



INFLUÊNCIA DE ÁGUAS DE REUSO NA HIDRATAÇÃO,  
TRABALHABILIDADE E COMPORTAMENTO MECÂNICO  
DE MATRIZES CIMENTÍCIAS

Julio Cezar D'Hyppolito Filho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Oscar Aurelio Mendoza Reales

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2019

INFLUÊNCIA DE ÁGUAS DE REUSO NA HIDRATAÇÃO,  
TRABALHABILIDADE E COMPORTAMENTO MECÂNICO  
DE MATRIZES CIMENTÍCIAS

Julio Cezar D'Hyppolito Filho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho  
Oscar Aurelio Mendoza Reales

Aprovada por: Prof. Romildo Dias Toledo Filho  
Prof. Oscar Aurelio Mendoza Reales  
Prof<sup>a</sup>. Camila Aparecida Abelha Rocha  
Prof. Thiago Melo Grabois  
Prof. João Alfredo Medeiros

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
DEZEMBRO DE 2019

D'Hyppolito Filho, Julio Cezar

Influência de Águas de Reuso na Hidratação, Trabalhabilidade e Comportamento Mecânico de Matrizes Cimentícias/ Julio Cezar D'Hyppolito Filho. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XIII, 111 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho e

Oscar Aurelio Mendoza Reales

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 104-111.

1. Água de Reuso no Concreto. 2. Sustentabilidade na Construção Civil. 3. Cinética de Hidratação. I. Toledo Filho, Romildo Dias *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

## *Agradecimentos*

Em primeiro lugar agradeço a Deus por todas as bênçãos em minha vida ao longo destes quase 4 anos de mestrado;

Ao amor da minha vida, Lays, por ser meu porto seguro em todos os momentos de tribulações, que não foram poucos. Só Deus sabe quantas vezes pensei em desistir... Você me deu forças quando achei que não tinha, e dedico a você esta conquista;

Aos meus pais, a quem eu devo tudo o que sou e conquistei em minha vida. Seu amor incondicional e seu incentivo aos estudos são a base deste trabalho;

À minha irmã Iza, por ser minha inspiração na vida acadêmica;

Ao professor Oscar, por tornar essa pesquisa possível. Obrigado por topar essa árdua empreitada comigo. Seu apoio irrestrito foi fundamental para este trabalho. Mais que um orientador, sinto que ganhei um amigo;

Ao professor Romildo, por me oportunizar desenvolver esta pesquisa. Sua visão de vanguarda na ciência delineou a presente pesquisa;

À equipe do CESA/Poli/UFRJ, em especial Eder, Maria Cristina, Cida, Darlise e Prof. Isaac Volschan, pela obtenção das águas de reuso, caracterização das mesmas e apoio ilimitado ao longo da pesquisa;

À equipe LAM/IQ/UFRJ, em especial Ulysses e Prof. João Alfredo, por disponibilizarem o laboratório para realização da caracterização complementar das águas de reuso;

Aos amigos do NUMATS/COPPE/UFRJ, em especial Adailton, Kleber, Flavinho, Márcio, Bruna, Raquel, Helder, Marcelo's, Mauro, Yasmim, Ítalo, Juber, Antônio Carlos, Luzidelle, Ioná, Mostafa, Anilé e Rayane, por todo apoio e cooperação na logística dos ensaios aplicados a concretos e pastas de cimento;

Aos amigos Ygor, Anderson, Diego, Luiz, Vitor, Rodrigo, Thiago, Totolo, Paula, Priscila, Karine, Victor, Clara, Helena, Fulche, Galak e minha sogra, Lucimar, por sempre estarem dispostos a oferecer um pouco de atenção e bons conselhos nos momentos de dificuldade;

À amiga Elisa, que vivenciou percorreu lado a lado comigo todo esse longo e árduo caminho. Obrigado por todo apoio e incentivo;

Ao ETU/UFRJ, por apoiar e incentivar o desenvolvimento desta pesquisa;

À Banca, por seu entusiasmo e disponibilidade em participar desta defesa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

INFLUÊNCIA DE ÁGUAS DE REUSO NA HIDRATAÇÃO,  
TRABALHABILIDADE E COMPORTAMENTO MECÂNICO  
DE MATRIZES CIMENTÍCIAS

Julio Cezar D’Hyppolito Filho

Dezembro/2019

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho  
Oscar Aurelio Mendoza Reales

Programa: Engenharia Civil

O atual cenário de crise hídrica e o fato da água ser um insumo essencial no concreto sugerem a necessidade de se estudar alternativas sustentáveis para substituir a água potável no concreto, reduzindo sua pegada hídrica. Neste contexto, águas de reuso se colocam como uma boa alternativa, visto que estações de tratamento de esgotos retornam para o meio-ambiente efluentes tratados com um elevado grau de depuração. O presente estudo apresenta os efeitos advindos do emprego de dois tipos diferentes de águas de reuso provenientes de tratamento de esgotos, com níveis de tratamento distintos, como água de amassamento e água de cura no concreto. A pesquisa focou nos impactos associados à cinética de hidratação, à trabalhabilidade e ao comportamento mecânico no concreto, além da caracterização das águas de reuso. Nos resultados, pode-se observar que as águas de reuso apresentaram um comportamento bastante similar ao da água potável, indicando a viabilidade de substituição nas atividades relacionadas à produção de concreto, bem como na cura do mesmo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

INFLUENCE OF REUSE WATER ON HYDRATION, WORKABILITY AND  
MECHANICAL BEHAVIOR OF CEMENT BASED MATERIALS

Julio Cezar D'Hyppolito Filho

December/2019

Advisors: Romildo Dias Toledo Filho  
Oscar Aurelio Mendoza Reales

Department: Civil Engineering

The current scenario of water crisis and the fact that water is an essential input in concrete suggests the need to study sustainable alternatives to replace drinking water in concrete in order to reduce its water footprint. In this context, wastewater reuse is presented as a good alternative, since sewage treatment plants return effluents with a high degree of purification. This study presents the advanced effects of using two different types of reused wastewater from sewage treatment, with different treatment levels, as mixing water and curing water in concrete. The research focused on the effects associated with hydration kinetics, workability and mechanical behavior in concrete, as well as the characterization of reuse wastewaters. In the results, it can be observed that the reuse wastewaters presented a behavior very similar to the drinking water, indicating the viability of substitution in the activities related to the concrete production, as well as its cure.

# Sumário

1. Introdução .....	1
1.1. Problema de Pesquisa .....	1
1.2. Objetivos da pesquisa .....	2
2. Revisão Bibliográfica .....	3
2.1. A Água no Mundo .....	3
2.2. Panorama dos Recursos Hídricos no Brasil .....	5
2.3. Reuso de Águas .....	7
2.4. Tratamentos de Esgoto .....	10
2.4.1. Tratamento Preliminar .....	12
2.4.2. Tratamento Primário .....	12
2.4.3. Tratamento Secundário .....	13
2.4.4. Tratamento Terciário .....	13
2.5. Ciclo de Vida da Água no Concreto .....	14
2.6. Análise do Cenário Nacional .....	17
2.7. Água de reuso aplicada ao concreto .....	23
2.8. Conclusões da revisão da literatura .....	33
2.8.1. Aspectos técnicos .....	33
2.8.2. Aspectos normativos .....	34
2.8.3. Análise do cenário brasileiro .....	35
3. Programa Experimental .....	36
3.1. Materiais .....	38
3.1.1. Cimento Portland .....	38
3.1.2. Agregados .....	39
3.1.3. Aditivos .....	39
3.1.4. Água Potável .....	40
3.1.5. Águas de Reuso .....	40
3.2. Metodologia empregada na Caracterização dos Materiais .....	42
3.2.1. Areia e Brita .....	42
3.2.1.1. Granulometria .....	42
3.2.1.2. Massa Específica e Absorção Total .....	43
3.2.1.3. Teor de Umidade .....	43

3.2.2.	Águas de reuso .....	44
3.3.	Dosagem e Produção das Matrizes Cimentícias.....	45
3.3.1.	Definição da mescla entre as águas PRIM e SEC .....	46
3.3.2.	Dosagem do concreto.....	46
3.4.	Caracterização mecânica dos concretos.....	49
3.4.1.	Determinação do comportamento mecânico sob compressão uniaxial ....	49
3.4.2.	Ensaio de Pulso Ultrassônico .....	51
3.5.	Estudo da cinética de hidratação de pastas .....	52
3.6.	Estudo da microestrutura de pastas e concretos .....	54
3.6.1.	Interrupção da Hidratação .....	54
3.6.2.	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	55
3.6.3.	Análise termogravimétrica .....	56
3.6.4.	Difratometria de Raio-X (DRX).....	59
4.	Apresentação e Análise dos Resultados .....	60
4.1.	Caracterização dos Agregados .....	60
4.1.1.	Propriedades Físicas .....	60
4.1.2.	Composição Granulométrica.....	60
4.2.	Caracterização das Águas de Reuso .....	61
4.3.	Mescla entre Águas de Reuso .....	63
4.4.	Dosagem do Concreto.....	64
4.5.	Caracterização Mecânica das Matrizes Cimentícias.....	67
4.6.	Ensaio de Pulso Ultrassônico .....	78
4.7.	Estudo da Cinética de Hidratação.....	80
4.8.	Caracterização da Microestrutura das Matrizes .....	83
4.8.1.	Análise termogravimétrica .....	83
4.8.2.	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	90
4.8.3.	Difratometria de Raio-X .....	97
5.	Conclusões.....	100
6.	Sugestões para trabalhos futuros.....	103
7.	Referências Bibliográficas.....	104



# Lista de Figuras

Figura 1 - Ciclo hidrológico (TELLES & COSTA, 2010) .....	4
Figura 2 - Retirada de água per capita, para atividades rurais, industriais e urbanas (FAO, 2010) .....	4
Figura 3 - Volume de água doce renovável, per capita (WORLD BANK, 2014) ..	5
Figura 4 - Evolução da retirada de água no Brasil (ANA, 2017).....	7
Figura 5 - O papel da água em quatro fases do ciclo de vida do concreto adaptado de MACK-VERGARA & JOHN (2017) .....	17
Figura 6 - Evolução anual da tarifa de água por região do país (adaptado de CFA-GESAE, 2017).....	22
Figura 7: Gráficos de permeabilidade no tempo para diferentes idades utilizando matriz com água potável (NORUZMAN, et al., 2012).....	29
Figura 8 - Gráficos de permeabilidade no tempo para diferentes idades utilizando matriz com efluente doméstico tratado (NORUZMAN, et al., 2012). .....	29
Figura 9 - Microscopia eletrônica de varredura - à esquerda: concreto com água potável; à direita: concreto com água de reuso (ASADOLLAHFARDI, et al., 2016)...	30
Figura 10: Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa contemplando todas as etapas que serão descritas nesse capítulo. ....	37
Figura 11 – Fluxograma da planta de tratamento de efluentes sanitários estudada, indicando os pontos de retiradas das águas de reuso PRIM e SEC.....	40
Figura 12 - Sistema de decantação primária do CESA UFRJ.....	41
Figura 13 - Sistema de lodos ativados do CESA UFRJ.....	42
Figura 14 - Equipamento analisador de umidade localizado no NUMATS/COPPE .....	44
Figura 15 - Setup de ensaio de compressão - prensa Shimadzu UH-F 1000 kN ..	49
Figura 16 - Determinação do patamar de percolação .....	51
Figura 17 - Estágios de hidratação de uma pasta de cimento (VIEIRA, 2018) ....	53
Figura 18 - Curva típica de análise térmica por termogravimetria simples e derivativa em pastas de cimento (SOUZA JR., 2016).....	57
Figura 19 - Matriz dosada pelo método ACI no estado fresco com baixa trabalhabilidade e alta porosidade .....	65

Figura 20 - Abatimento de tronco de cone da nova dosagem utilizando água REF	66
Figura 21 - Abatimento de tronco de cone da nova dosagem utilizando (A) água SEC e (B) água MIX	67
Figura 22 – Curvas tensão-deformação aos 7 dias para as matrizes estudadas	68
Figura 23 - Curvas tensão-deformação aos 14 dias para as matrizes estudadas	68
Figura 24 - Curvas tensão-deformação aos 28 dias para as matrizes estudadas	69
Figura 25 - Representação gráfica dos resultados de resistência à compressão das três matrizes estudadas de acordo com as curas em água potável e reuso nas idades de 7, 14 e 28 dias. O desvio padrão associado a cada resultado está indicado na forma de barra de erro	71
Figura 26 - Representação gráfica dos resultados de módulo de elasticidade das três matrizes estudadas de acordo com as curas em água potável e reuso nas idades de 7, 14 e 28 dias. O desvio padrão associado a cada resultado está indicado na forma de barra de erro	73
Figura 27 - Corpos de provas ensaiados com idade de 7 dias evidenciando o modo de ruptura, separadas de acordo com o tipo de amostra sendo (A) REF P, (B) SEC P, (C) MIX P, (D) REF R, (E) SEC R e (F) MIX R	75
Figura 28 - Corpos de provas ensaiados com idade de 14 dias evidenciando o modo de ruptura, separadas de acordo com o tipo de amostra sendo (A) REF P, (B) SEC P, (C) MIX P, (D) REF R, (E) SEC R e (F) MIX R	76
Figura 29 - Corpos de provas ensaiados com idade de 28 dias evidenciando o modo de ruptura, separadas de acordo com o tipo de amostra sendo (A) REF P, (B) SEC P, (C) MIX P, (D) REF R, (E) SEC R e (F) MIX R	77
Figura 30 - Resultado do ensaio UCA nas diferentes matrizes	78
Figura 31 – Detalhe do patamar de percolação da matriz REF	79
Figura 32 – Detalhe do patamar de percolação da matriz SEC	79
Figura 33 – Detalhe do patamar de percolação da matriz MIX	80
Figura 34 - Calorimetria isotérmica: fluxo de calor das matrizes cimentícias	82
Figura 35- Calorimetria isotérmica: calor acumulado das matrizes cimentícias	83
Figura 36 - Análise termogravimétrica da Matriz REF com 7 dias	84
Figura 37 - Análise térmica da Matriz REF com 28 dias	85
Figura 38 - Análise térmica da Matriz SEC com 7 dias	85
Figura 39 - Análise térmica da Matriz SEC com 28 dias	86

Figura 40 - Análise térmica da Matriz MIX com 7 dias .....	86
Figura 41 - Análise térmica da Matriz MIX com 28 dias .....	87
Figura 42 - Evolução da portlandita nas matrizes estudadas .....	88
Figura 43 - Evolução da calcita nas matrizes estudadas .....	88
Figura 44 - Evolução da água total combinada nas matrizes estudadas .....	89
Figura 45: Matriz REF, curada em água potável, com idade de 7 dias. Magnificação (A) x100, (B)x200, (C)x500, (D)x1200 .....	91
Figura 46: Matriz REF, curada em água de reuso, com idade de 7 dias. Magnificação (A)x100, (B)x200, (C)x500, (D)x1200.....	91
Figura 47: Matriz SEC, curada em água potável, com idade de 7 dias. Magnificação (A)x100, (B)x200, (C)x500, (D)x1200.....	92
Figura 48: Matriz SEC, curada em água de reuso, com idade de 7 dias. Magnificação (A)x100, (B)x200, (C)x500, (D)x1200.....	92
Figura 49: Matriz MIX, curada em água potável, com idade de 7 dias. Magnificação (A)x100, (B)x200, (C)x500, (D)x1200.....	93
Figura 50: Matriz MIX, curada em água de reuso, com idade de 7 dias. Magnificação (A)x100, (B)x200, (C)x500, (D)x1200.....	93
Figura 51: Matriz MIX, curada em água potável, com idade de 7 dias. (A) Imagem 1 – Magnificação x2200, (B) Imagem 2- Magnificação x2200, (C) Imagem 1 - Magnificação x5000, (D) Imagem 2- Magnificação x5000.....	95
Figura 52 - Pontos de aplicação da técnica de EDS .....	96
Figura 53 - DRX aplicado à matriz MIX, com idade de 7 dias, mostrando os picos associados a cada cristal, sendo (A) Etringita, (B) Hidrotalcita, (C) Formato de Cálcio, (D) Portlandita, (E) Calcita, (F) Alita, (G) Belita, (H) Oxalato de Cálcio, (I) Cloreto de Sódio, (J) Cloreto de Cálcio, (L) Nitrato de Cálcio.....	98

# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Composição genérica de esgotos sanitários (TELLES & COSTA, 2010) .....	8
Tabela 2 - Parâmetros mínimos de qualidade para reuso de água de acordo com as Classes definidas na NBR 13969 (ABNT, 1997).....	10
Tabela 3 - Principais agentes poluidores presentes nos esgotos domésticos adaptado de VON SPERLING (1996).....	11
Tabela 4 - Níveis de tratamentos de esgoto adaptado de VON SPERLING (1996) .....	12
Tabela 5 - Cenário nacional de saneamento em termos de recursos hídricos consumidos, e potencial para reuso de água de esgotos tratados .....	19
Tabela 6 - Cenário de consumo de cimento e água em usinas de concreto por estado no Brasil, por ano.....	21
Tabela 7 - Efeitos de impurezas da água de amassamento nas propriedades do concreto. Fonte: RYAN & SAMARIN (1992) apud CCAA (2007) (adaptado).....	23
Tabela 8 - Parâmetros de qualidade de água de amassamento adotados em diferentes países.....	25
Tabela 9 - Resultado da análise das águas cinzas adaptado de GHRAIR, et al (2016) .....	27
Tabela 10 - Resultado do EDX - concreto com água potável (adaptado de ASADOLLAHFARDI, et al., 2016).....	30
Tabela 11 - Resultado do EDX - concreto com água de reuso (adaptado de ASADOLLAHFARDI, et al., 2016).....	31
Tabela 12 - Dados de águas negras de reuso, em relação à NBR 15900-1 (2009)	32
Tabela 13 - Caracterização química do cimento, onde PF simboliza a perda ao fogo e RI o resíduo insolúvel associado ao cimento empregado no estudo (VOTORANTIM, 2019) .....	39
Tabela 14 - Caracterização física do cimento (VOTORANTIM, 2019) .....	39
Tabela 15 - Glenium 51: dados técnicos (BASF, 2019) .....	39
Tabela 16 - Parâmetros analisados na água de reuso e os respectivos métodos utilizados .....	45
Tabela 17 - Caracterização dos agregados.....	60
Tabela 18 - Composição granulométrica da areia .....	60

Tabela 19 - Composição granulométrica da brita.....	61
Tabela 20 - Caracterização das águas de reuso x NBR 15900 (2009).....	62
Tabela 21 - Tempos de pega para diferentes tipos de água.....	63
Tabela 22 - Estimativa de dosagem pelo método ACI .....	64
Tabela 23 - Dosagem final corrigida .....	65
Tabela 24 - Resultado referente ao ensaio de compressão axial, onde $f_c$ representa a resistência à compressão do concreto; Desv.Pad. é o desvio-padrão associado às amostras ensaiadas; CV representa o coeficiente de variação dos resultados; e LC95% indica os limites associados ao intervalo de confiança para 95% dos resultados. ....	70
Tabela 25 - Resultado referente ao módulo de elasticidade no ensaio de compressão axial, onde E representa a módulo de elasticidade do concreto; Desv.Pad. é o desvio-padrão associado às amostras ensaiadas; CV representa o coeficiente de variação dos resultados; e LC95% indica os limites associados ao intervalo de confiança para 95% dos resultados.....	72
Tabela 26 - Resultados associados ao ensaio de calorimetria isotérmica das matrizes cimentícias.....	83
Tabela 27 - Quantificação dos produtos na análise térmica.....	87
Tabela 28 - Composição química do ponto 1 marcado na Figura 52 .....	96
Tabela 29 - Composição química do ponto 2 marcado na Figura 52 .....	96
Tabela 30 - Composição química do ponto 3 marcado na Figura 52 .....	96
Tabela 31 - Composição química do ponto 4 marcado na Figura 52 .....	96
Tabela 32 - Composição química do ponto 5 marcado na Figura 52 .....	97
Tabela 33 - Caracterização dos cristais por DRX na matriz MIX com idade de 7 dias segundo a base de dados cristalográfica PDF-2 .....	98

## **1. Introdução**

### **1.1. Problema de Pesquisa**

Segundo UNEP (2016), o concreto é o segundo material mais usado no mundo, perdendo apenas para água. De maneira sucinta, pode-se afirmar que o concreto é uma rocha artificial que se molda à inventividade construtiva do homem. Este foi capaz de desenvolver um material que, depois de endurecido, tem resistência similar às das rochas naturais e, quando no estado fresco, é um composto plástico: possibilita sua modelagem em formas e tamanhos os mais variados (PEDROSO, 2009). Ainda que represente apenas cerca de 10 % da massa deste material compósito, a água é um insumo vital na sua produção tomando por base as reações de hidratação do cimento. Levando-se em conta que o concreto é o material de construção mais empregado em todo o mundo, o volume de água despendido diretamente na composição deste torna-se significativa. Contudo, se considerado o volume total de água envolvido em todas as etapas de produção deste material, que representa a pegada hídrica do material, depreende-se a importância de se estudar alternativas sustentáveis ao emprego de água potável no concreto.

Adicionalmente, a crise hídrica brasileira, tendo em vista os recentes eventos de escassez de água na região sudeste somados aos problemas crônicos de falta de água na região nordeste, trouxe à tona a necessidade de preservar a água potável para os seus mais nobres usos, incentivando a procura de alternativas à utilização da mesma.

A implementação do reuso de águas mostra-se uma alternativa interessante para atividades que possam vir a ser compatíveis com essas águas, entre elas a construção civil. Apesar disso, a NBR 15900 (2009), intitulada “Água para amassamento do concreto”, que é norma brasileira responsável por estabelecer requisitos mínimos de qualidade para águas empregadas na mistura do concreto, indica que não há antecedentes suficientes que garantam a viabilidade do emprego de águas de reuso, tanto em relação às estruturas de concreto armado, quanto apenas concreto simples, não-estrutural.

Neste contexto, essa pesquisa visa desenvolver soluções sustentáveis na produção de concretos, examinando a viabilidade do reuso de águas sob a óptica da NBR 15900 a partir do estudo da substituição da água potável por água de reuso proveniente de esgotos

sanitários tratados no preparo e cura do concreto. Adicionalmente, esta pesquisa também irá estudar os efeitos desta água na hidratação do cimento.

## **1.2. Objetivos da pesquisa**

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar os efeitos da substituição da água potável por água de reuso no preparo e cura do concreto, visando a reutilização dessas águas na indústria da construção civil. Neste contexto a pesquisa aborda dois tipos diferentes de águas de reuso, sendo ambas provenientes de sistemas de esgotamento sanitário, porém com níveis de tratamento distintos.

Sendo assim, os objetivos específicos a serem atingidos na pesquisa são:

- Avaliar os parâmetros de qualidade das águas de reuso, tanto em termos técnicos quanto sanitários;
- Quantificar o impacto das águas de reuso nos parâmetros de resistência e trabalhabilidade do concreto;
- Avaliar a influência do emprego das águas de reuso no processo de hidratação e na microestrutura de matrizes cimentícias.

## **2. Revisão Bibliográfica**

O presente capítulo irá apresentar uma revisão bibliográfica sobre as temáticas principais inerentes ao desenvolvimento da pesquisa. Primeiramente será apresentado um panorama geral dos recursos hídricos, onde serão abordadas questões como usos da água e a recente crise hídrica. Outrossim, a revisão bibliográfica também irá abranger os aspectos técnicos relacionados a águas de reuso e seu papel na temática de sustentabilidade. Por fim, ainda neste capítulo será dado enfoque mais aprofundado acerca dos desdobramentos provenientes da aplicação de águas de reuso em matrizes cimentícias apresentados na bibliografia técnica, bem como a importância da água no concreto considerando a pegada hídrica deste material.

### **2.1. A Água no Mundo**

Como é de conhecimento geral, a água é um recurso natural de suma importância no que diz respeito à sobrevivência de organismos vivos. Cobrindo aproximadamente 70% da superfície do globo terrestre, a água se encontra em constante circulação, configurando o ciclo hidrológico, conforme ilustrado na Figura 1. A água dos oceanos, dos rios, dos lagos, da camada superficial dos solos e das plantas evapora por ação dos raios solares. O vapor formado vai constituir as nuvens que, em condições adequadas, condensam-se e precipitam-se em forma de chuva, neve ou granizo. Parte da água das chuvas infiltra-se no solo, outra parte escorre pela superfície até os cursos de água ou regressa à atmosfera por evaporação, formando novas nuvens. A porção que se infiltra no solo vai abastecer os aquíferos, reservatórios de água subterrânea que, por sua vez, vão alimentar os rios e os lagos (CONSUMO SUSTENTÁVEL, 2005).

Além de se destinar a suprir as necessidades sistêmicas dos seres vivos, a água também se presta aos mais diversos usos, tais como irrigação, atividades industriais e de mineração, geração de energia elétrica, abastecimentos rural e urbano. Para que se possa atender a essas diversas demandas por água, este recurso é captado da natureza ao longo das diversas etapas do ciclo hidrológico. O cenário de retirada de água para uso em atividades industriais, urbanas e agrícolas em nível mundial é apresentado na Figura 2.



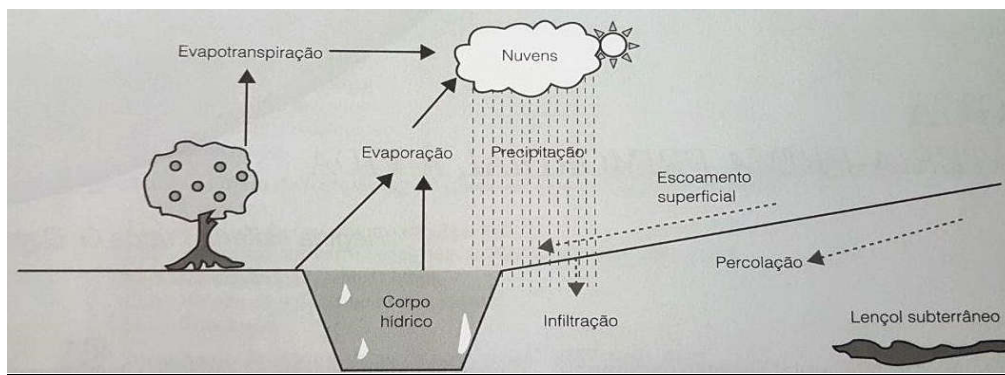


Figura 1 - Ciclo hidrológico (TELLES & COSTA, 2010)

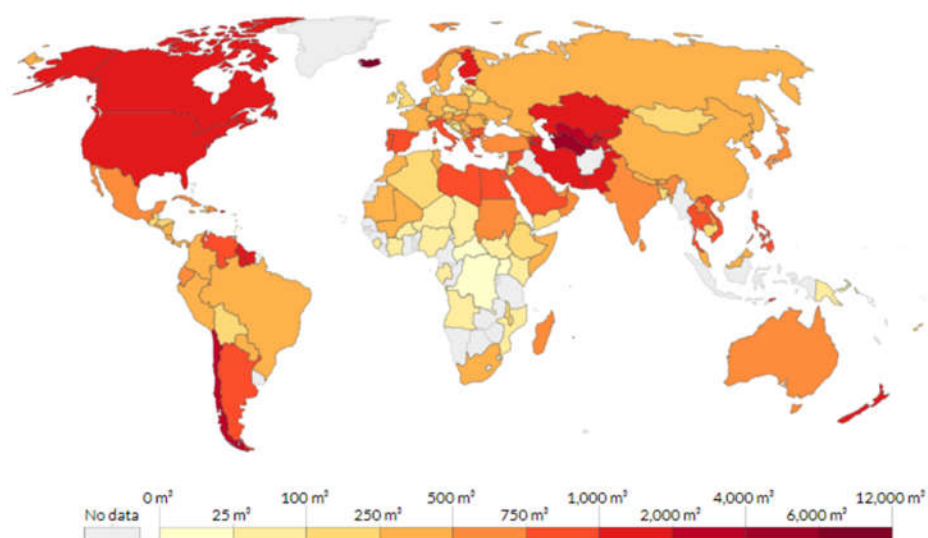


Figura 2 - Retirada de água per capita, para atividades rurais, industriais e urbanas (FAO, 2010)

Uma vez consumida, toda a água captada retorna ao ciclo hidrológico, renovando-o. Contudo, nem sempre o retorno da água se dá nos mesmos níveis de qualidade existentes quando da retirada, visto que boa parte dos usos agrega a esta água altos níveis de poluição. Quando não adequadamente tratados, estes efluentes que regressam contaminados acabam por comprometer a capacidade de renovação destas águas ao longo do ciclo hidrológico, reduzindo assim o montante total de água disponível com qualidade (NOGUEIRA, 2010). Neste contexto, a Figura 3 apresenta o volume de água doce renovável dos países onde este dado é representativo, bem como a média mundial.

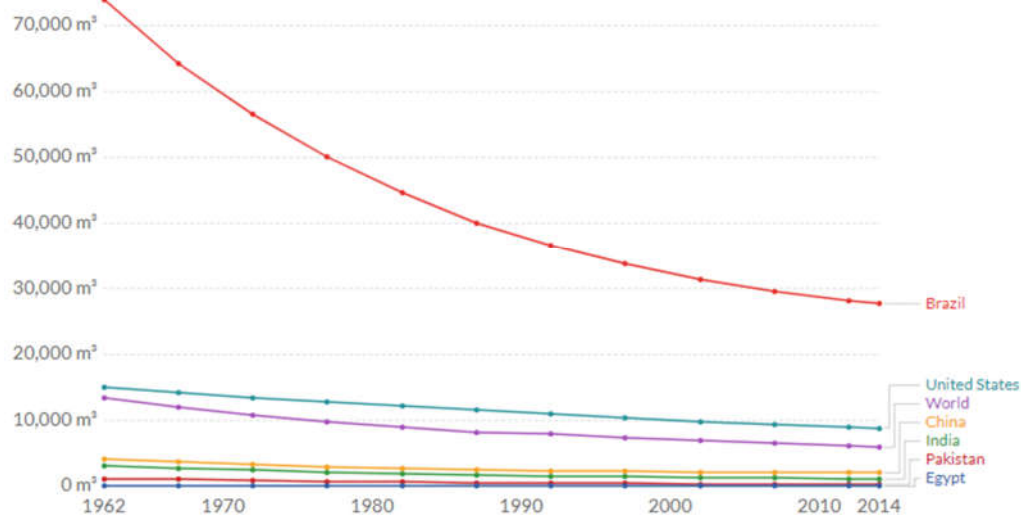


Figura 3 - Volume de água doce renovável, per capita (WORLD BANK, 2014)

Observando-se a Figura 3, nota-se que o Brasil teve uma redução do total de água doce renovável de cerca de 60% enquanto a média mundial reduziu cerca de 40% ao longo de mais de 50 anos. Sendo assim, o problema de redução de volume de água doce disponível é evidente em todo o mundo, e a água em qualidade tem se tornado um recurso cada vez mais limitado.

Apesar de o Brasil ainda dispor de um volume absoluto maior que os outros países, a alta taxa de contaminação das águas doces aponta para a necessidade de melhor gestão desses recursos bem como preservação de sua qualidade.

A partir do cenário apresentado, nota-se que tal tendência torna-se alarmante dado o fato de que a água também pode atuar como agente disseminador de doenças, de acordo com seu grau de qualidade. A organização mundial de saúde (OMS) estima que 25 milhões de pessoas morrem anualmente por doenças transmitidas pela água, tais como cólera e sífilis (NOGUEIRA, 2010).

## 2.2. Panorama dos Recursos Hídricos no Brasil

Ainda que tenha 1386 milhões de quilômetros cúbicos de água em todo o planeta Terra, estima-se que apenas 2,5% sejam de água doce (SOS MATA ATLÂNTICA, 2019). Apesar de o Brasil deter aproximadamente 12% de toda a reserva de água doce do mundo, a distribuição deste recurso ao longo de sua vasta extensão territorial é bastante desigual. A título de exemplo, a região norte concentra aproximadamente 80% da quantidade de

água disponível, mas representa apenas 5% da população brasileira. Já as regiões próximas ao Oceano Atlântico possuem mais de 45% da população, porém, menos de 3% dos recursos hídricos do país (ANA, 2017). Essa disparidade existente ajuda a entender os recentes eventos de estresse hídrico observados principalmente nessas regiões próximas à costa.

Outro fator de similaridade entre estas regiões próximas ao litoral é o avanço do desenvolvimento das cidades, visto que possuem os mais altos índices de urbanização do país. O fenômeno de urbanização, por sua vez, encontra-se intrinsecamente ligado à indústria da construção civil, visto que gera demanda por transformações em infraestrutura de serviços, bem como surgimento de edificações residenciais e comerciais. De acordo com NOGUEIRA (2010), a urbanização descontrolada, o aumento da população, e, conseqüentemente o aumento do volume da carga orgânica lançada nos corpos de água, vem diminuindo consideravelmente sua capacidade de se auto depurarem. A contaminação das águas pelos resíduos urbanos vem tornando a água dos rios cada vez mais impura e inadequada ao consumo, agravando o problema da escassez desse recurso, conforme observado na Figura 3.

O uso de água destinado ao Abastecimento Urbano merece destaque pois no Brasil cerca de 84% da população está concentrada em áreas urbanas, segundo dados do IBGE (2010). O abastecimento humano é constituído predominantemente por sistemas de captação e tratamento de água.

De acordo com ANA (2017), a média anual, em termos de vazão, de retirada de água no Brasil é 2.057,8 m<sup>3</sup>/s, e o abastecimento urbano é responsável por 23,3 % deste total. Já para o consumo de água, a média anual, também em termos de vazão, é de 1.081,3 m<sup>3</sup>/s, sendo o abastecimento urbano responsável por 8,8% deste total.

As informações apresentadas na Figura 4 corroboram o que já foi apresentado. Neste gráfico destaca-se o uso urbano, onde é possível perceber um acentuado crescimento entre os anos de 1955 e 2016, cujo aumento relativo foi de cerca de 580% na vazão de retirada. Tal dado evidencia o impacto que atualmente o uso urbano possui no contexto hídrico nacional.

No Brasil, a indústria da construção civil tem por volta de 20% de participação em todo o PIB nacional (CBIC, 2019). A água possui papel fundamental no contexto deste

ramo, visto que um insumo essencial para o concreto, que é reconhecidamente o principal material empregado pela indústria da construção no Brasil.

