. 62, n. 3-4, p. 261-264, 2007.
- TURI, E. A. KHANNA, Y. P.; TAYLOR, T. J. *Thermal Analysis*. In SIBILIA, J. P. (Ed.). *A guide to materials characterization and chemical analysis*. New York, United States of America: VCH, 1988.
- VENUAT, M.; ALEXANDRE, J. *De la carbonatation du béton*. França. CERILH. Publication N° 195, 1969, 30p.
- VIDIC, Jasmina et al. Selective antibacterial effects of mixed ZnMgO nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 15, n. 5, p. 1595, 2013.
- VISSMAN, W. J.; HAMMER, M. J. *Water supply and pollution control*. 4th Ed. Harper and Row, New York. 1985.
- VOULVOULIS, Nikolaos. Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, v. 2, p. 32-45, 2018.

- WEI, Shiping et al. Microbial mediated deterioration of reinforced concrete structures. *International biodeterioration & biodegradation*, v. 64, n. 8, p. 748-754, 2010.
- WHITE, G. R. 1991. *Concrete Technology*. 3rd edition. New York: Delmar Publishers.
- WOOLARD, C. D. ;Petrus,K. and M van der Horst (2000). The use of a modified fly ash as an adsorbent for lead. *Water SA* 26(4) 531-536.
- YAMAMOTO, Osamu et al. Antibacterial characteristics of CaCO<sub>3</sub>-MgO composites. *Materials Science and Engineering: B*, v. 173, n. 1-3, p. 208-212, 2010.
- YANG, J.; PAN, X.; ZHAO, C.; MOU, S.; ACHAL, V.; AL-MISNED, F. A.; MORTUZA, M. G.; GAAD, G. M. Bioimmobilization of heavy metals in acidic copper mine tailings soil. *Geomicrobiology Journal*, v. 33, n. 3-4, p. 261-266, 2016. Disponível em: . doi: 10.1080/01490451.2015.1068889
- YIN, Kun et al. Simultaneous bioremediation and biodetection of mercury ion through surface display of carboxylesterase E2 from *Pseudomonas aeruginosa* PA1. *Water research*, v. 103, p. 383-390, 2016.
- YUN, Hyosuk et al. Antibacterial activity of CNT-Ag and GO-Ag nanocomposites against gram-negative and gram-positive bacteria. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, v. 34, n. 11, p. 3261-3264, 2013.
- ZHANG, J.; SCHERER, G. W. Comparison of methods for arresting hydration of cement. *Cement and concrete Research*, v. 41, n. 10, p. 1024-1036, Outubro 2011.
- ZHAO, Lingzhou et al. Antibacterial coatings on titanium implants. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, v. 91, n. 1, p. 470-480, 2009.
- ZHU, X.; LI, W.; ZHAN, L.; HUANG, M.; ZHANG, Q.; ACHAL, V. The large-scale process of microbial carbonate precipitation for nickel remediation from an industrial soil. *Environmental Pollution*, v. 219, p. 149-155, 2016. Disponível em: . doi: 10.1016/j.envpol.2016.10.047.

## ANEXO A – GRÁFICOS DOS ENSAIOS TERMO-ANALÍTICOS

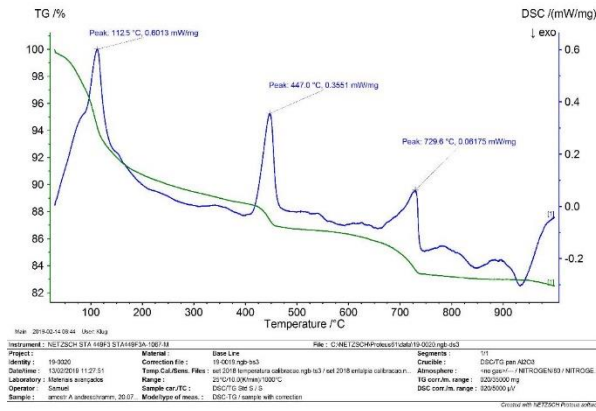
### A1 – Ref + CP III

A1.1 Termogravimetria (TG) e Análise Termica Diferencia (DTG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida

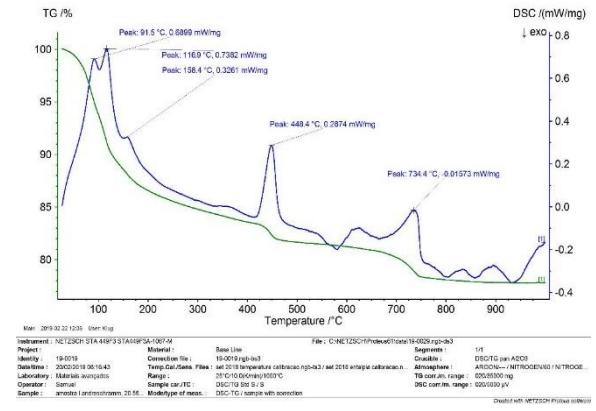


A1.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida

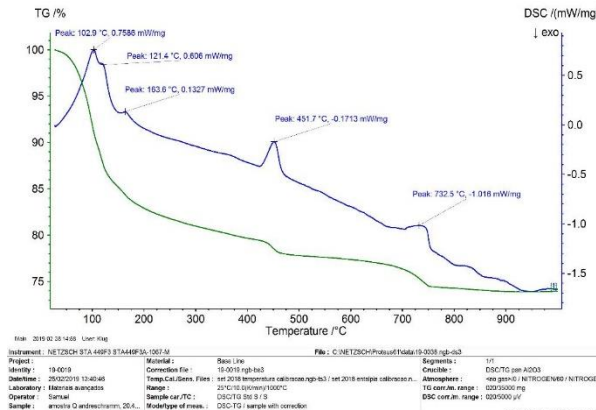
(a)



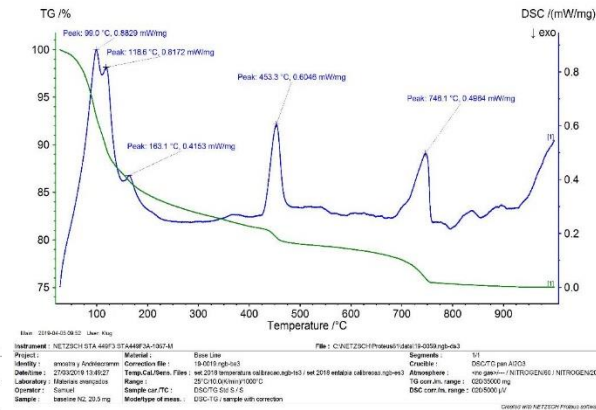
(b)



(c)



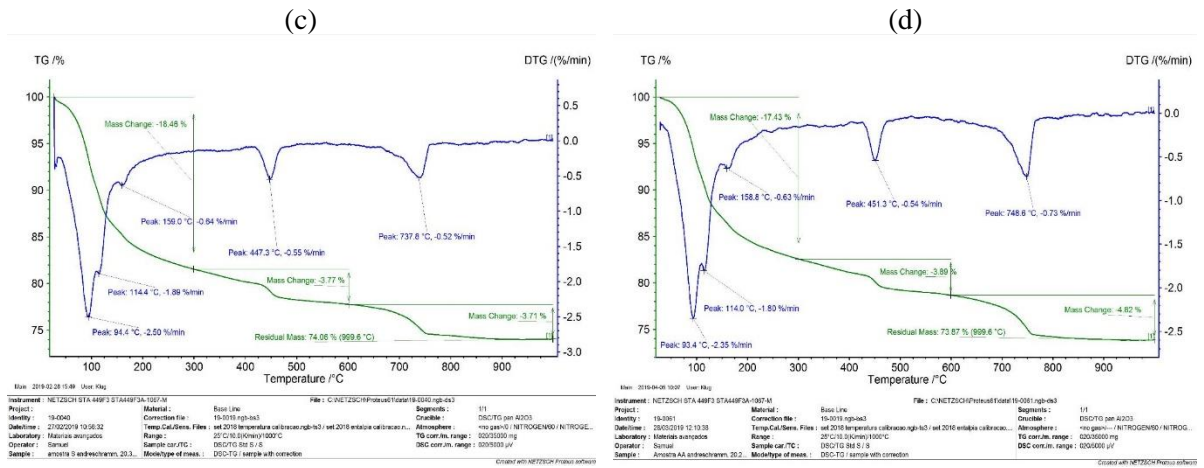
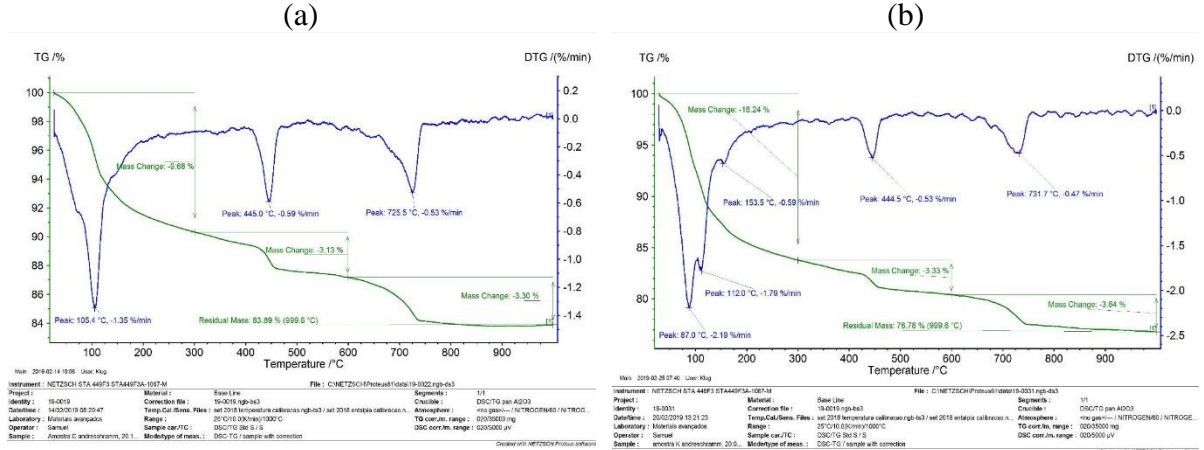
(d)