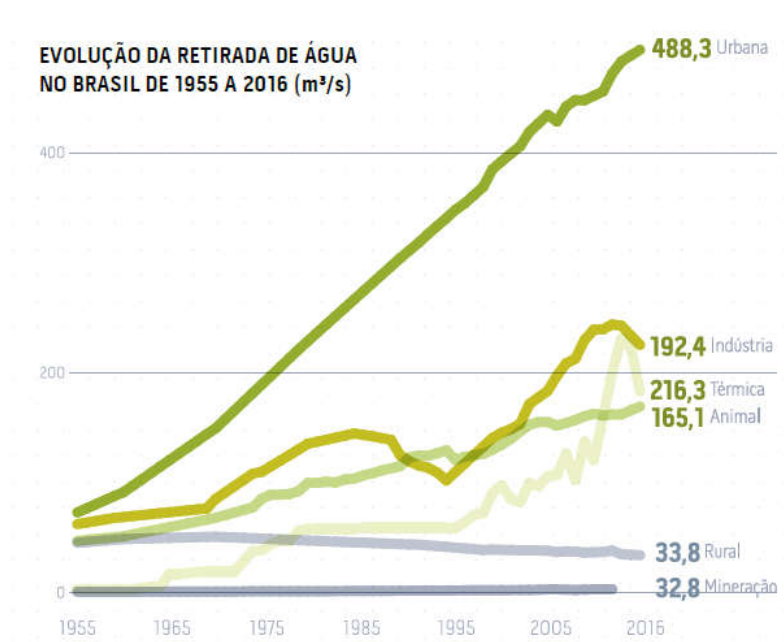


Figura 4 - Evolução da retirada de água no Brasil (ANA, 2017)

### 2.3. Reuso de Águas

Conforme já previsto pela Lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997, que institui a política nacional de recursos hídricos, no inciso III de seu artigo 1º, enuncia que em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais. Desta maneira, em um contexto onde a disponibilidade de água potável torna-se cada vez mais difícil, a implementação do reuso de águas mostra-se uma alternativa interessante para atividades que possam vir a ser compatíveis com essas águas. Assim, águas potáveis podem ser preservadas para empregos mais nobres e essenciais.

O reaproveitamento de águas ainda é muito incipiente no Brasil. Apesar disso, normativas e legislações tem sido elaboradas no sentido de promover uma maior disseminação dessa prática, o que contribui para a preservação de água com qualidade para a gerações atual e futura.

Um exemplo dessas iniciativas é a NBR 15527 (ABNT, 2019), que fornece os requisitos para o aproveitamento de águas de chuva provenientes do sistemas de captação de águas pluviais de coberturas. Desta forma, além de promover uma economia de água potável, este reaproveitamento também promove um alívio nas redes de drenagem urbana, sabidamente sobrecarregadas nos grandes centros urbanos devido à grande poluição inerente às mesmas, tais como folhas interrompendo bocas de lobo nas ruas, bem como lixo lançado em canais de drenagem obstruindo sua seção útil, além da alta taxa de impermeabilização dos solos nestas áreas. Porém, esta pesquisa não contempla o reaproveitamento de águas de chuva, visando o reuso de efluentes de esgoto.

Além das águas de chuva, que estão sujeitas à sazonalidade, um outro reaproveitamento que possui potencial presumível neste contexto é o reuso de efluentes de esgoto, onde é possível notar a partir dos dados apresentados na Tabela 1 que a água representa 99,9% da composição total dos esgotos sanitários. A partir de dados obtidos em ANA (2017), em áreas urbanas, a vazão total de esgoto gerada é de 390,6 m<sup>3</sup>/s. Deste total, apenas 43% são coletados e conduzidos a Estações de Tratamento de Esgotos (ETE), enquanto que outros 12% são conduzidos a fossas sépticas.

Tabela 1 - Composição genérica de esgotos sanitários (TELLES & COSTA, 2010)

Composição	Descrição
99,9 % de Água	Água de abastecimento utilizada na remoção do esgoto das economias e residências
0,01% de Sólidos	Sólidos Grosseiros
	Areia
	Sólidos Sedimentáveis
	Sólidos Dissolvidos

Um outro documento que reforça o compromisso nacional com preservação de águas potáveis e promoção da prática do reaproveitamento é a Resolução nº 54, de 28 de Novembro de 2005, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2005). De acordo com esta publicação, águas de reuso podem ser definidas como efluentes

provenientes de esgotamento sanitário, tratados ou não, que se encontram dentro dos padrões exigidos para sua utilização nas modalidades pretendidas.

Os esgotos sanitários são, sumariamente, divididos em águas cinzas e águas negras. As águas cinzas são esgotos advindos de lavagem de roupas, banheiras, chuveiros, pias de cozinha e lavatórios. Podem, eventualmente, conter material fecal, mas em baixíssimas concentrações, apresentando baixos riscos de contaminação. Já as águas negras, além de contemplarem os usos já descritos, também abarcam os efluentes de bacias sanitárias. Por este motivo, possuem elevadas concentrações de material fecal, e, por conseguinte, tem alto potencial de contaminação (CCAA, 2007).

Também a NBR 13969 (ABNT, 1997), que trata sobre projeto, construção e operação de tanques sépticos, em seu item 5.6 aborda a questão do reuso de efluentes tratados. Em seu desenvolvimento, no subitem 5.6.1, a norma preconiza um planejamento para que o reuso seja seguro e efetivo. Neste sentido, devem ser definidos:

- Os usos previstos para esgoto tratado
- Volume de esgoto a ser reutilizado
- Grau de tratamento necessário
- Sistema de reservação e de distribuição
- Manual de operação e treinamento dos responsáveis

O grau de tratamento está diretamente relacionado ao tipo de uso ao qual a água irá se destinar. A norma em tela define quatro classes, onde associa a cada uma delas usos e tratamentos equivalentes, bem como parâmetros mínimos de qualidade que devem ser atendidos. A seguir são apresentadas as classes:

- Classe 1: Lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador, incluindo chafarizes;
- Classe 2: lavagens de pisos, calçadas e irrigação dos jardins, manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes;
- Classe 3: reuso nas descargas dos vasos sanitários;
- Classe 4: reuso nos pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual.

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros mínimos de qualidade definidos na NBR 13969 (ABNT, 1997) associados a cada uma das classes supracitadas, e por conseguinte, a seus respectivos usos.

Tabela 2 - Parâmetros mínimos de qualidade para reuso de água de acordo com as Classes definidas na NBR 13969 (ABNT, 1997)

Parâmetros de Qualidade	Unidade	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Turbidez	UNT	Inferior a 5	Inferior a 5	Inferior a 10	
Coliformes Fecais	NMP/100 ml	Inferior a 200	Inferior a 500	Inferior a 500	Inferior a 5000
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	Inferior a 200			
pH	-	Entre 6,0 e 8,0			
Cloro Residual	mg/L	Entre 0,5 - 1,5	Inferior a 0,5		
Oxigênio Dissolvido	mg/L				Inferior a 2,0

NOGUEIRA (2010) estudou a viabilidade econômica da prática de reúso de água para cidades providas de sistema de esgotamento sanitário e estações de tratamento de esgotos, considerando inclusive os custos de transporte. A partir da modelagem de diferentes cenários estudados, a referida pesquisa atesta a viabilidade de emprego de água de reúso em substituição à água potável para distâncias até próximo de 140 km considerando o transporte por bombeamento a partir da estação de tratamento de esgotos, e 17 km para o transporte por caminhões-pipa. Nestas faixas de transporte, o custo unitário da água de reúso é inferior à tarifa média da água potável.

#### 2.4. Tratamentos de Esgoto

VON SPERLING (1996) define os principais agentes poluidores no tocante a esgotos domésticos. A Tabela 3 apresenta compiladas suas principais informações. Com finalidade de reduzir a concentração desses agentes, são realizados tratamentos específicos no efluente para a obtenção da água de reúso.

Existem alguns tipos de tratamento de esgoto, desde os mais simples, até os mais sofisticados. Em termos práticos, os tratamentos se dividem em preliminar, primário, secundário e terciário. Cada uma destas etapas objetiva a remoção de componentes específicos, conforme observado na Tabela 4.

Tabela 3 - Principais agentes poluidores presentes nos esgotos domésticos adaptado de VON SPERLING (1996)

<b>Fonte</b>	<b>Esgotos Domésticos</b>	
	<i><u>Principais Parâmetros</u></i>	<i><u>Possível Efeito Poluidor</u></i>
Sólidos em Suspensão	Sólidos em Suspensão Totais	Problemas Estéticos; Depósitos de Lodo; Adsorção de Poluentes; Proteção de Patogênicos
Matéria Orgânica Biodegradável	Demanda Bioquímica de Oxigênio	Consumo de Oxigênio; Mortandade de Peixes; Condições Sépticas
Nutrientes	Nitrogênio Fósforo	Crescimento Excessivo de Algas; Toxicidade aos Peixes (Amônia); Doença em Recém-Nascidos (Nitrito); Poluição de Água Subterrânea
Patogênicos	Coliformes	Doenças de Veiculação Hídrica



Tabela 4 - Níveis de tratamentos de esgoto adaptado de VON SPERLING (1996)

<b>Nível</b>	<b>Remoção</b>
<i>Preliminar</i>	Sólidos em suspensão grosseiros (materiais de maiores dimensões e areia)
<i>Primário</i>	Sólidos em suspensão sedimentáveis
	DBO em suspensão (matéria orgânica componente dos sólidos em suspensão sedimentáveis)
<i>Secundário</i>	DBO em suspensão (matéria orgânica em suspensão fina, não removida no tratamento primário)
	DBO solúvel (matéria orgânica na forma de sólidos dissolvidos)
<i>Terciário</i>	Nutrientes
	Patogênicos
	Compostos não biodegradáveis
	Metais pesados
	Sólidos inorgânicos dissolvidos
	Sólidos em suspensão remanescentes

#### 2.4.1. Tratamento Preliminar

Este tipo de tratamento objetiva, basicamente, remover sólidos grosseiros e areia. Para que se viabilize tal remoção, esta etapa conta com sistemas de gradeamento e desarenadores. Os sistemas de gradeamentos, em geral, são compostos por telas de variadas aberturas que impedem a passagem de materiais grosseiros, enquanto que os desarenadores, também conhecidos como caixas de areia, promovem a sedimentação da areia durante a passagem do efluente pela caixa.

#### 2.4.2. Tratamento Primário

Após o tratamento preliminar, o efluente resultante é direcionado para unidades de sedimentação. Nestas unidades, também conhecidas como decantadores primários, os sólidos não-grosseiros em suspensão, que não sofreram deposição no tratamento preliminar, passam lentamente por estes tanques de decantação. Assim, considerando-se o fato de possuírem densidade maior que a do líquido, sedimentam-se. Por outro lado, óleos e graxas, que são menos densos que o líquido, sobrenadam em sua superfície, sendo coletados também, tal qual os sólidos depositados no fundo dos decantadores, para posterior tratamento (NUCASE, 2008).

#### *2.4.3. Tratamento Secundário*

Conforme observado a partir da Tabela 4, após a etapa de tratamento primário, o efluente líquido resultante ainda contém matéria orgânica fina em suspensão e dissolvida, além de poder ainda contar com nutrientes e patogênicos. O tratamento secundário, neste contexto, surge com o objetivo de promover a degradação desta matéria orgânica a partir de processos biológicos aeróbios ou anaeróbios. Segundo VON SPERLING (1996), nesta fase a eficiência de remoção tanto de matéria orgânica quanto de coliformes varia de 60 a 99%, enquanto a de nutrientes varia de 10 a 50%. O sistema aeróbio se caracteriza pela introdução artificial de oxigênio no processo, promovendo a ação de bactérias aeróbias, e caracteriza-se por uma maior produção de lodo se comparado ao sistema anaeróbio. Para o sistema anaeróbio, a geração de lodo tende a ser menor, visto que parte da matéria orgânica é decomposta em gases a partir das bactérias anaeróbias (TELLES & COSTA, 2010).

Em termos de tratamento secundário, existem diversas alternativas de técnicas biológicas, dentre as quais destacam-se Lodos Ativados, Filtros Biológicos, Lagoa de Estabilização, Biodiscos, Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA), Filtro Anaeróbio de Fluxo Ascendente (FAFA) e Fossa Séptica.

#### *2.4.4. Tratamento Terciário*

No âmbito do tratamento tradicional de esgotos, onde estes efluentes tratados são devolvidos aos corpos hídricos, o tratamento em nível secundário, em geral, atende aos requisitos mínimos de eficiência de remoção de poluentes. Contudo, no caso de reuso de água, o tratamento terciário passa a ter papel importante neste processo. As classes 1, 2 e 3 da NBR 13969 (ABNT, 1997) demandam a aplicação de desinfecção, que é um dos processos de tratamento de efluentes líquidos a nível terciário. Em termos de desinfecção, a forma mais tradicional é a cloração. O cloro tem maior aplicabilidade prática devido ao seu baixo custo, eficiência na remoção de cor e odor do subproduto, eficácia em tornar inertes grande variedade de patogênicos, além de poder ser medido e monitorado com facilidade. Alternativas existentes ao cloro para desinfecção são ozônio, dióxido de cloro, permanganato de potássio e radiação ultravioleta.

## 2.5. Ciclo de Vida da Água no Concreto

A partir da apresentação dos requisitos e mecanismos existentes para a obtenção da água de reuso, é importante tratar de sua aplicação prática em substituição à água potável. Como já citado, a Resolução nº 54, de 28 de Novembro de 2005, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2005), em seu artigo 3º, enquadra a construção civil como uma modalidade de emprego de reuso de água não potável para fins urbanos. Como se sabe, o setor da construção civil tem importância estratégica no desenvolvimento econômico nacional. Este setor se caracteriza por seu elevado consumo de matérias-primas e geração de resíduos, e o principal material de construção empregado neste setor é o concreto. Para que se tenha uma dimensão da importância deste material, segundo SNIC (2018), entre janeiro e dezembro de 2017 foram comercializadas, apenas no Brasil, mais de 53 milhões de toneladas de cimento, que é, paralelamente à água, uma das principais matérias-primas do concreto.

Tomando por base a abordagem feita por AITCIN (2000) para aproximação do consumo de água, tal cenário fica ainda mais evidente. Em seu trabalho, este autor considerou que 1 m<sup>3</sup> de concreto consome, em média, 250 kg de cimento sob um fator a/c de 0,5. Sob esta perspectiva, para o ano de 1997, o autor publicou que cerca de 800 bilhões de litros foram empregados na produção de concreto em todo o mundo. Num contexto nacional, a partir dos dados de SNIC (2018), utilizando-se a mesma aproximação citada, chega-se a um total de 26,5 bilhões de litros de água apenas no Brasil, no ano de 2017.

Para a produção do concreto, a água é um dos principais insumos, além do cimento, agregados, e eventualmente aditivos. Contudo, em uma análise mais profunda acerca da produção do concreto, é possível perceber que, além do próprio volume de água consumido para amassamento do concreto, existem outros volumes indiretos que também são consumidos para que se possa produzir este material. Esses quantitativos que se fazem presentes de maneira indireta são definidos como águas virtuais. A partir deste conceito, se contabilizadas as águas real e virtual, obtém-se a pegada hídrica do concreto, que consiste no volume de água total consumido no processo de produção de um material (SILVA, *et al.*, 2013).

Em relação à parcela real, ou seja, considerando-se apenas a água de amassamento empregada diretamente na preparação da mistura, BARRETO (2015) cita como referência o valor de 180 litros para a produção de 1 metro cúbico de concreto usinado.

Com o desenvolvimento de conceitos de sustentabilidade cada vez mais presentes no campo da construção civil, estudos mais específicos acerca de análises de ciclo de vida tem sido realizados nos materiais que a compõe, dando um panorama mais realista sobre os impactos ambientais relacionados a estes materiais. Segundo TAVARES (2006), a Análise de Ciclo de Vida envolve uma abordagem holística que não diz respeito apenas aos limites industriais do processo, mas também à natureza das matérias primas e recursos energéticos, diretos e indiretos, necessários, e ainda ao destino dos resíduos e subprodutos de cada etapa, além do próprio produto após sua vida útil. Sob essa nova óptica, torna-se essencial avaliar também os demais consumos indiretos de água associados à produção do concreto, a fim de se obter sua pegada hídrica.

De acordo com TSIMAS & ZERVAKI (2010), as etapas mais críticas de consumo de água em uma usina de concreto são nas fase de produção do mesmo e de limpeza dos caminhões-betoneira. Neste linha de raciocínio, o autor estima que são consumidos cerca de 3100 litros de água para um volume equivalente de 8 m<sup>3</sup> de concreto, distribuídos da seguinte maneira: 1600 litros para a produção do concreto propriamente dito, e 1500 litros para lavar o caminhão-betoneira. Diante dos valores apresentados, para a produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto, seriam necessários 387,5 litros de água, considerando-se produção e limpeza.

Já para MACK-VERGARA & JOHN (2017), que estudaram o ciclo de vida da água na produção do concreto, existem ainda mais etapas relacionadas ao consumo de água. Com uma abordagem mais aprofundada acerca das etapas inerentes aos processos, o autor propôs uma divisão destes em fases, desde o início até o fim do ciclo, Como é possível perceber, em um contexto mais generalizado e amplo de análise, existem diversos processos relacionados à produção do concreto onde a água tem papel importante, direto ou indireto, conforme observado na Figura 5, onde nota-se que em todas as fases há a entrada da água nos processos, bem como sua posterior saída.

No que diz respeito a valores consumo, MACK-VERGARA & JOHN (2017) estimam que para se produzir 1 m<sup>3</sup> de concreto seriam necessários 563 litros de água. Para este cálculo, foram considerados os consumos de água relacionados aos seguintes processos já indicados na Figura 5: Mistura do Concreto, Instalações e Laboratório, Limpeza de Caminhões-Betoneira, Geração Hidroelétrica de Energia, Limpeza e Controle de Particulados.

Para a mistura do concreto, o consumo total considerado foi de 200 litros, e considerou, além do próprio volume de água que compõe diretamente o traço do concreto, os volumes indiretos associados aos insumos que o compõe. Já para Instalações e Laboratório, o autor estima um consumo de 10 litros, enquanto que para Limpeza de Caminhões-Betoneira, o valor de consumo adotado no artigo foi de 90 litros. Em termos de consumo de água associado à geração hidroelétrica de energia gasta no processo produtivo do concreto, a estimativa adotada foi de 250 litros. Por fim, para a limpeza e o controle de particulados, o autor adotou um valor de 13 litros como consumo associado a esse processo. Dessa forma, considerados os volumes apresentados, para uma produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto, obtem-se o volume total de água demandado, de forma direta e indireta, de 563 litros, conforme já informado.

Considerando-se o ciclo de vida apresentado, pode-se supor que os volumes que não seriam passíveis de substituição por águas de reuso seriam apenas o consumo de instalações e laboratórios, bem como o volume associado à geração de energia hidroelétrica. Neste cenário, em que todos os demais usos listados na análise de ciclo de vida do concreto podem ser substituídos por águas de reuso, nota-se que há um grande potencial de redução no impacto ambiental do concreto em termos de sua pegada hídrica. A partir desta premissa, nota-se que dos 563 litros de água potável gastos para produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto, cerca de 303 litros tem potencial para substituição através do reuso de águas, o que representaria uma redução de 46,2% na pegada hídrica deste material compósito.

A partir dos dados apresentados, é possível perceber que a indústria da construção civil, através da produção de concreto, consome um volume significativo de água potável.

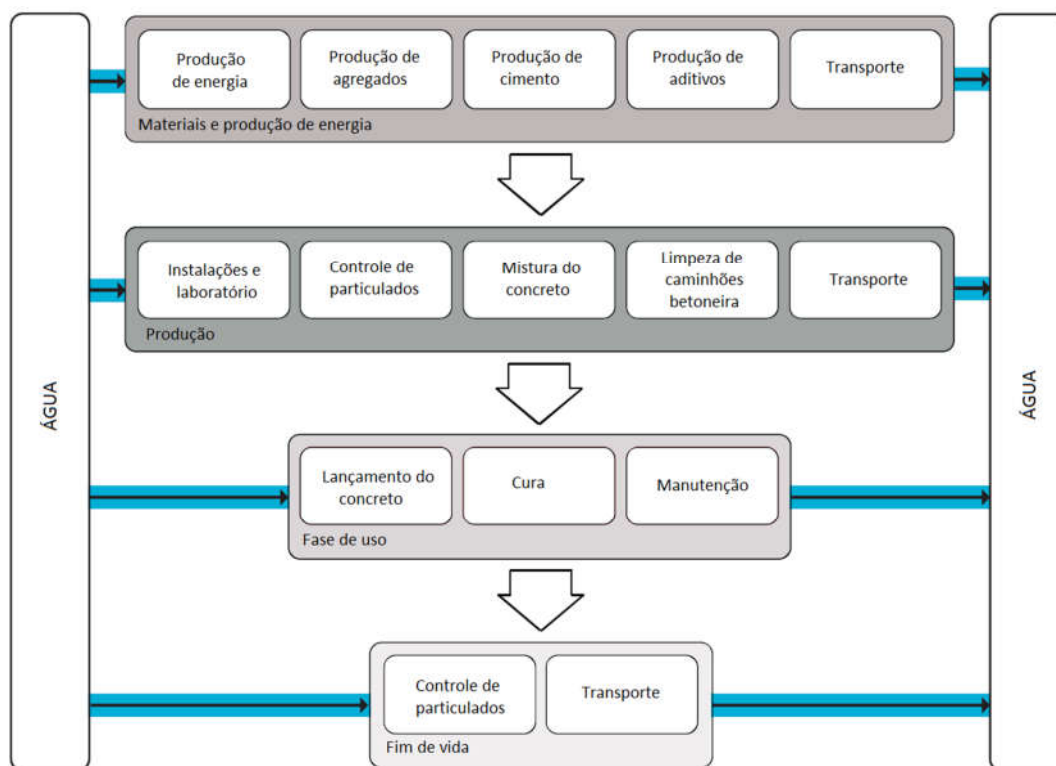


Figura 5 - O papel da água em quatro fases do ciclo de vida do concreto adaptado de MACK-VERGARA & JOHN (2017)

## 2.6. Análise do Cenário Nacional

CFA-GESAE (2017) apresenta os dados técnicos associados ao consumo de água em todos os estados do Brasil, além de introduzir parâmetros de eficiência dos sistemas de saneamento básico, com destaque para o índice de perdas associado às redes de distribuição de águas, bem como o índice de tratamento de esgoto. A partir de um consumo de água efetivo, ou seja, descontadas as perdas, é possível estimar o volume de esgoto produzido através deste consumo. Isto porque, de acordo com VON SPERLING (1996), em média 80% do volume total de água consumida se reverte em esgoto. Desta forma, tomando-se por base os dados demográficos pertencentes a IBGE (2010) em associação aos dados supracitados de gestão de saneamento básico, torna-se possível mapear o consumos efetivos de água, bem como os volumes de esgoto tratado com potencial aplicação para reúso de águas. O resultado desta análise integrada é apresentado na Tabela 5. A partir dos dados de consumo de água *per capita* do CFA-GESAE (2017) e população brasileira do IBGE (2010) obtém-se o consumo de água total por estado no

Brasil. Agregando o índice de perdas do CFA-GESAE (2010) na análise, é obtido o consumo efetivo de água. Partindo-se da premissa de que 80% do consumo efetivo de água é revertido em esgoto (VON SPERLING, 1997), é calculado o volume total de esgoto gerado a nível nacional. Tomando por base os índices de coleta e tratamento de esgoto disponibilizados pela CFA-GESAE (2010), chega-se ao volume potencial de reuso por estados em todo o Brasil.

Por outro lado, SNIC (2018) apresenta o consumo médio anual de cimento nas concreteiras por estado, conforme mostrado na Tabela 6. Tomando por base o consumo de cimento proposto por AITCIN (2000) para produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto, bem como os dados de consumo de cimento em usinas de concreto, por estados do Brasil, apresentados por SNIC (2018), estima-se a produção regional de concreto brasileira.

Tendo-se em vista os consumos críticos real e virtual de água associados à produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto apresentados por TSIMAS & ZERVAKI (2010), associados a águas de amassamento, representando o consumo de água real, e limpeza de caminhões betoneira, representando o consumo de água virtual, torna-se possível contabilizar os volumes de água dispendidos para a produção de concreto em usinas no Brasil, conforme apresentado na Tabela 6. Ressalta-se que as parcelas referentes à água de amassamento e de limpeza de caminhões betoneira são passíveis de substituição por água de reuso, conforme já destacado anteriormente. Sendo assim, pode ser observado na Tabela 6 o volume estimado de água potável passível de ser substituído por água de reuso.

Observando-se os dados referentes ao consumo de água em todos os estados da federação apresentados na Tabela 5, identifica-se uma tendência de maiores volumes de água dispendidos nas regiões sudeste e sul, que são as áreas reconhecidas mais urbanizadas do país. Tal comportamento vai ao encontro do disposto no item 2.2, evidenciando o desequilíbrio entre oferta e demanda de água no Brasil, visto que os maiores consumos são verificados nas regiões onde há as menores reservas de água potável.

Tabela 5 - Cenário nacional de saneamento em termos de recursos hídricos consumidos, e potencial para reuso de água de esgotos tratados

<b>Estado</b>	<b>Consumo Per Capita (l/dia)</b> Fonte: (CFA-GESAE, 2017)	<b>População (un)</b> Fonte: (IBGE, 2010)	<b>Consumo total de Água anual (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>Perdas (%)</b> Fonte: (CFA-GESAE, 2017)	<b>Volume de Perdas (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>Consumo Efetivo (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume de esgoto produzido (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>Índice de Coleta de Esgoto (%)</b> Fonte: (CFA-GESAE, 2017)	<b>Índice de Tratamento de Esgoto (%)</b> Fonte: (CFA-GESAE, 2017)	<b>Volume de Reuso Potencial (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>
Amapá	183.88	829,494.00	55.67	66.19%	36.85	18.82	15.06	15.62	94.7	2.23
Rondônia	158.12	1,757,589.00	101.44	61.38%	62.26	39.18	31.34	12.23	75.4	2.89
Roraima	157.37	576,568.00	33.12	70.76%	23.43	9.68	7.75	70.17	100.0	5.44
Acre	156.43	869,265.00	49.63	60.10%	29.83	19.80	15.84	18.78	100.0	2.97
Pará	155.42	8,513,497.00	482.96	43.33%	209.26	273.69	218.95	18.36	42.5	17.08
Tocantins	130.13	1,555,229.00	73.87	32.30%	23.86	50.01	40.01	33.91	99.5	13.50
Amazonas	92.01	4,080,611.00	137.04	69.43%	95.15	41.89	33.51	30.36	91.9	9.35
Maranhão	140.97	7,035,055.00	361.98	60.45%	218.82	143.16	114.53	30.45	32.4	11.30
Piauí	129.72	3,264,531.00	154.57	49.20%	76.05	78.52	62.82	13.92	94.5	8.26
Ceará	117.98	9,075,649.00	390.82	46.17%	180.44	210.38	168.30	40.34	88.9	60.36
Paraíba	116.54	3,996,496.00	170.00	37.93%	64.48	105.52	84.41	48.30	77.2	31.47
Rio Grande do Norte	113.83	3,479,010.00	144.55	50.57%	73.10	71.45	57.16	32.35	94.7	17.51
Sergipe	111.94	2,278,308.00	93.09	47.65%	44.36	48.73	38.98	31.98	96.4	12.02
Bahia	107.42	14,812,617.00	580.78	39.51%	229.47	351.31	281.05	57.29	86.5	139.28
Pernambuco	95.54	9,496,294.00	331.16	52.15%	172.70	158.46	126.77	31.54	68.4	27.34
Alagoas	94.68	3,322,820.00	114.83	44.86%	51.51	63.32	50.65	17.86	80.1	7.25
Mato Grosso	160.51	3,441,998.00	201.65	48.09%	96.98	104.68	83.74	42.04	82.9	29.18



Tabela 5 - Cenário nacional de saneamento em termos de recursos hídricos consumidos, e potencial para reuso de água de esgotos tratados (Continuação)

<b>Estado</b>	<b>Consumo Per Capita (l/dia)</b> Fonte: (CFA-GESAE, 2017)	<b>População (un)</b> Fonte: (IBGE, 2010)	<b>Consumo total de Água anual (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>Perdas (%)</b> Fonte: (CFA-GESAE, 2017)	<b>Volume de Perdas (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>Consumo Efetivo (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume de esgoto produzido (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>Índice de Coleta de Esgoto (%)</b> Fonte: (CFA-GESAE, 2017)	<b>Índice de Tratamento de Esgoto (%)</b> Fonte: (CFA-GESAE, 2017)	<b>Volume de Reuso Potencial (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>
Mato Grosso do Sul	156.27	2,748,023.00	156.74	32.40%	50.78	105.96	84.77	43.83	99.8	37.08
Goiás	134.06	6,921,161.00	338.67	29.57%	100.14	238.52	190.82	55.66	87.3	92.72
Distrito Federal	132.39	2,974,703.00	143.74	33.75%	48.51	95.23	76.18	85.36	100.0	65.03
Rio de Janeiro	247.15	17,159,960.00	1,548.00	31.38%	485.76	1062.23	849.79	50.01	63.6	270.28
São Paulo	167.62	45,538,936.00	2,786.13	36.96%	1029.75	1756.38	1405.10	80.72	78.1	885.81
Espírito Santo	157.33	3,972,388.00	228.12	37.91%	86.48	141.64	113.31	58.57	73.8	48.98
Minas Gerais	153.91	21,040,662.00	1,182.00	35.79%	423.04	758.97	607.17	65.19	41.6	164.66
Santa Catarina	150.58	7,075,494.00	388.88	36.75%	142.91	245.97	196.77	28.15	89.9	49.80
Rio Grande do Sul	147.52	11,329,605.00	610.04	37.56%	229.13	380.91	304.73	29.27	81.0	72.24
Paraná	139.65	11,348,937.00	578.48	28.17%	162.96	415.52	332.42	73.48	99.4	242.80

De modo a otimizar a gestão dos recursos hídricos, bem como preservar água potável para seus usos mais nobres, a implementação de reusos de águas provenientes de esgotos tratados em usinas de produção de concreto desponta como uma possível alternativa mitigatória ao problema apresentado. Analisando-se a Tabela 5 e a Tabela 6, identifica-se que o volume de água associado à produção de concreto representa em média apenas 0,31% do volume de esgoto tratado com potencial emprego como água de reuso. Desta forma, nota-se que há uma viabilidade em termos quantitativos de se suprir a demanda de água em usinas de concreto integralmente a partir da aplicação de águas de reuso provenientes de sistemas de tratamento de esgotos sanitários.

Tabela 6 - Cenário de consumo de cimento e água em usinas de concreto por estado no Brasil, por ano.

<b>Estado*</b>	<b>Consumo de Cimento (ton)</b> Fonte: SNIC(2018)	<b>Produção Média de Concreto (m³)</b>	<b>Consumo de Água no Concreto (m³)</b>
Rondônia	13,138	52,552	20,364
Pará	79,055	316,220	122,535
Tocantins	9,546	38,184	14,796
Amazonas	21,513	86,052	33,345
Maranhão	18,660	74,640	28,923
Piauí	14,129	56,516	21,900
Ceará	85,288	341,152	132,196
Paraíba	136,137	544,548	211,012
Rio Grande do Norte	126,332	505,328	195,815
Sergipe	118,599	474,396	183,828
Bahia	154,367	617,468	239,269
Pernambuco	10,355	41,420	16,050
Alagoas	13,884	55,536	21,520
Mato Grosso	109,929	439,716	170,390
Mato Grosso do Sul	66,072	264,288	102,412
Goiás	156,129	624,516	242,000
Distrito Federal	408,225	1,632,900	632,749
Rio de Janeiro	264,768	1,059,072	410,390
São Paulo	1,282,161	5,128,644	1,987,350
Espírito Santo	168,361	673,444	260,960
Minas Gerais	2,429,125	9,716,500	3,765,144
Santa Catarina	375,673	1,502,692	582,293
Rio Grande do Sul	236,049	944,196	365,876
Paraná	1,637,597	6,550,388	2,538,275
<b>TOTAL</b>	<b>7,833,353</b>	<b>31,333,412</b>	<b>12,141,697</b>

\*Obs.: Não foram obtidos dados para os Estados de Amapá, Roraima e Acre.

Além disso, considerando-se os dados de CFA-GESAE (2017) é observado um aumento do valor da tarifa de água potável nos últimos anos. Conforme Figura 6, o custo da água potável aumentou em torno de 50% entre os anos de 2012 e 2017.

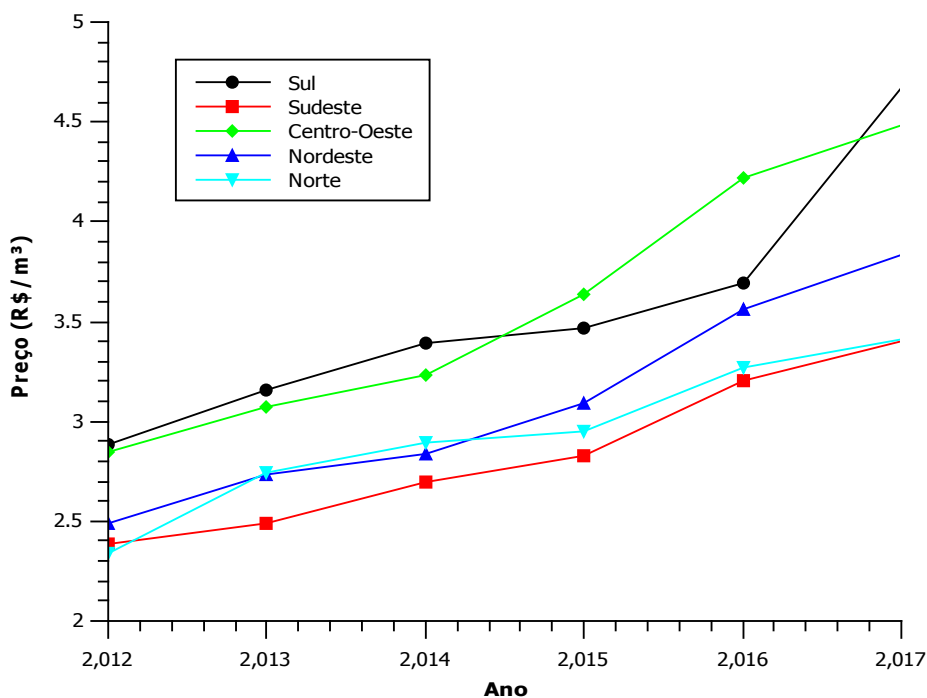


Figura 6 - Evolução anual da tarifa de água por região do país (adaptado de CFA-GESAE, 2017).

Nota-se, a partir das informações apresentadas na Figura 6, que a água potável, enquanto produto, vem tendo seu valor de mercado cada vez maior, evidenciando a necessidade de se estudar alternativas sustentáveis que permitam a substituição deste recurso natural enquanto insumo de produção. NOGUEIRA (2010) atestou a viabilidade econômica de emprego da água de reuso em substituição à água potável, comparando o custo unitário da água de reuso com o custo médio de produção da água potável à época, para distâncias até próximo de 140 km considerando o transporte por bombeamento a partir da estação de tratamento de esgotos, e 17 km para o transporte por caminhões-pipa. Dessa forma, nota-se também uma viabilidade financeira de substituição da água potável por água de reuso em usinas de concreto.

## 2.7. Água de reuso aplicada ao concreto

Devido a problemas de escassez de água, esforços no campo da pesquisa foram demandados, no sentido de se estudar alternativas ao emprego de água potável, preservando-a aos seus mais nobres usos. Neste contexto, estudos foram desenvolvidos com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica da substituição da água potável empregada na produção do concreto. Grande parte desses trabalhos e iniciativas de pesquisa tem como origem países do Oriente Médio visto seu histórico de problemas com escassez de água potável. Além disso, segundo VEOLIA & IFPRI (2015), projeções para o ano de 2050 indicam um grave declínio na qualidade das águas dessa região do planeta.

Apesar dessa necessidade, é importante ressaltar que o emprego da água de reuso requer alguns cuidados, visto que estas águas possuem em sua constituição impurezas que podem vir a comprometer algumas propriedades do mesmo. As preocupações em relação à água de amassamento são geralmente relacionadas a trabalhabilidade, resistência e durabilidade do concreto. Com relação a isso, estudos mostram que águas de reuso apresentam em sua constituição impurezas que podem vir a comprometer algumas propriedades do concreto, conforme apresentado na Tabela 7. Adicionalmente, no caso específico de utilização destas águas, parâmetros relacionados à segurança sanitária do manuseio devem ser considerados.

Tabela 7 - Efeitos de impurezas da água de amassamento nas propriedades do concreto. Fonte: RYAN & SAMARIN (1992) apud CCAA (2007) (adaptado)

<b>Impurezas</b>	<b>Efeitos</b>
Óleos, Gorduras ou Detergentes	Possibilidade de incorporação de ar
Cloreto de Cálcio e alguns outros sais de Cálcio	Probabilidade de aceleração da pega
Açúcar, Sal, Zinco, Chumbo e uma gama de outros materiais orgânicos e inorgânicos	Probabilidade de retardamento da pega
Íons Cloreto	Forte probabilidade de corrosão do aço

A matéria orgânica e química presente nos esgotos, além dos sólidos em suspensão, tendem a comprometer os valores de resistência mecânica e durabilidade do concreto, visto que afeta as reações químicas dos principais componentes do cimento: Belita ( $C_2S$ ), Alita ( $C_3S$ ), Aluminato tricalcico ( $C_3A$ ) e Alumino-Ferrita cálcica ( $C_4AF$ ). Durante o processo de hidratação, alguns dos componentes do esgoto são degradados, formando

poros adicionais à matriz, os quais comprometem seu desempenho, tanto mecânico quanto em termos de durabilidade (MAHASNEH, 2014).

Outro composto presente em efluentes sanitários que influencia diretamente a hidratação do cimento é a amônia. KUZ'MIN & BARABASH (1981) constataram que este composto atua regulando a taxa de liberação do calor de hidratação, de modo que na presença deste composto tal liberação ocorre de maneira mais uniforme. Em termos de comportamento mecânico, não foram notadas diferenças relevantes nos resultados entre a matriz de referência e as matrizes com amônia. Com relação à elevação adiabática de temperatura, nota-se que o tempo para se alcançar um aumento de temperatura cresce conforme ocorre o aumento da concentração de amônia na água de mistura.

Neste contexto, PECHE, *et al.* (2015) indicam que já existem em vigor diversos códigos e normatizações que sugerem a viabilidade de emprego de águas não potáveis para fins de produção de concreto, destacando-se as normas britânica BS EN 1008/2002, australiana AS 1379/2007, indiana IS456/2000, e americana ASTM C94/2005.

No contexto nacional, a NBR 15900-1 (ABNT, 2009) define os requisitos que a água deve atender para que possa ser aplicada na produção do concreto. Para a água potável proveniente do abastecimento público, o documento a isenta de testes e ensaios, permitindo sua aplicação direta. Entretanto, esta norma também considera águas de outras fontes, como salobras, de fontes subterrâneas, de captação pluvial, recuperadas de processos de preparação de concreto, residuais industriais e de reuso provenientes de estações de tratamento de esgoto. Para estes casos, são estabelecidos parâmetros mínimos de qualidade que devem ser atendidos. De acordo com a concentração de íons cloreto presente na água, a NBR 15900 (2009) estabelece condições específicas de aplicação destas enquanto água de amassamento, conforme descrito a seguir:

- Concentração de íons cloreto inferior a 500 mg/l: Permitida a aplicação em concretos estruturais protendidos;
- Concentração de íons cloreto entre 500 mg/l e 1000 mg/l: Permitida a aplicação em concretos estruturais armados;
- Concentração de íons cloreto entre 1000 mg/l e 4500 mg/l: Permitida a aplicação em concreto sem fins estruturais.

Desta maneira, para efeito de comparação, a Tabela 8 apresenta parâmetros de normas e códigos internacionais, juntamente com os da referida norma brasileira.

Tabela 8 - Parâmetros de qualidade de água de amassamento adotados em diferentes países

Parâmetro	Unidade	Brasil [3]	EUA [4]	Reino Unido [1]	Austrália [1]	Índia [2]
<b>Cor</b>	-	Amarelo Claro Incolor <sup>a</sup>				
<b>Odor</b>	-	Sem cheiro		Sem cheiro		
<b>pH</b>	-	Mínimo de 5	Mínimo de 5	Mínimo de 4	Mínimo de 5	Mínimo de 6
<b>Detergentes</b>	-	Deve sumir em 2 minutos		Deve sumir em 2 minutos		
<b>Sólidos Totais</b>	mg/l	Máximo de 50000	Máximo de 50000	Máximo de 1% do total de agregados		Máximo de 2000
<b>Óleo gorduras<sup>e</sup></b>	mg/l	Traços visíveis	Máximo de 50	Traços visíveis	Máximo de 50	
<b>Cloretos</b>	mg/l	Máximo entre 500-4500, dependendo da armadura	Máximo entre 500-1000, dependendo da armadura	Máximo entre 500-4500, dependendo da armadura	Máximo de 0,8 kg/m <sup>3</sup> de concreto	Máximo de 500
<b>Nitratos</b>	mg/l	Máximo de 500		Máximo de 500	Máximo de 500	
<b>Sulfatos</b>	mg/l	Máximo de 2000	Máximo de 3000	Máximo de 2000	Máximo de 500	Máximo de 400
<b>Alcalinidade Total</b>	mg/l	Máximo de 1500	Máximo de 600	Máximo de 1500		
<b>Fosfatos</b>	mg/l	Máximo de 100		Máximo de 100	Máximo de 100	
<b>Chumbo</b>	mg/l	Máximo de 100		Máximo de 100	Máximo de 100	
<b>Zinco</b>	mg/l	Máximo de 100		Máximo de 100	Máximo de 100	
<b>Açucares</b>	mg/l	Máximo de 100	Máximo de 100	Máximo de 100	Máximo de 100	

Notas:

[1] - Fonte: (ABNT, 2009)

[2] - Fonte: (CCAA, 2007)

[3] - Fontes: (CCAA, 2007); (PECHE, *et al.*, 2015)

[4] - Fonte: (PECHE, *et al.*, 2015)

Comparando-se as normas técnicas apresentadas, nota-se que a norma brasileira é a mais abrangente em termos de requisitos mínimos de qualidade que a água deve atender para aplicação em concretos. Percebe-se também que as normas brasileira e britânica

possuem limites idênticos, apenas tendo como exceção o limite associado a sólidos totais. Já no caso da norma australiana, nota-se que esta define menos requisitos que a norma brasileira, como por exemplo, não define limite para sólidos totais. Contudo, para os limites por ela definidos, percebe-se linearidade com as normas brasileira e britânica. Por fim, em relação às normas americana e indiana, nota-se que estas são menos rígidas no tocante a requisitos de qualidade da água, visto que estabelecem poucos parâmetros a serem atendidos. Em especial, além da menor quantidade de parâmetros, os limites indicados na norma indiana são inferiores às demais.

### *2.7.1. Reuso de Águas Cinzas*

Dentro desse panorama, algumas pesquisas foram desenvolvidas com objetivo de estudar os efeitos da aplicação de águas reuso nas propriedades físicas e químicas do concreto. GHRAIR, *et al.* (2016), por exemplo, utilizaram águas cinzas em seu trabalho, definindo-as como efluentes advindos de lavagem de roupas, banheiras, chuveiros e lavatórios. Desta maneira, excluem-se os esgotos vindos de pias de cozinha, lavadoras de louças e bacias sanitárias. Para efeito de comparação, foi utilizada água potável como referência, água cinza in natura, e água cinza tratada. O cimento empregado foi do tipo pozolânico, e em termos de agregados foram empregadas duas frações granulométricas tanto de brita quanto de areia. O resultado das análises realizadas nas águas cinzas são apresentados na Tabela 9.

Com relação ao seu desempenho mecânico no estado endurecido, foram realizados ensaios de compressão. Não foram observadas diferenças significativas entre a matriz de referência e a constituída por água cinza tratada. Contudo, para o caso da matriz com água cinza in natura ocorreu uma perda de resistência da ordem de 10%. Este decréscimo de resistência confirma o preconizado em CCAA (2007) para águas de reuso.

Adicionalmente, foram realizados também ensaios de absorção de água e imagens da amostra fraturada em microscópio eletrônico. Em termos de microscopia, não foram observadas diferenças significativas entre as três matrizes no tocantes a ocorrência de vazios. Tal fato é corroborado também pelo resultado do ensaio de absorção, não tendo sido notada diferenças significativas neste teste, que é um importante indicador de durabilidade.

Tabela 9 - Resultado da análise das águas cinzas adaptado de GHRAIR, *et al* (2016)

Parâmetros	Unidade	Água Cinza <i>in natura</i>	Água Cinza Tratada
Sólidos em Suspensão	mg/l	436	2
Sólidos Dissolvidos	mg/l	980	803
DQO	mg/l	900	6,97
DBO <sub>5</sub>	mg/l	536	2,98
Cl	mg/l	243	208
SO <sub>4</sub>	mg/l	222	137
NH <sub>3</sub>	mg/l	24	4,5>
pH	-	7,5	7,9
Coliformes	MPN/100ml	1,70E+05	<1

PECHE, *et al.* (2015) também pesquisaram os efeitos da água cinza em materiais cimentícios. Neste trabalho foram empregadas águas cinzas de duas fontes de geração distintas, sendo uma de edificação residencial e a outra hoteleira. Em termos práticos, os resultados apresentados pelos autores são semelhantes aos discutidos anteriormente em GHRAIR, *et al.* (2016) e CCAA (2007).

### 2.7.2. Reuso de Águas Negras

Apesar dos bons resultados apresentados com a aplicação de águas cinzas, sua aplicabilidade prática fica um tanto quanto comprometida. Isto se dá pelo fato de que os sistemas de esgotamento sanitário convencionais no Brasil acabam por juntar águas cinzas aos despejos sanitários de vasos sanitários, pias de cozinha e demais efluentes. Tal confluência muitas vezes se dá ainda nos tubos de queda, comprometendo assim qualquer chance de captação isolada deste tipo de água.

A partir do disposto, e levando-se em conta os grandes volumes de água consumidos para a produção de concreto brasileira, passa a ser necessário avaliar a viabilidade de emprego de águas negras tratadas no contexto do reuso para aplicação em concretos.

TAY & YIP (1987) estudaram a viabilidade do emprego de águas negras tratadas pela estação de Jurong, em Cingapura, focando exclusivamente em ensaios de resistência mecânica à compressão. A substituição da água potável pela de reuso se deu nos percentuais de 25, 50, 75 e 100%. Foram realizados ensaios de curta duração aos 3, 7 e



28 dias de cura, ensaios com duração maior, de 3, 6 e 12 meses de cura, além dos ensaios de caracterização físico-química da água recuperada pelos processos de tratamento. Em termos de qualidade de água, os parâmetros atingiram valores dentro dos limites estabelecidos nas diversas literaturas pertinentes. Já no que tange ao desempenho mecânico sob compressão axial, os resultados para a água de reuso foram superiores aos com água potável.

Já no caso de EL-NAWAWY & AHMAD (1991), o efluente tratado possui características físico-químicas que excediam os limites apresentados nas principais bibliografias técnicas, com destaque para sólidos dissolvidos, íons cloreto e sulfato. O autor associa este fato à contaminação do sistema de tratamento por água salobra proveniente do solo, sendo uma particularidade da região de estudo, em Doha, no Catar. O estudo considerou a substituição gradual da água potável pelo efluente tratado nos seguintes percentuais: 20, 40, 60, 80 e 100%. Este trabalho avaliou parâmetros de resistência à compressão axial, e tração por compressão diametral para idades de cura de 7 dias, 28 dias e 1 ano. No tocante à qualidade da água, o estudo constatou que para uma composição de 60% de água potável e 40% de água de reuso os parâmetros mínimos de qualidade foram atendidos. No que diz respeito aos ensaios mecânicos, o desempenho dos materiais diminuiu com o aumento da parcela de efluente tratado na mistura, tanto nos parâmetros compressão como nos de tração, sendo 20% de substituição o limite para obtenção de resultados abaixo dos limites prescritos. É importante notar também que a relação entre as resistências à compressão e tração tiveram pouca variação, independente concentração e do tempo de cura.

NORUZMAN, *et al.* (2012) estudou o emprego de efluentes domésticos tratados para a produção de concreto em termos de trabalhabilidade, tempo de pega, resistência à compressão e permeabilidade. Os parâmetros de qualidade do efluente supracitado ficaram abaixo dos limites preconizados nas principais literaturas relacionadas ao tema. No tocante a propriedades no estado fresco, tanto tempo de pega quanto slump atingiram valores satisfatórios, tendo a pega ocorrido 10 minutos mais cedo em comparação à matriz de referência, e o abatimento ficou dentro da margem projetada. Já para os parâmetros da matriz em seu estado endurecido, os valores de resistência mecânica à compressão tiveram uma redução de pouco mais de 5% em relação ao emprego de água potável para idades de até 60 dias, enquanto que, em termos de permeabilidade do material o comportamento do concreto com efluente tratado em comparação com água potável pode ser visto a seguir.

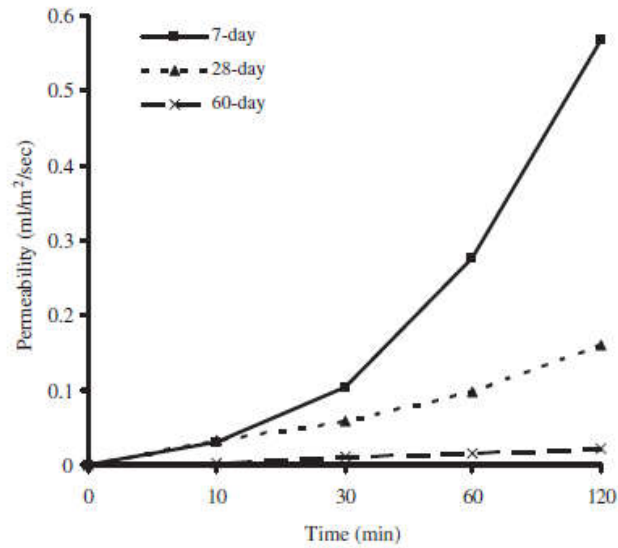


Figura 7: Gráficos de permeabilidade no tempo para diferentes idades utilizando matriz com água potável (NORUZMAN, *et al.*, 2012).

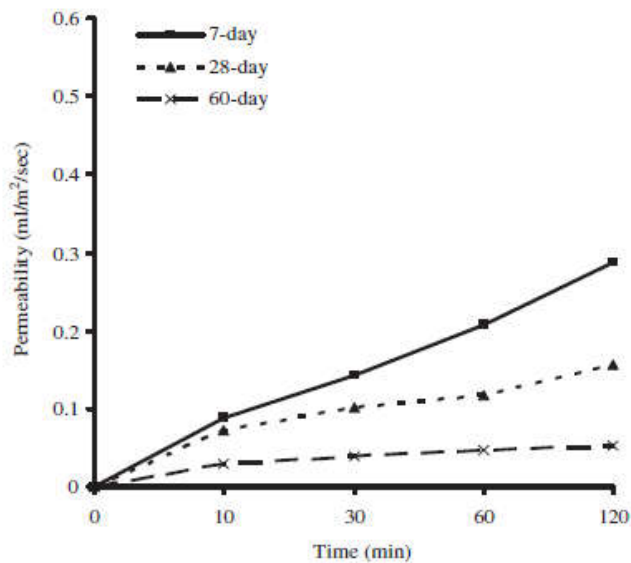


Figura 8 - Gráficos de permeabilidade no tempo para diferentes idades utilizando matriz com efluente doméstico tratado (NORUZMAN, *et al.*, 2012).

Uma abordagem mais aprofundada deste tema foi realizada por ASADOLLAHFARDI, *et al.* (2016). Este trabalho utilizou técnicas analíticas para avaliação da matriz, com destaque para Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Dispersão de Energia por Raios-X (EDX). Os resultados destes ensaios são apresentados na Figura 9, na Tabela 10 e na Tabela 11.

Observando-se o resultado da Microscopia Eletrônica de Varredura, nota-se uma diferença entre as matrizes em estudo no tocante à presença de vazios. Fica clara presença de uma porosidade maior no caso do efluente tratado. Além disso, a partir do ensaio EDX, nota-se um aumento nos índices de Enxofre, Cloro e Sódio em função da natureza da água de reuso.

É importante ressaltar que este autor utilizou o efluente tratado sem cloração, o que, sob a ótica da NBR 13969, não atende aos requisitos de utilização no contexto brasileiro.

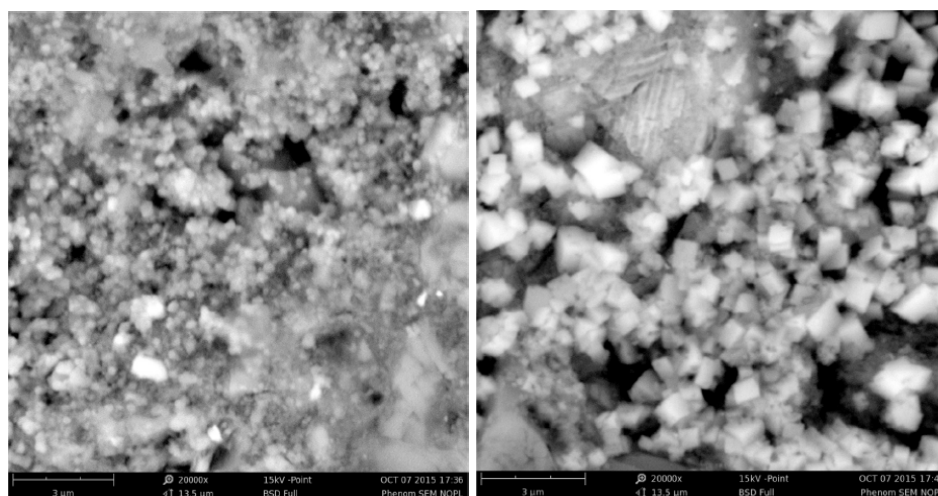


Figura 9 - Microscopia eletrônica de varredura - à esquerda: concreto com água potável; à direita: concreto com água de reuso (ASADOLLAHFARDI, *et al.*, 2016)

Tabela 10 - Resultado do EDX - concreto com água potável (adaptado de ASADOLLAHFARDI, *et al.*, 2016)

Percentual de elementos no concreto com 350 kg/m <sup>3</sup> de cimento utilizando água potável				
Número do Elemento	Símbolo do Elemento	Nome do Elemento	Concentração (%)	Erro (%)
20	Ca	Cálcio	7.9	0.7
14	Si	Silício	12.9	0.5
8	O	Oxigênio	72.6	0.7
13	Al	Alumínio	2.0	1.7
19	K	Potássio	0.8	2.7
26	Fe	Ferro	0.4	6.6
12	Mg	Magnésio	0.6	5.9
16	S	Enxofre	0.2	6.6
17	Cl	Cloro	0.0	12.6
11	Na	Sódio	1.5	34

Tabela 11 - Resultado do EDX - concreto com água de reuso (adaptado de ASADOLLAHFARDI, *et al.*, 2016).

Percentual de elementos no concreto com 350 kg/m <sup>3</sup> de cimento utilizando água de reuso				
Número do Elemento	Símbolo do Elemento	Nome do Elemento	Concentração (%)	Erro (%)
20	Ca	Cálcio	12.1	0.7
14	Si	Silício	7.7	0.9
8	O	Oxigênio	74.2	1.0
13	Al	Alumínio	1.7	2.7
19	K	Potássio	0.7	4.3
26	Fe	Ferro	0.6	8.0
12	Mg	Magnésio	1.2	5.0
16	S	Enxofre	0.4	6.2
17	Cl	Cloro	0.2	12.6
11	Na	Sódio	1.1	8.9

A partir do exposto, para efeito de estudo acerca da viabilidade da pesquisa, foram compilados dados de diferentes trabalhos com emprego de águas negras tratadas, e estes foram confrontados com os limites preconizados na NBR 15900-1 (ABNT, 2009). O resultado do processo descrito é apresentado na Tabela 12.

Quando observados os dados compilados na Tabela 12, nota-se que os dados de parâmetros de qualidade de água de reuso disponíveis, quase em sua totalidade, ficam abaixo dos limites definidos pela NBR 15900-1 (2009). A única ressalva diz respeito ao trabalho de EL-NAWAWY & AHMAD (1991), especificamente no teor de cloretos. Este parâmetro na norma técnica possui diferentes limites, de acordo com a aplicação do concreto. Desta forma, para a concentração obtida, a água poderia ser usada apenas em concreto armado e simples, sendo vedado seu emprego, neste caso, em concretos protendidos ou grautes.

Diante do exposto, observa-se que os trabalhos realizados em outros países atenderam ao preconizado pela NBR 15900-1 (2009). Com isso, torna-se essencial estudar uma água de reuso brasileira não apenas sob a ótica da norma supracitada, mas levando em conta também aspectos sanitários que regem manipulação deste tipo de insumo.

Tabela 12 - Dados de águas negras de reuso, em relação à NBR 15900-1 (2009)

Parâmetro	Unidade	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	Limites NBR 15900 [12]	
pH	-	7,1	7,1	7,21	7,7	9,43 7,00	-	8,1	7,48	7,2	7,8	7,9	Mínimo de 5	
Sólidos Total	mg/l	670	3,790	1121	200	581,1 630,9	-	520	1000	89,5	476,6	644,8	Máximo de 50000	
Cloretos	mg/l	240	1289	7,5	55	271 - 269	128	189	11,98	78,3	190,3	101	Máximo entre 500-4500, dependendo da armadura	
Nitratos	mg/l	2,7	0,5	7,5	14	79,9 82,1	-		2,1	7,4			Máximo de 500	
Sulfatos	mg/l	56	763	22,6	180	106 - 107	104	65	10,49		31,7		Máximo de 2000	
Alcalinidade Total	mg/l	110	154	159		11,4 20,3	-		361	62		152,8	200	Máximo de 1500
Fosfatos	mg/l					5,6 - 10,3				4,7	2,0			Máximo de 100
Chumbo	mg/l		0,065	0,003		< 0,05		0						Máximo de 100
Zinco	mg/l	0,274	0,096	0,21		< 0,05		0	0,046					Máximo de 100

Notas:

[1] - Fonte: (TAY & YIP, 1987)

[2] - Fonte: (EL-NAWAWY & AHMAD, 1991)

[3] - Fonte: (NORUZMAN, *et al.*, 2012)

[4] - Fonte: (ASADOLLAHFARDI, *et al.*, 2016)

[5] - Fonte: (SARICIMEN, *et al.*, 2008)

[6] - Fonte: (CEBECI & SAATICI, 1989)

[7] - Fonte: (SARKAR, *et al.*, 2014)

[8] - Fonte: (LEE, *et al.*, 2001)

[9] - Fonte: (PIRES, *et al.*, 2015)

[10] - Fonte: (SILVA, 2011)

[11] - Fonte: (SILVA, *et al.*, 2016)

[12] - Fonte: (ABNT, 2009)

## **2.8. Conclusões da revisão da literatura**

### *2.8.1. Aspectos técnicos*

Observando os resultados expostos na bibliografia técnica enunciada, identifica-se que as estações de tratamento de esgotos sanitários possuem uma eficiência elevada no que diz respeito à remoção de poluentes, de modo que o efluente tratado proveniente destas instalações possui um alto grau de refinamento, o que o credencia como uma alternativa iminente para implementação do reuso de águas na produção de concretos. Outra questão associada a esta temática diz respeito à redução da pegada hídrica inerente à produção do concreto, visto que se considerado o potencial de reuso nos consumos de água reais e virtuais pertinentes a este processo, nota-se que há possibilidade de se reduzir a pegada hídrica em quase 50%, reduzindo assim o impacto ambiental associado às etapas produtivas deste material.

Em termos de estudos de viabilidade técnica e econômica associada a implementação do reuso de efluentes sanitários, a bibliografia apresenta resultados expressivos, indicando rentabilidade no reuso destas águas associada ao transporte das mesmas em longas distâncias, conforme já enunciado.

No tocante à composição do efluente tratado, diferentemente da água potável, há a presença de elementos característicos associados à origem sanitária do material, com destaque para matéria orgânica e amônia, os quais alteram o comportamento da matriz produzida com este tipo de água de reuso, quando comparada com uma matriz produzida com água potável.

De acordo com a bibliografia técnica, no caso da matéria orgânica, o efeito associado a sua presença é o retardamento do tempo de pega, visto que este material se apresenta em suspensão e dissolvido, interferindo assim na pega do cimento. Outro efeito associado à presença da matéria orgânica na matriz cimentícia é o aumento da porosidade da matriz em seu estado endurecido, fruto da decomposição desta matéria ao longo das reações de hidratação. A literatura indica que degradação se dá com o passar do tempo, de modo que os espaços anteriormente ocupados pela matéria orgânica se transformam em poros.

Com relação à aplicação de amônia em matrizes cimentícias, identifica-se que este composto é inserido em matrizes onde há o interesse de se reduzir o calor liberado ao

longo das reações de hidratação do cimento, tendo boa aplicabilidade em estruturas massivas de concreto, onde o calor de hidratação pode gerar gradientes térmicos capazes de fissurar e enfraquecer o material. Uma vez que a amônia também é um subproduto existente em efluentes provenientes de estações de tratamento de esgoto, tona-se imprescindível avaliar seu comportamento no contexto do reuso destas águas em matrizes cimentícias.

Além disso, a literatura técnica apresenta resultados bem sucedidos de comportamento mecânico de concretos produzidos com águas de reuso advindas de esgotos sanitários tratados. Ressalta-se que a totalidade dos trabalhos abordou esta temática sob o ponto de vista da resistência à compressão axial, apresentando resultados homogêneos em relação concretos produzidos com águas potáveis.

Por outro lado, torna-se importante avaliar os efeitos da aplicação deste tipo de água de reuso no concreto em termos de cinética de hidratação, dados os elementos que compõem estes efluentes, e a conseqüente correlação entre estes e o avanço das reações de hidratação do cimento.

Por fim, dado que os resultados apresentados na literatura técnica indicaram a afinidade no emprego de águas de reuso provenientes de efluentes sanitários tratados enquanto água de amassamento do concreto, vislumbrou-se a possibilidade de se aplicar o reuso de águas também no procedimento de cura dos concretos.

#### *2.8.2. Aspectos normativos*

Observando-se o reuso de águas do ponto de vista prático, nota-se que no Brasil tal prática ainda é bastante incipiente. Por outro lado, as legislações que estão sendo publicadas indicam um rumo no sentido de se intensificar estas práticas nos usos onde há compatibilidade entre a água de reuso e a atividade dependente de recursos hídricos, bem como estabelecer critérios objetivos que assegurem a viabilidade de emprego destas.

Neste sentido, destaca-se a NBR 15900 (2009), que trata sobre a qualidade de água requerida para o amassamento do concreto. Apesar de a referida normativa introduzir a água de reuso proveniente de estação de tratamento de esgotos como uma alternativa, esta legislação enuncia a ausência de antecedentes suficientes que garantissem o uso generalizado deste tipo de água.

Ademais, a NBR 13969 (1997) é a norma brasileira que delibera, de forma geral, sobre o reuso de águas. Esta normativa preconiza limites de qualidade mínimos que as águas de reuso devem atender, de modo a garantir a segurança sanitária associada a manipulação ou contato com esta água.

Desta maneira, torna-se importante estudar os efeitos da aplicação de águas de reuso em concreto também sob a perspectiva da NBR 15900 (2009), bem como garantir que a mesma atenda aos requisitos mínimos de segurança sanitária conforme NBR 13969 (1997).

### *2.8.3. Análise do cenário brasileiro*

Levando-se em conta a distribuição de reservas de água potável inversamente proporcional à concentração demográfica no Brasil, torna-se urgente implementar soluções que trabalhem no sentido de se preservar a água potável para seus usos mais nobres, visto tratar de um bem de consumo de valor inestimável para todos os seres vivos. Considerando-se a premissa de emprego de águas de reuso provenientes de estações de tratamento de esgotos em usinas de produção de concreto, nota-se que há uma disponibilidade de efluentes sanitários com potencial reuso capaz de suprir com folga toda a demanda de água associada a essa atividade industrial. Desta forma, analisando-se holisticamente os aspectos técnicos e normativos inerentes à tese em tela associados ao cenário nacional, identifica-se um potencial significativo no desenvolvimento da presente pesquisa, no sentido de agregar conhecimento técnico à bibliografia, bem como fomentar a discussão em torno do reuso de águas no Brasil.



### **3. Programa Experimental**

Conforme já apresentado, a pesquisa tem por objetivo estudar os efeitos da aplicação de águas de reuso como água de amassamento em matrizes cimentícias. Desta forma, o planejamento experimental iniciou-se a partir da obtenção e caracterização dos materiais a serem aplicados na pesquisa. A segunda etapa consistiu no estudo de dosagem, onde foram definidas as proporções entre os materiais que integram o concreto e a pasta de cimento elaborados. Por fim, foram realizados ensaios técnicos específicos nas matrizes produzidas no sentido de quantificar e qualificar as propriedades do material em termos de cinética de hidratação, microestrutura e desempenho mecânico. A Figura 10 apresenta o fluxograma do programa experimental desenvolvido neste trabalho, que será detalhado nesse capítulo.

Antes, porém, é importante identificar as nomenclaturas dos diferentes tipos de água adotadas no presente trabalho. Desta forma, serão adotadas as seguintes siglas durante o desenvolvimento da pesquisa:

- REF: Sigla que representa a utilização de água potável;
- PRIM: Sigla que representa o efluente sanitário obtido após tratamento primário dos esgotos;
- SEC: Sigla que representa o efluente obtido ao final do tratamento secundário dos esgotos;
- MIX: Sigla que representa o efluente resultante da mescla das águas PRIM e SEC.

Como se sabe, os processos de tratamento, bem como as próprias características dos esgotos, podem gerar certo grau de variabilidade nos parâmetros de qualidade das águas de reuso obtidas através destes. Neste contexto, a presente pesquisa optou por estudar a água MIX, composta pela mescla entre as águas PRIM e SEC, no sentido de agregar à pesquisa a variabilidade prática que pode ocorrer no âmbito dos tratamentos de efluentes sanitários.

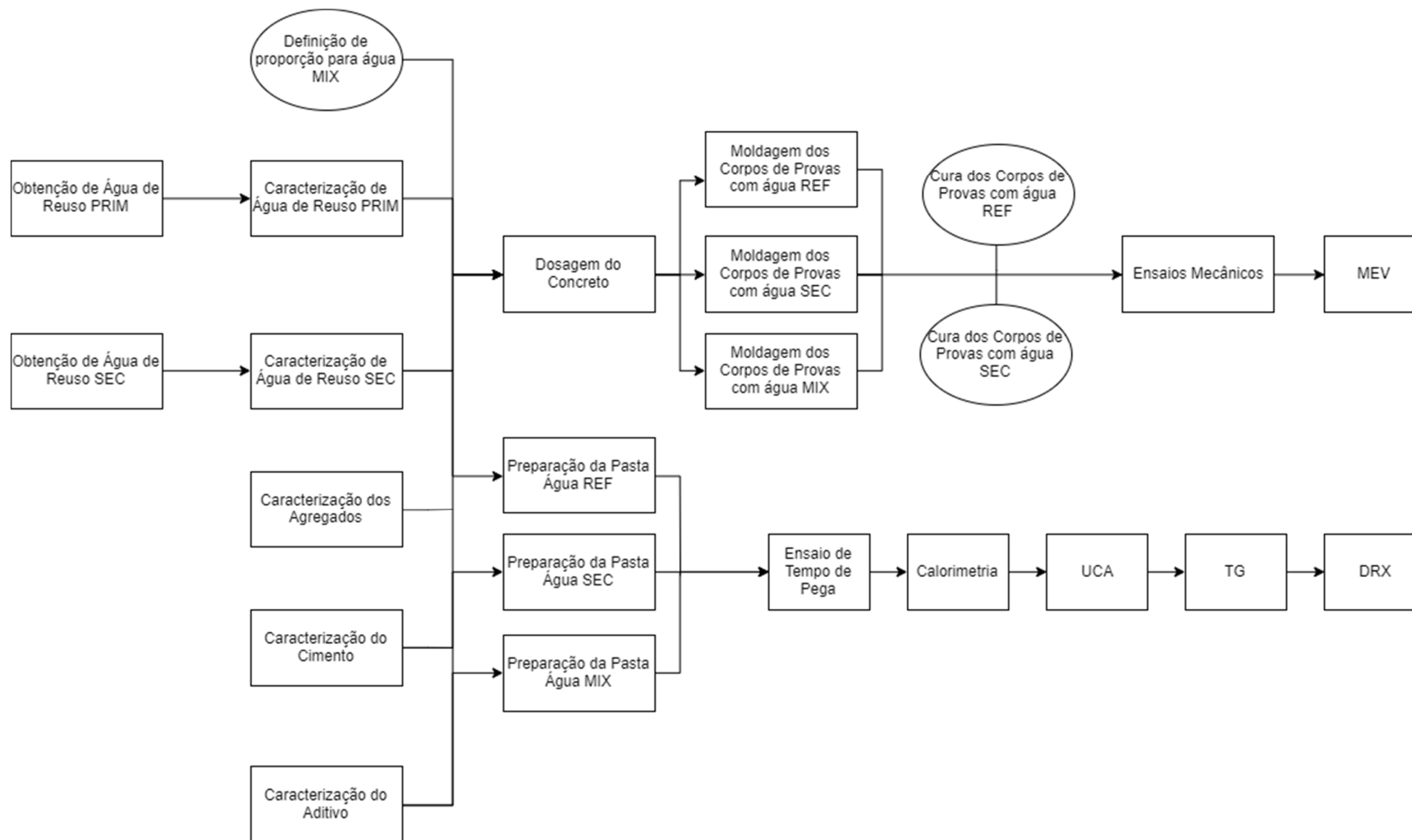


Figura 10: Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa contemplando todas as etapas que serão descritas nesse capítulo.

### 3.1. Materiais

Para o desenvolvimento das matrizes de referência, bem como das matrizes modificadas com água de reuso, serão utilizados os seguintes insumos:

- Cimento Portland
- Areia
- Brita
- Superplastificante
- Água Potável
- Águas de Reuso

#### 3.1.1. Cimento Portland

O cimento empregado nesta pesquisa foi do tipo CPIIE-40, produzido pela empresa Votorantim Cimentos.

Sob a ótica da NBR 16697 (2018), a qual delimita os requisitos mínimos a serem atendidos pelo cimento, o cimento empregado na pesquisa possui as seguintes características:

- Clínter + Gesso: (51 - 94)%
- Escória: (6 - 34)%
- Filer Calcário: (0 - 15)%

A caracterização do cimento foi obtida a partir do boletim de ensaios técnicos referente ao lote empregado neste estudo emitido pela Votorantim Cimentos, produtora deste material. A Tabela 13 apresenta os resultados de ensaios químicos aos quais o cimento foi submetido, enquanto a Tabela 14 apresenta resultados de ensaios físicos aplicados ao mesmo.

Observando-se os resultados fornecidos pelo fabricante, nota-se que o cimento utilizado na pesquisa atende satisfatoriamente aos requisitos normativos apresentados pela NBR 16697 (2018).