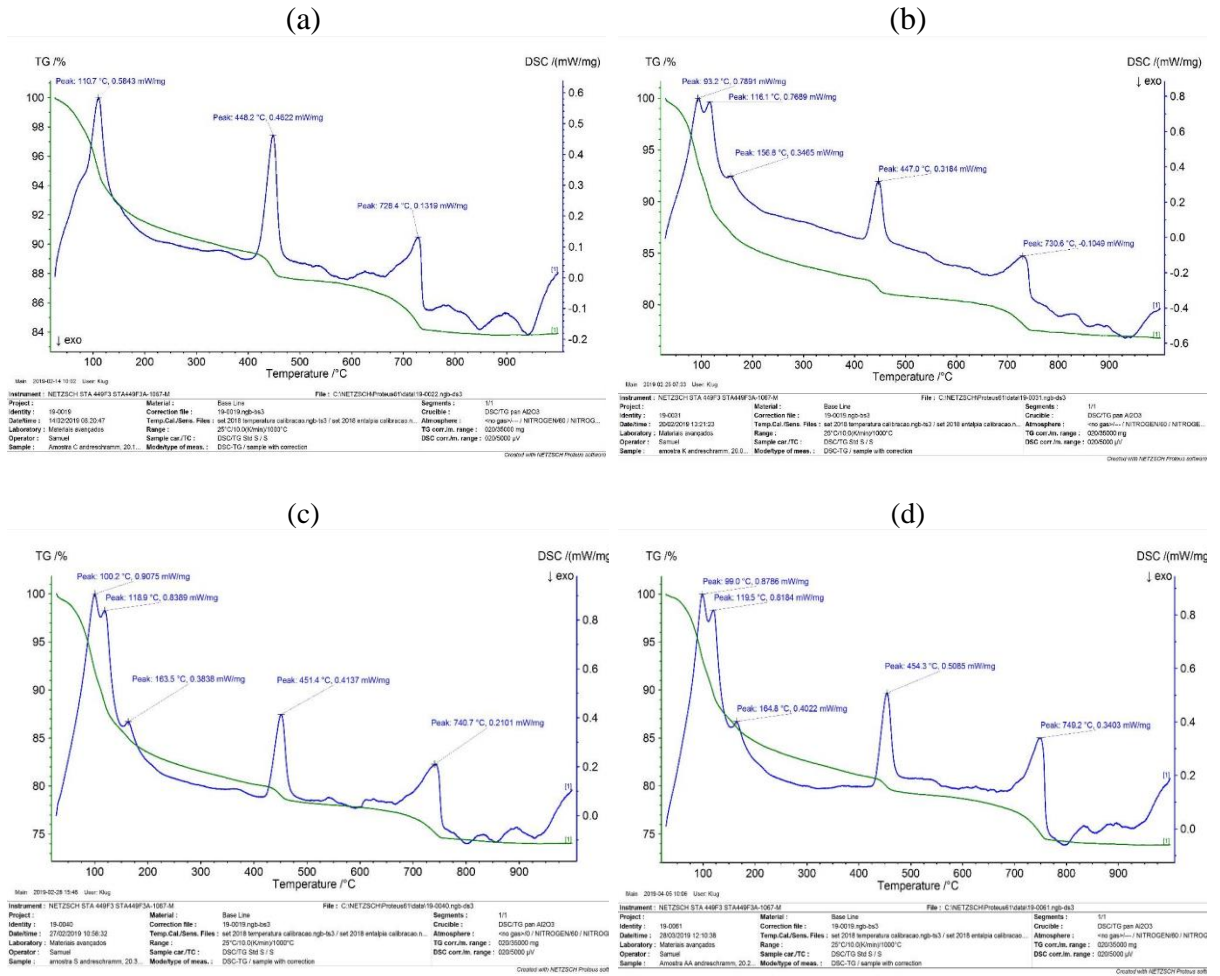


A2 – TAP + CP III

A2.1 Termogravimetria (TG) e Análise Termica Diferencia (DTG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida

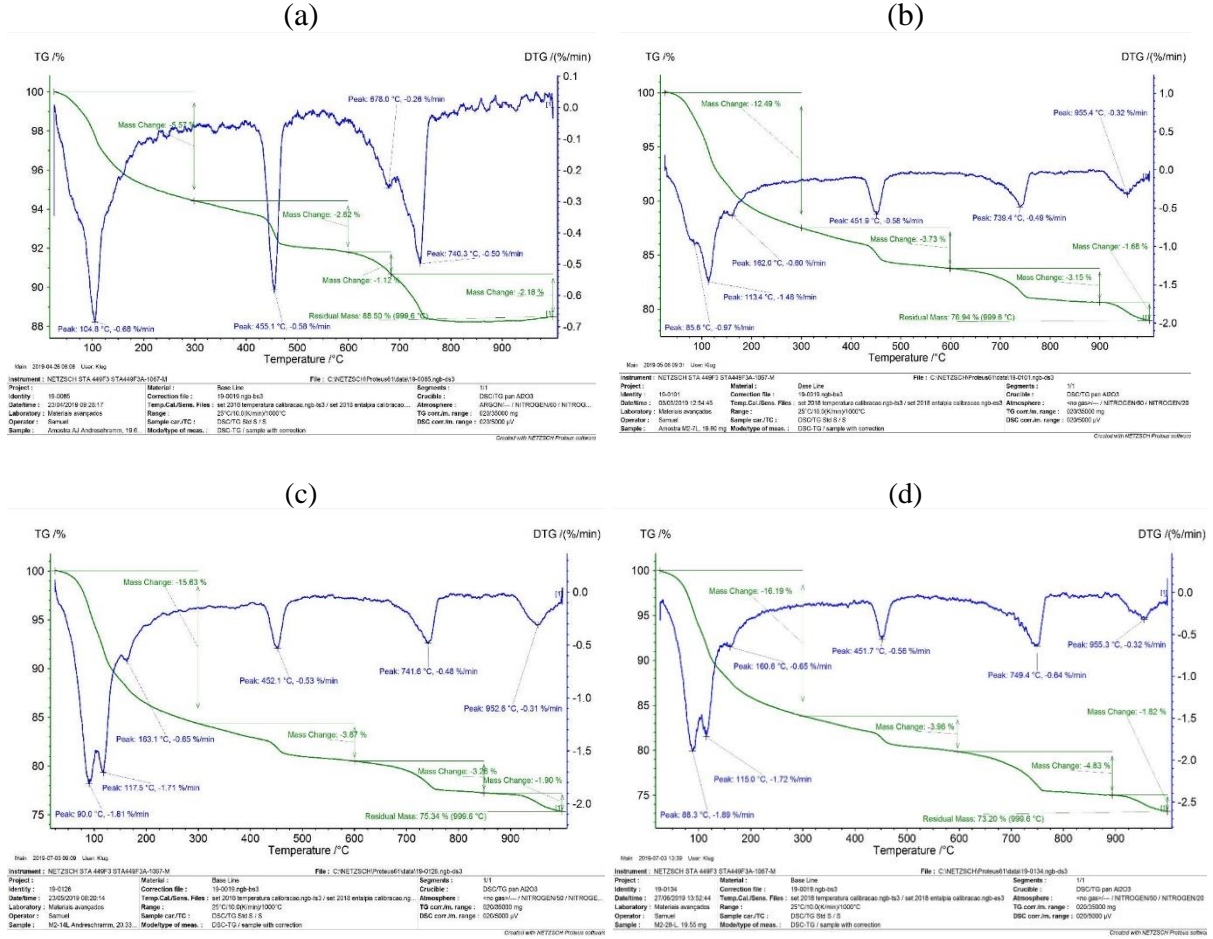


A2.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida

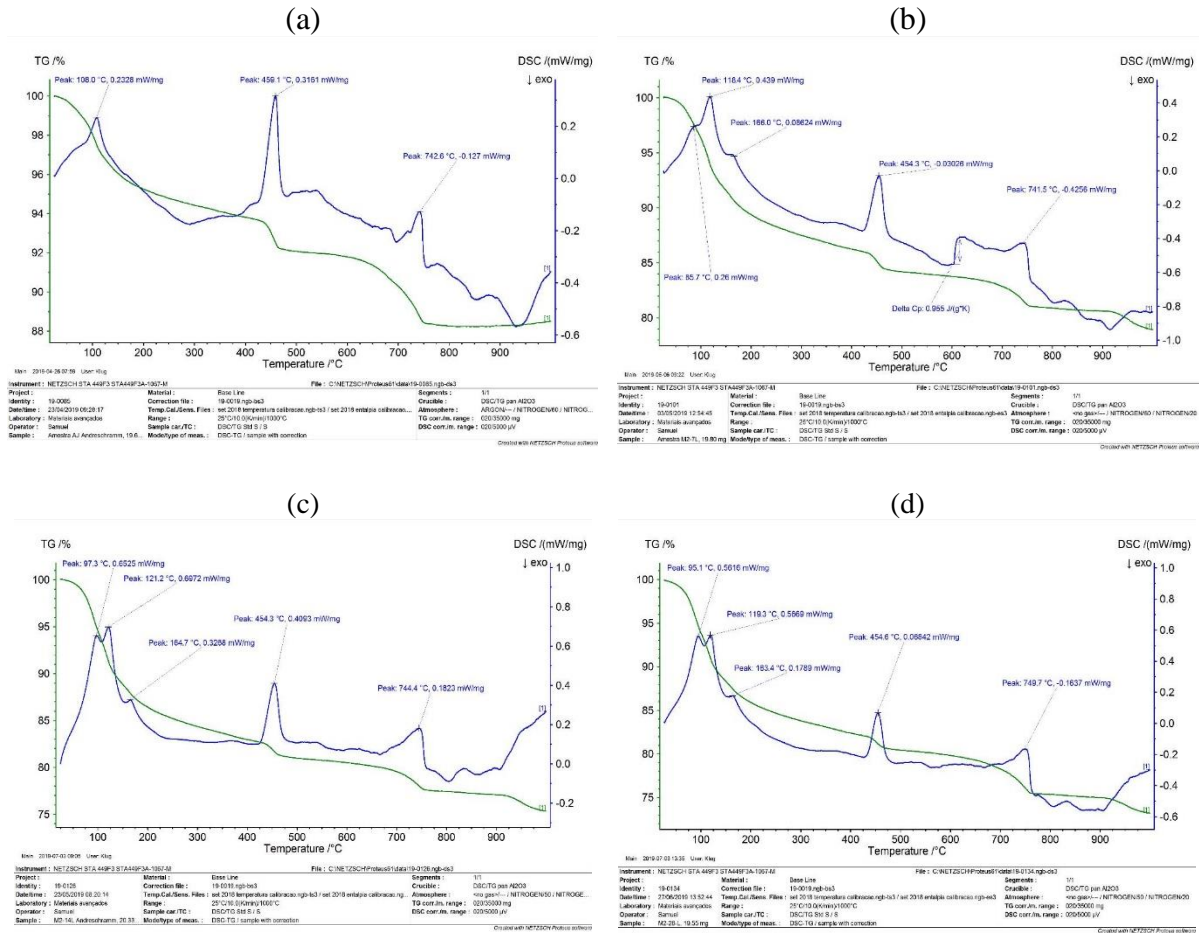


A3 – E2 + CP III

A3.1 Termogravimetria (TG) e Análise Termica Diferencia (DTG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida

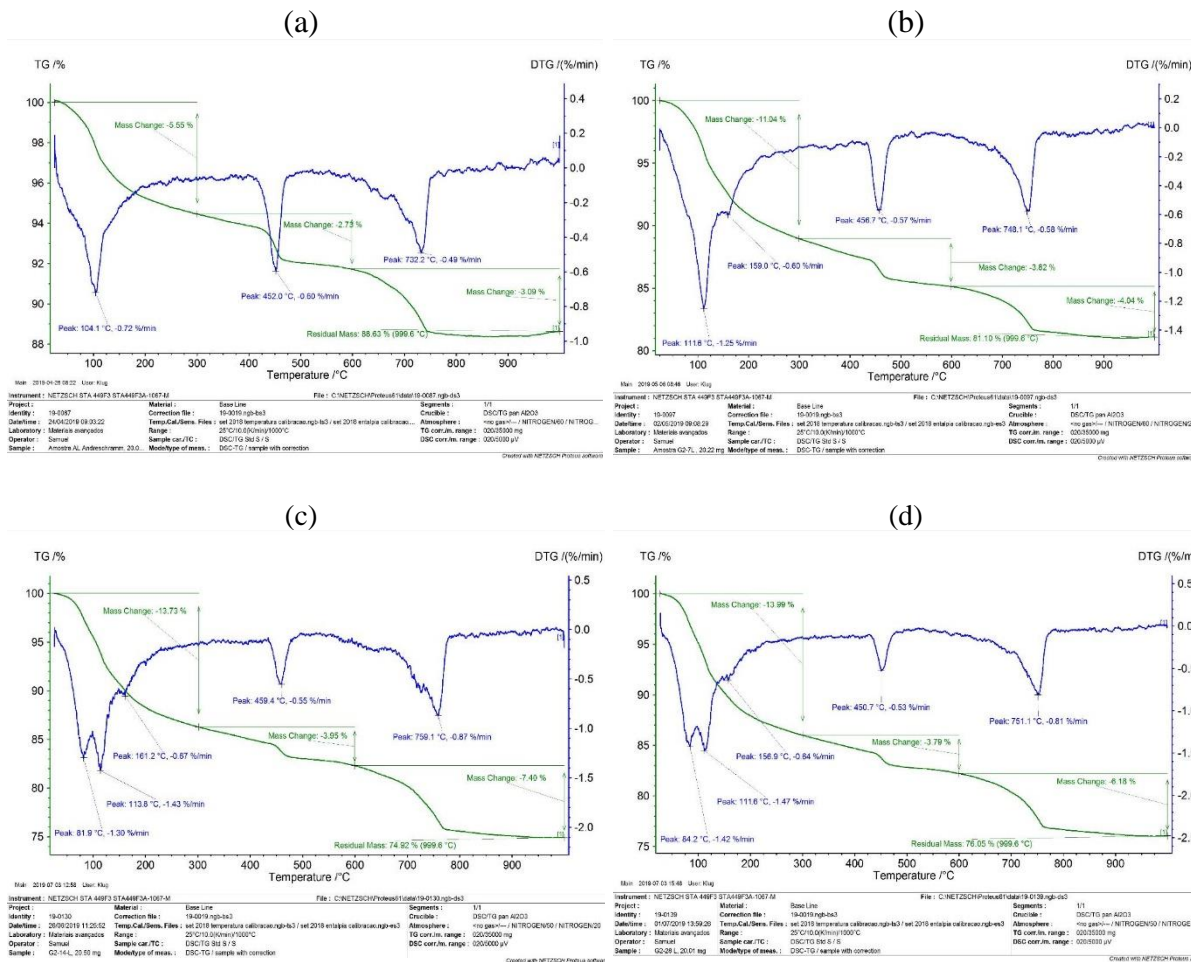


A3.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida

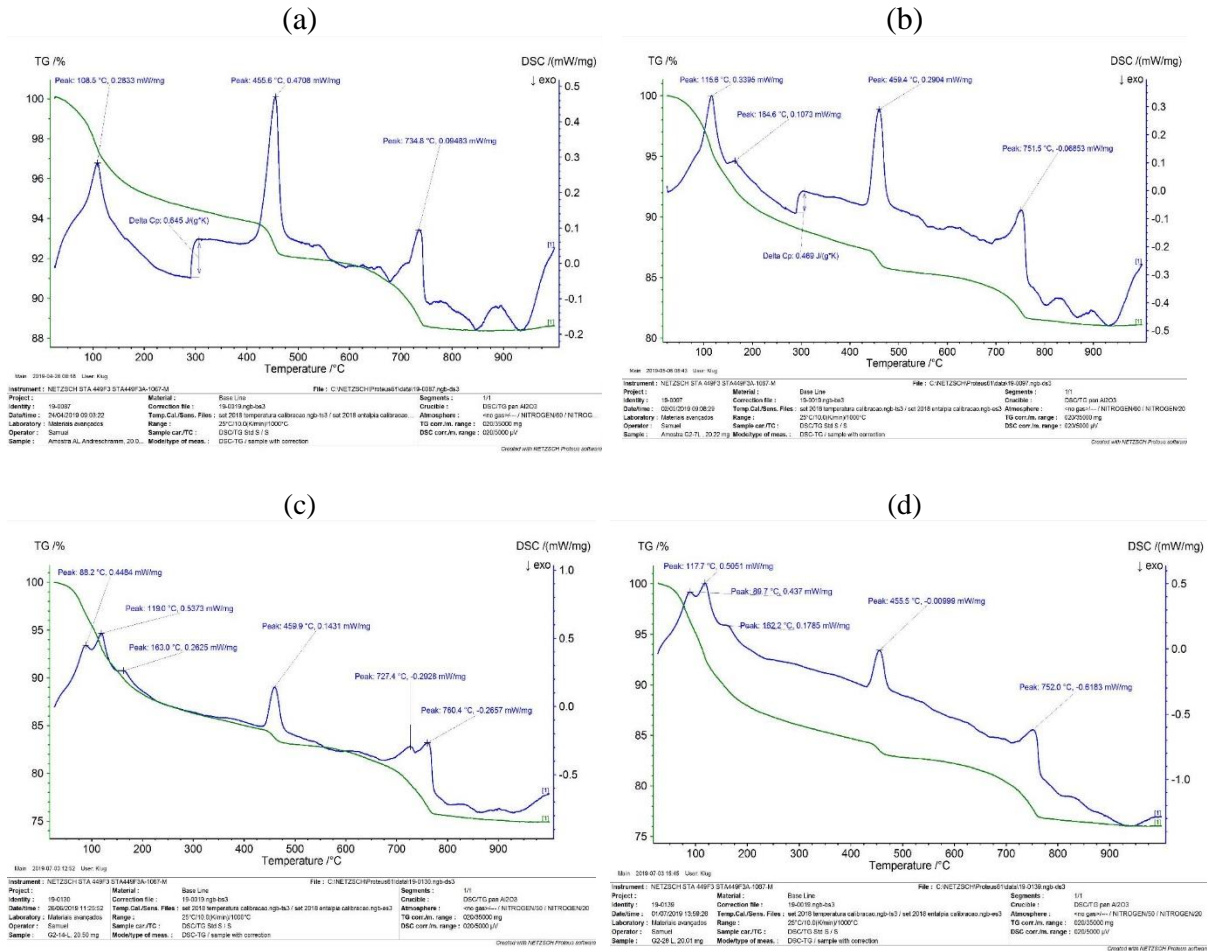


### A4 – E3 + CP III

A4.1 Termogravimetria (TG) e Análise Térmica Diferencial (DTG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida

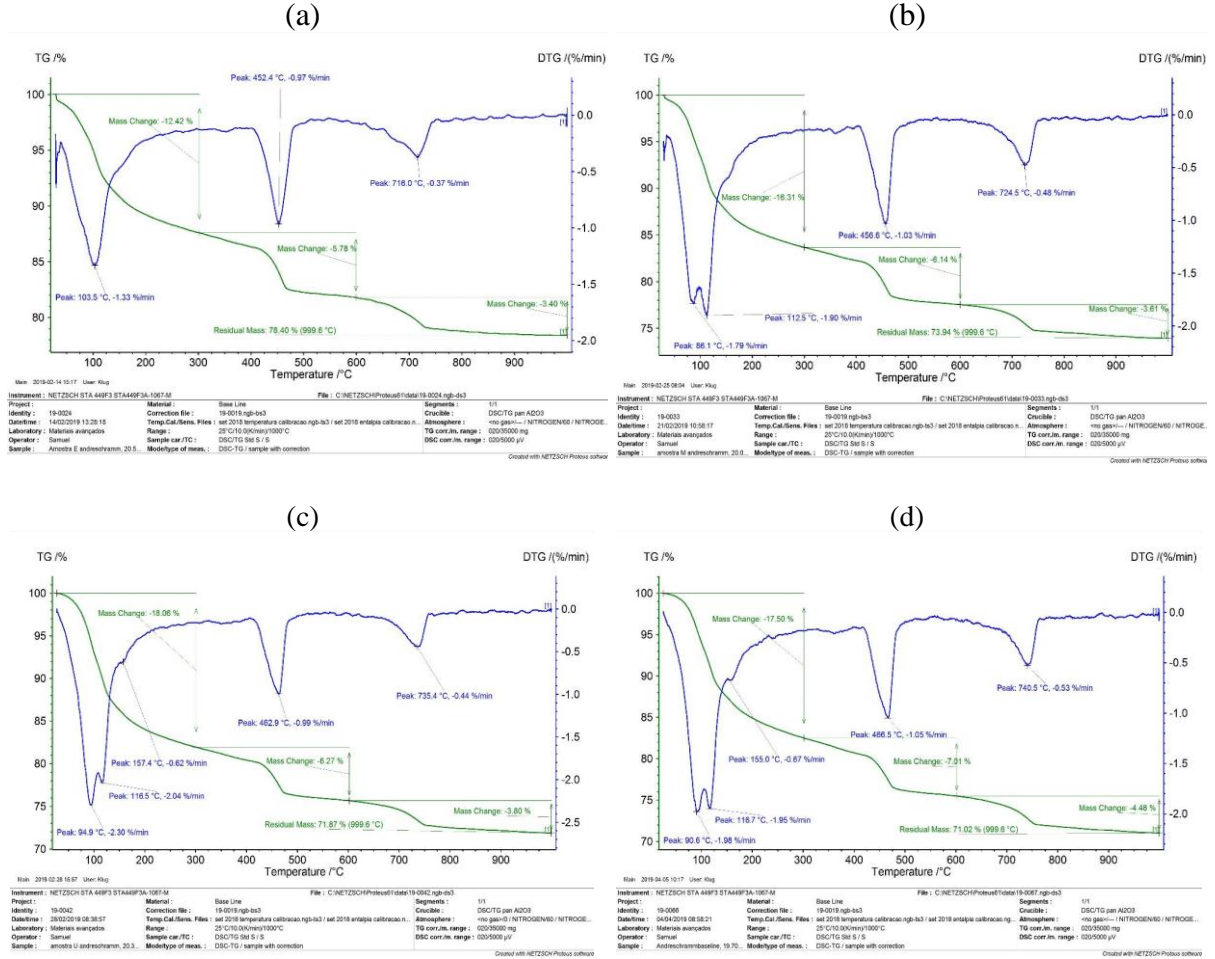


A4.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida

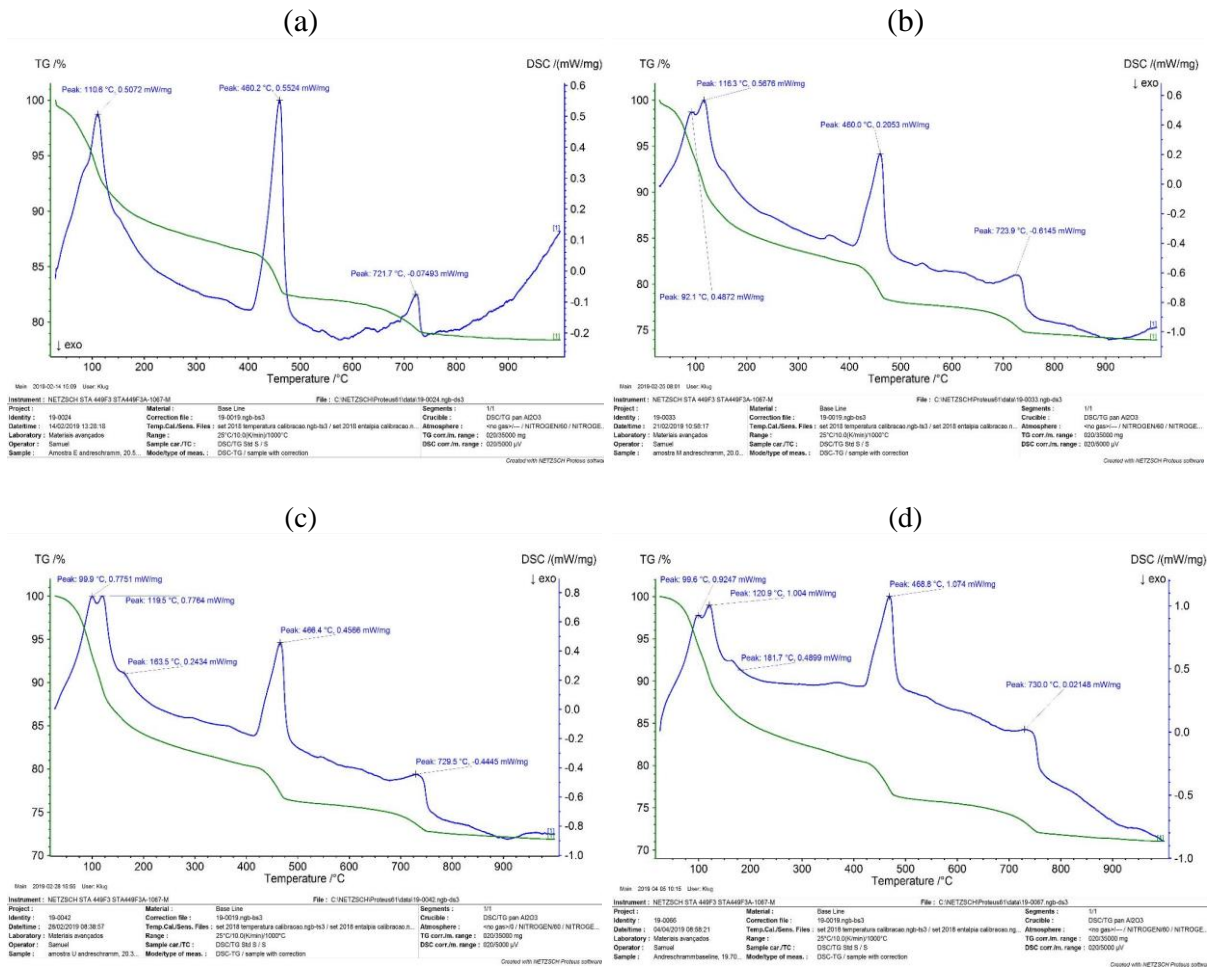


A5 – Ref + CP V

A5.1 Termogravimetria (TG) e Análise Termica Diferencia (DTG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida



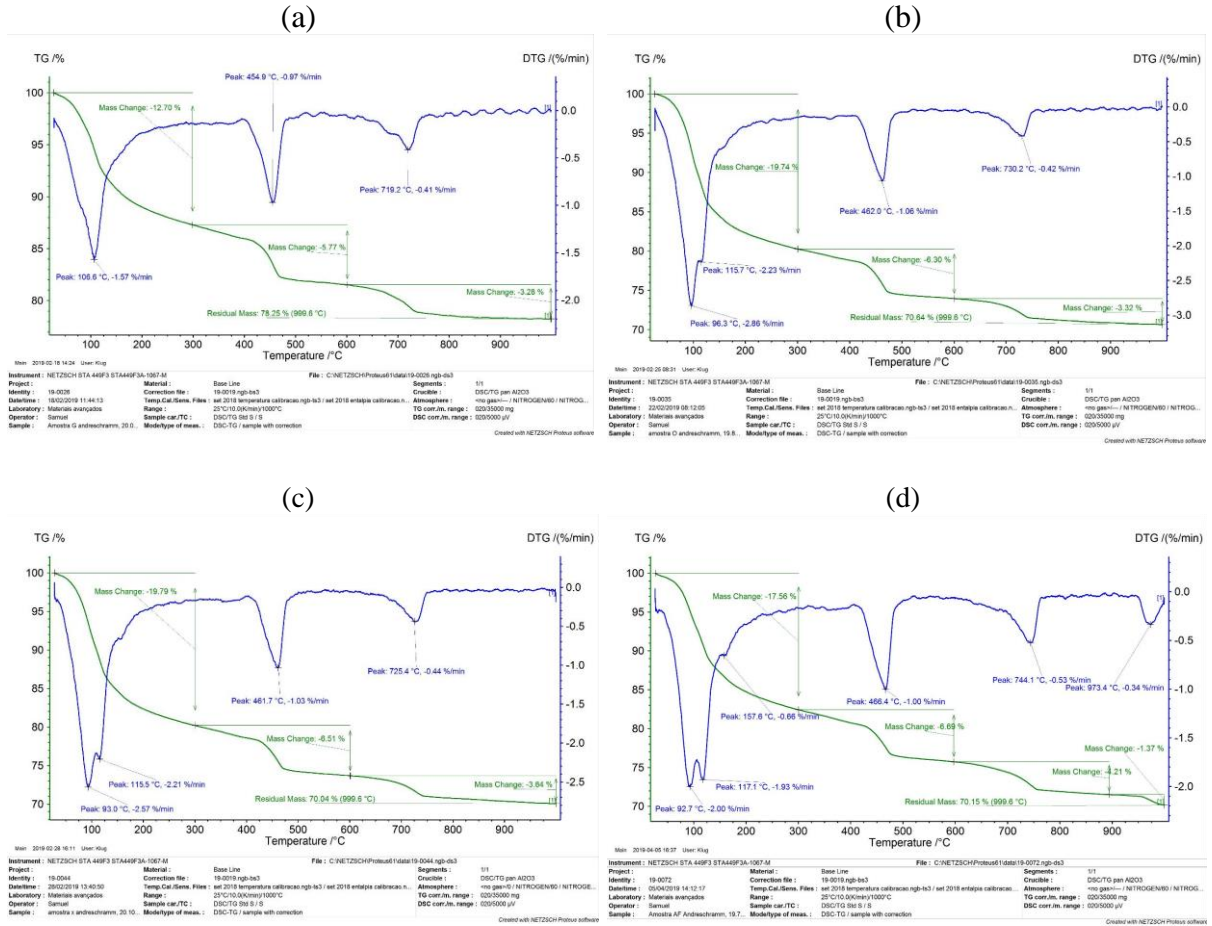
A5.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida



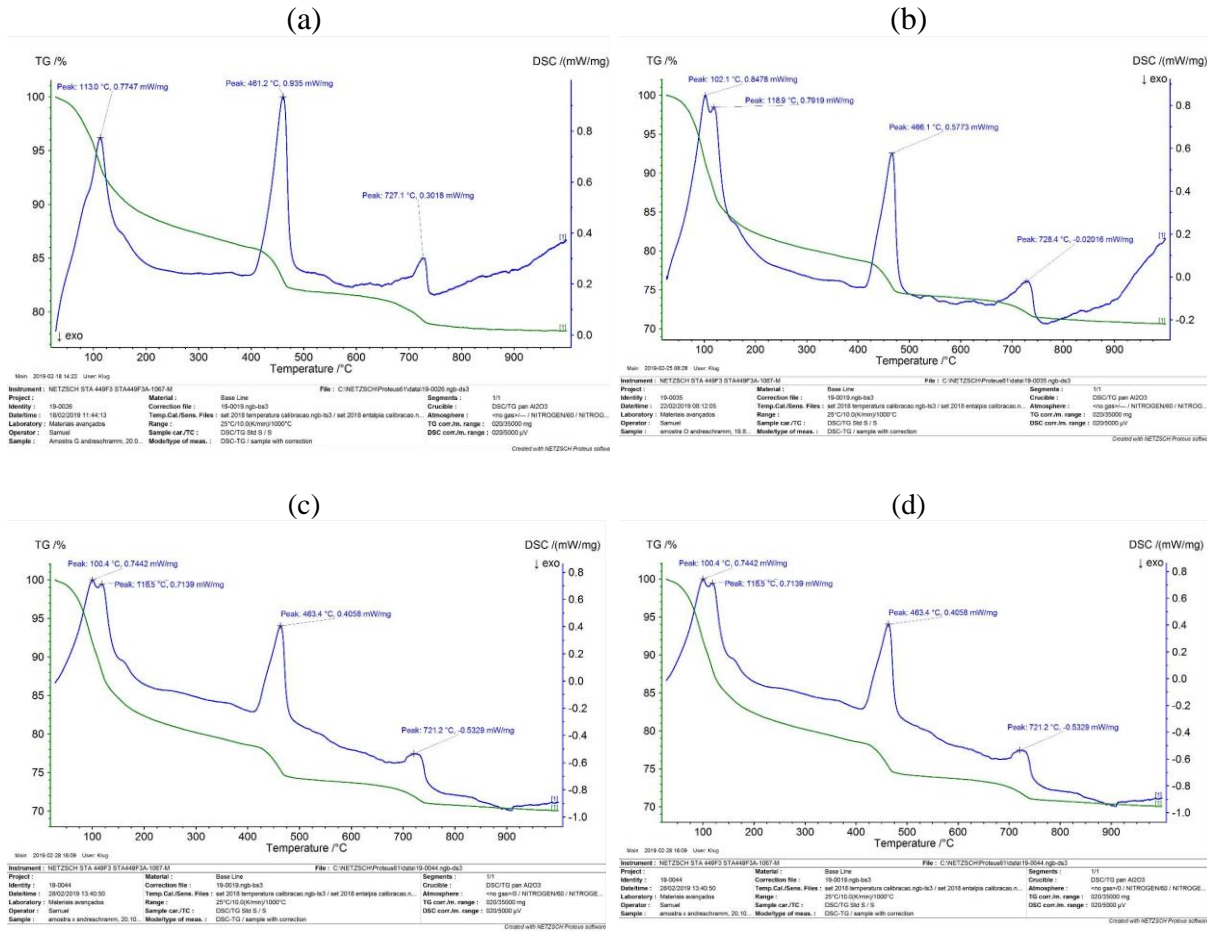


A6 – TAP + CP III

A6.1 Termogravimetria (TG) e Análise Termica Diferencia (DTG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida



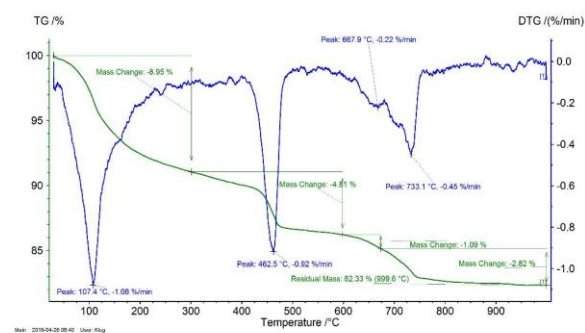
A6.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida



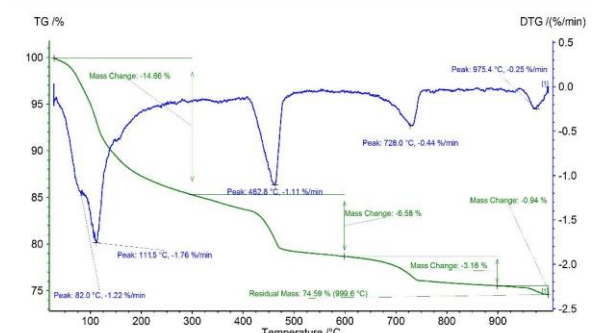
A7 – E2 + CP III

A7.1 Termogravimetria (TG) e Análise Termica Diferencia (DTG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida

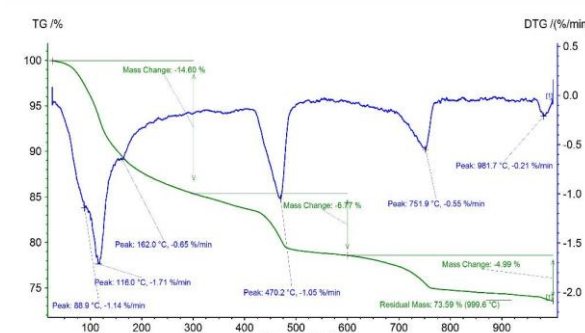
(a)



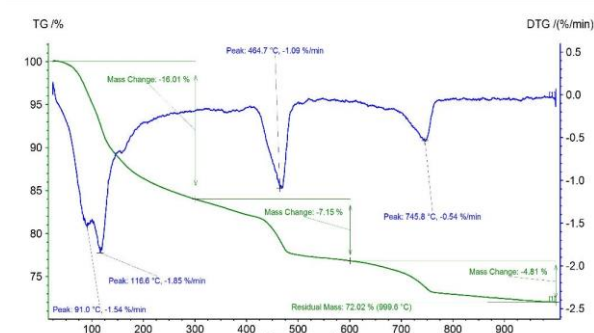
(b)



(c)



(d)

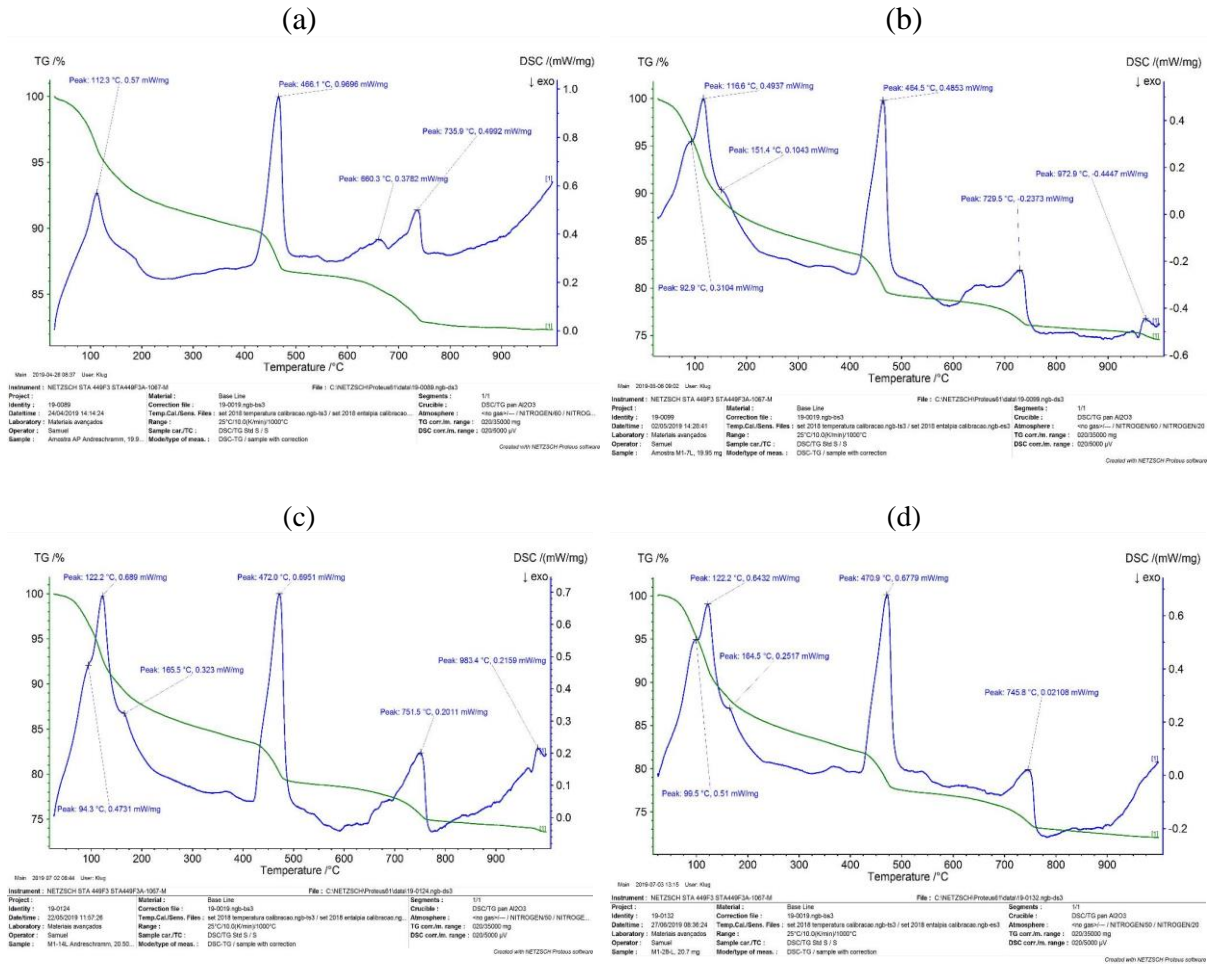


File: C:\NETZSCH\Pruebas\104919-0081.rgh-n3  
 Project: NETZSCH STA 449F3 STA449F3A-1687.M  
 Material: 19-0209  
 Base Line: 19-0219.rgh-n3  
 Segments: 1/1  
 Identity: 19-0209  
 Correction file: 19-0219.rgh-n3  
 Crucible: DSC-TG per ADO3  
 Date/Time: 24/04/2019 14:14:24  
 Temp./Cal./Sens. Files: set 2018 temperatura calibracion.rgh-n3 / set 2018 entalpia calibracion.rgh-n3  
 Atmosphere: no gas= / NITROGEN50 / NITROGE  
 Laboratory: Materiales avanzados  
 Range: 25°C/10.00cm/1000°C  
 TG con. in. range: 02035000.rg  
 Operator: Samuel  
 Sample car./TC: DSC-TG Set 9 / S  
 TG con. in. range: 02035000.rg  
 Sample: Anolis AP Androschmann, 19.9  
 Mode/type of meas.: DSC-TG / sample with correction  
 DSC con. in. range: 02035000.rg  
 Created with NETZSCH Proteus software

File: C:\NETZSCH\Pruebas\104919-0124.rgh-n3  
 Project: NETZSCH STA 449F3 STA449F3A-1687.M  
 Material: 19-0214  
 Base Line: 19-0219.rgh-n3  
 Segments: 1/1  
 Identity: 19-0214  
 Correction file: 19-0219.rgh-n3  
 Crucible: DSC-TG per ADO3  
 Date/Time: 22/05/2019 11:57:26  
 Temp./Cal./Sens. Files: set 2018 temperatura calibracion.rgh-n3 / set 2018 entalpia calibracion.rgh-n3  
 Atmosphere: no gas= / NITROGEN50 / NITROGEN20  
 Laboratory: Materiales avanzados  
 Range: 25°C/10.00cm/1000°C  
 TG con. in. range: 02035000.rg  
 Operator: Samuel  
 Sample car./TC: DSC-TG Set 9 / S  
 TG con. in. range: 02035000.rg  
 Sample: M1-14, Androschmann, 20.05  
 Mode/type of meas.: DSC-TG / sample with correction  
 DSC con. in. range: 02035000.rg  
 Created with NETZSCH Proteus software

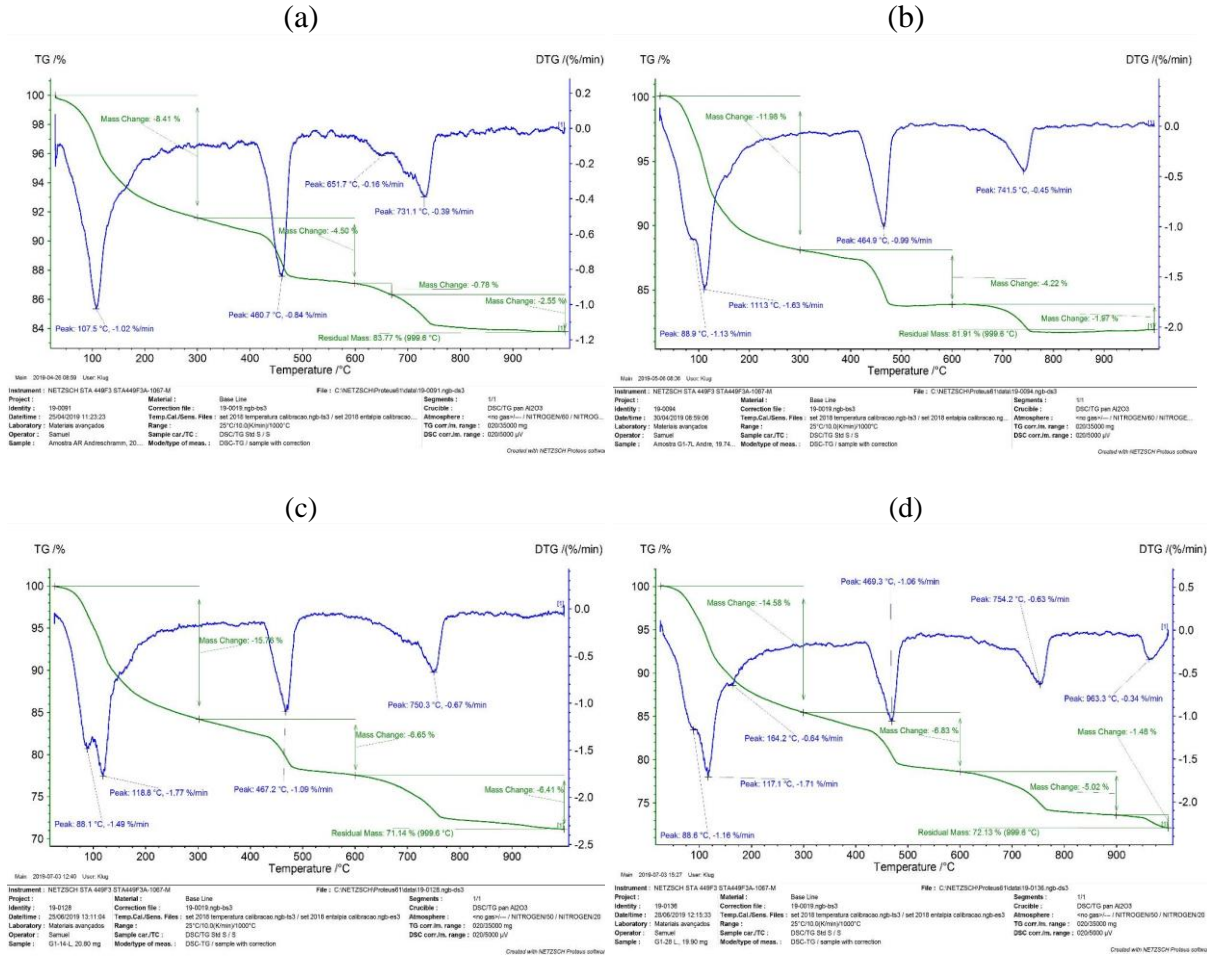
File: C:\NETZSCH\Pruebas\104919-0132.rgh-n3  
 Project: NETZSCH STA 449F3 STA449F3A-1687.M  
 Material: 19-0132  
 Base Line: 19-0219.rgh-n3  
 Segments: 1/1  
 Identity: 19-0132  
 Correction file: 19-0219.rgh-n3  
 Crucible: DSC-TG per ADO3  
 Date/Time: 27/05/2019 08:36:24  
 Temp./Cal./Sens. Files: set 2018 temperatura calibracion.rgh-n3 / set 2018 entalpia calibracion.rgh-n3  
 Atmosphere: no gas= / NITROGEN50 / NITROGEN20  
 Laboratory: Materiales avanzados  
 Range: 25°C/10.00cm/1000°C  
 TG con. in. range: 02035000.rg  
 Operator: Samuel  
 Sample car./TC: DSC-TG Set 9 / S  
 TG con. in. range: 02035000.rg  
 Sample: M1-25-1, 20.7.rg  
 Mode/type of meas.: DSC-TG / sample with correction  
 DSC con. in. range: 02035000.rg  
 Created with NETZSCH Proteus software