Tabela 13 - Caracterização química do cimento, onde PF simboliza a perda ao fogo e RI o resíduo insolúvel associado ao cimento empregado no estudo (VOTORANTIM, 2019)

<u>Ensaio Químico</u>	<b>Teores (%)</b>			
	<b>PF</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>RI</b>
<i>Média</i>	4,29	3,14	3,77	0,81
<i>Desvio-Padrão</i>	0,11	0,20	0,08	0,11
<i>Limite NBR 16697</i>	≤ 8,5	N/A	≤ 4,5	≤ 5,0

Tabela 14 - Caracterização física do cimento (VOTORANTIM, 2019)

<u>Ensaio Físico</u>	<b>Finura (%)</b>		<b>Blaine</b>	<b>Tempo de Pega</b>	
	<b>#200</b>	<b>#400</b>	<b>cm<sup>2</sup>/g</b>	<b>Início (min)</b>	<b>Fim (min)</b>
<i>Média</i>	0,29	1,45	5288	185	245
<i>Desvio-Padrão</i>	0,05	0,11	32	7	7
<i>Limite NBR 16697</i>	≤ 10,0	N/A	≥ 2800	≥ 60	≤ 600

### 3.1.2. Agregados

No estudo foram empregados agregados de origem natural, tanto miúdos quanto graúdos. No caso específico dos agregados graúdos, foram empregadas britas tipo "0" (zero).

### 3.1.3. Aditivos

Para adequação do traço empregado na pesquisa, foi utilizado o aditivo superplastificante de terceira geração Glenium 51, produzido pela empresa BASF. A seguir, na Tabela 15 são apresentados os dados técnicos referentes a este aditivo.

Tabela 15 - Glenium 51: dados técnicos (BASF, 2019)

<b>Função</b>	Aditivo super plastificante de terceira geração para concreto
<b>Base Química</b>	Éter policarboxílico
<b>Aspecto</b>	Líquido
<b>Cor</b>	Branco Turvo
<b>Ação Secundária</b>	Redutor de Água
<b>Solubilidade em Água</b>	Total
<b>pH</b>	5 - 7
<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,067 - 1,107
<b>Sólidos (%)</b>	28,5 - 31,5
<b>Viscosidade (cps)</b>	< 150

### 3.1.4. Água Potável

Como insumo de referência foi utilizada água da torneira proveniente da rede de abastecimento da concessionária (CEDAE-RJ).

### 3.1.5. Águas de Reuso

A obtenção da água de reuso foi realizada a partir do Centro Experimental de Saneamento Ambiental da UFRJ (CESA/UFRJ). Este complexo conta com unidades de tratamento de efluentes, e, a partir de um desvio da elevatória da rede da CEDAE, recebe e trata efluentes de todo o campus da ilha do fundão em menor escala. Em geral, o CESA/UFRJ conta sistemas de tratamento que englobam etapas preliminares, primárias e secundárias, contando inclusive com diferentes técnicas de tratamento em cada etapa. A planta de tratamento contemplada no estudo é composta pelas etapas de gradeamento, decantação primária, sistema de lodos ativados, decantação secundária e filtração por areia. O processo completo é apresentado na Figura 11 em forma de fluxograma, onde é possível identificar as retiradas das águas de reuso contempladas nesta pesquisa.

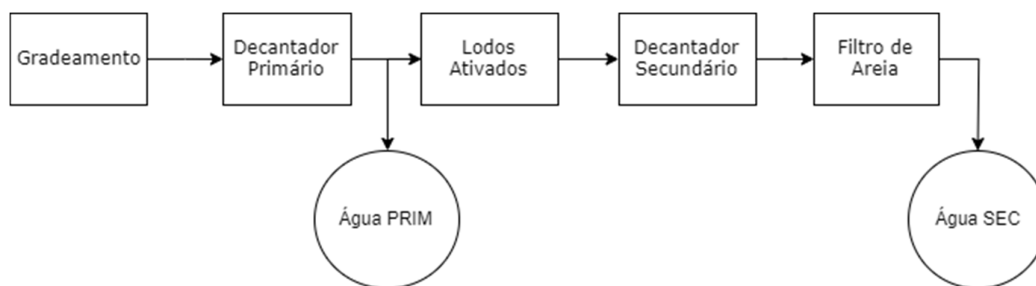


Figura 11 – Fluxograma da planta de tratamento de efluentes sanitários estudada, indicando os pontos de retiradas das águas de reuso PRIM e SEC.

Sendo assim, para o presente trabalho foram coletados dois tipos distintos de água, com níveis de tratamento diferentes. A primeira água, denominada água “PRIM”, constituiu-se do efluente submetido apenas ao tratamento primário de Decantação, apresentado na Figura 12.



Figura 12 - Sistema de decantação primária do CESA UFRJ

A segunda água de reuso que foi empregada na pesquisa, denominada água “SEC”, é proveniente do tratamento secundário pelo sistema de Lodos Ativados, de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 11. A estrutura de Lodos Ativados é apresentada na Figura 13.

Além desses tratamentos, as águas de reuso utilizadas na pesquisa foram submetidas, por questões de segurança sanitária, a desinfecção por cloração. A cloração se configura como um tipo de tratamento terciário, e é fundamental para eliminação de riscos aos usuários, visto a possibilidade de contato direto com a mesma ao longo das atividades. Para realização da desinfecção, foi utilizada água sanitária com concentração de hipoclorito de sódio ( $\text{NaClO}$ ) de 2,5% p/p. Tal procedimento foi realizado de forma gradual, sempre acompanhado por análises de colimetria, de forma que fosse adicionada apenas a quantidade de cloro necessária a completa desinfecção da água.

Desta maneira, para um volume coletado de 200 l do sistema de lodos ativados (Água SEC) foram necessários 60 ml de água sanitária com concentração de hipoclorito de sódio de 2,5% p/p. No que diz respeito ao decantador primário (Água PRIM), foram coletados 30 litros, sendo necessários os mesmos 60 ml de solução aquosa de hipoclorito de sódio 2,5% p/p. Assim sendo o consumo relativo de hipoclorito de sódio associado a cada uma das águas foi o seguinte:

- Água PRIM:  $\frac{60 \text{ ml} \times 2,5\%}{30 \text{ l}} = 50 \text{ mg}$  de NaClO para cada litro de água;
- Água SEC:  $\frac{60 \text{ ml} \times 2,5\%}{200 \text{ l}} = 7,5 \text{ mg}$  de NaClO para cada litro de água.



Figura 13 - Sistema de lodos ativados do CESA UFRJ

## 3.2. Metodologia empregada na Caracterização dos Materiais

### 3.2.1. Areia e Brita

Com finalidade de caracterização da areia e da brita, esses materiais foram submetidos a ensaios de granulometria, massa específica e absorção total.

#### 3.2.1.1. Granulometria

Para a classificação granulométrica destes agregados foi seguida a NBR NM 248 (ABNT, 2003). As amostras de agregados são secas em estufa à temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  por 24 horas e pesadas após a secagem. O material resultante deve ser peneirado, em ordem crescente de peneiras, cujas malhas variem sua abertura entre 150  $\mu\text{m}$  e 12,5 mm.

### 3.2.1.2. Massa Específica e Absorção Total

Para a brita, tanto o valor de massa específica quanto o de absorção de água foram obtidos seguindo a NBR NM 53 (ABNT, 2009a).

Para o caso da areia, o parâmetro de massa específica foi obtido segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009b), enquanto que a obtenção do valor referente a absorção de água atendeu ao preconizado na NBR NM 30 (ABNT, 2001).

### 3.2.1.3. Teor de Umidade

A estimativa do teor de umidade natural dos agregados empregados no estudo se deu conforme procedimento descrito por ARIAS, *et al.* (2015). A técnica consiste em submeter uma pequena amostra do material a uma fonte de calor, que o distribui uniformemente ao longo da amostra. Salienta-se que durante este processo, a amostra fica posicionada sobre uma balança com precisão de 0,001 g, de modo a registrar as variações de massa da amostra associadas à perda de sua umidade natural.

Para este estudo foi utilizado um equipamento analisador de umidade, o qual possui uma balança acoplada a uma fonte de calor, da marca Shimadzu, modelo MOC63u do NUMATS/COPPE/UFRJ, mostrado na Figura 14. Dado que o parâmetro de interesse do ensaio era apenas o valor global de umidade natural dos agregados, optou-se por empregar uma massa de  $60 \pm 5$  gramas, submetida a uma temperatura de  $200^{\circ}\text{C}$ . Como critério de parada do ensaio, que representa a condição onde se admite que ocorreu constância de valor na massa medida, adotou-se uma variação de massa de 0,04%.





Figura 14 - Equipamento analisador de umidade localizado no NUMATS/COPPE

### 3.2.2. *Águas de reuso*

Para efeitos de caracterização dessa água, foram realizados ensaios que determinem os parâmetros preconizados pela NBR 15900 (ABNT, 2009), que trata sobre água de amassamento para concreto, e pela NBR 13969 (ABNT, 1997), que em seu texto trata sobre critérios mínimos de tratamento para reuso de águas cujo emprego demande contato humano. Esses parâmetros já foram comentados no item 2.7 e foram determinados por ensaios específicos.

As análises foram realizadas seguindo métodos descritos na Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, 20nd edition (AWWA, 1998) e HACH Company (HACH, 2013), de acordo com o mostrado na Tabela 16.

Salienta-se os ensaios de cátions/ânions dissolvidos e alcalinidade foram desenvolvidos no Laboratório de Análise Ambiental e Mineral (LAM-IQ/UFRJ), enquanto que os demais ensaios listados foram desenvolvidos no Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente (LEMA-DRHIMA/POLI/UFRJ).

Tabela 16 - Parâmetros analisados na água de reuso e os respectivos métodos utilizados

<b>Parâmetro</b>	<b>Método Analítico</b>	<b>Referência</b>
pH	4500 B - Potenciométrico	AWWA (1998)
Turbidez	8237 –Absorptometric Method	HACH (2013)
Sólidos Totais	2540 B - Gravimétrico	AWWA (1998)
Sólidos Totais Fixos	2540 B - Gravimétrico	AWWA (1998)
Sólidos Totais Voláteis	2540 B - Gravimétrico	AWWA (1998)
Sólidos Suspensos Totais	2540 D - Gravimétrico	AWWA (1998)
Sólidos Suspensos Fixos	2540 D - Gravimétrico	AWWA (1998)
Sólidos Suspensos Voláteis	2540 D - Gravimétrico	AWWA (1998)
Colimetria	9223 – Método Enzimático do Substrato Cromogênico	AWWA (1998)
Alcalinidade	2320 B – Método titulométrico	AWWA (1998)
Cátions/Ânions	4110 - Cromatografia de Íons	AWWA (1998)

### **3.3. Dosagem e Produção das Matrizes Cimentícias**

Nessa pesquisa, foram utilizadas matrizes na forma de pasta de cimento e de concreto, que terão diferentes metodologias de preparo da amostra, que serão descritos a seguir.

A pesquisa avaliou três tipos de água, sendo uma delas potável, como referência, e as outras duas de reuso. Uma vez que uma das espécies de reuso é proveniente de um tratamento primário (água PRIM), o que significa que a mesma possui um elevado grau de poluentes em sua composição, optou-se por não estudar o emprego integral desta água de reuso em substituição à água potável. Alternativamente, decidiu-se estudar uma mescla entre as águas PRIM e SEC, de modo a fornecer um resultado representativo à variabilidade que pode existir entre diferentes tipos de efluentes sanitários tratados em estações de tratamento de esgoto.

Por conseguinte, as matrizes foram produzidas empregando-se três tipos diferentes de água. Como referência foi utilizada água potável da rede de abastecimento, e ao longo deste trabalho toda e qualquer matriz que tenha em sua composição esta água foi designada pela sigla “REF”. Para o caso da água de reuso proveniente do tratamento secundário, as matrizes que a contenham foram indicadas pela sigla “SEC”. De forma análoga, as matrizes compostas por água de reuso proveniente da mistura entre as águas PRIM e SEC foi denominada pela sigla “MIX”.

Além do impacto da água de reuso empregada na mistura do concreto, este trabalho também estudou o efeito do emprego deste tipo de água como componente de cura. Para atingir este objetivo, os materiais moldados foram submetidos a dois tipos diferentes de cura submersa, sendo uma delas em água REF, e a outra em água SEC. De forma a evitar confusão com a água de amassamento utilizada, optou-se por denominar a matriz cujo processo de cura foi realizado em água potável (ou água REF) pela letra “P” e a matriz cujo processo de cura foi realizado em água de reuso (ou água SEC) pela letra “R”.

Sendo assim, uma matriz que utilizou água potável e foi curada em água potável denomina-se “REF P”, enquanto que uma matriz que utilizou água de reuso proveniente da mistura entre as águas PRIM e SEC e foi curada em água de reuso SEC denomina-se “MIX R”.

### *3.3.1. Definição da mescla entre as águas PRIM e SEC*

Preliminarmente ao estudo de dosagem das matrizes, a escolha da proporção de mistura entre as águas de reuso tem por objetivo encontrar uma água de produza resultados próximos aos limites preconizados pela NBR 15900. Como critério de avaliação, foi selecionado o ensaio de tempo de pega. O ensaio de tempo de pega é normatizado pela NM 65 (AMN, 2002a).

De acordo com a norma supracitada, em termos de tempo de pega, uma água de reuso é considerada própria para emprego em concreto se a diferença entre os resultados obtidos para tempos de início e fim de pega desta matriz e uma matriz de referência não for maior que 25%. Desta maneira, foram realizados uma série de ensaios de tempo de pega com diferentes proporções de mescla entre as águas PRIM e SEC estudadas, denominada água MIX, de modo a se definir a mistura que produz resultados próximos aos limites da NBR 15900.

### *3.3.2. Dosagem do concreto*

Para a dosagem da matriz de referência, optou-se por utilizar o método de dosagem recomendado pela ACI (*American Concrete Institute*). Sob as condições de desempenho mecânico e trabalhabilidade, este método se propõe a fornecer uma primeira aproximação do traço adequado para produção do concreto desejado. Desta forma, uma das premissas deste método é a verificação experimental dos parâmetros de trabalhabilidade e resistência mecânica projetados (ACI, 1991). Caso os critérios de dosagem definidos não

sejam atendidos, deve-se proceder a ajustes no traço, e repetir os experimentos até que se obtenha os parâmetros desejados.

O método ACI leva em conta algumas propriedades naturais dos materiais que compõe a matriz do concreto, dentre os quais se destacam a granulometria, massa específica e absorção dos agregados, além da relação entre água e cimento, representada pelo fator  $a/c$ . A partir da definição do *slump* requerido e da dimensão máxima do agregado graúdo foi determinada a quantidade de água de mistura do concreto. Em seguida, escolheu-se o fator  $a/c$  em função da classe de resistência do concreto. Uma vez estabelecidos a quantidade de água e o fator  $a/c$ , foi possível então calcular a quantidade de cimento necessária. Após, foi realizada a estimativa da quantidade de agregado graúdo em função do diâmetro máximo deste agregado e do módulo de finura da areia. Por fim, tendo em vista que todos os demais componentes do concreto encontram-se quantificados, a quantidade de agregado miúdo foi calculada a partir da diferença entre a massa específica do concreto fresco e as quantidades dos demais constituintes do concreto.

A estimativa inicial de dosagem obtida pelo método foi em seguida ajustada por meio de uma otimização do empacotamento entre a areia e a brita. O teste consistiu em preencher moldes cilíndricos, cujas dimensões são 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, com camadas alternadas de areia e brita. Em seguida, o molde já preenchido era submetido a 30 segundos de vibração com o auxílio da mesa vibratória. Por fim, a massa do molde já submetido à compactação era medida. Este procedimento foi aplicado a diferentes proporções de areia e brita, de modo a otimizar o empacotamento entre estes materiais. Desta forma, o ensaio que registrasse a maior massa compactada seria o de melhor grau de empacotamento entre os grãos.

Tendo em vista que a presença de superplastificante na dosagem, era de suma importância que o referido procedimento de mistura contemplasse o tempo de atuação deste agente químico em toda a mistura, que no caso em tela são 8 minutos. Com o auxílio de um misturador tipo betoneira, o presente trabalho utilizou o procedimento de mistura apresentado por RANGEL (2015), conforme etapas a seguir:

- a) Umedecimento do misturador com água, retirando-se o excesso com pano;
- b) Lançamento de todos os agregados graúdos e miúdos, misturando-os por 1 minutos, visando perfeita homogeneização;

- c) Adição de 50% da quantidade total de água, misturando-os por 1 minuto, visando melhor absorção pelos agregados;
- d) Adição do cimento, misturando-o por 1 minuto com os agregados, para correta homogeneização;
- e) Adição do restante da água, e todo o superplastificante;
- f) Mistura de todos os componentes por 8 minutos.

Ao final de cada procedimento de mistura, uma pequena amostra era submetida ao ensaio de abatimento de tronco de cone, conforme a NM 67 (1998), para verificação do atendimento ao requisito de trabalhabilidade adotado.

A partir da nova dosagem, o ensaio de abatimento de tronco de cone foi realizado, e o novo traço não atingiu a trabalhabilidade requerida. Com o intuito de atingir esta premissa, foi necessária a inserção do superplastificante na composição do concreto. Este insumo age no sentido de assegurar que a água dosada seja empregada em sua totalidade na matriz, visto que esta água pode ficar aprisionada entre grãos de cimento em um fenômeno conhecido como floculação. Neste contexto, o superplastificante consegue atuar na melhora da trabalhabilidade do concreto, sem comprometer seu desempenho mecânico, visto que não há alteração no fator a/c.

Para cada uma das misturas estudadas (REF, SEC e MIX) foram moldados 3 corpos de prova para 3 idades diferentes (7, 14 e 28 dias), e duas condições distintas de cura, totalizando 18 amostras por mistura. Foram utilizados moldes cilíndricos, cujas dimensões são 7,5 cm de diâmetro e 15 cm de altura, os quais foram previamente lubrificados com uma fina camada de óleo para facilitar a desmoldagem.

Uma vez realizado o procedimento de mistura descrito anteriormente, os moldes cilíndricos já lubrificados eram posicionados sobre a mesa vibratória e preenchidos com o concreto em três camadas iguais. Cada uma das camadas foi submetida a adensamento mecânico através da mesa vibratória por cerca de 15 segundos sob uma frequência de 68 Hz.

Durante 24 horas os moldes preenchidos foram mantidos sob cobertores molhados, de modo a garantir que não houvesse perda de umidade dos corpos de prova para o ambiente. Passado este período, os corpos de prova foram desmoldados, identificados, e

colocados nas respectivas curas submersas em água REF ou em água SEC, onde permaneceram até que completassem as idades de ensaio.

### 3.4. Caracterização mecânica dos concretos

#### 3.4.1. Determinação do comportamento mecânico sob compressão uniaxial

Os ensaios de compressão foram realizados nas amostras de concreto moldadas conforme 3.3.2. Antes de se iniciar estes ensaios, foi necessário realizar a regularização das faces inferior e superior dos corpos de prova, em processo de faceamento em torno mecânico, no sentido de eliminar possíveis irregularidades que se formem no processo de moldagem. Para a ruptura das amostras experimentais das matrizes cimentícias na forma de concreto foi empregada uma prensa mecânica Shimadzu, modelo UH-F 1000 kN. A velocidade de carregamento que foi aplicada no ensaio é de 0,1 mm/min, e os deslocamentos axiais foram medidos com o auxílio de dois LVDT's, conforme Figura 15.



Figura 15 - Setup de ensaio de compressão - prensa Shimadzu UH-F 1000 kN

A partir deste ensaio, foram obtidos os parâmetros de resistência à compressão do concreto, bem como seu módulo de elasticidade, conforme equações a seguir:

Equação 1 - Cálculo da Resistência a Compressão

$$f_c = \frac{S}{A}$$

Onde:

- $f_c$  representa a resistência a compressão do concreto, em MPa;
- $s$  representa a carga máxima de ruptura aplicada no ensaio, em kN;
- $A$  representa a área da seção transversal do corpo de prova cilíndrico, em  $\text{cm}^2$ .

Equação 2 - Cálculo do Módulo de Elasticidade

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Onde:

- $E$  representa o módulo de elasticidade do concreto, em GPa;
- $\sigma_2$  representa a tensão correspondente a 40% da máxima, em MPa;
- $\sigma_1$  representa a tensão correspondente a deformação longitudinal  $\varepsilon_1$ , em MPa;
- $\varepsilon_2$  representa a deformação longitudinal produzida pela tensão  $\sigma_2$ , em  $\mu\text{str}$ ;
- $\varepsilon_1$  representa a deformação longitudinal correspondente a 50  $\mu\text{str}$ .

Para efeito de análise dos resultados, foram considerados os valores médios dos parâmetros estudados. A média foi calculada de acordo com a Equação 3. Além disso, foram empregadas ferramentas estatísticas com o objetivo de verificar a representatividade dos testes, bem como complementar o resultado final. Em termos de parâmetros estatísticos, foram avaliados o desvio-padrão (Equação 4), o coeficiente de variação (Equação 5) e o limite de confiança associado a 95% de confiança dos resultados (Equação 6).

Equação 3 – Cálculo da Média

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}$$

Equação 4 – Cálculo do desvio padrão

$$\sigma = DP = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (x_i - \bar{x}_i)^2}{2}}$$

Equação 5 – Cálculo do Coeficiente de Variação em Porcentagem

$$CV (\%) = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100$$

Equação 6 – Cálculo do Limite de Confiança

$$LC = \pm t * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \pm 4,3 * \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$$

$$\text{Intervalo de Confiança} = \bar{x} \pm 4,3 * \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$$

### 3.4.2. Ensaio de Pulso Ultrassônico

O ensaio de pulso ultrassônico consiste em submeter uma pasta cimentícia a pulsos ultrassônicos, onde são medidos os tempos de transposição dos mesmos ao longo da pasta. Conforme vai se sucedendo a reação de hidratação na matriz, a pasta vai se solidificando, de modo que o tempo que o pulso leva para percorrê-la vai ficando cada vez menor. Diferentemente do ensaio de compressão, este teste fornece de forma não destrutiva um panorama do desempenho mecânico da matriz cimentícia. Ademais, um aspecto importante deste ensaio é a determinação do momento em que a pasta começa a se comportar como um sólido, definido como patamar de percolação (ABOELKHEIR, *et al.*, 2018). Neste ensaio, o patamar de percolação corresponde ao instante em que ocorre a aceleração na velocidade de transmissão do pulso. Esse patamar foi determinado conforme mostrado na Figura 16. Outro ponto que se destaca no gráfico é o fato de existirem três estágios distintos, designados como I, II e III.

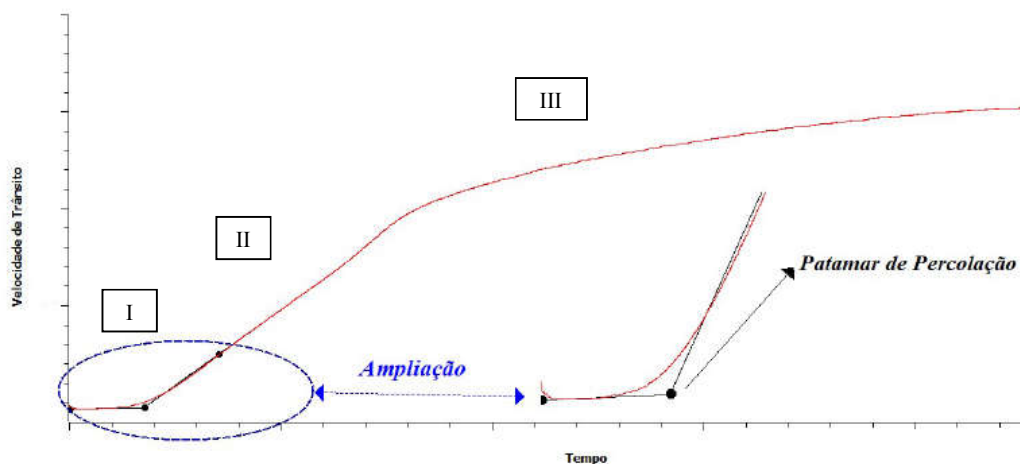


Figura 16 - Determinação do patamar de percolação



No período I, a mistura, ainda fluida, apresenta somente suspensão de partículas que são consideradas uniformemente dispersas. A velocidade é constante e é em torno de 1490 m/s, que é a mesma velocidade do som na água. Com o decorrer do tempo, a temperatura do meio vai aumentando devido a reação hidratação ser exotérmica, o que faz com que a velocidade do pulso aumente rapidamente. O período II é caracterizado pela aceleração dos produtos de hidratação formados que, à medida que se conectam, transformam a pasta do estado fluido em estado sólido. No período III, o processo de hidratação chega na etapa de difusão controlada e agora a mistura passa a apresentar um alto grau de hidratação, sendo sua velocidade desacelerada, atingindo praticamente um nível de constância, em termos de densificação da matriz (POLISSENI, 2018). Além disso, de acordo com BUNGEY, *et al.* (2006), este ensaio fornece uma perspectiva acerca da porosidade do material, haja visto que o grau de porosidade é inversamente proporcional às velocidades de propagação de ondas longitudinais nas matrizes.

As medidas de velocidade de propagação dos pulsos na pasta ao longo do tempo foram obtidas através do equipamento *Ultrasonic Cement Analyser*, da marca Chandler, modelo 4262. As configurações de ensaio foram temperatura ambiente de 23°C e pressão atmosférica, e a duração do mesmo foi cerca de 70 horas. A produção das pastas empregadas neste ensaio (REF, SEC e MIX) seguiu o procedimento descrito na NM 43 (AMN, 2002), sob um fator a/c de 0,47, tal qual o concreto que foi produzido para os testes de resistência a compressão.

### **3.5. Estudo da cinética de hidratação de pastas**

O estudo da hidratação das matrizes cimentícias foi desenvolvido a partir de calorimetria isotérmica. Esta técnica de ensaio se destina a estudar a reação de hidratação do cimento. Dado que a reação estudada é de natureza exotérmica, o principal parâmetro de interesse neste estudo é a quantidade de calor que é liberada ao longo do fenômeno. Em termos práticos, o ensaio consiste em submeter uma pasta de cimento a uma condição isotérmica, na qual sensores de fluxo de calor acoplados a ela medem a quantidade de energia gerada pela hidratação do cimento ao longo do tempo, conforme observado na Figura 17.

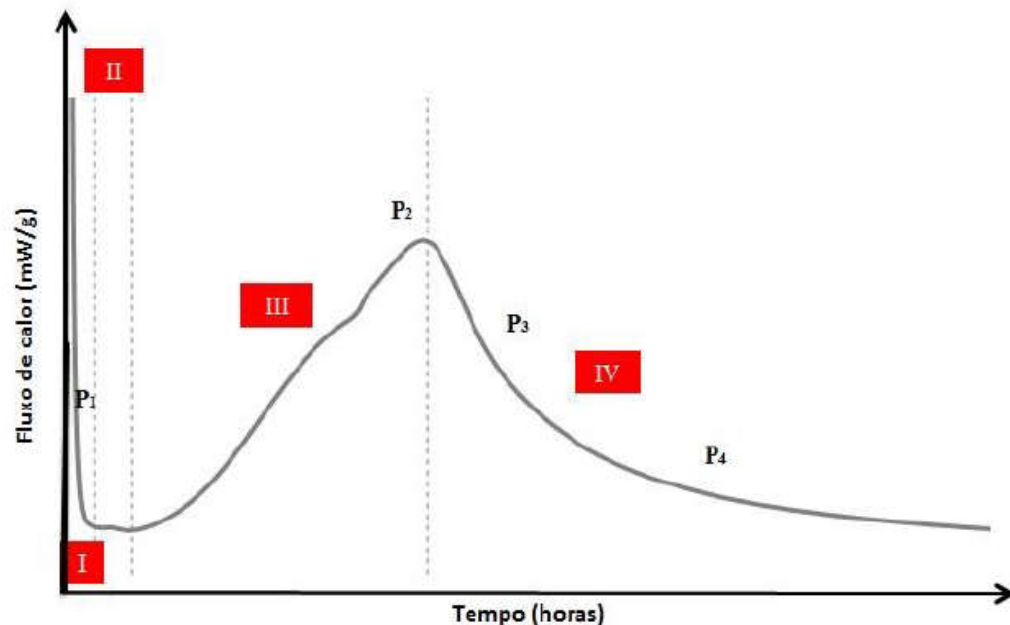


Figura 17 - Estágios de hidratação de uma pasta de cimento (VIEIRA, 2018)

A partir do gráfico apresentado é possível identificar quatro etapas características deste ensaio (I, II, III e IV). A etapa I é definida como período de pré-indução, que, segundo BULLARD, *et al.* (2011) e TAYLOR (1997), se notabiliza pela dissolução do sulfato de cálcio, além da hidratação das fases  $C_3S$  e  $C_3A$  do cimento, que por sua vez originam respectivamente C-S-H e Etringita. A partir do contato do cimento com a água tem início a reação de hidratação, que se caracteriza por ser exotérmica. Desta forma, o início do ensaio se caracteriza por apresentar um pico exotérmico intenso. Entretanto, conforme descrito em levando-se em conta o fato de que a preparação da pasta se externamente ao calorímetro, não há precisão na medida deste fluxo de calor, de modo que tal evento não será considerado neste estudo (ROCHA, 2015).

Após o chamado período de pré-indução observa-se um patamar no gráfico, o qual delimita a etapa II do ensaio, denominada período de dormência, tendo-se em vista o reduzido grau de atividade química representado pelo patamar indicado. Acredita-se que essa baixa atividade química ocorre devido a uma precipitação de C-S-H na superfície do  $C_3S$ , assim ainda que a taxa de dissolução por unidade de área possa ser rápida, a taxa de dissolução global é comparativamente menor (VIEIRA, 2018)

Em seguida tem início a etapa III do ensaio, cuja nomenclatura convencional é período de aceleração. Este período apresenta uma elevação na medida de fluxo de calor, indicando aumento das atividades químicas inerentes ao processo de hidratação do cimento. Nesta etapa do ensaio se destaca a rápida formação de CH e C-S-H, associada a uma significativa redução do teor de  $C_3S$ , simbolizado pelo pico que delimita o fim deste período. A referida formação dos compostos hidratados, expressiva e rápida, propicia o desenvolvimento das primeiras resistências mecânicas na matriz, bem como uma diminuição acentuada em sua porosidade (ROCHA, 2015).

Por fim, a etapa IV do ensaio representa o período de desaceleração. Isto se dá em virtude da mudança de comportamento observada no gráfico, de onde depreende-se que as atividades químicas vão se reduzindo gradualmente na matriz cimentícia. Isto se dá pelo fato de ocorrer nesta fase a hidratação, além do  $C_3S$ , do  $C_2S$ , sendo que este último tem sua reação de hidratação mais lenta, diretamente associada a um calor de hidratação relativamente baixo em comparação com o  $C_3S$  (ROCHA, 2015).

Os parâmetros de interesse deste ensaio são a duração do período de indução, o fluxo de calor associado ao período de dormência, a aceleração da reação de hidratação, e o fluxo de calor máximo, o qual simboliza o fim do período de aceleração.

O ensaio foi feito seguindo a norma BS EN 196-11 (2018). As pastas cimentícias ensaiadas foram produzidas conforme 3.3.2.1 sob um fator a/c de 0,47, e o equipamento utilizado foi o calorímetro de condução isotérmica TAM Air de 8 canais, da marca TA Instruments.

### **3.6. Estudo da microestrutura de pastas e concretos**

O estudo dos efeitos das águas de reuso aplicadas em matrizes cimentícias se deu através de aplicação de técnicas analíticas, com destaque para a microscopia eletrônica de varredura, a termogravimetria e a difratometria por raios-x. O estudo de microscopia foi aplicado nas matrizes sob a forma de concreto, enquanto que os outros dois ensaios foram realizados em pastas.

#### *3.6.1. Interrupção da Hidratação*

Uma vez misturados água e cimento em uma matriz, a reação de hidratação ocorre de forma contínua, até que um dos dois componentes se esgote. Tendo-se em vista a

necessidade de se estudar as transformações no material em diferentes idades, é essencial que a reação de hidratação em curso seja interrompida, de modo a garantir que a matriz guarde as características pertinentes a uma determinada idade.

Para tal, aplicou-se uma técnica que consiste em paralisar as reações de hidratação com álcool isopropílico em fragmentos consolidados, de concreto ou pasta, nas idades de interesse de estudo. O objetivo principal do emprego do álcool é a retirada da água de composição do material, o que impede o avanço das reações de hidratação do cimento. A escolha do álcool isopropílico se dá pelo fato de que este solvente não reage com o cimento presente nas matrizes, garantindo assim a integridade da microestrutura destas, bem como a representatividade das amostras em relação às idades de estudo no tocante à hidratação do cimento (ASKUSHAJ & MULAJ, 2016).

Uma vez obtidas as amostras nas respectivas idades, estas eram imersas em álcool isopropílico por 24h em uma capela. Na etapa seguinte, os fragmentos eram colocados em uma estufa a 40°C por 48 horas. Passado este período, as amostras estavam prontas para os ensaios de avaliação de microestrutura.

### *3.6.2. Microscopia Eletrônica de Varredura*

Paralisada a reação de hidratação, alguns fragmentos foram submetidos a Microscopia Eletrônica de Varredura. Esses fragmentos passam por um processo de metalização, onde são recobertos com ouro, de modo a melhorar a resolução das imagens obtidas. Nesta técnica é possível observar produtos de hidratação do cimento.

Adicionalmente, para os casos em que houver água de reuso na matriz, foi utilizada também a técnica de espectroscopia por energia dispersiva (EDX), a qual permite identificar a composição química da amostra, permitindo assim identificar quimicamente qualquer anomalia observada na microestrutura da matriz. Para este estudo, foram empregados fragmentos de concreto provenientes dos ensaios mecânicos de compressão referentes à idade de 7 dias.

Foram utilizados dois microscópios distintos, porém ambos acoplados a dispositivos para aquisição dos composição química por espectroscopia por energia dispersiva. O primeiro é da marca HITACHI modelo TM 3030, localizado no NUMATS/COPPE/UFRJ, enquanto que o segundo é da marca TESCAN modelo VEGA3, localizado no Núcleo de Microscopia do PEMM/COPPE/UFRJ.

### 3.6.3. *Análise termogravimétrica*

Para a obtenção de fragmentos para este ensaio, foram moldados pequenos corpos de prova cilíndricos, com 2,5 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura, de acordo com procedimento apresentado na NM 43 (AMN, 2002). Estes moldes, vedados em ambas as extremidades por tampa, foram mantidos em uma caixa acrílica em cura úmida. Após a desmoldagem e paralização da reação de hidratação, alguns fragmentos menores são reduzidos a pó com o auxílio de almofariz e pistilo. Uma vez pulverizada a amostra, o material passante pela peneira #200 foi submetido ao ensaio realizado no equipamento SDT Q600 TA Instruments no LabEst/COPPE/UFRJ.

O ensaio se destina a investigar o comportamento de uma amostra como função da temperatura a que o material é submetido. Para o presente estudo foi realizada uma análise termogravimétrica (TGA) e sua primeira derivada (DTG), onde foi medida a variação de massa como função da elevação de temperatura, com o intuito de identificar e quantificar fases presentes nas pastas cimentícias.