A7.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida

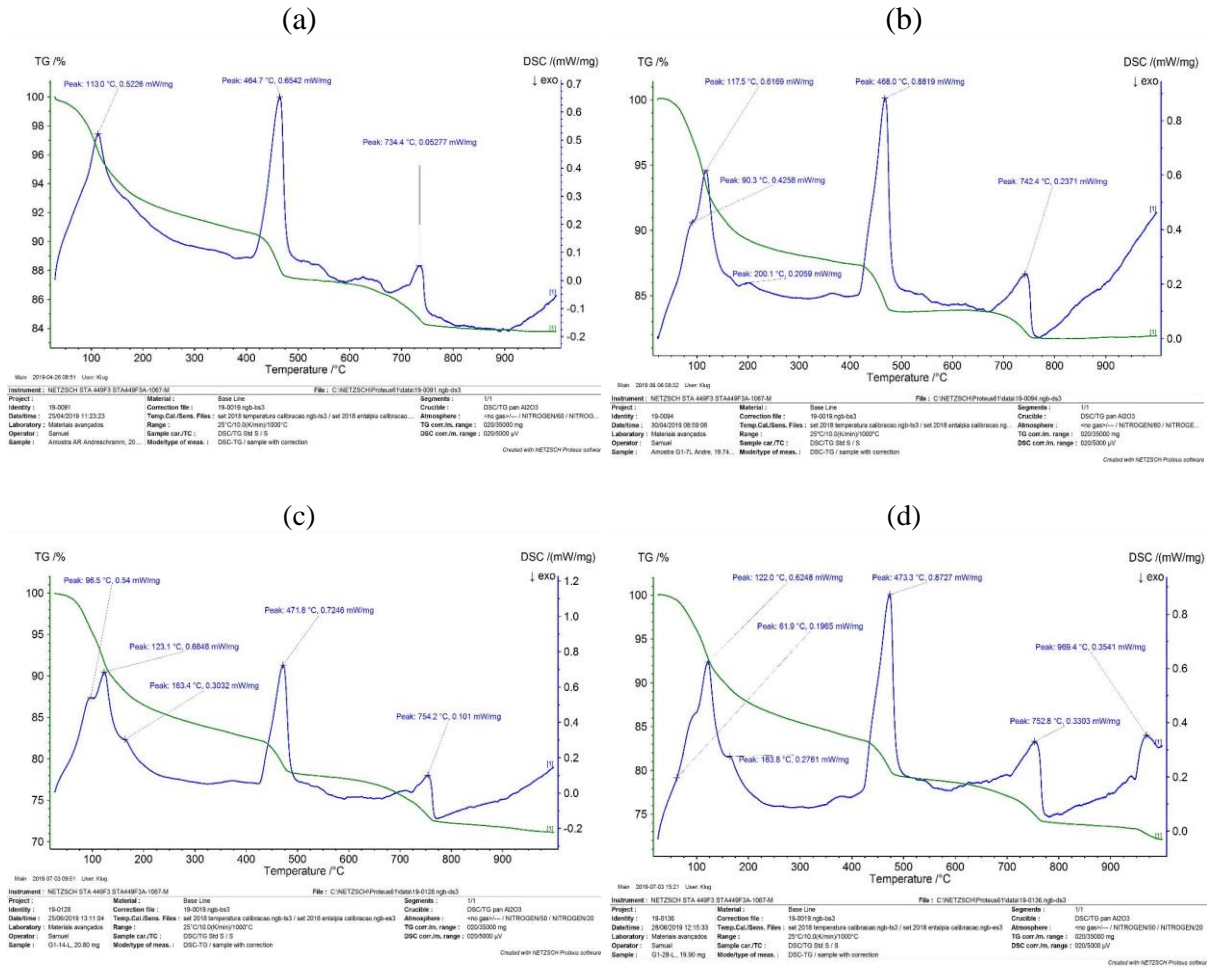


A8 – E3 + CP V

A8.1 Termogravimetria (TG) e Análise Térmica Diferencial (DTG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida



A8.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG): (a) 1 dia de cura úmida, (b) 7 dias de cura úmida. (c) 14 dias de cura úmida e (d) 28 dias de cura úmida



## ANEXO B – TABELAS DE INTERPRETAÇÃO DOS GRÁFICOS DO ANEXO A

### B1 – Ref + CP III

B1.1 – Tabela primária de interpretação dos gráficos A1

Idade	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)		Massa Residual (%)	Fator de Correção
	C-S-H + Aluminatos	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub> *	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub> #		
<b>1 dia (a)</b>	10,55	3,12	12,82	3,83	8,69	82,51	1,212
<b>7 dias (b)</b>	15,26	3,54	14,55	3,44	7,81	77,82	1,285
<b>14 dias (c)</b>	19	3,6	14,80	3,44	7,81	73,94	1,352
<b>28 dias (d)</b>	17,14	3,76	15,45	4,01	9,10	75,04	1,333

Legenda: \* calculo conforme equação 6.4; # calculo conforme equação 6.5.

Fonte: Interpretação dos gráficos A1 pelo autor, conforme Hoppe Filho (2008).

B1.2 – Tabela ajustada da interpretação da tabela B1.1

Idade	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)	
	C-S-H + Aluminatos	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
<b>1 dia</b>	12,79	3,78	15,54	4,64	10,54
<b>7 dias</b>	19,61	4,55	18,70	4,42	10,03
<b>14 dias</b>	25,70	4,87	20,01	4,65	10,56
<b>28 dias</b>	22,84	5,01	20,59	5,34	12,13

Fonte: Correção da tabela B1.1 pelo autor, conforme Hoppe Filho (2008).

### B2 – TAP+ CP III

B2.1 – Tabela primária de interpretação dos gráficos A2

Idade	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)		Massa Residual (%)	Fator de Correção
	C-S-H + Aluminatos	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub> *	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub> #		
<b>1 dia (a)</b>	9,68	3,13	12,86	3,3	7,49	83,89	1,192
<b>7 dias (b)</b>	16,24	3,33	13,69	3,64	8,26	76,78	1,302
<b>14 dias (c)</b>	18,46	3,77	15,49	3,71	8,42	74,06	1,350
<b>28 dias (d)</b>	17,43	3,89	15,99	4,82	10,94	73,87	1,354

Legenda: \* calculo conforme equação 6.4; # calculo conforme equação 6.5.

Fonte: Interpretação dos gráficos A2 pelo autor, conforme Hoppe Filho (2008).

B2.2 – Tabela ajustada da interpretação da tabela B2.1

Idade	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)	
	C-S-H + Aluminatos	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
<b>1 dia</b>	11,54	3,73	15,33	3,93	8,93
<b>7 dias</b>	21,15	4,34	17,83	4,74	10,76
<b>14 dias</b>	24,93	5,09	20,92	5,01	11,37
<b>28 dias</b>	23,60	5,27	21,64	6,52	14,81

Fonte: Correção da tabela B2.1 pelo autor, conforme Hoppe Filho (2008).

### B3 – E2+ CP III

B3.1 – Tabela primária de interpretação dos gráficos A3

Idade	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)		Massa Residual (%)	Fator de Correção
	C-S-H + Aluminatos	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub> *	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub> #		
<b>1 dia (a)</b>	5,57	2,62	10,77	3,3	7,49	88,5	1,130
<b>7 dias (b)</b>	12,49	3,73	15,33	4,83	10,96	78,94	1,267
<b>14 dias (c)</b>	15,63	3,87	15,91	5,16	11,71	75,34	1,327
<b>28 dias (d)</b>	16,19	3,96	16,28	6,65	15,10	73,2	1,366

Legenda: \* calculo conforme equação 6.4; # calculo conforme equação 6.5.

Fonte: Interpretação dos gráficos A3 pelo autor, conforme Hoppe Filho (2008).

B3.2 – Tabela ajustada da interpretação da tabela B3.1

Idade	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)	
	C-S-H + Aluminatos	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
<b>1 dia</b>	6,29	2,96	12,17	3,73	8,46
<b>7 dias</b>	15,82	4,73	19,42	6,12	13,89
<b>14 dias</b>	20,75	5,14	21,11	6,85	15,55
<b>28 dias</b>	22,12	5,41	22,23	9,08	20,62

Fonte: Correção da tabela B3.1 pelo autor, conforme Hoppe Filho (2008).

### B4 – E3 + CP III

B4.1 – Tabela primária de interpretação dos gráficos A4

Idade	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)		Massa Residual (%)	Fator de Correção
	C-S-H + Aluminatos	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub> *	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub> #		
<b>1 dia (a)</b>	5,55	2,73	11,22	3,09	7,01	88,63	1,128
<b>7 dias (b)</b>	11,04	3,82	15,70	4,04	9,17	81,1	1,233
<b>14 dias (c)</b>	13,73	3,95	16,23	7,4	16,80	74,92	1,335
<b>28 dias (d)</b>	13,99	3,79	15,58	6,18	14,03	76,05	1,315

Legenda: \* calculo conforme equação 6.4; # calculo conforme equação 6.5.

Fonte: Interpretação dos gráficos A4 pelo autor, conforme Hoppe Filho (2008).

B4.2 – Tabela ajustada da interpretação da tabela B4.1

Idade	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)	
	C-S-H + Aluminatos	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
<b>1 dia</b>	6,26	3,08	12,66	3,49	7,91
<b>7 dias</b>	13,61	4,71	19,36	4,98	11,31
<b>14 dias</b>	18,33	5,27	21,67	9,88	22,42
<b>28 dias</b>	18,40	4,98	20,48	8,13	18,45

Fonte: Correção da tabela B4.1 pelo autor, conforme Hoppe Filho (2008).



## B5 – Ref + CP V

### B5.1 – Tabela primária de interpretação dos gráficos A5

Idade	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)		Massa Residual (%)	Fator de Correção
	C-S-H + Aluminatos	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub> *	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub> #		
<b>1 dia (a)</b>	12,42	5,78	23,76	3,4	7,72	78,4	1,276
<b>7 dias (b)</b>	16,31	6,14	25,24	3,61	8,19	73,94	1,352
<b>14 dias (c)</b>	18,06	6,27	25,77	3,8	8,63	71,87	1,391
<b>28 dias (d)</b>	17,5	7,01	28,81	4,48	10,17	71,02	1,408

Legenda: \* calculo conforme equação 6.4; # calculo conforme equação 6.5.

Fonte: Interpretação dos gráficos A5 pelo autor, conforme Hoppe Filho (2008).

### B5.2 – Tabela ajustada da interpretação da tabela B1.1

Idade	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)	
	C-S-H + Aluminatos	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
<b>1 dia</b>	15,84	7,37	30,30	4,34	9,84
<b>7 dias</b>	22,06	8,30	34,13	4,88	11,08
<b>14 dias</b>	25,13	8,72	35,86	5,29	12,00
<b>28 dias</b>	24,64	9,87	40,57	6,31	14,32

Fonte: Correção da tabela B5.1 pelo autor, conforme Hoppe Filho (2008).

## B6 – TAP+ CP V

### B6.1 – Tabela primária de interpretação dos gráficos A6

Idade	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)		Massa Residual (%)	Fator de Correção
	C-S-H + Aluminatos	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub> *	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub> #		
<b>1 dia (a)</b>	12,7	5,77	23,71	3,28	7,45	78,25	1,278
<b>7 dias (b)</b>	19,74	6,3	25,89	3,32	7,54	70,64	1,416
<b>14 dias (c)</b>	19,79	6,51	26,76	3,64	8,26	70,04	1,428
<b>28 dias (d)</b>	17,56	6,69	27,50	5,58	12,67	70,15	1,426

Legenda: \* calculo conforme equação 6.4; # calculo conforme equação 6.5.

Fonte: Interpretação dos gráficos A6 pelo autor, conforme Hoppe Filho (2008).

### B6.2 – Tabela ajustada da interpretação da tabela B2.1

Idade	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)	
	C-S-H + Aluminatos	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
<b>1 dia</b>	16,23	7,37	30,31	4,19	9,52
<b>7 dias</b>	27,94	8,92	36,65	4,70	10,67
<b>14 dias</b>	28,26	9,29	38,20	5,20	11,80
<b>28 dias</b>	25,03	9,54	39,20	7,95	18,06

Fonte: Correção da tabela B6.1 pelo autor, conforme Hoppe Filho (2008).

**B7 – E2+ CP V****B7.1 – Tabela primária de interpretação dos gráficos A7**

Idade	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)		Massa Residual (%)	Fator de Correção
	C-S-H + Aluminatos	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub> *	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub> #		
<b>1 dia (a)</b>	8,95	4,81	19,77	3,91	8,88	82,33	1,215
<b>7 dias (b)</b>	14,66	6,58	27,04	4,1	9,31	74,59	1,341
<b>14 dias (c)</b>	14,6	6,77	27,82	4,99	11,33	73,59	1,359
<b>28 dias (d)</b>	16,01	7,15	29,39	4,81	10,92	72,02	1,389

Legenda: \* calculo conforme equação 6.4; # calculo conforme equação 6.5.

Fonte: Interpretação dos gráficos A7 pelo autor, conforme Hoppe Filho (2008).

**B7.2 – Tabela ajustada da interpretação da tabela B7.1**

Idade	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)	
	C-S-H + Aluminatos	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
<b>1 dia</b>	10,87	5,84	24,01	4,75	10,78
<b>7 dias</b>	19,65	8,82	36,26	5,50	12,48
<b>14 dias</b>	19,84	9,20	37,81	6,78	15,39
<b>28 dias</b>	22,23	9,93	40,80	6,68	15,16

Fonte: Correção da tabela B7.1 pelo autor, conforme Hoppe Filho (2008).

**B8 – E3 + CP V****B8.1 – Tabela primária de interpretação dos gráficos A8**

Idade	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)		Massa Residual (%)	Fator de Correção
	C-S-H + Aluminatos	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub> *	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub> #		
<b>1 dia (a)</b>	8,41	4,5	18,50	3,33	7,56	83,77	1,194
<b>7 dias (b)</b>	11,98	4,22	17,34	1,97	4,47	81,91	1,221
<b>14 dias (c)</b>	15,76	6,65	27,33	6,41	14,55	71,14	1,406
<b>28 dias (d)</b>	14,58	6,83	28,07	5,02	11,40	72,13	1,386

Legenda: \* calculo conforme equação 6.4; # calculo conforme equação 6.5.

Fonte: Interpretação dos gráficos A8 pelo autor, conforme Hoppe Filho (2008).

**B8.2 – Tabela ajustada da interpretação da tabela B8.1**

Idade	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)	
	C-S-H + Aluminatos	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
<b>1 dia</b>	10,04	5,37	22,08	3,98	9,02
<b>7 dias</b>	14,63	5,15	21,17	2,41	5,46
<b>14 dias</b>	22,15	9,35	38,42	9,01	20,45
<b>28 dias</b>	20,21	9,47	38,92	6,96	15,80

Fonte: Correção da tabela B8.1 pelo autor, conforme Hoppe Filho (2008).

**B9 – Tabela Mbio**

Anexo B9: Morfologia celular e características tintoriais de culturas bacterianas isoladas das amostras das pastas após os 45 minutos.

Cimentos	Amostras de água	Morfologia celular		
		Bastonete G+	Bastonete G-	Cocos G+
III	A	3*	0	0
	B	1	0	3
	C	1	2	3
	E	2	1	3
V	A	1	0	2
	B	1	2	0
	C	1	0	5
	E	2*	1	3
<b>Total</b>		<b>25</b>	<b>9</b>	<b>23</b>

Legenda: \* esporulando.

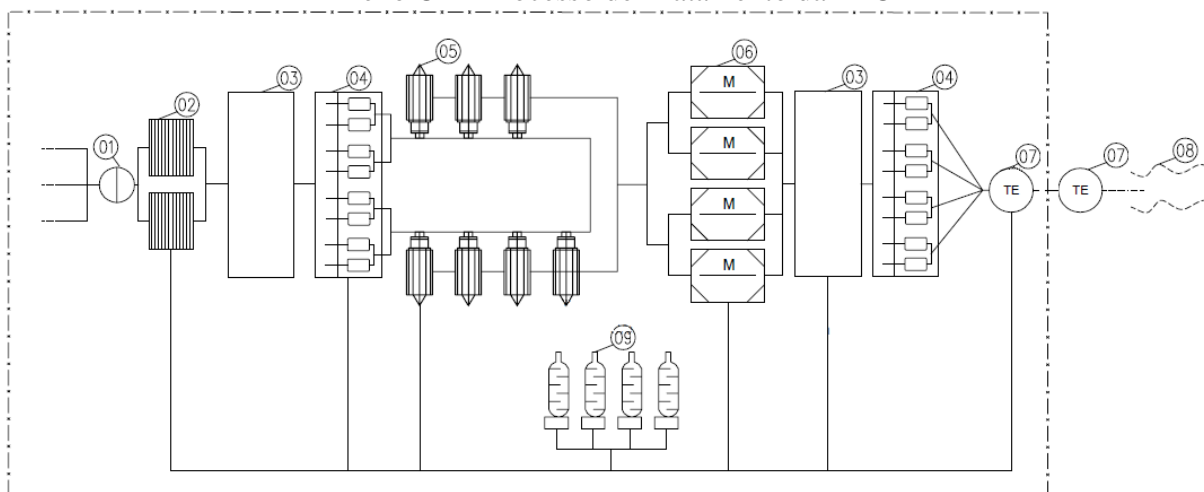
Fonte: Elaborado pelo autor.

## ANEXO C – ILUSTRAÇÕES

### Capítulo 7 - Item 7.1

#### Águas Utilizadas

##### Anexo C1 – Processo de Tratamento da EPC



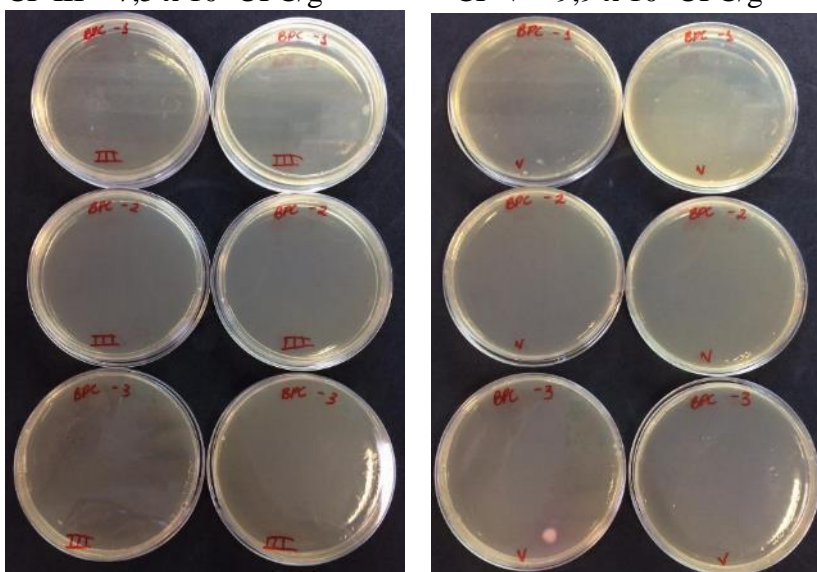
Legendas:

- 01: Canal de chegada;
- 02: Gradeamento de 5 cm;
- 03: Poço profundo;
- 04: Poço com 4 bombas de sucção;
- 05: Pereiras 1,5 mm;
- 06: Desarenador;
- 07: Torre de equilíbrio;
- 08: Corpo receptor oceânico;
- 09: Torre de lavagem de gases.

##### Anexo C2 – Resultados das placas das bactérias precipitadora de carbonato

CP III –  $7,5 \times 10^1$  UFC/g

CP V –  $9,9 \times 10^2$  UFC/g



Fonte: Adaptado pelo autor dos ensaios no LAMAP.