Conforme pode ser observado na Figura 18, a curva de um ensaio deste tipo está associada a três intervalos de degradação. A primeira faixa de redução de massa, até aproximadamente 200 °C, está ligada à perda de massa de hidratos, que engloba a desidratação da etringita, do C-S-H e de fases aluminatos (AFt e AFm), representando parte da água total combinada.

A segunda perda de massa ocorre pela desidratação da portlandita e tem início em temperaturas acima de 400°C e inferiores a 500°C. A perda total de massa ocorrida até a degradação da portlandita é designada por Água Total Combinada, englobando as duas primeiras parcelas de perda de massa.

A última perda de massa ocorre em virtude da descarbonatação do carbonato de cálcio, processo que se dá em temperaturas acima de 600°C.

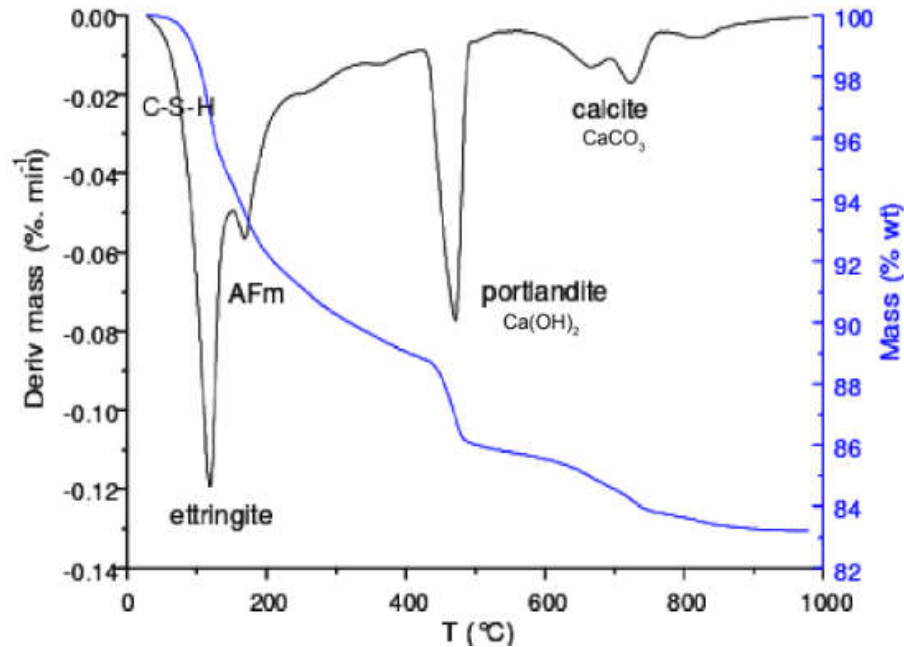


Figura 18 - Curva típica de análise térmica por termogravimetria simples e derivativa em pastas de cimento (SOUZA JR., 2016)

A quantificação dos produtos de hidratação foi realizada em função da massa de material cimentício utilizando o teor de perda de massa no início e no fim das reações térmicas das três faixas indicadas acima. O primeiro passo foi transformar a curva TGA para base calcinada (Equação 7).

Equação 7 – Transformação para massa relativa

$$m = \frac{m_{\%} \times m_0}{100}$$

Onde:

- $m_{\%}$  representa a proporção de massa na temperatura em que houve calcinação (%);
- $m_0$  representa a massa inicial da amostra (mg);
- $m$  representa a massa da amostra na temperatura em que houve calcinação (mg).

A água total combinada foi obtida a partir da perda percentual de massa na curva TGA entre a temperatura de 45°C até o fim da perda de massa por desidroxilação.

Para quantificar o teor de hidróxido de cálcio presente na amostra foi necessário conhecer a reação de desidroxilação desse composto em temperaturas próximas a 400°C (Equação 8). Calculando a perda de massa correspondente ao pico de desidroxilação foi possível estimar a quantidade de água quimicamente ligada ao Ca(OH)<sub>2</sub> e assim determinar o teor de hidróxido de cálcio presente nas pastas.

O teor de CaCO<sub>3</sub> foi obtido a partir da quantidade de CO<sub>2</sub> desprendido ao se determinar a perda de massa correspondente à descarbonatação (Equação 9). As pastas produzidas apresentaram perda de massa em temperaturas entre 600 e 700°C.

Para que se possa estimar a representatividade percentual das massas dos compostos presentes nas reações de desidroxilação (Equação 8) e descarbonatação (Equação 9) é necessário conhecer a massa molecular de cada um deles, conforme apresentado a seguir:

#### Massas Moleculares

$$CaCO_3 = 100,086 \text{ g}$$

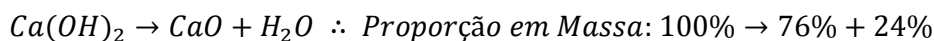
$$Ca(OH)_2 = 74,092 \text{ g}$$

$$CaO = 56,077 \text{ g}$$

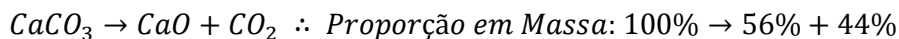
$$CO_2 = 44,009 \text{ g}$$

$$H_2O = 18,015 \text{ g}$$

#### Equação 8 - Reação de Desidroxilação



#### Equação 9 - Reação de Descarbonatação



As condições de ensaio empregadas foram:

- Temperatura Máxima: 900°C;
- Taxa de Aquecimento: 10°C/min;
- Tipo de Gás de Purga: Nitrogênio;
- Fluxo de Gás: 50 ml/min.

#### 3.6.4. *Difratometria de Raio-X (DRX)*

O ensaio consiste em submeter a amostra a feixes de raios-x, onde a fonte é mantida com uma angulação constante, enquanto que o detector e a amostra vão tendo sua angulação variada ao longo do tempo de ensaio.

Visto que cada cristal está associado a um padrão de difração de raios-x diferente, o ensaio de DRX permite identificar as fases cristalinas presentes. Foi utilizado o difratômetro BRUKER, modelo D8 FOCUS, com radiação Cu-K $\alpha$ ,  $\lambda = 0.179021$  nm, gerador operado a 40 kV e 40 mA do Laboratório do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) usando um passo de  $0.02^\circ$  e um tempo de acumulação de 30 segundos.



#### 4. Apresentação e Análise dos Resultados

##### 4.1. Caracterização dos Agregados

###### 4.1.1. Propriedades Físicas

Os resultados de caracterização da areia e da brita são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Caracterização dos agregados

<u>Propriedades Físicas</u>	<b>Areia</b>	<b>Brita</b>
<i>Massa Específica (kg/m<sup>3</sup>)</i>	2494,9	2677,8
<i>Absorção Total (%)</i>	0,5	1,2
<i>Teor de Umidade (%)</i>	0,0	0,5

###### 4.1.2. Composição Granulométrica

Os resultados de classificação granulométrica dos agregados empregados nessa pesquisa são apresentados na Tabela 18 e na Tabela 19.

A partir dos resultados observados, nota-se que o agregado miúdo estudado se apresenta como uma areia média, enquanto que o agregado graúdo situa-se na graduação comercial de brita “0”.

Tabela 18 - Composição granulométrica da areia

<b>Peneiras</b>		<b>% Retida Média</b>	<b>% Retida Acumulada</b>
<b>n</b>	<b>mm</b>		
3/8	9,5	0	0
4	4,8	1	1
8	2,4	5	5.6
16	1,2	18	23.3
30	0,6	32	55.0
50	0,3	29	84.0
100	0,15	13	97.3
Fundo		2	
TOTAL		100	
Modulo de Finura/Areia Fina		2,66	
Dimensão Máxima		peneira 4,8	

Tabela 19 - Composição granulométrica da brita

<b>Peneiras</b>		<b>% Retida Média</b>	<b>% Retida Acumulada</b>
<b>n</b>	<b>mm</b>		
3/8	9,5	0	0
5/16	8	43	43
1/4	6,3	38	81.0
4	4,8	19	100.0
8	2,4	0	100.0
<i>Fundo</i>		0	
<i>TOTAL</i>		100	
Dimensão Máxima			peneira 9,5

#### 4.2. Caracterização das Águas de Reuso

Os resultados referentes aos ensaios de caracterização das águas de reuso empregadas neste estudo são apresentados na Tabela 20.

No que tange a segurança sanitária, nota-se que ambas as águas encontram-se aptas ao uso. Isto se dá pelo fato de que os índices tanto de coliformes totais quanto termotolerantes foram nulos, indicando que a cloração realizada foi bem sucedida, e que não há risco de contaminação na manipulação destas águas ao longo da pesquisa.

Em relação à presença de matéria orgânica, a qual é diretamente proporcional ao parâmetro referente ao teor de sólidos totais, nota-se que ambos possuem concentrações relativamente baixas de sólidos em sua composição quando observado o limite preconizado pela NBR 15900 (2009). Há de se ressaltar que o efluente proveniente do tratamento primário possui mais que o dobro de matéria orgânica que a água de reuso do tratamento secundário. Isto se dá pelo fato de que o decantador primário realiza um tratamento físico no efluente sem que haja degradação química, ou mesmo biológica, da matéria orgânica existente.

Tomando por base os parâmetros limitados pela NBR 15900 (2009), percebe-se que o efluente do sistema de tratamento secundário atende a todos os requisitos de qualidade para ser empregado como água de amassamento em concretos. Já o efluente originário do tratamento primário atende a maior parte dos requisitos, não atendendo apenas o

parâmetro de índice de turbidez. Além disso, para a concentração de íons cloreto observada, esta água apenas teria aplicabilidade em concretos sem fins estruturais.

Tabela 20 - Caracterização das águas de reuso x NBR 15900 (2009)

<b>Parâmetro</b>	<b>Água SEC</b>	<b>Água PRIM</b>	<b>Limites da NBR 15900</b>
<i>Sólidos Totais</i>	1,393.30 mg/l	3,686.60 mg/l	50,000.00 mg/l
<i>Sólidos Totais Suspensos</i>	10.00 mg/l	76.60 mg/l	-
<i>Sólidos Totais Dissolvidos</i>	1,383.30 mg/l	3,610.00 mg/l	-
<i>Turbidez</i>	0.2 NTU	21.55 NTU	Inferior a 10 NTU
<i>pH</i>	6.8	7.7	Maior que 5
<i>Coliformes Totais</i>	0 NMP/100ml	0 NMP/100ml	-
<i>Coliformes Termotolerantes</i>	0 NMP/100ml	0 NMP/100ml	-
<i>Alcalinidade</i>	25.00 mg/l	699.00 mg/l	1,500.00 mg/l
<i>Na<sup>+</sup></i>	272.00 mg/l	893.00 mg/l	-
<i>K<sup>+</sup></i>	21.00 mg/l	42.00 mg/l	-
<i>Ca<sup>+2</sup></i>	32.00 mg/l	61.00 mg/l	-
<i>Mg<sup>+2</sup></i>	40.00 mg/l	127.00 mg/l	-
<i>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></i>	7.40 mg/l	48.00 mg/l	-
<i>Cl<sup>-</sup></i>	492.00 mg/l	1,751.00 mg/l	500.00 mg/l
<i>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></i>	78.00 mg/l	191.00 mg/l	2,000.00 mg/l
<i>PO<sub>4</sub><sup>-3</sup></i>	7.20 mg/l	17.20 mg/l	100.00 mg/l
<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>	180.00 mg/l	5.30 mg/l	500.00 mg/l
<i>Br<sup>-</sup></i>	1.20 mg/l	5.30 mg/l	-
<i>F<sup>-</sup></i>	0.13 mg/l	0.16 mg/l	-

Obs.: O limite de Cl<sup>-</sup> indicado é referente ao concreto protendido. Para concreto armado, o limite é de 1,000 mg/l. Para concreto sem fins estruturais, 4,500 mg/l

Apesar da alta concentração de íons cloreto apresentada pela amostra PRIM, destaca-se que mesmo antes de ser realizada a cloração, ensaios preliminares executados nessa amostra indicavam valores de concentração de 1590 mg/l, ou seja, valores elevados para este íon em efluentes sanitários. Para efeito de comparação, mesmo considerando a concentração desses íons na água SEC após a desinfecção (380 mg/l), os valores obtidos na água PRIM são bem superiores.

Uma hipótese que justifica o comportamento apresentado é que tenha ocorrido contaminação da água PRIM por água salgada. Para entender o surgimento dessa hipótese, é importante compreender a origem dos efluentes sanitários que chegam ao CESA/UFRJ. Como já relatado em 3.1.5, o esgoto tratado é uma pequena parcela de todo o esgoto do campus. A porção sul da ilha do fundão abriga um complexo conhecido como Vila Residencial. Apesar de se caracterizar por uma área urbana, densamente ocupada por construções residenciais, a origem deste complexo remonta da época da construção da ponte Rio-Niterói, onde o mesmo foi utilizado como residência provisória para os trabalhadores à época. Esta parte da ilha encontra-se às margens da Baía de Guanabara e, em períodos de maré alta ocorre um fluxo de água do mar para o interior da ilha. Diante da impossibilidade de se escoar as águas pluviais para a baía, estas são também direcionadas à estação elevatória que transpõe o esgoto da Vila Residencial até a elevatória principal do Campus, de onde é feito o desvio para o CESA/UFRJ. A partir deste ponto, nota-se que é comum a presença de água marinha na estação elevatória da CEDAE, e, por conseguinte, no CESA/UFRJ. Uma vez observado este contexto, a hipótese levantada torna-se plausível, podendo justificar a discrepância observada em relação à alta concentração iônica do efluente primário.

#### 4.3. Mescla entre Águas de Reuso

Com o objetivo de encontrar uma mescla entre as águas de reuso que se aproximasse do limite proposto pela NBR 15900 (2016), estudou-se uma mistura de 50% do efluente primário (PRIM) com 50% do efluente secundário (SEC). O resultado do ensaio de tempo de pega para os diferentes tipos de água é apresentado na Tabela 21.

Observou-se que os resultados da água mesclada, nota-se que o tempo de início de pega aumentou cerca de 20% em relação à matriz de referência, próxima ao limite estipulado pela norma (25%). Sendo assim, essa mistura de 50% de água PRIM e 50% de água SEC foi definida como água MIX, e foi utilizada nos ensaios desta pesquisa.

Tabela 21 - Tempos de pega para diferentes tipos de água

	<b>REF</b>	<b>SEC</b>	<b>MIX</b>
Início da Pega	3h 30min	3h 33min	4h 10 min
Fim da Pega	5h 00min	5h 20min	5h 45min
Duração	1h 30 min	1h 47min	1h 35min

Observando-se os resultados da água SEC em comparação com a matriz de referência, nota-se pouca variação nos resultados, de no máximo 7% no fim de pega.

Pode-se também verificar que quanto menos tratada a água de reuso, maior o tempo de pega. Este resultado já era esperado pois vai ao encontro da bibliografia técnica atual, onde tal comportamento se justifica pela maior concentração de matéria orgânica em águas mais poluídas, conforme discutido no item 2.7 e em especial mostrado na Tabela 7.

#### 4.4. Dosagem do Concreto

O escopo deste trabalho é estudar um traço que possua boa empregabilidade no cotidiano da construção civil. De acordo com MEHTA & MONTEIRO (2006), para um concreto ser bombeável, o mesmo deve possuir boa trabalhabilidade, de modo que seu *slump* seja da ordem de 10 cm. Desta forma, este trabalho irá dosar o concreto sob as premissas de trabalhabilidade equivalente a (10±3) cm e resistência a compressão característica de 35 MPa.

Para que se garanta o atendimento a esta resistência característica ( $f_{ck}$ ), conforme método ACI 211.1 (ACI, 1991), tomando por base que a resistência característica se situa entre os valores de 211 kgf/cm<sup>2</sup> e 352 kgf/cm<sup>2</sup>, a resistência à compressão média experimental ( $f_{cm}$ ) deve ser calculada conforme Equação 10.

Equação 10 – Cálculo de  $f_{cm}$  a partir do  $f_{ck}$  de acordo com o método ACI 211.1

$$f_{cm} = f_{ck} + 84 \rightarrow f_{cm} = 350 + 84 = 434 \text{ kgf/cm}^2 = 43 \text{ MPa.}$$

A partir dos materiais empregados no estudo, o emprego do método descrito gerou a dosagem apresentada na Tabela 22.

Tabela 22 - Estimativa de dosagem pelo método ACI

<b>Slump (cm)</b>	<b>Água (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Fator a/c</b>	<b>Cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Areia (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Brita (kg/m<sup>3</sup>)</b>
10±3	228	0,47	485,10	281,94	1284,96

Por se tratar de um método empírico, a dosagem que dele advém necessita de validação experimental. De modo a verificar se os critérios básicos de projeto estariam sendo atendidos pela dosagem proposta foi moldada e compactada uma amostra em forma

de tronco de cone, a qual é apresentada na Figura 19. Como pode ser visto, a matriz em seu estado fresco apresentou-se bastante porosa, indicando um baixo grau de empacotamento entre seus componentes. Tal nível de porosidade é compatível com o baixo teor de argamassa, que representa a relação entre areia e brita na matriz cimentícia. No contexto de concretos estruturais, comumente armados, esta elevada porosidade torna-se nociva ao comportamento do material, visto que favorece a corrosão do aço no interior do concreto.



Figura 19 - Matriz dosada pelo método ACI no estado fresco com baixa trabalhabilidade e alta porosidade

A partir do resultado preliminar de dosagem pelo método ACI, identificou-se a necessidade de ajuste do traço para a continuação da pesquisa. Nota-se, de fato, que o elevado grau de porosidade observado no concreto advém da grande diferença entre as proporções de areia e brita na dosagem, de modo que a relação entre elas é de 1:5. A partir dos problemas identificados, procedeu-se o ajuste do traço objetivando equilibrar a proporção entre areia e brita, e também aumentar o teor de argamassa.

A partir dos ajustes realizados, o traço final da presente pesquisa é apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 - Dosagem final corrigida

<b>Slump (cm)</b>	<b>Água (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Fator a/c</b>	<b>Cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Areia (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Brita (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Superplastificante (g/m<sup>3</sup>)</b>
10±3	228	0,47	485,10	774	774	279,83

É importante pontuar que o traço foi corrigido para o teor de absorção e umidade natural dos agregados, de modo a garantir que toda a água dosada pelo método integre a hidratação do cimento.

A partir da correção na proporção entre areia e brita e a adição de superplastificante na mistura, o ensaio de abatimento de tronco de cone foi refeito e utilizado como referencial para assegurar o atendimento do critério de trabalhabilidade proposto com a nova formulação. O resultado pode ser observado na Figura 20, onde é possível perceber uma maior homogeneidade entre os componentes do concreto, indicando o sucesso da recalibração da dosagem.

Após, os ensaios de *slump* foram repetidos com a mesma dosagem final, porém utilizando água SEC e água MIX. Os resultados foram de 10 cm no caso da água SEC e 11 cm no caso da água MIX, conforme Figura 21. Ou seja, não foram observadas variações significativas na trabalhabilidade das diferentes matrizes.



Figura 20 - Abatimento de tronco de cone da nova dosagem utilizando água REF

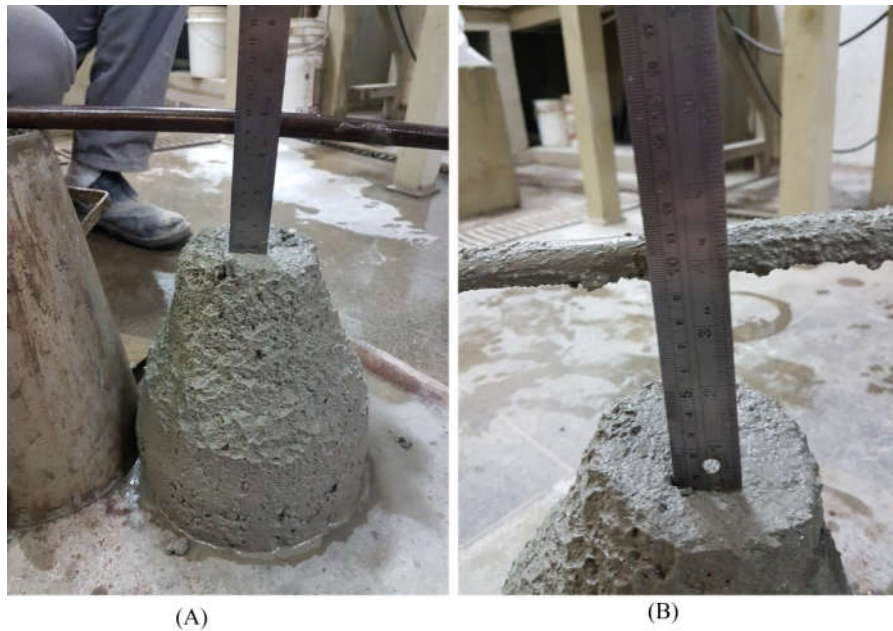


Figura 21 - Abatimento de tronco de cone da nova dosagem utilizando (A) água SEC e (B) água MIX

#### 4.5. Caracterização Mecânica das Matrizes Cimentícias

De modo a facilitar a identificação de cada uma das matrizes, bem como as condições do ensaio como idade e tipo de cura, foi adotada, conforme já comentado, a seguinte regra de nomenclatura:

- A primeira parte da designação indica o tipo de água empregada na mistura (REF, SEC, MIX);
- A designação intermediária indica a idade com a qual os corpos de prova foram ensaiados (7, 14 e 28 dias);
- Por fim, a última parcela do nome indica o tipo de cura ao qual o material foi submetido, representando “P” a cura submersa em água potável, enquanto que “R” designa cura submersa em água de reuso proveniente do tratamento secundário.

A Figura 22, a Figura 23 e a Figura 24 mostram as curvas tensão-deformação típicas aos 7, 14 e 28 dias, respectivamente, de forma a apresentar o comportamento da matriz durante o ensaio. Foram adotadas curvas representativas em termos de resistência média à compressão para cada um dos ensaios apresentados.



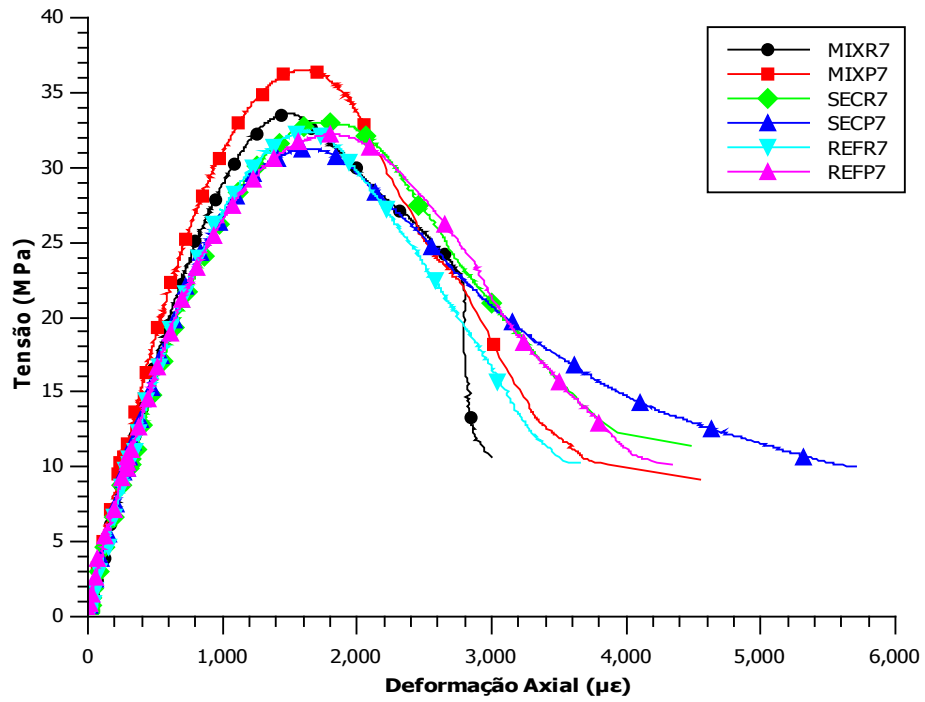


Figura 22 – Curvas tensão-deformação aos 7 dias para as matrizes estudadas.

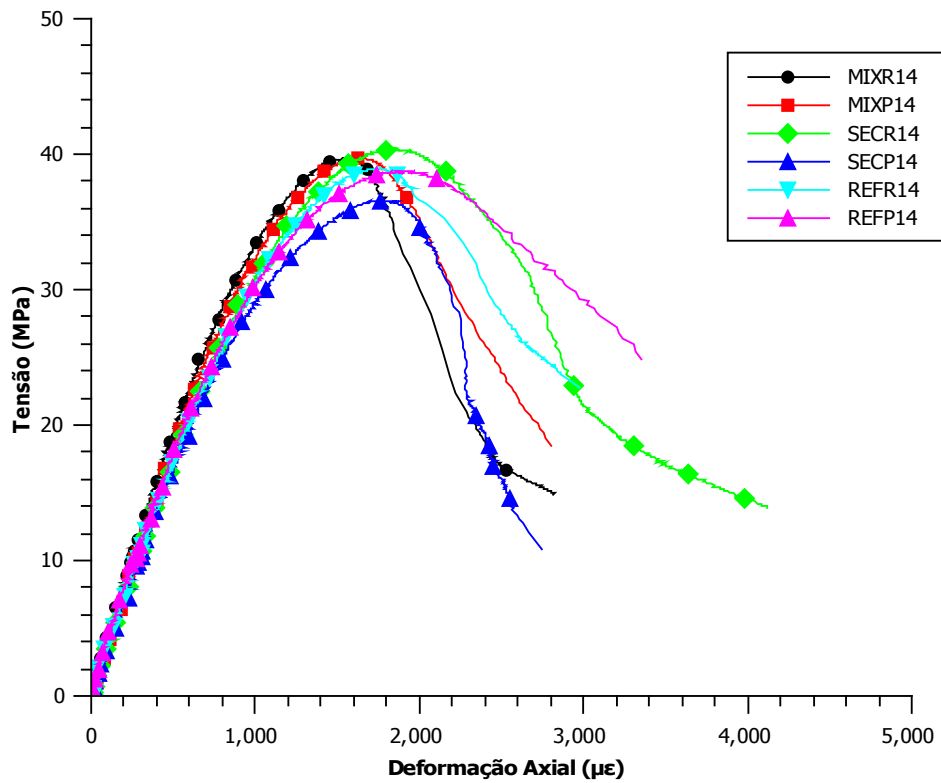


Figura 23 - Curvas tensão-deformação aos 14 dias para as matrizes estudadas.

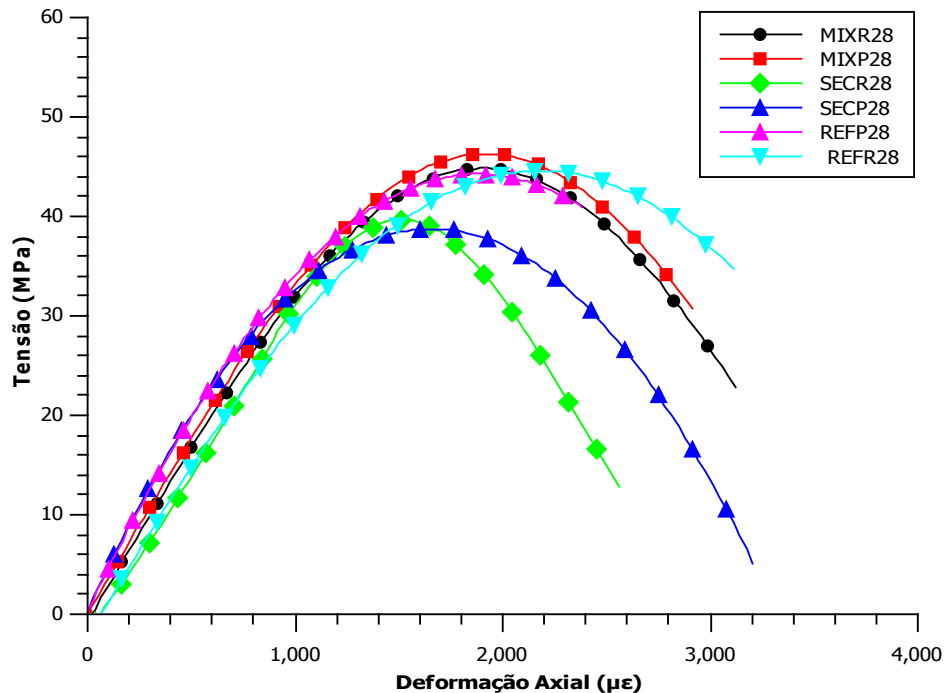


Figura 24 - Curvas tensão-deformação aos 28 dias para as matrizes estudadas.

Observando-se as curvas tensão x deformação para as matrizes estudadas é possível perceber que a aplicação das águas de reuso na mistura do concreto, bem como na cura do mesmo, não motivaram diferenças significativas em termos de resposta no ensaio. Vale a pena ressaltar também que não resposta representativa das matrizes após o pico de resistência em nenhum dos casos, novamente aproximando o comportamento das matrizes compostas por águas de reuso em relação às matrizes com água potável.

A apresentação dos resultados referentes ao ensaio de compressão axial no concreto é feita a seguir. A Tabela 24 apresenta os valores de resistência à compressão referentes às diferentes matrizes estudadas e a Figura 25 representa esses valores e seus respectivos desvios padrão de forma a facilitar a comparação dos resultados.

Observando-se os resultados apresentados, nota-se que todas as matrizes tiveram um ganho de resistência com o aumento da idade, o que já era esperado. Esse ganho, entretanto, foi ligeiramente diferente em cada caso.

Primeiramente, comparando a mesma matriz com variação na água utilizada na cura, observa-se que no caso da referência, a matriz curada em água de reuso apresentou

uma resistência levemente inferior aos 7 dias, da ordem de 3%. Contudo, com o avançar das idades, essa diferença não foi mais observada.

Já na matriz SEC, observa-se um comportamento diferente. A matriz curada na água de reuso apresentou uma resistência maior em todas as idades, variando entre 7% e 14% de ganho em relação a curada em água potável.

Por último, na matriz MIX, o comportamento é similar ao da matriz REF aos 7 dias, ou seja, a resistência foi menor para a matriz curada em água de reuso. Essa diferença não foi observada aos 14 dias, porém pôde ser detectada novamente aos 28 dias. Na primeira idade, a diferença atingiu 13%, porém na última diminuiu para 5%.

Tabela 24 - Resultado referente ao ensaio de compressão axial, onde  $f_c$  representa a resistência à compressão do concreto; Desv.Pad. é o desvio-padrão associado às amostras ensaiadas; CV representa o coeficiente de variação dos resultados; e LC95% indica os limites associados ao intervalo de confiança para 95% dos resultados.

	<b><math>f_c</math> (MPa)</b>	<b>Desv.Pad. (MPa)</b>	<b>CV</b>	<b>LC 95% (MPa)</b>
<b>REF 7 P</b>	32.0	0.3	1.0%	0.8
<b>REF 7 R</b>	31.1	2.6	8.4%	6.5
<b>SEC 7 P</b>	31.1	0.5	1.5%	1.2
<b>SEC 7 R</b>	33.4	1.1	3.2%	2.6
<b>MIX 7 P</b>	35.4	1.2	3.5%	3.0
<b>MIX 7 R</b>	31.3	2.5	8.1%	6.3
<b>REF 14 P</b>	37.1	3.5	9.5%	8.8
<b>REF 14 R</b>	37.6	2.7	7.1%	6.6
<b>SEC 14 P</b>	34.8	1.7	5.0%	4.3
<b>SEC 14 R</b>	39.7	2.5	6.4%	6.3
<b>MIX 14 P</b>	39.5	2.1	5.4%	5.3
<b>MIX 14 R</b>	39.9	1.7	4.3%	4.3
<b>REF 28 P</b>	43.1	1.5	3.4%	3.7
<b>REF 28 R</b>	43.1	1.1	2.6%	2.8
<b>SEC 28 P</b>	38.4	1.8	4.7%	4.5
<b>SEC 28 R</b>	41.0	3.3	8.0%	8.1
<b>MIX 28 P</b>	46.1	1.6	3.5%	4.0
<b>MIX 28 R</b>	44.0	0.8	1.7%	1.9

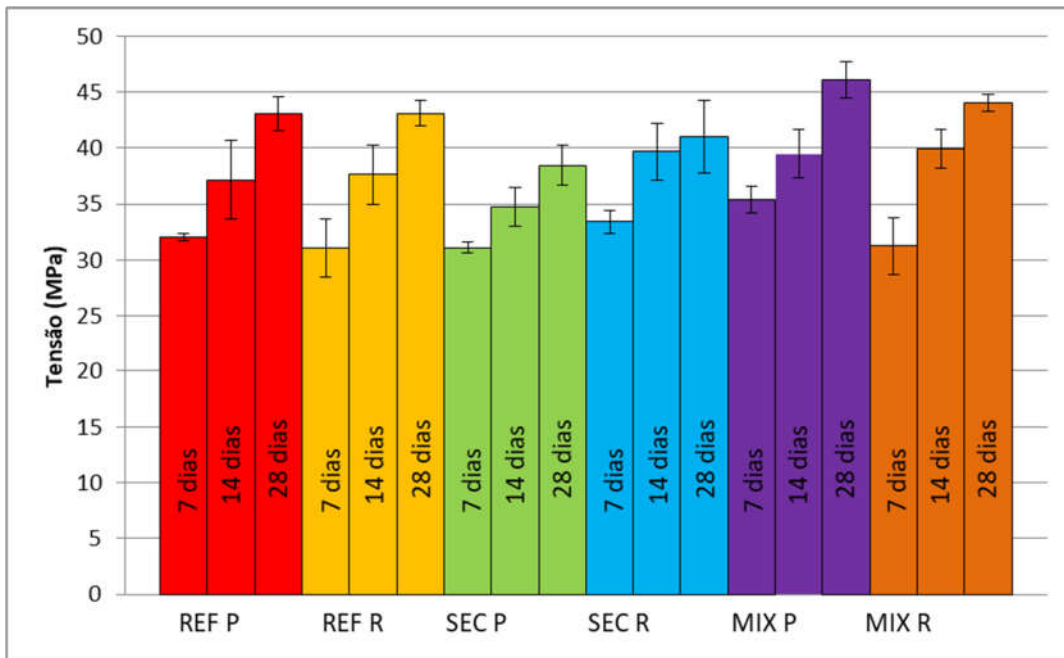


Figura 25 - Representação gráfica dos resultados de resistência à compressão das três matrizes estudadas de acordo com as curas em água potável e reuso nas idades de 7, 14 e 28 dias. O desvio padrão associado a cada resultado está indicado na forma de barra de erro.

Por outro lado, comparando-se as diferentes matrizes que utilizaram a mesma cura em água potável, observou-se que as maiores resistências foram observadas para a matriz MIX e as menores resistências para a matriz SEC em todas as idades. Essa diferença foi de 14% para 7 e 14 dias e atingiu 20% para a idade de 28 dias.

No caso da cura em água de reuso, o comportamento foi ligeiramente diferente. A matriz MIX e REF seguiram a mesma linha de comportamento nas idades de 7 e 28 dias, sendo que a matriz MIX teve um resultado levemente superior aos 28 dias. Aos 14 dias, a resistência da matriz MIX foi superior em 6%. A matriz SEC, por outro lado, teve uma resistência superior às demais na idade de 7 dias, em cerca de 7%. Após, aos 14 dias, teve uma resistência equivalente a da MIX com a mesma idade, porém o incremento no período entre 14 e 28 dias foi pequeno, e terminou com uma resistência 7% inferior às demais.

Em relação ao módulo de elasticidade, os resultados são apresentados na Tabela 25 e na Figura 26.

O comportamento esperado seria aumentar o módulo com o avançar das idades. Esse comportamento não foi observado na matriz REF curada em água de reuso e na matriz MIX curada em água de reuso. E na matriz MIX curada em água potável, esse ganho foi bem pequeno, cerca de 3% entre as idades.

Ao comparar a mesma matriz com variação na água utilizada na cura, observa-se que a matriz REF curada em água de reuso apresentou um enrijecimento aos 7 dias e aos 28 dias em relação a matriz curada em água potável. Aos 14 dias, o comportamento é inverso, onde a matriz curada em água potável é mais rígida.

Tabela 25 - Resultado referente ao módulo de elasticidade no ensaio de compressão axial, onde E representa a módulo de elasticidade do concreto; Desv.Pad. é o desvio-padrão associado às amostras ensaiadas; CV representa o coeficiente de variação dos resultados; e LC95% indica os limites associados ao intervalo de confiança para 95% dos resultados.

	<b>E (GPa)</b>	<b>Desv.Pad. (GPa)</b>	<b>CV</b>	<b>LC 95% (GPa)</b>
<b>REF 7 P</b>	33.1	1.5	4.4%	3.6
<b>REF 7 R</b>	34.6	2.9	8.4%	7.2
<b>SEC 7 P</b>	33.8	3.6	10.5%	8.8
<b>SEC 7 R</b>	31.4	1.3	4.2%	3.3
<b>MIX 7 P</b>	37.5	4.1	11.0%	10.2
<b>MIX 7 R</b>	38.4	2.3	6.1%	5.8
<b>REF 14 P</b>	35.5	1.3	3.7%	3.3
<b>REF 14 R</b>	33.5	2.1	6.2%	5.1
<b>SEC 14 P</b>	37.8	2.5	6.5%	6.1
<b>SEC 14 R</b>	34.9	4.8	13.8%	12.0
<b>MIX 14 P</b>	38.3	2.0	5.1%	4.9
<b>MIX 14 R</b>	37.4	0.9	2.3%	2.1
<b>REF 28 P</b>	40.9	1.7	4.2%	4.2
<b>REF 28 R</b>	43.1	2.2	5.0%	5.4
<b>SEC 28 P</b>	43.5	4.3	9.9%	10.7
<b>SEC 28 R</b>	40.5	4.8	11.9%	12.0
<b>MIX 28 P</b>	39.9	0.3	0.8%	0.8
<b>MIX 28 R</b>	44.2	2.8	6.3%	7.0

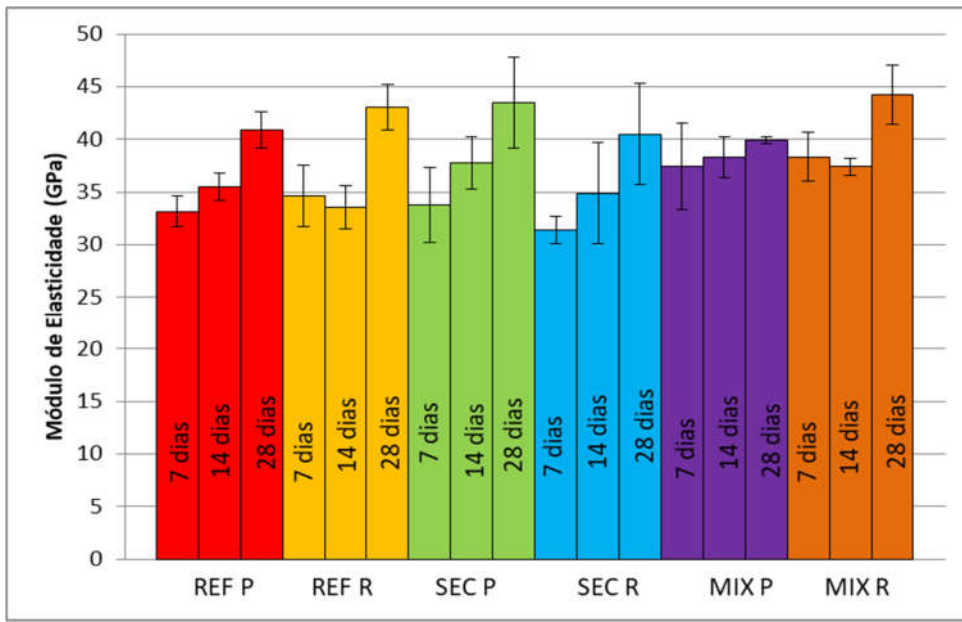


Figura 26 - Representação gráfica dos resultados de módulo de elasticidade das três matrizes estudadas de acordo com as curas em água potável e reuso nas idades de 7, 14 e 28 dias. O desvio padrão associado a cada resultado está indicado na forma de barra de erro.

Por outro lado, no caso da matriz SEC, a matriz curada em água potável é em torno de 8% mais rígida para todas as idades se comparada com a curada em água de reuso com a mesma idade.

No caso da matriz MIX com idade de 7 e 14 dias, os resultados do módulo de elasticidade das amostras curadas em água potável e água de reuso são muito próximos, diferindo em apenas 2%. Entretanto, aos 28 dias, a matriz curada em água de reuso apresentou um enrijecimento de 11% em relação a curada em água potável.

Se compararmos as matrizes que utilizaram a mesma cura em água potável, a matriz MIX apresentou os maiores resultados de módulo de elasticidade nas idades de 7 e 14 dias, com 8 a 13% de aumento em relação a REF. Isso também foi observado no caso da cura em água de reuso em todas as idades, atingindo 20% de diferença aos 7 dias entre a MIX e SEC. A única exceção ocorreu aos 28 dias com cura em água potável, onde a matriz SEC teve a rigidez mais alta e a matriz MIX, menor.

Considerando o exposto anteriormente, foram observados diferentes resultados nas matrizes submetidas às diferentes curas. Apesar disso, pode-se considerar que a tendência de comportamento é similar independente da cura.

As Figuras 27, 28 e 29 ilustram os corpos de prova rompidos com idades de 7, 14 e 28 dias, respectivamente, mostrando uma amostra de cada matriz cimentícia utilizada. Em geral, observou-se que as rupturas ocorreram em uma superfície inclinada média de cerca de 45 graus, indicando que o ensaio foi bem sucedido.

Por fim, considerando todas as análises, pode-se concluir que foram observadas variações no desempenho mecânico quando comparadas as diferentes matrizes. Em especial, destaca-se o comportamento da matriz MIX, que possui maior grau de impurezas entre as matrizes analisadas, e teve desempenhos por vezes maiores que a referência. Nos casos em que as matrizes SEC e MIX apresentaram resultados menores que o de REF, as diferenças observadas foram inferiores a 10%. Se considerarmos os limites de confiança calculados, os resultados são geralmente equivalentes. Desta forma, em termos de desempenho mecânico, observa-se uma boa empregabilidade de águas de reuso em concretos.

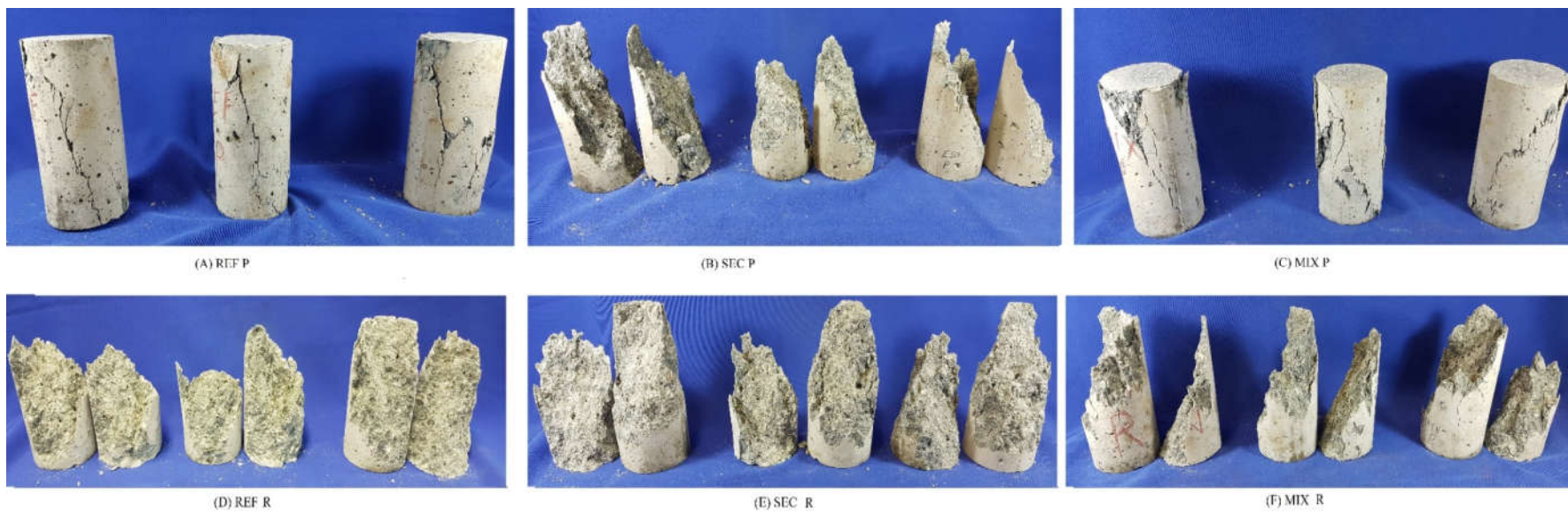


Figura 27 - Corpos de provas ensaiados com idade de 7 dias evidenciando o modo de ruptura, separadas de acordo com o tipo de amostra sendo (A) REF P, (B) SEC P, (C) MIX P, (D) REF R, (E) SEC R e (F) MIX R.



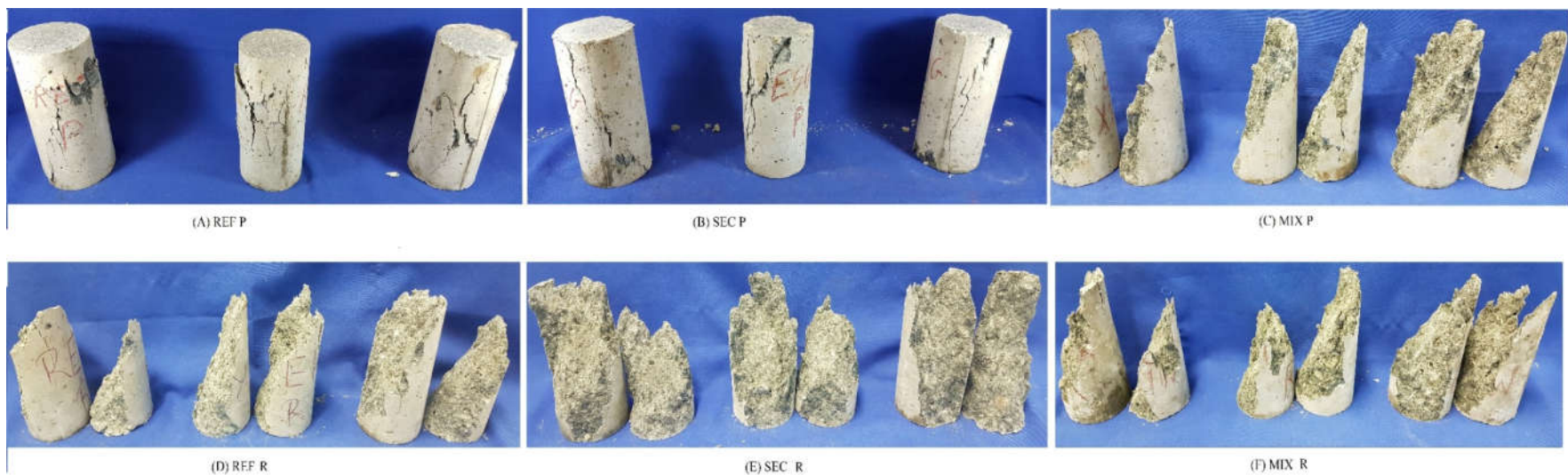


Figura 28 - Corpos de provas ensaiados com idade de 14 dias evidenciando o modo de ruptura, separadas de acordo com o tipo de amostra sendo (A) REF P, (B) SEC P, (C) MIX P, (D) REF R, (E) SEC R e (F) MIX R.

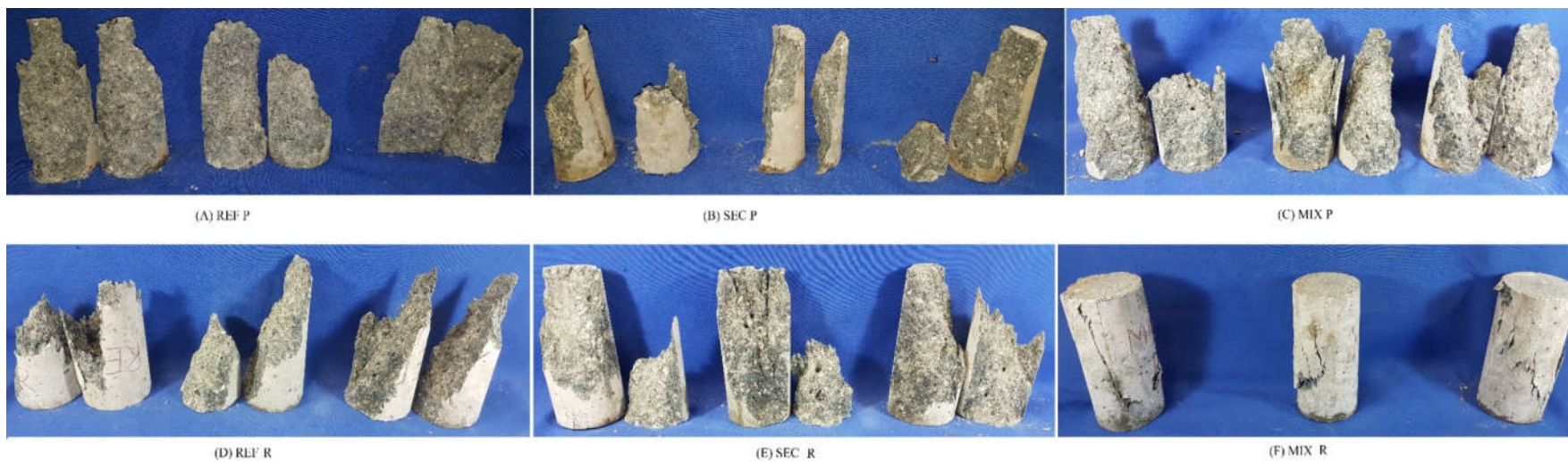


Figura 29 - Corpos de provas ensaiados com idade de 28 dias evidenciando o modo de ruptura, separadas de acordo com o tipo de amostra sendo (A) REF P, (B) SEC P, (C) MIX P, (D) REF R, (E) SEC R e (F) MIX R.

#### 4.6. Ensaio de Pulso Ultrassônico

Os resultados dos ensaios de pulso ultrassônico são apresentados na Figura 30. No início do ensaio, referente ao período I, o comportamento observado nas três matrizes é bastante similar, tendo a matriz MIX os maiores valores de velocidade de transmissão de pulso, seguida pela matriz SEC, e por último a matriz REF.

Na transição do período I para o período II localiza-se o patamar de percolação. Quando comparados os tempos associados a este patamar, observamos que a matriz REF possui o maior tempo de 4,90 h, conforme pode ser verificado na Figura 31 seguida pela matriz SEC, com 4,77 h, apresentado na Figura 32. A matriz MIX apresentou o menor tempo, com 4,22 h, conforme apresentado na Figura 33.

Outro ponto de destaque observado na Figura 30 diz respeito ao comportamento observado a partir do início do período II, caracterizada por apresentar aceleração na velocidade dos pulsos ultrassônicos. Enquanto as matrizes REF e SEC apresentaram acelerações aproximadamente iguais, a matriz MIX apresentou uma aceleração maior que as demais em cerca de 20%.

De maneira análoga, o período III segue a mesma tendência observada ao longo de todo o ensaio, permanecendo a matriz MIX com os maiores valores de velocidade de transmissão de pulso, seguida, respectivamente, pelas matrizes SEC e REF.

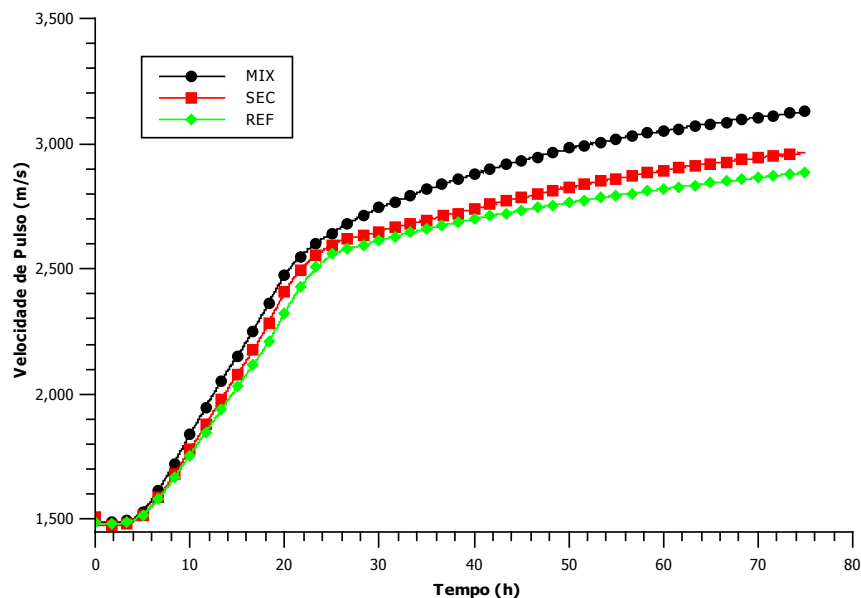


Figura 30 - Resultado do ensaio UCA nas diferentes matrizes

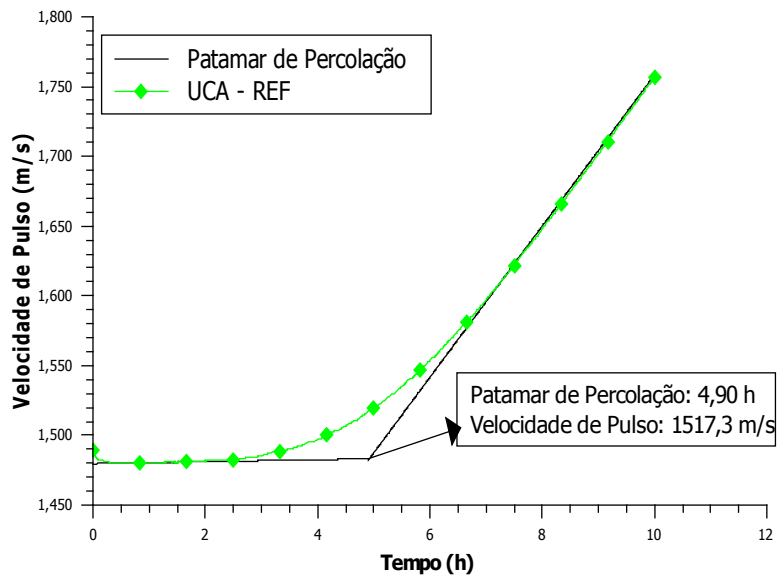


Figura 31 – Detalhe do patamar de percolação da matriz REF

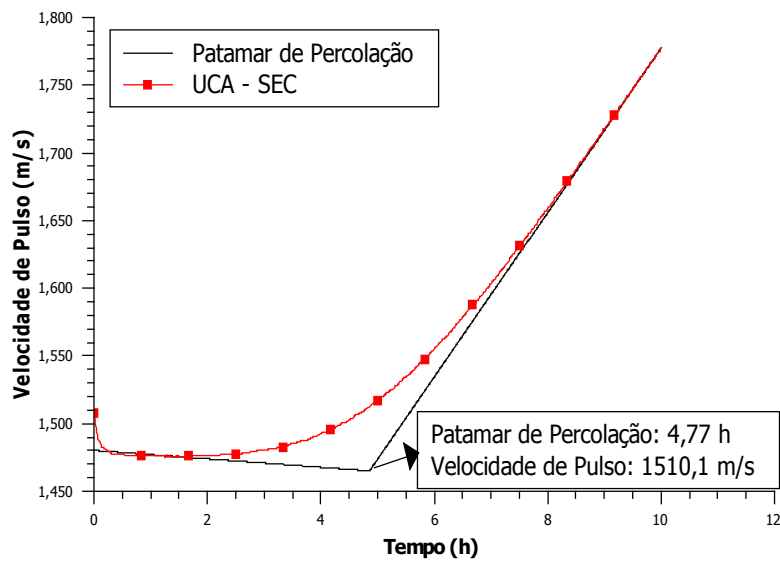


Figura 32 – Detalhe do patamar de percolação da matriz SEC

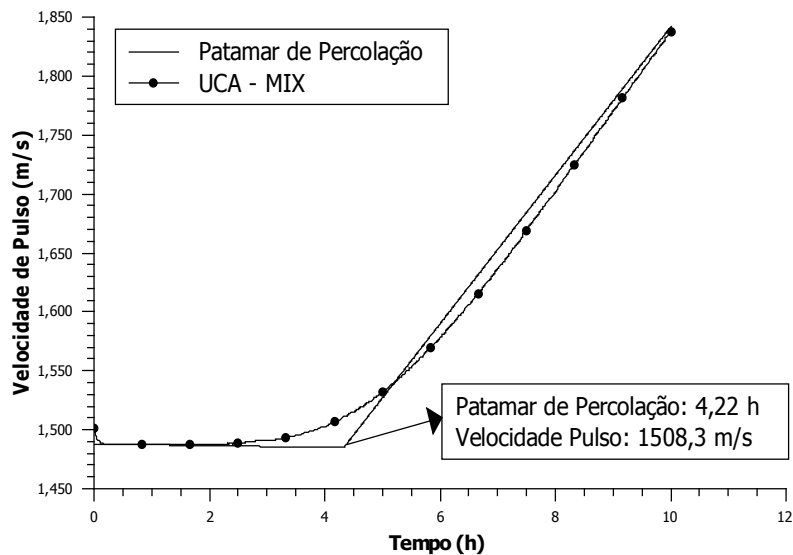


Figura 33 – Detalhe do patamar de percolação da matriz MIX

De maneira global, quando comparados os valores de velocidade de trânsito dos pulsos é possível perceber que as amostras que contém águas de reuso apresentam valores maiores que as de água potável. Adicionalmente, pode-se perceber que a matriz com maior quantidade de impurezas (MIX) apresentou resultados maiores que a matriz SEC. Ou seja, observa-se que o aumento de impurezas resulta em um aumento nas velocidades de propagação das ondas, resultado este compatível com as conclusões de BUNGEY, *et al.* (2006). De forma correlata, as análises associadas ao patamar de percolação indicam a tendência inversamente proporcional entre o grau de impurezas associado às águas e os tempos associados a este patamar.

Tal fato se justifica pela presença maior de sais e sólidos dissolvidos nestas águas. Considerando a matriz com pouco tempo de hidratação, os compostos presentes nas águas de reuso tendem a densificar sua estrutura, o que explica as maiores velocidades de pulso observadas neste caso, bem como os menores tempos associados ao patamar de percolação.

#### 4.7. Estudo da Cinética de Hidratação

A Figura 34, a Figura 35 e a Tabela 26 apresentam os resultados da calorimetria isotérmica aplicada às matrizes estudadas.

Nota-se na Figura 34, a partir da resposta exposta pelo ensaio, que durante o período de indução, bem como boa parte do período de aceleração, ocorre um retardo no fluxo de calor envolvido nas reações de hidratação do cimento nas matrizes preparadas com as águas de reuso em relação à matriz de referência. Ainda no tocante ao atraso associado ao desenvolvimento da reação, também é possível observar que o retardamento promovido na matriz MIX é maior que na matriz SEC. Dadas as características das águas de reuso, bem como o comportamento observado nesta etapa do ensaio, pode-se associar esse resultado à quantidade de matéria orgânica presente nessas águas, conforme Tabela 20, que poderia resultar em um retardamento das reações do cimento, corroborando o que foi constatado nos ensaios de tempo de pega.

Ainda no tocante à energia associada ao processo, observa-se, um aumento do calor liberado na precipitação do C-S-H para as águas de reuso. Levando-se em conta que as águas de reuso possuem íons cloretos e nitratos dissolvidos em quantidades superiores à água potável, bem como o fato de que o cimento é um material rico em cálcio, pode-se considerar a possível formação de cloreto e nitrato de cálcio no decorrer da reação. Este sal, conforme item 2.7, em especial na Tabela 7, os sais de cálcio atuam como um agente acelerador das atividades químicas inerentes à reação de hidratação do cimento, de modo que seus efeitos poderiam ser observados ao final do período de aceleração, onde os picos máximos de fluxo de calor estão associados às águas de reuso estudadas e o menor se refere à água potável, vide valores de fluxo de calor máximo na Tabela 26.

Contudo, ao final do ensaio, o comportamento se inverte, e pode ser observado que o fluxo de calor para a amostra composta por água potável é levemente superior às demais. Esse comportamento no longo prazo é evidenciado pela Figura 35, onde o calor acumulado referente à matriz REF é o maior em intervalos de tempo maiores, enquanto que o da matriz MIX possui os menores valores para calor acumulado. A redução de calor liberado ao final do ensaio atinge 13% no caso da matriz MIX e apenas 3% no caso da matriz SEC em relação à matriz REF. Essa inversão observada pode ser justificada a partir da presença de nitrogênio amoniacal nas águas de reuso, o que tende a reduzir o calor liberado ao longo das reações de hidratação do cimento, conforme já enunciado por KUZ'MIN & BARABASH (1981). Sendo assim, a presença de amônia, em especial na água MIX, pode contribuir para o comportamento observado no final do ensaio.

Destaca-se o pioneirismo relativo ao estudo de cinética de hidratação em matrizes cimentícias compostas por águas de reuso. Como conclusão do mesmo, pode-se verificar a confirmação de tendências já apresentadas em outros ensaios, como o retardamento da reação do cimento nas matrizes com águas de reuso. Também se pode inferir a possibilidade de formação de sais de cálcio, visto que os picos de fluxo de calor associados a águas de reuso são maiores quando comparados ao da água potável. Entretanto, a presença de amônia, em especial na água MIX, pode ter contribuído para a redução do calor liberado ao longo das reações do cimento. Ressalta-se ainda que as diferenças observadas nas matrizes com águas de reuso podem ser consideradas pequenas quando comparadas à matriz REF, reforçando a premissa de viabilidade no emprego dessas águas em substituição à água potável em concretos.

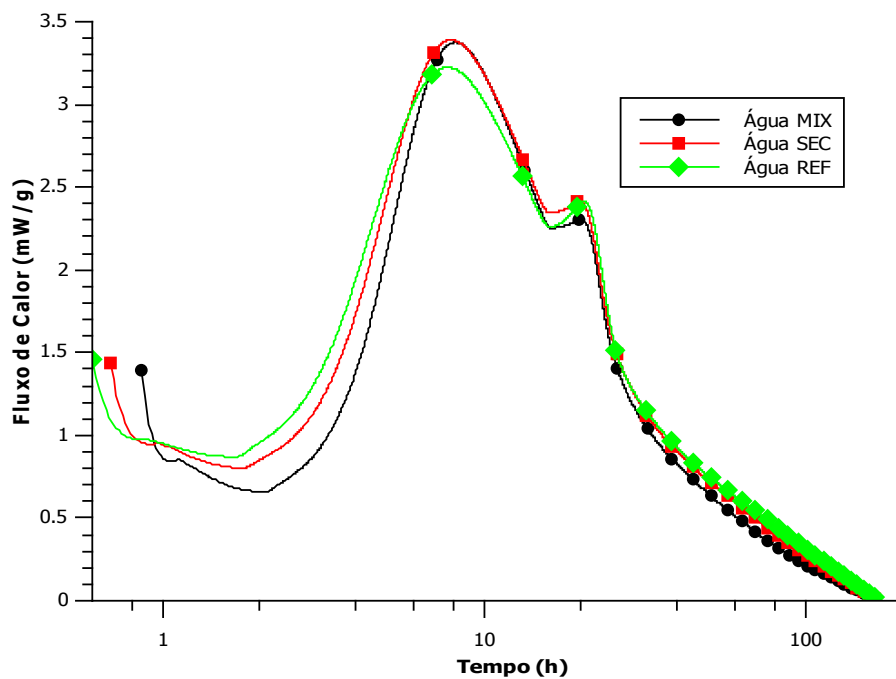


Figura 34 - Calorimetria isotérmica: fluxo de calor das matrizes cimentícias

Tabela 26 - Resultados associados ao ensaio de calorimetria isotérmica das matrizes cimentícias

	Matriz REF	Matriz SEC	Matriz MIX
<b>Indução</b> - <b>Duração (h)</b>	1.7	1.8	2.0
<b>Dormência</b> - <b>Fluxo de Calor (mW/g)</b>	0.9	0.8	0.7
<b>Aceleração da</b> <b>Reação (mW/g.h)</b>	0.7	0.7	0.6
<b>Fluxo de Calor</b> <b>Máximo (mW/g)</b>	3.2	3.4	3.4

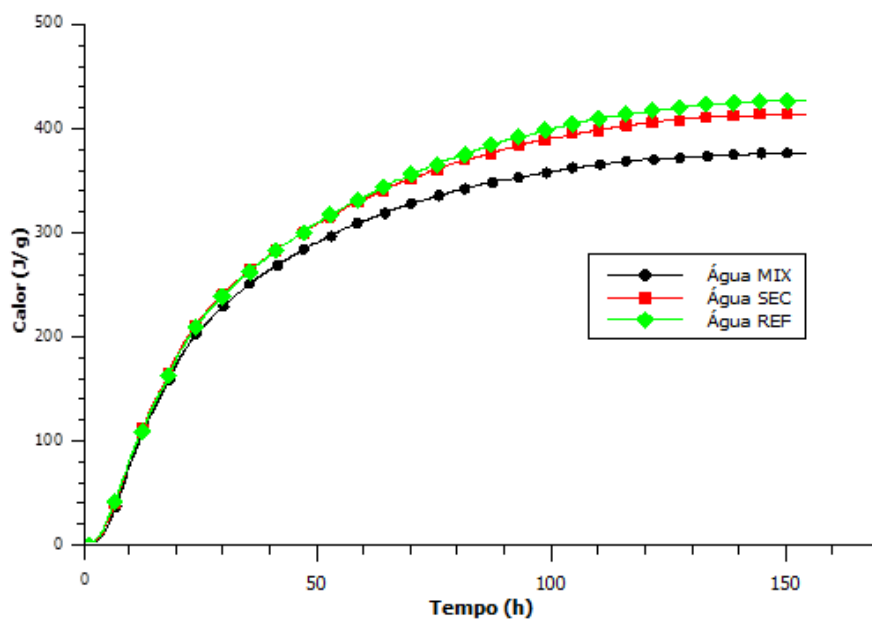


Figura 35- Calorimetria isotérmica: calor acumulado das matrizes cimentícias

#### 4.8. Caracterização da Microestrutura das Matrizes

##### 4.8.1. Análise termogravimétrica

A Figura 36 a Figura 41 apresentam os resultados dos ensaios de análise térmica aplicados às pastas de cimento estudadas com 7 e 28 dias. A quantificação dos produtos degradados obedeceu ao disposto na Equação 8 (Desidroxilação) e Equação 9 (Descarbonatação). Além destes, foi obtida também o percentual referente à Água Total



Combinada, da qual se extrai a massa total de hidratos conforme descrito no item 3.6.3. Os valores obtidos nesse ensaio para cada matriz estudada estão apresentados na Tabela 27.

O primeiro conjunto de picos representa a perda de massa de hidratos, conforme já detalhado no item 3.6.3. O segundo pico representa a degradação da portlandita, que ocorre próxima à temperatura de 400 °C, na qual a variação de massa apresentada no gráfico representa a perda de água ocorrida nesta reação. O último pico representa a degradação da calcita, que ocorre em torno de 600 °C, e onde a variação de massa observada simboliza a perda de  $CO_2$  ocorrida nesta reação.

Pode-se observar que os ensaios nas diferentes matrizes cimentícias apresentaram resultados semelhantes. Entretanto, o resultado referente à matriz SEC aos 28 dias destoou devido à redução do primeiro pico, associado ao C-S-H e à etringita.