## **ANEXO D – MÉTODO ESTATÍSTICO**

### Avaliação dos resultados (Teste ANOVA)

Com objetivo de avaliar os dados experimentais realizados, utilizamos a metodologia de Projeto de Experimentos, visto ser apoiada fortemente em conceitos estatísticos, segundo (RIBEIRO e CATEN, 2010).

Assim, a análise de variância (ANOVA) é a metodologia estatística que avalia a significância dos diversos fatores e interações, onde tem-se uma variável resposta (resistência à compressão, índice de vazios, massa específica real e absorção) e um fator controlável a vários níveis, sendo este último a nível fixo (água de amassamento utilizada).

A metodologia conhecida como “Projeto de Experimentos” foi introduzida por Fischer em 1935 e inicialmente aplicada a experimentos de agricultura. Posteriormente, essa metodologia difundiu-se rapidamente em campos como Agronomia, Biologia, Engenharia Química, Engenharia Industrial e Engenharia da Qualidade. Atualmente, Projeto de Experimentos tem sido aplicado virtualmente em todas as áreas de conhecimentos.

Trata-se de uma metodologia apoiada fortemente em conceitos estatísticos, destinada a otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento. O uso de Projeto de Experimentos permite que se estruture a sequência de ensaios de forma a traduzir os objetivos preestabelecidos pelo pesquisador. A eficiência de experimentos projetos é superior em termos de informação a qualquer outra sequência não estruturada de ensaios.

Na verdade, devido às decisões importantes que derivam dos resultados experimentais, e ao custo dos experimentos, não é recomendável buscar a solução de um determinado problema confiando apenas na intuição.

A metodologia de Projeto de Experimentos é utilizada na Otimização de um sistema. Entende-se por sistema, qualquer produto, processo ou serviço. Um sistema é avaliado por indicadores de desempenho, ou seja, características de qualidade resultantes da operação do mesmo. Por exemplo, as características de qualidade avaliadas em um sistema podem ser produtividade, custos, características dimensionais, entre outras.

Em um sistema, existem parâmetros do sistema (do produto, do processo ou do serviço) que podem ser alterados durante sua execução. Por exemplo, em um produto pode-se alterar o tipo de material e suas características dimensionais, em um processo pode-se alterar a temperatura e a pressão e em um serviço pode-se alterar o número de funcionários e o layout. A alteração desses parâmetros pode afetar as características de qualidade resultantes do sistema.

Existem ainda os fatores de ruído, ou seja, fatores que podem influenciar o desempenho do sistema, no entanto não se consegue controlá-los. Os fatores de ruído são, por exemplo, a temperatura e umidade do dia, o desgaste das ferramentas e a habilidade e cansaço do operador.

Um dos objetivos principais do método é tornar o desempenho do sistema, neste trabalho são as propriedades físicas e mecânicas do concreto avaliadas, sensível ao efeito de um fator, sendo a água de amassamento.

Hermeneuticamente, as características de qualidade são aquelas que o cliente percebe como importante, sendo neste trabalho os requisitos desejados. A variável de resposta são aspectos

do produto que podem ser medidos e que permitem quantificar as características de qualidade, sendo neste trabalho as propriedades físicas e mecânicas.

Para análise, temos que atender as seguintes etapas: fazer a análise de variância, escrever uma tabela de médias, fazer gráficos dos efeitos dos fatores principais e fazer gráficos das interações significativas.

O método de comparação de vários grupos (*one-way analysis of variance*) são experimentos que envolvem 1 variável de resposta e 1 fator controlável a vários níveis, com objetivo de identificar se os valores da variável de resposta medido nos diversos níveis diferem entre si, isto é, neste trabalho, se a água de amassamento interfere nas propriedades avaliadas.

A análise de variância (ANOVA) é uma metodologia estatística para avaliar a significância dos diversos fatores e interações, onde existem suposições básicas para validar a análise de variância, sendo: a distribuição normal dos dados, homogeneidade das variâncias, aditividade dos efeitos e independência estatística dos valores observados. Caso as suposições de normalidade e homogeneidade não forem satisfeitas, o resultado da análise de variância deixa de ser exato, e passa a ser aproximado. Em raras situações a suposição de aditividade dos efeitos não é satisfeita, onde uma transformação dos dados (*log*,  $\sqrt{\quad}$ , dentre outros) pode recuperar a aditividade e permitir uma análise mais precisa. A independência estatística dos valores observados é obtida com o uso da aleatorização.

#### Hipóteses

- H0: Não há diferenças significativas entre os grupos;
- H1: Há diferença significativa entre os grupo provocada pelo fator controlável investigado (a água de amassamento).

#### Formulação matemática do problema:

Modelo Estatístico:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_j + \varepsilon_{ij}$$

Onde:

$\mu$  é a média geral;

$\tau_j$  é o efeito do grupo j;

$\varepsilon_{ij}$  é um erro aleatório.

Decomposição dos resíduos:

$$(Y_{ij} - \bar{Y}_{...}) = (\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{...}) + (Y_{ij} - \bar{Y}_{.j})$$

Elevando ao quadrado e somando:

$$\sum (Y_{ij} - \bar{Y}_{...})^2 = \sum n (\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{...})^2 + \sum (Y_{ij} - \bar{Y}_{.j})^2$$

$$SQT = SQG + SQR$$

Graus de Liberdade:

$$(n - 1) = (K - 1) + (N - K)$$

Médias quadradas:

$$MQG = \frac{SQG}{(K - 1)}$$

$$MQR = \frac{SQR}{(N - K)}$$

Se não há diferenças significativas entre os grupos:

$$E[MQG] = E[MQR]$$

O teste F compara as duas variâncias:

$$F_{calc} = \frac{\text{Variância entre os grupos}}{\text{Variância dentro do grupo}} = \frac{MQG}{MQR}$$

Comparar F calculado com F tabelado, ver tabela D1), se o valor calculado for maior que o valor tabela (ou vapor-p<0,05), destaca-se H0, ou seja, existe diferenças significativas entre os grupos provocada pelo fator controlável em estudo.

O limite de decisão é estabelecido usando os valores tabelados da distribuições F, ou seja:

$$F_{\alpha, K-1, N-K}$$

Onde:

$\alpha$ : nível de significancia (usualmente 0,05)

k -1: graus de liberdade do numerador (MQG);

N - K: graus de liberdade do denominador (MQR)

Sendo  $\alpha$  o nível de significancia (geralmente  $\alpha = 5\%$ ), que é um valor aceitável de se cometer o erro do tipo I (rejeitar H0 sendo que a hipótese é verdadeira). O intervalo de confianã na decisão é  $(1 - \alpha)$

Equações do o termo de correção:

$$TC = \frac{T^2}{N}$$

$$SQT = \sum (Y_{ij}^2) - TC$$

$$SQG = \sum \left( \frac{T_j^2}{n_j} \right) - TC$$

$$SQR = SQT = SQG$$

Expressão de resultados na tabela ANOVA:

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F
Entre Grupos	SQG	K - 1	MQG	F = MQG/MQR
Dentro Grupos	SQR	N - K	MQR	
Total	SQT	N - 1		

Tabela D1 – Distribuição F ( $\alpha = 5\%$  a direita)

df <sub>2</sub>	df <sub>1</sub>	Numerador - graus de liberdade								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Denominador - graus de liberdade	1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54
	2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385
	3	10.128	9.5521	9.2766	9.1172	9.0135	8.9406	8.8867	8.8452	8.8123
	4	7.7086	9.9443	6.5914	6.3882	6.2561	6.1631	6.0942	6.0410	6.9988
	5	6.6079	5.7861	5.4095	5.1922	5.0503	4.9503	4.8759	4.8183	4.7725
	6	5.9874	5.1433	4.7571	4.5337	4.3874	4.2839	4.2067	4.1468	4.0990
	7	5.5914	4.7374	4.3468	4.1203	3.9715	3.8660	3.7870	3.7257	3.6767
	8	5.3177	4.4590	4.0662	3.8379	3.6875	3.5806	3.5005	3.4381	3.3881
	9	5.1174	4.2565	3.8625	3.6331	3.4817	3.3738	3.2927	3.2296	3.1789
	10	4.9646	4.1028	3.7083	3.4780	3.3258	3.2172	3.1355	3.0717	3.0204
	11	4.8443	3.9823	3.5874	3.3567	3.2039	3.0946	3.0123	2.9480	2.8962
	12	4.7472	3.8853	3.4903	3.2592	3.1059	2.9961	2.9134	2.8486	2.7964
	13	4.6672	3.8056	3.4105	3.1791	3.0254	2.9153	2.8321	2.7669	2.7144
	14	4.6001	3.7389	3.3439	3.1122	2.9582	2.8477	2.7642	2.6987	2.6458
	15	4.5431	3.6823	3.2874	3.0556	2.9013	2.7905	2.7066	2.6408	2.5876
	16	4.4940	3.6337	3.2389	3.0069	2.8524	2.7413	2.6572	2.5911	2.5377
	17	4.4513	3.5915	3.1968	2.9647	2.8100	2.6987	2.6143	2.5480	2.4943
	18	4.4139	3.5546	3.1599	2.9277	2.7729	2.6613	2.5767	2.5102	2.4563
	19	4.3807	3.5219	3.1274	2.8951	2.7401	2.6283	2.5435	2.4768	2.4227
	20	4.3512	3.4928	3.0984	2.8661	2.7109	2.5990	2.5140	2.4471	2.3928
	21	4.3248	3.4668	3.0725	2.8401	2.6848	2.5727	2.4876	2.4205	2.3660
	22	4.3009	3.4434	3.0491	2.8167	2.6613	2.5491	2.4638	2.3965	2.3419
	23	4.2793	3.4221	3.0280	2.7955	2.6400	2.5277	2.4422	2.3748	2.3201
	24	4.2597	3.4028	3.0088	2.7763	2.6207	2.5082	2.4226	2.3551	2.3002
	25	4.2417	3.3852	2.9912	2.7587	2.6030	2.4904	2.4047	2.3371	2.2821
	26	4.2252	3.3690	2.9752	2.7426	2.5868	2.4741	2.3883	2.3205	2.2655
	27	4.2100	3.3541	2.9604	2.7278	2.5719	2.4591	2.3732	2.3053	2.2501
	28	4.1960	3.3404	2.9467	2.7141	2.5581	2.4453	2.3593	2.2913	2.2360
	29	4.1830	3.3277	2.9340	2.7014	2.5454	2.4324	2.3463	2.2783	2.2229
	30	4.1709	3.3158	2.9223	2.6896	2.5336	2.4205	2.3343	2.2662	2.2107
40	4.0847	3.2317	2.8387	2.6060	2.4495	2.3359	2.2490	2.1802	2.1240	
60	4.0012	3.1504	2.7581	2.5252	2.3683	2.2541	2.1665	2.0970	2.0401	
120	3.9201	3.0718	2.6802	2.4472	2.2899	2.1750	2.0868	2.0164	1.9588	
∞	3.8415	2.9957	2.6049	2.3719	2.2141	2.0986	2.0096	1.9384	1.8799	

Fonte: Adaptado pelo autor de Ribeiro e Caten (2010)



## ANEXO E – OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