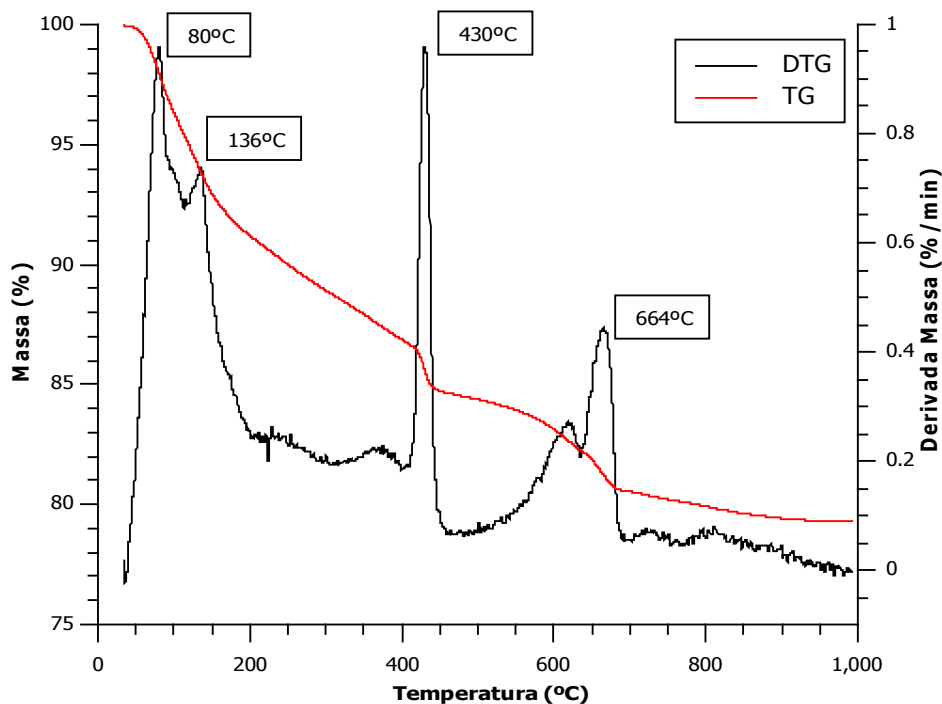


Figura 36 - Análise termogravimétrica da Matriz REF com 7 dias

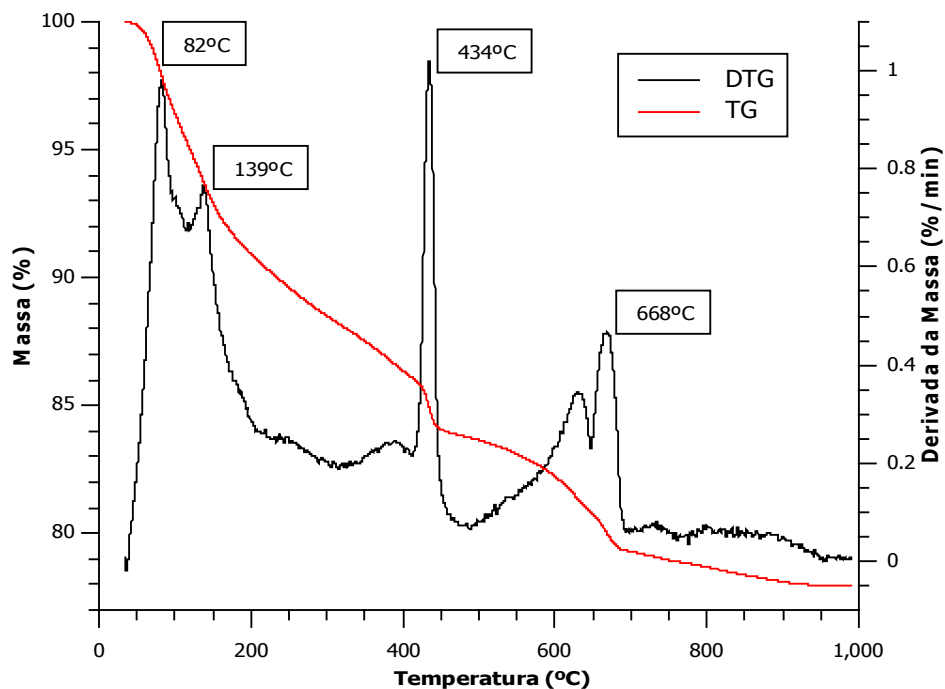


Figura 37 - Análise térmica da Matriz REF com 28 dias

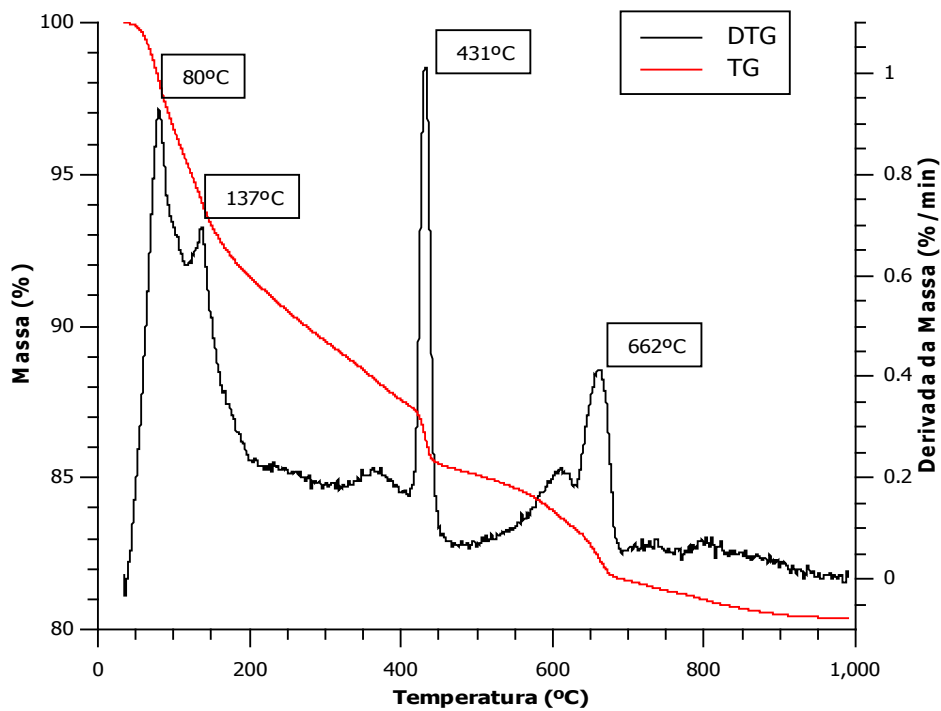


Figura 38 - Análise térmica da Matriz SEC com 7 dias

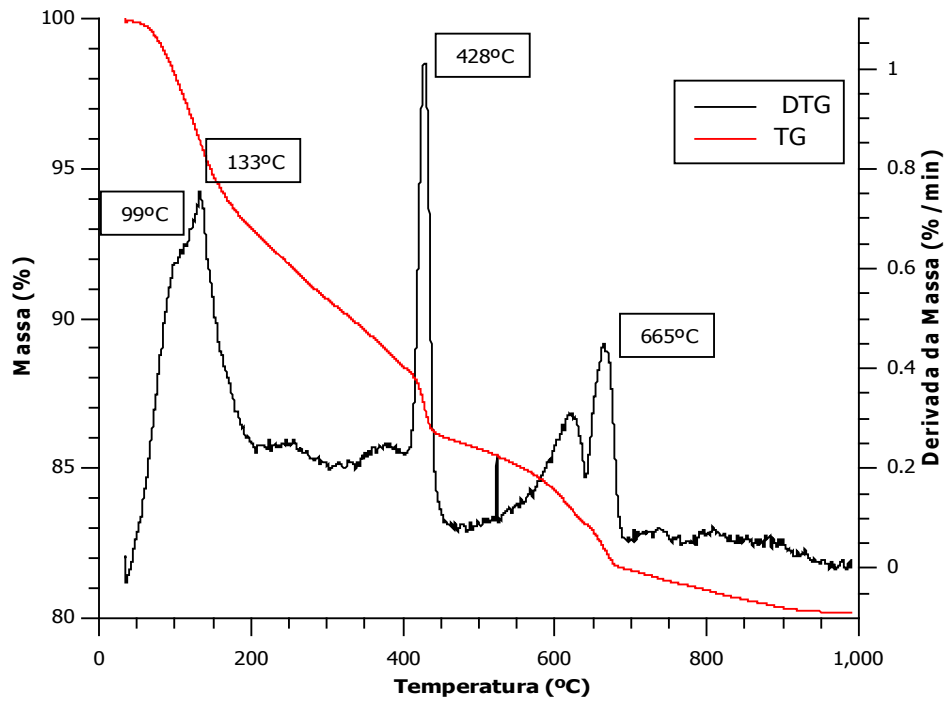


Figura 39 - Análise térmica da Matriz SEC com 28 dias

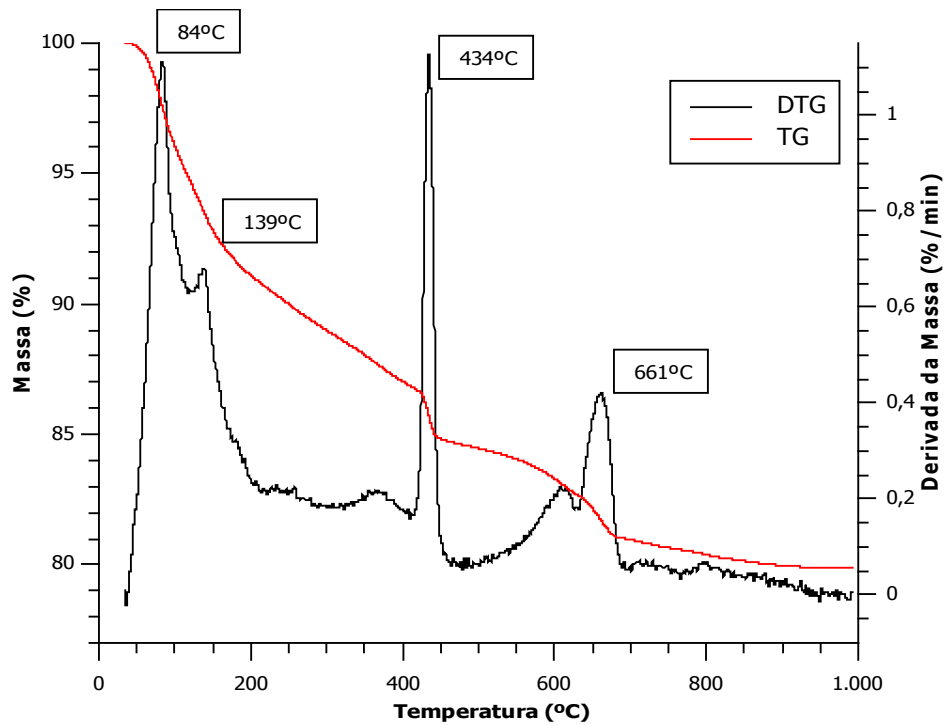


Figura 40 - Análise térmica da Matriz MIX com 7 dias

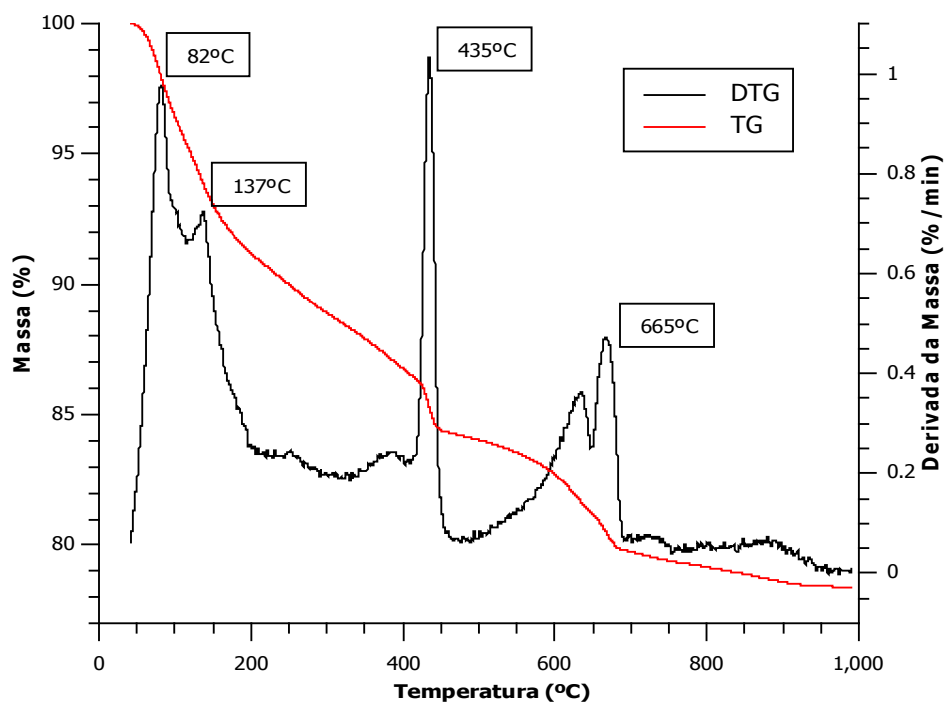


Figura 41 - Análise térmica da Matriz MIX com 28 dias

Tabela 27 - Quantificação dos produtos na análise térmica

<b>Matriz</b>	<b>Água Total Combinada (%)</b>	<b>Ca(OH)<sub>2</sub> Total (%)</b>	<b>CaCO<sub>3</sub> Total (%)</b>
<i>REF 7</i>	15,5	9,7	8,5
<i>SEC 7</i>	16,2	9,8	7,6
<i>MIX 7</i>	15,4	9,3	8,7
<i>REF 28</i>	16,3	9,6	9,7
<i>SEC 28</i>	14,1	10,2	8,6
<i>MIX 28</i>	17,3	10,1	9,4

A Figura 42 apresenta a evolução da portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>), já a Figura 43 apresenta a evolução da calcita (CaCO<sub>3</sub>) e, por fim, a Figura 44 apresenta a evolução da água total combinada. Ressalta-se que os resultados apresentados são referentes à porcentagem da massa inicial das amostras de acordo com as idades estudadas.

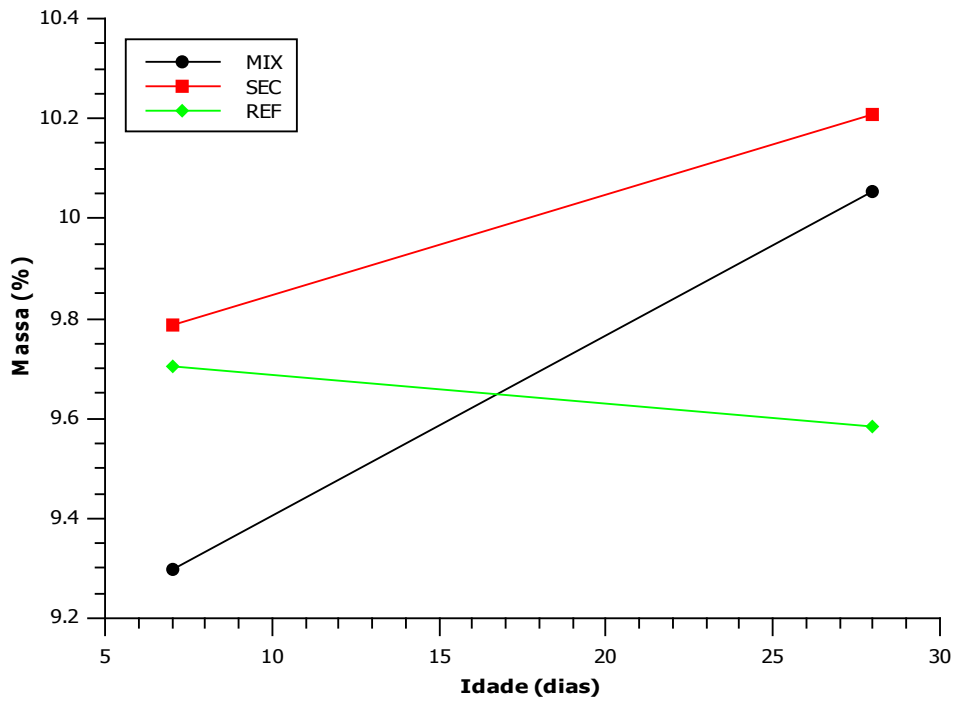


Figura 42 - Evolução da portlandita nas matrizes estudadas

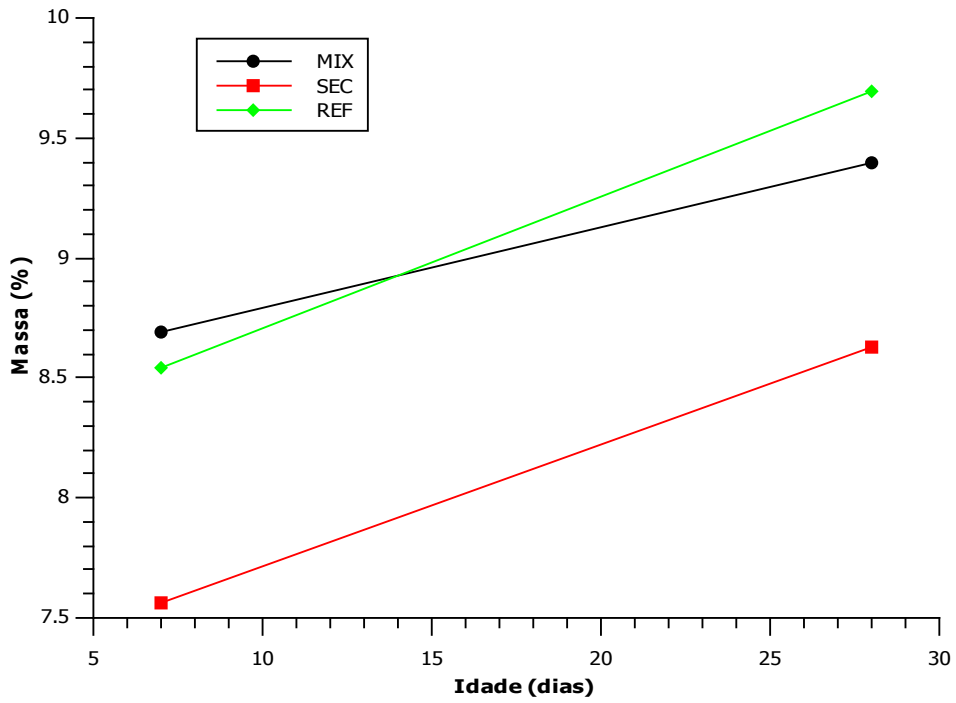


Figura 43 - Evolução da calcita nas matrizes estudadas

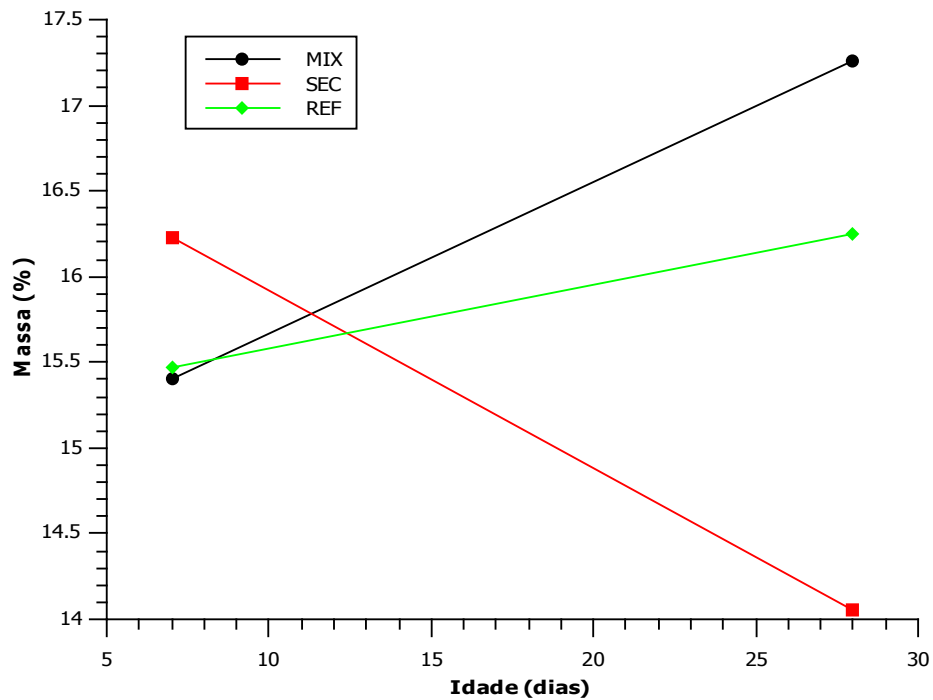


Figura 44 - Evolução da água total combinada nas matrizes estudadas

A partir dos resultados apresentados, nota-se que para a idade de 7 dias a matriz MIX apresenta uma porcentagem menor de portlandita em relação a massa inicial, que aumenta 0,76% com o avançar da idade. A matriz SEC também aumentou a quantidade de portlandita com a idade, mas o seu valor aos 7 dias já era maior. Já a matriz REF tem comportamento quase constante com a idade, apresentando uma leve queda na porcentagem (0,12% da massa inicial). Pode-se observar ainda que a matriz REF e a matriz SEC apresentaram porcentagem de portlandita similares aos 7 dias e maiores que a matriz MIX.

Esse comportamento pode ser justificado pela presença de matéria orgânica em maior quantidade na matriz MIX, o que retarda a reação de hidratação do cimento em relação às demais matrizes, e, por conseguinte, a formação da portlandita enquanto seu produto. Este resultado vai ao encontro do comportamento observado nos ensaios de tempo de pega e calorimetria isotérmica.

No tocante aos resultados associados à calcita, nota-se a matriz REF e a MIX apresentaram comportamento parecidos, sendo que a primeira teve um acréscimo maior com a idade. Porém, a matriz SEC apresentou porcentagem de calcita cerca de 1% inferior

às demais nas duas idades. Isso pode ser justificado pela presença maior de nitratos na matriz SEC em relação às demais matrizes. Essa maior concentração de íons nitrato associada à presença de compostos a base de cálcio presentes no cimento pode favorecer a formação de nitrato de cálcio, e motiva a redução na massa de calcita observada. Essa hipótese já havia sido levantada no estudo da cinética de hidratação.

O resultado referente à parcela de água total combinada apresentou a mesma tendência observada no gráfico referente à calcita para as matrizes REF e MIX, tendo esta última apresentado um crescimento mais acentuado aos 28 dias, de 1,7% em valor absoluto da massa inicial. Esse resultado vai ao encontro dos resultados referentes à compressão axial, visto que a matriz MIX apresentou maiores resistências, associados portanto ao maior índice de hidratos observados, em especial o C-S-H, responsável principal por conferir resistência mecânica ao material.

Para o caso da matriz SEC, nota-se um forte decréscimo de massa entre as idades de 7 e 28 dias, equivalente a 2,27% da massa inicial. Observando-se em conjunto o resultado referente à calcita para esta mesma matriz, nota-se que a potencial presença de nitrato de cálcio no sistema pode ter comprometido a formação dos hidratos ao longo da reação de hidratação do cimento. Isso pode ter ocasionado à anomalia verificada na Figura 39, visto que a redução do teor de hidratos aos 28 dias, em especial do C-S-H, o que pode ter ocasionado a redução do primeiro pico. Nesta linha, o presente resultado pode vir a ratificar o desempenho mecânico aos 28 dias inferior às demais matrizes, observado no item 4.5.

#### *4.8.2. Microscopia Eletrônica de Varredura*

O resultado do ensaio de microscopia eletrônica é apresentado nas Figura 45 a Figura 50. São apresentadas imagens de cada uma das matrizes, com as respectivas curas, para a idade de 7 dias, realizadas no MEV da marca HITACHI modelo TM 3030, localizado no NUMATS/COPPE/UFRJ. Ressalta-se que as amostras foram ensaiadas sem qualquer recobrimento.

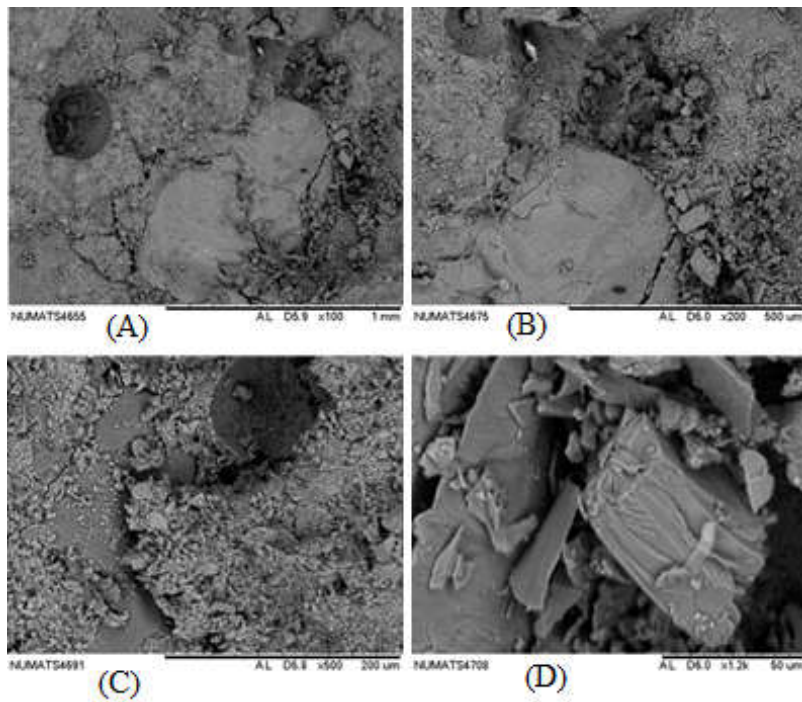


Figura 45: Matriz REF, curada em água potável, com idade de 7 dias. Magnificação (A) x100, (B)x200, (C)x500, (D)x1200

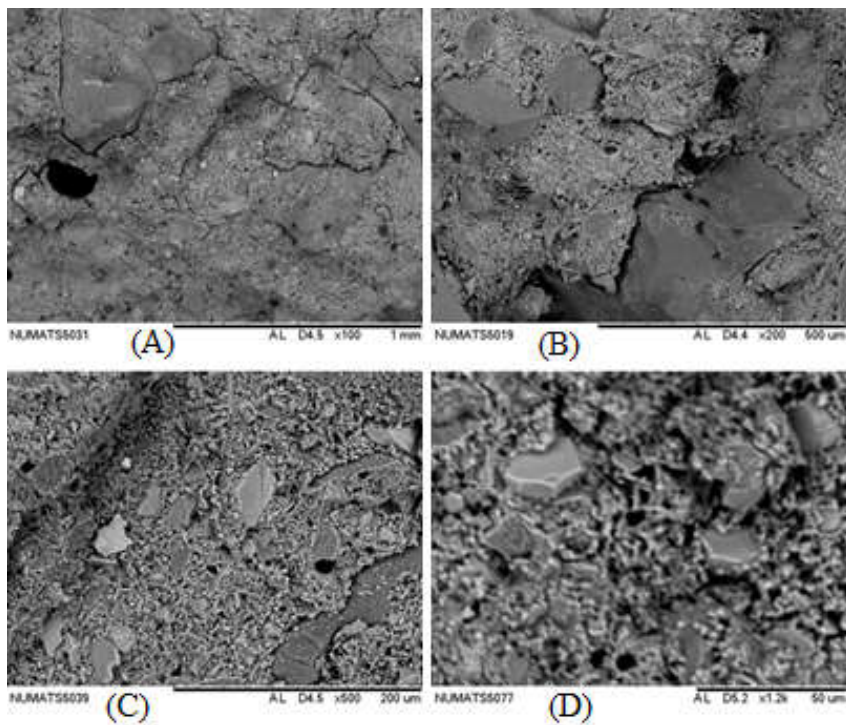


Figura 46: Matriz REF, curada em água de reuso, com idade de 7 dias. Magnificação (A)x100, (B)x200, (C)x500, (D)x1200



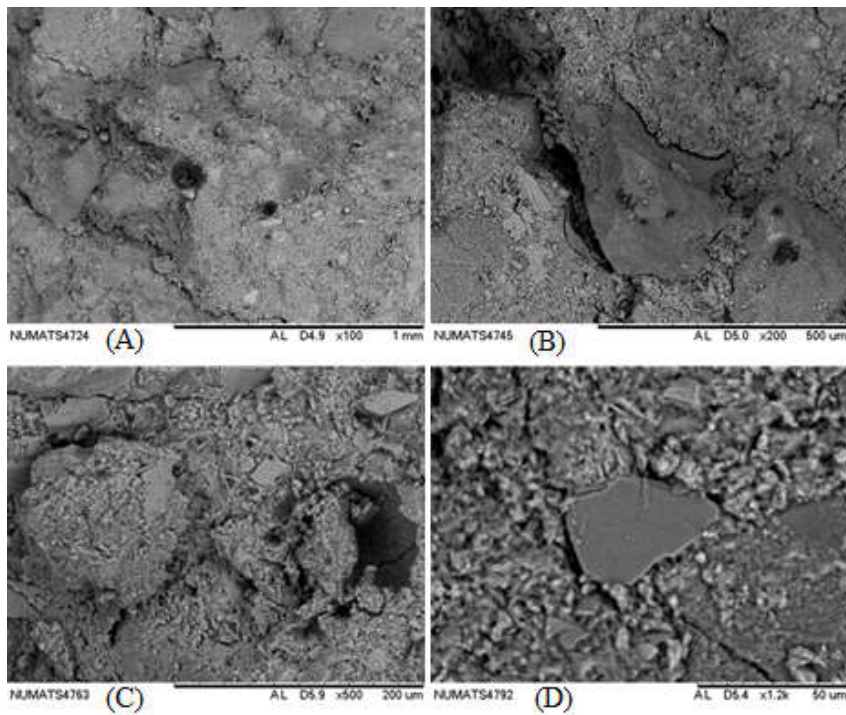


Figura 47: Matriz SEC, curada em água potável, com idade de 7 dias. Magnificação (A)x100, (B)x200, (C)x500, (D)x1200

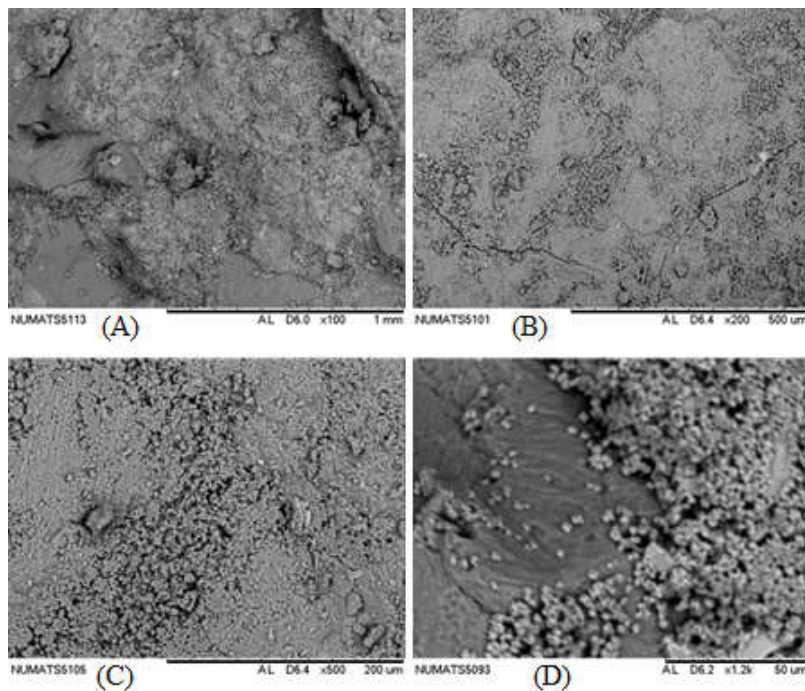


Figura 48: Matriz SEC, curada em água de reuso, com idade de 7 dias. Magnificação (A)x100, (B)x200, (C)x500, (D)x1200

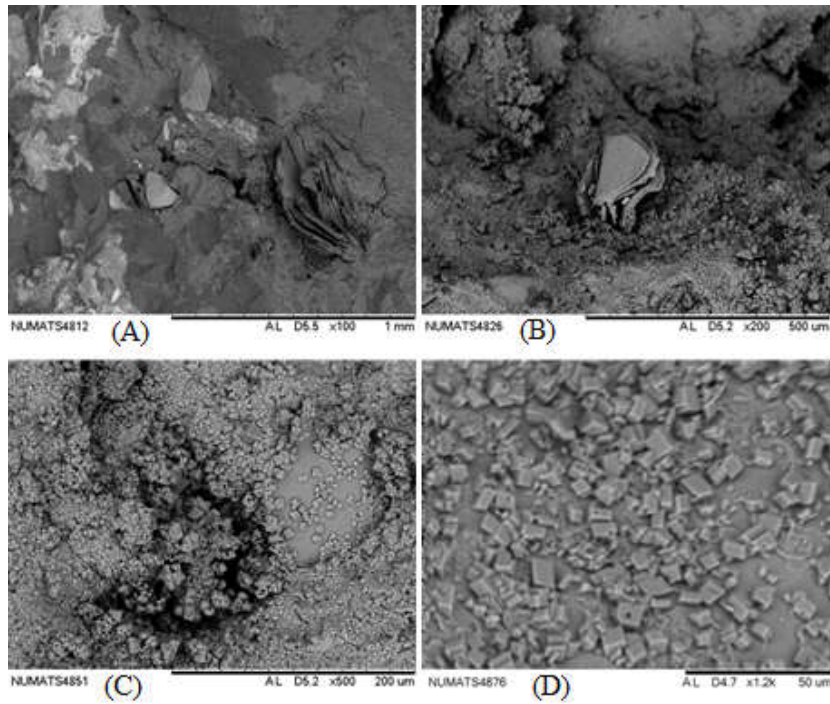


Figura 49: Matriz MIX, curada em água potável, com idade de 7 dias. Magnificação (A)x100, (B)x200, (C)x500, (D)x1200

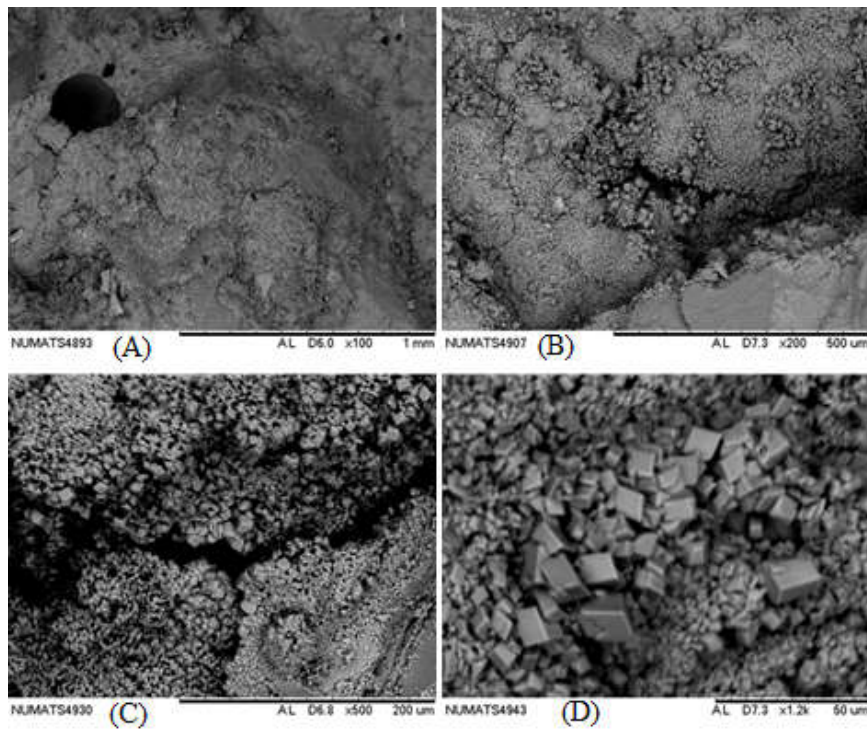


Figura 50: Matriz MIX, curada em água de reuso, com idade de 7 dias. Magnificação (A)x100, (B)x200, (C)x500, (D)x1200

Observando-se as imagens apresentadas, é possível perceber que a variação no tipo de cura praticamente não alterou a microestrutura do concreto.

Por outro lado, as imagens referentes à matriz MIX se destacaram perante as demais matrizes. É possível observar a presença de inúmeros cristais alojados na superfície da amostra, tornando esta matriz mais densa, o que por sua vez valida os resultados obtidos nos ensaios de compressão e pulso ultrassônico.

Na matriz SEC também são observados cristais depositados na superfície da amostra, porém em menor quantidade. Desta forma, comparativamente à matriz MIX, a formação destes cristais torna-se pouco relevante.

De maneira análoga, as imagens referentes à microscopia eletrônica da matriz REF indicam apenas a formação de produtos de hidratação do cimento na amostra, conforme esperado.

Tomando-se por base a presença massiva de cristais na amostra referente à matriz MIX, e com o objetivo de caracterizar melhor estes cristais, optou-se por submeter uma amostra da matriz MIX curada em água potável por 7 dias a um microscópio eletrônico de maior porte. Esta amostra foi recoberta com ouro, com o objetivo de melhorar a resolução das imagens obtidas, e assim, foi submetida à nova microscopia no MEV TESCAN modelo VEGA3, localizado no Núcleo de Microscopia do PEMM/COPPE/UFRJ.

O resultado deste ensaio é apresentado na Figura 51.

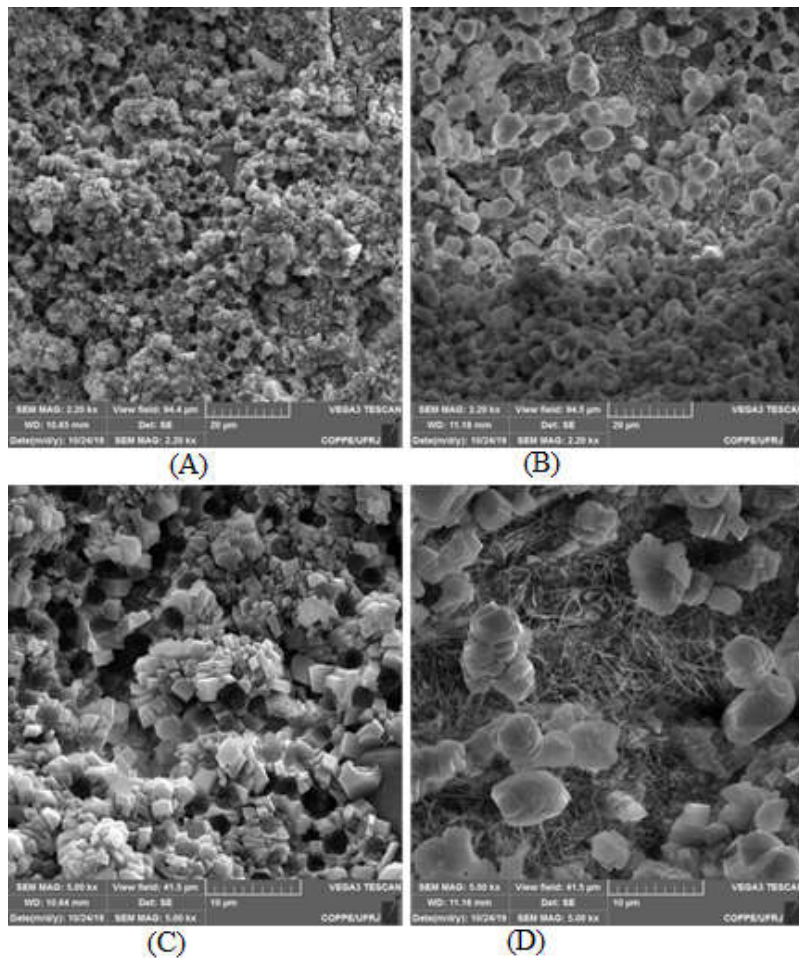


Figura 51: Matriz MIX, curada em água potável, com idade de 7 dias. (A) Imagem 1 – Magnificação x2200, (B) Imagem 2- Magnificação x2200, (C) Imagem 1 - Magnificação x5000, (D) Imagem 2- Magnificação x5000

Observando-se a amostra com um grau de aproximação e resolução melhores, é possível perceber que existem variadas morfologias nos cristais observados.

A partir da identificação de cristais distintos compondo a matriz MIX, foi aplicada a técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) com o intuito de se obter a composição química destas aglomerações observadas. Os resultados deste ensaio são apresentados a seguir na Figura 52, Tabela 28, Tabela 29, Tabela 30, Tabela 31 e Tabela 32.

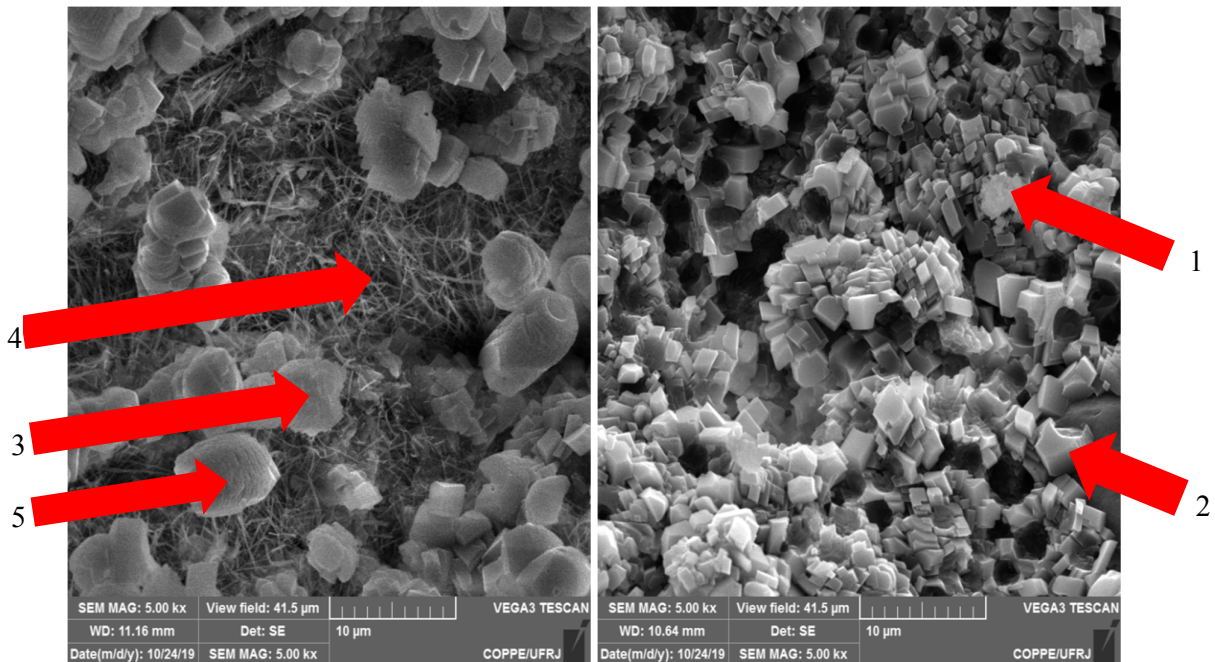


Figura 52 - Pontos de aplicação da técnica de EDS

Tabela 28 - Composição química do ponto 1 marcado na Figura 52

Spectrum	C	N	O	F	Na	Mg	Si	S	K	Ca	Br	Sr
MIX_7_5000x276	15,66	7,53	49,30	2,83	0,69	0,40	0,59	0,51	0,04	21,74	0,08	0,40

Tabela 29 - Composição química do ponto 2 marcado na Figura 52

Spectrum	C	O	Al	Si	K	Ca
MIX_7_5000x277	13,03	56,74	0,02	0,33	0,05	29,83

Tabela 30 - Composição química do ponto 3 marcado na Figura 52

Spectrum	C	N	O	Na	Mg	Si	S	K	Ca	Cr	Fe
MIX_7_5000x298	22,75	7,31	32,81	1,07	0,51	2,18	0,74	0,21	29,05	1,09	1,63

Tabela 31 - Composição química do ponto 4 marcado na Figura 52

Spectrum	C	N	O	Na	Mg	Si	S	Cl	K	Ca	Cr	Fe	Br
MIX_7_5000x299	20,60	6,95	38,76	0,15	0,09	1,23	0,44	0,01	0,30	28,75	0,74	1,72	0,08

Tabela 32 - Composição química do ponto 5 marcado na Figura 52

Spectrum	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Br
MIX_7_5000x 300	18,77	7,90	44,39	0,40	0,23	0,08	0,91	0,45	0,13	25,26	1,31	0,16

A partir dos resultados apresentados é possível identificar aspectos relevantes neste ensaio. O primeiro deles diz respeito à alta gama de elementos químicos observados na composição desta matriz. Levando-se em conta o disposto no item 4.2, a água de reuso aplicada nesta matriz pode ter sofrido contaminação por água salgada, o que explicaria o alto grau de diversidade de elementos químicos observados.

Outro ponto a ser observado é a ausência de nitrogênio no cristal identificado no ponto 2. Por se tratar de uma água proveniente de esgotamento sanitário, é esperado que esta apresente em sua composição compostos nitrogenados. Tal premissa é observada em todos os demais pontos, a exceção do ponto 2. Desta forma, observando-se também as concentrações associadas aos elementos Carbono, Cálcio e Oxigênio é possível classificar este cristal como Carbonato de Cálcio. Um outro composto cuja identificação se faz possível é o que está representado pelo ponto 4. A partir da imagem gerada pelo microscópio, o formato característico de cristais em forma de agulha indica a presença de etringita, que é um dos produtos convencionais da reação de hidratação do cimento.

No tocante aos demais cristais apontados, o resultado do MEV associado ao EDS não é suficiente para permitir sua adequada caracterização.

#### 4.8.3. Difractometria de Raio-X

Conforme constatado ao final do ensaio de microscopia eletrônica, não foi possível caracterizar todos os cristais apontados apenas com essa técnica. Nesse contexto, o ensaio de difratometria de raios-x pode fornecer dados complementares ao EDS, e assim facilitar a identificação dos cristais observados na matriz MIX.

A Figura 53 apresenta o resultado do ensaio de difratometria de raios-x aplicado à matriz MIX com idade de 7 dias. Neste resultado, é possível identificar diversos picos no gráfico. Cada um dos picos principais do gráfico está associado a ocorrências cristalinas na matriz cimentícia estudada. A partir da posição dos picos é possível fazer a associação destes a formações cristalinas conhecidas. Desta forma, os cristais puderam ser identificados conforme Tabela 33.

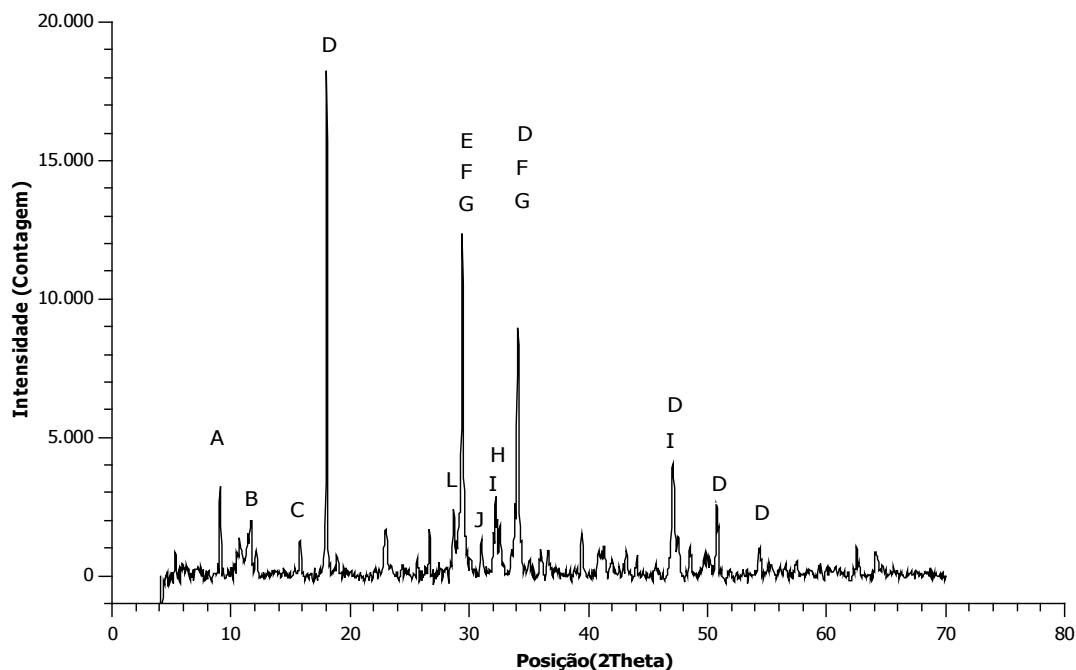


Figura 53 - DRX aplicado à matriz MIX, com idade de 7 dias, mostrando os picos associados a cada cristal, sendo (A) Etringita, (B) Hidrotalcita, (C) Formato de Cálcio, (D) Portlandita, (E) Calcita, (F) Alita, (G) Belita, (H) Oxalato de Cálcio, (I) Cloreto de Sódio, (J) Cloreto de Cálcio, (L) Nitrato de Cálcio.

Tabela 33 - Caracterização dos cristais por DRX na matriz MIX com idade de 7 dias segundo a base de dados cristalográfica PDF-2

<b>Código PFD-2</b>	<b>Cristal Presente</b>	<b>Fórmula Química</b>
00-041-1451	Etringita	$Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$
01-089-0460	Hidrotalcita	$Mg_6Al_2CO_3(OH)_{16} \cdot 4H_2O$
00-008-0825	Formato de Cálcio	$C_2H_2CaO_4$
01-081-2041	Portlandita	$Ca(OH)_2$
01-086-2334	Calcita	$CaCO_3$
01-070-1846	Alita	$3CaO \cdot SiO_2$
00-033-0302	Belita	$2CaO \cdot SiO_2$
00-014-0770	Oxalato de Cálcio	$C_2CaO_4 \cdot H_2O$
01-083-1728	Cloreto de Sódio	$NaCl$
01-070-2740	Cloreto de Cálcio	$CaCl_2$
00-001-1215	Nitrato de Cálcio	$Ca(CO_3)_2$

A partir deste resultado, torna-se possível identificar os cristais apontados no MEV/EDS. Concatenando-se as concentrações de cada um dos elementos químicos nos

apontamentos realizados no EDS, as imagens geradas através do MEV, e com a formulação química dos cristais presentes na matriz proveniente do DRX, chega-se à seguinte correlação:

- Ponto 1 da Figura 52 = Oxalato de Cálcio;
- Ponto 2 da Figura 52 = Carbonato de Cálcio;
- Ponto 3 da Figura 52 = Formato de Cálcio;
- Ponto 4 da Figura 52 = Etringita;
- Ponto 5 da Figura 52 = Hidrotalcita.

Se comparados os resultados do ensaio de difratometria de raio-x com a microscopia acoplada ao EDS, nota-se que os compostos observados tem conexão com os comportamentos verificados ao longo dos ensaios realizados na matriz preparada com água MIX. A partir das formações cristalinas identificadas, observa-se que:

- Etringita, Calcita e Portlandita são produtos convencionais da reação padrão de hidratação do cimento;
- Alita e Belita representam a parcela de cimento anidro;
- Formato de Cálcio é um composto formado a partir da reação do ácido fórmico com a calcita e portlandita, conforme SIDLEY (2019). A presença deste composto nesta matriz pode justificar o resultado observado no ensaio de análise térmica na matriz MIX aos 7 dias. Isto porque neste ensaio a referida matriz apresentou valores de portlandita e calcita inferiores às demais matrizes;
- Nitrato de Cálcio e Cloreto de Cálcio podem funcionar como aceleradores da reação, conforme apresentado na Tabela 7. A Hidrotalcita, com potencial origem a partir da autodepuração dos esgotos no sistema de lodos ativados (NEW ATLAS, 2014), também funciona como elemento catalisador de reação química, conforme SALOMAO, *et al.* (2011). Esse comportamento de intensificação das reações químicas foi observado nos ensaios de calorimetria e análise térmica na matriz MIX.



## 5. Conclusões

Em um contexto onde a preservação da água potável para seus usos mais nobres se faz cada vez mais necessária, a implementação do reuso de águas na construção civil, em especial, no concreto surge como uma alternativa atrativa. De forma a verificar a viabilidade dessa substituição, esta pesquisa objetivou examinar os efeitos da substituição da água potável por água de reuso proveniente de esgotos sanitários tratados no preparo do concreto.

No tocante aos parâmetros de qualidade das águas de reuso constatou-se que ambas as águas analisadas (MIX e SEC) atendem aos limites técnicos preconizados pela NBR 15900 (2009), bem como os parâmetros de segurança sanitária demandados pela NBR 13969 (1997), evidenciando assim o sucesso nas etapas de tratamento e desinfecção dos efluentes sanitários empregados nesta pesquisa. O único adendo fica por conta da aplicabilidade da água MIX, visto que sob a ótica da norma esta água apenas poderia ser empregada em concretos sem fins estruturais, dada sua alta concentração de íons cloreto.

Por outro lado, deve-se considerar o fato de que, ao contrário da água SEC, proveniente exclusivamente de efluente sanitários tratados, a água MIX provavelmente continha não apenas efluentes sanitários tratados, mas também água marinha. Ressalta-se que esta contaminação em potencial se deu em virtude de uma particularidade do sistema de esgotamento do campus da UFRJ, ocorrendo de maneira fortuita, uma vez que a contaminação foi descoberta ao longo dos ensaios.

Apesar destas particularidades, os estudos de dosagem, bem como os testes de abatimento de tronco de cone mostraram que ambas as águas de reuso estudadas apresentaram grau de trabalhabilidade idêntico ao da água potável quando aplicadas no amassamento do concreto.

No tocante ao desempenho mecânico das matrizes estudadas, todas as matrizes apresentaram comportamento satisfatório, visto que na maior parte dos ensaios as águas de reuso apresentaram comportamento superior ao da matriz de referência, e, quando inferiores, a perda não foi maior que 10%. Dentre todas as matrizes, a que apresentou os maiores valores absolutos de resistência foi a matriz constituída por água MIX. Isto pode ser justificado se considerada a hipótese de presença de água do mar nesta matriz, haja vista o fato de que a água marinha carrega consigo grande quantidade de sais, que por sua

vez contribuem no preenchimento de vazios na matriz cimentícia, elevando assim a sua capacidade de carga.

A densificação das matrizes a partir da presença de sólidos dissolvidos e em suspensão nas águas de reuso também é observada no ensaio de pulso ultrassônico, onde as matrizes compostas por estas águas apresentaram as maiores velocidades de propagação.

Adicionalmente, o estudo de cura dos corpos de prova mostrou equivalência de desempenho entre a água de reuso e a água potável. Os corpos de provas curados em água de reuso proveniente de tratamento secundário apresentaram resultados semelhantes no ensaio mecânico de compressão. A análise da microestrutura das amostras rompidas também mostrou que a água de reuso empregada na cura do concreto não afeta o desenvolvimento de suas propriedades.

Com relação aos efeitos associados à cinética de hidratação do cimento, notou-se que o teor de matéria orgânica presente na água é diretamente proporcional ao retardo no tempo de pega deste material, evidenciado especificamente a partir do alongamento do período de dormência. Além disso, a análise dos resultados dos testes de calorimetria isotérmica indicou que o pico associado ao final do período de aceleração é maior nas águas de reuso, podendo esse fenômeno ser atribuído à ação do nitrato de cálcio. Por outro lado, as matrizes compostas por águas de reuso apresentaram uma quantidade de calor liberado ao longo da reação de hidratação menor que a matriz de referência, podendo esse comportamento ser atribuído ao efeito da amônia nas águas de reuso.

No contexto da análise microestrutural das matrizes compostas por águas de reuso, os resultados da análise térmica mostraram que na amostra composta por água SEC apresentou valores de água total combinada e calcitas menores que as demais matrizes. A potencial presença de nitrato de cálcio nesta matriz pode ter contribuído para este comportamento.

Ainda com relação ao estudo em microescala da matriz, os ensaios de DRX, MEV e EDS reforçaram a premissa de que a matriz composta pela água MIX apresentava contaminação por água do mar, haja vista a elevada quantidade de cristais observados e identificados. A origem destes cristais pode estar associada à interação entre os íons presentes nas águas de reuso e os componentes da reação de hidratação do cimento. Desta

forma, foi possível visualizar a deposição destes internamente no material, de modo que esta matriz apresentou uma densificação de sua estrutura, ratificando assim os resultados já observados nos testes de comportamento mecânico da matriz.

Sendo assim, a partir dos resultados obtidos, frutos do presente trabalho, fica evidente que o emprego de águas de reuso em atividades intrínsecas de produção de concreto não apenas é viável, como por vezes promove melhorias no desempenho global das matrizes obtidas. Os resultados desta pesquisa ratificam os estudos realizados em outros países, além de contribuir na promoção do reuso de águas no âmbito nacional, especialmente no âmbito da NBR 15900 (2009).

Além disso, a presente pesquisa insere resultados referentes à cinética de hidratação de matrizes cimentícias produzidas com o emprego de águas de reuso, temática inédita na literatura técnica. As repercussões provenientes destes ensaios permitiram identificar possíveis efeitos na hidratação do cimento associados à composição das águas de reuso nessas matrizes. Porém, ressalta-se que, a despeito de qualquer efeito observado, ambas as águas de reuso estudadas apresentaram resultados satisfatórios em comparação a matriz de referência produzida com água potável.

O estudo comparativo entre a água de reuso submetida ao tratamento secundário e a água potável quando aplicadas ao processo de cura do concreto gerou um resultado de significativo impacto na literatura, visto que se constatou a viabilidade de substituição da água potável, comumente empregada, pela água de reuso sem prejuízos para a qualidade e desempenho do material.

## **6. Sugestões para trabalhos futuros**

Tendo-se em vista a aplicação bem sucedida das águas de reuso em termos de desempenho mecânico, cinética de hidratação e microestrutura das matrizes cimentícias, é essencial expandir este estudo para avaliação de parâmetros de durabilidade destes materiais. Fundamentalmente deve-se avaliar se o comportamento observado no presente trabalho se mantém em condições adversas de uso, uma vez que a durabilidade é um dos requisitos mais importantes no que diz respeito ao concreto e suas aplicações

Outra vertente que também se destaca como oportunidade de trabalhos futuros é a aplicação integral de águas de reuso provenientes de tratamento apenas primário em substituição à água potável no amassamento e na cura do concreto. O presente trabalho atestou a viabilidade do emprego de 50% do efluente primário somado a 50% do efluente secundário. Desta forma, um estudo de viabilidade acerca do emprego de efluentes tratados primariamente na produção do concreto tem potencial para gerar uma economia ainda maior, visto que reduziria custos com insumos no tratamento de esgotos.

Alternativamente, uma temática que desponta também com amplo campo para pesquisas futuras diz respeito ao estudo de diferentes metodologias de tratamento de esgotos sanitários, e seus efeitos em matrizes cimentícias. Tendo-se em vista o amplo conjunto de técnicas de tratamento de esgotos, com distintas eficiências de remoção de impurezas, além da possível variabilidade dos esgotos de acordo com a localidade, torna-se interessante estudar a variabilidade das águas de reuso e seus impactos no concreto.

## **7. Referências Bibliográficas**

ABNT, 1997. *ABNT NBR 13969:1997*. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 1997. *ABNT NBR 13969: Tanques Sépticos - Unidades de Tratamento Complementar e Disposição Final dos Efluentes Líquidos - Projeto, Construção e Operação*. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2001. *ABNT NBR NM 30: Agregado Miúdo - Determinação da Absorção de Água*. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2003. *ABNT NBR NM 248 : Agregados - Determinação da Composição Granulométrica*. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2007. *ABNT NBR 5739: Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos*. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2009. *ABNT NBR 15900-1: Água para Amassamento do Concreto*. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2009a. *ABNT NBR NM 53: Agregado Graúdo - Determinação da Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção de Água*. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2009b. *ABNT NBR NM 52 - Agregado Miúdo - Determinação da Massa Específica e Massa Específica Aparente*. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2015. *ABNT NBR 5738: Concreto - Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos de Prova*. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2018. *ABNT NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos*. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2019. *ABNT NBR 15527: Água de Chuva - Aproveitamento de Coberturas em Áreas Urbanas para fins não potáveis - Requisitos*. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABOELKHEIR, M., SIQUEIRA, C. Y. S., SOUZA JR., F. G. & TOLEDO FILHO, R. D., 2018. Influence of Styrene-Butadiene Co-Polymer on Hydration Kinetics os SBR-Modified Well Cement Slurries. *Macromolecular Symposia*, 16 Agosto, pp. 1-6.

ACI, 1991. *ACI 211.1 - Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. ACI Committee 211: American Concrete Institute.

AÏTCIN, P.-C., 2000. Cements of yesterday and today - Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, 10 Julho, pp. 1349-1359.

AMARIO, M., 2015. *Dosagem Científica de Concretos Estruturais Contendo Agregado de Resíduo de Concreto (ARC)*. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado: COPPE/UFRJ.

AMN, 1998. *NM 67: Concreto - Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone*. AMN: Asociación Mercosur de Normalización.

AMN, 2002. *NM 43: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal*. AMN: Asociación Mercosur de Normalización.

AMN, 2002a. *NM 65: Cimento portland - Determinação do tempo de pega*. AMN: Asociación Mercosur de Normalización.

ANA, 2017. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno*. Brasília: p. 169.

ANDRADE, W. P. d., FONTOURA, J. T. F. & BITTENCOURT, R. M., 1981. *Elevação Adiabática de Temperatura do Concreto*. Brasil: Furnas S.A..

ARIAS, Y. P., PAYÁ, J. & OCHOA, J. C., 2015. Halogen light thermogravimetric technique for determining the retained water in fine aggregates used for concrete mixing design. *J Therm Anal Calorim*, 14 Julho, pp. 127-134.

ASADOLLAHFARDI, G., DELNAVAZ, M., RASHNOIEE, V. & GHONABADI, N., 2016. Use of Treated Domestic Wasterwater before Chlorination to produce and cure Concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 105, pp. 253-261.

ASKUSHAJ, D. & MULAJ, T., 2016. The Influence Of Solvent Exchange On Porosity Of Cement Pastes Identified By Mercury Intrusion Porosimetry. *Journal of*

*Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, 12 Dezembro, pp. 6281-6284.

ASTM, 2008. *ASTM C 403/C - Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance*. USA: ASTM.

AWWA, 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th edition*. 20ª ed. American Water Works Association, American Public Health Association: Water Environment Federation.

BARRETO, L. P. G. L., 2015. *O Estudo da Águas Real e Virtual no Concreto Usinado*. Belém: UFPA.

BASF, 2019. *Ficha Técnica - Aditivo super plastificante Glenium 51*. São Paulo: BASF - The Chemical Company.

BRASIL, 1997. *Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997*. Brasília, DF.

BSI, 2018. *BS EN 196-11:2018 - Methods of testing cement. Heat of hydration, Isothermal Conduction Calorimetry method*. United Kingdom: British Standards Institution.

BULLARD, W. *et al.*, 2011. Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research* 41, Dezembro, pp. 1208-1223.

BUNGEY, J. H., MILLARD, S. G. & GRANTHAM, M. G., 2006. *Testing os Concrete in Structures*. 4ª ed. London & New York: Taylor & Francis.

CAMPOS, G., 2005. *PROCELAB*. Brasil: Procedimentos e Métodos de Laboratório destinados à Cimentação de Poços Petrolíferos.

CCAA, 2007. *Use of Recycled Water in Concrete Production*. Australia: Cement Concrete & Aggregates Australia.

CEBECI, O. Z. & SAATICI, A. M., 1989. Domestic Sewage as Mixing Water in Concrete. *ACI Materials Journal*, Volume 86, pp. 503-506.

CERQUEIRA, G. A.; *et. al.*, 2015. *A Crise Hídrica e suas Consequências*. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado.

CESA, 2018. *Centro Experimental de Saneamento Ambiental: Lodos Ativados*. Disponível em: <http://www.saneamento.poli.ufrj.br/index.php/br/infraestrutura/lodos-ativados>. Acesso em 18 de Março de 2018.

CFA-GESAE, 2017. *Sistema CFA de Governança, Planejamento e Gestão Estratégica de Serviços Municipais de Água e Esgotos*. Disponível em: <https://gesae.org.br>

CIRILO, J. A., 2015. Crise Hídrica: Desafios e Superação. *Revista USP*, pp. 45-58.

CNRH, 2005. *Resolução nº 54, de 28 de Novembro de 2005*. Brasília/DF: Ministério do Meio Ambiente.

CONSUMO SUSTENTÁVEL, M. D. E., 2005. Brasília: MMA/MEC/IDEC, p. 160.

D'HYPPOLITO FILHO, J. C., 2014. *Avaliação de Desempenho Mecânico sob Altas Temperaturas de Pastas Cimentícias Reforçadas com Microfibras de Volastonita para Cimentação de Poços Petrolíferos*. Rio de Janeiro: Projeto de Graduação: Escola Politécnica/UFRJ.

EL-NAWAWY, O. A. & AHMAD, S., 1991. Use of Treated Effluent in Concrete Mixing in an Arid Climate. *Cement & Concrete Composites*, pp. 137-141.

FALK, S. A. & COOPER, J. T., 2019. The Isolation of Calcium Oxalate from Fresh Spinach. *Georgia Journal of Science*, Volume 77, No. 1, Artigo 25.

FAO, 2010. *AQUASTAT - Water Withdraw*. Food and Agriculture Organization of the United Nations: United Nations.

GHRAIR, A. M. *et al.*, 2016. Influence of Grey Water on physical and mechanical properties of mortar and concrete mixes. *Ain Shams Engineering Journal*.

HACH, 2013. *Turbidity - Absorptometric Method - Method 8237*. 8ª ed. Colorado - EUA: Hach Company.

IBGE, 2010. *Censo Demográfico, Brasil: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*.



IFPRI & VEOLIA, 2015. *The murky future of global water quality*. USA: International Food Policy Research Institute.

JORDÃO, E. P. & PESSÔA, C. A., 2011. *Tratamento de Esgotos Domésticos*. ABES.

KUZ'MIN, E. D. & BARABASH, I. D., 1981. *Retarder of Heat Liberation on Concrete*. New York: Plenum Publishin Corporation.

LEE, O. S., SALIM, M. R., ISMAIL, M. & ALI, M. I., 2001. Reusing Treated Effluent in Concrete Technology. *Jurnal Teknologi*, Volume 34, pp. 1-10.

MACK-VERGARA, Y. L. & JOHN, V. M., 2017. *Life Cycle Water Inventory in Concrete Production - A review*. São Paulo: Elsevier.

MAHASNEH, B. Z., 2014. Assessment os Replacing Wastewater and treated water with Tap water in making Concrete Mix. *Journal of Geotechnical Engineering*, Abril.

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J., 2006. *Concrete - Microstructure, Properties, and Materials*. 3ª ed. California: McGraw-Hill.

NEW ATLAS, 2014. *New Atlas - Environment*. Disponível em: <https://newatlas.com/wastewater-cleans-self-hydrotalicytes-sludge/32521/>. Acesso em 02 de dezembro de 2019.

NOGUEIRA, M. R. d. S., 2010. *Otimização econômica do uso do esgoto tratado: Uma análise do transporte da água de reúso em busca da sustentabilidade*. Dissertação de Mestrado: COPPE/UFRJ.

NORUZMAN, A. H., MUHAMMAD, B., ISMAIL, M. & ABDUL-MAJID, Z., 2012. Characteristics os Treated Effluents and their potential applications for producing Concrete. *Journal of Environmental Management*, pp. 27-32.

NUCASE, 2008. *Processos de Tratamento de Esgotos: Guia do Profissional em Treinamento: Nivel 1*. Brasília: Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental.

PECHE, R. T., JAMKAR, S. S. & SADGIR, P. A., 2015. Influence of Grey Water as Mixing Water on Properties and Strength of Cement. *International Journal of Technology Enhancements and Emerging Engineering Research*, pp. 56-61.

PEDROSO, F. L., 2009. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. *Concreto & Construções*, 53(IBRACON), pp. 14-19.

PIRES, D. P., SILVA, F. H. B. T. d. & MONTEIRO, C. A. B., 2015. *Avaliação da Eficiência da Estação de Tratamento de Esgoto ETE-Alegria em Teresina-PI*. Fortaleza - Ceará: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. CONTECC 2015.

POLISSENI, G. d. C., 2018. *Efeito de Finos Reciclados de Concreto (FRC) de diferentes origens nas propriedades físico-químicas e mecânicas de matrizes cimentícias*. Dissertação de Mestrado: COPPE/UFRJ.

RANGEL, C. S., 2015. *Influência de Agregados Graúdos Reciclados nas Propriedades Estruturais de Concretos de Resistência Normal e de Alto Desempenho*. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado: COPPE/UFRJ.

ROCHA, C. A. A., 2015. *Influência da Pressão e Temperatura de Cura e da Adição de NaCl e KCl no Comportamento de Pastas para Cimentação de Poços de Petróleo*. Rio de Janeiro: Tese de Doutorado - PEC/COPPE.

SALOMAO, R., MILENA, L. M., WAKAMATSU, M. H. & PANDOLFELLI, V. C., 2011. Hydrotalcite synthesis via co-precipitation reactions using MgO and Al(OH)<sub>3</sub> precursors. *Ceramics International*, pp. 3063-3070.

SARICIMEN, H., SHAMEEM, M., BARRY, M. & IBRAHIM, M., 2008. *Testing of Treated Effluent for use in mixing and curing of Concrete*. Dhalaran, Arábia Saudita: King Fahd University of Petroleum and Minerals, Research Institute, Metrology, Standards and Materials Division.

SARKAR, K., MIRETU, T. M. & BHATTACHARJEE, B., 2014. Curing of Concrete with Wastewater and curing compounds: Effect on Strength and Water Absorption. *Indian Concrete Journal*, Volume 88, pp. 87-93.

SIDLEY, 2019. *Calcium Formate Production Process*. Disponível em: <https://celluloseether.com/calcium-formate-production-process/>  
Acesso em 29 de novembro de 2019.

SILVA, I. M. d., PONTES, M. L. d. F. C., LEITE, J. P. R. & SANTOS, K. D., 2016. *Caracterização do Efluente da Estação de Tratamento de Esgoto - Unidade Mangabeira - João Pessoa/PB*. Campina Grande, VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental.

SILVA, R. J., 2011. *Caracterização do Esgoto tratado na ETE Mangueira e a viabilidade de seu uso em mudas de eucalipto*. Recife - PE, Universidade Federal de Pernambuco.

SILVA, V. d. P. d. *et al.*, 2013. Uma Medida de Sustentabilidade Ambiental: Pegada Hídrica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Issue 17, pp. 100-105.

SNIC, 2018. *Sindicato Nacional da Indústria do Cimento*. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=20>  
Acesso em 15 de março de 2018.

SOS MATA ATLÂNTICA, 2019. *Água Limpa*. Disponível em: <https://www.sosma.org.br/nossas-causas/agua-limpa/>. Acesso em 29 de novembro de 2019.

SOUZA JR., F. G. d., 2016. *Notas de Aula - Técnicas Analíticas em Materiais Cimentícios*. Programa de Engenharia Civil: COPPE/UFRJ.

TAVARES, S. F., 2006. *Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras*. Santa Catarina: UFSC.

TAY, J.-H. & YIP, W.-K., 1987. Use of Reclaimed Wastewater for Concrete Mixing. *Journal of Environmental Engineering*, 113(5), pp. 1156-1161.

TAYLOR, H. F. W., 1997. *Cement chemistry*. 2ª ed. Londres: Thomas Telford.

TELLES, D. D. & COSTA, R. P., 2010. *Reúso da Água: Conceitos, Teorias e Práticas*. 2ª ed. São Paulo: Blucher.

TSIMAS, S. & ZERVAKI, M., 2010. *Reuse of Waste Water from Ready-Mixed Concrete Plants*. Atenas: Emerald.

UNEP, 2016. *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry*. Paris, França: United Nations Environment Programme.

VEOLIA; IFPRI, 2015. *The murky future of global water quality: New global study projects rapid deterioration in water quality*. International Food Policy Research Institute.

VIEIRA, A. P., 2018. *Avaliação da Retração Autógena de Concretos de Alto Desempenho produzidos com Cinza da Casca de Arroz*. Dissertação de Mestrado: PEC/COPPE/UFRJ.

VITORINO, F. d. C., 2012. *Caracterização Experimental de Pastas Cimentícias contendo Polímero SBR em Pó e Microfibras de Volastonita*. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado: COPPE/UFRJ.

VITORINO, F. d. C., 2017. *Influência de Copolímeros de Estireno-Butadieno e de Fibras de Wollastonita na Hidratação, Reologia e Comportamento Mecânico a Altas Temperaturas de Pastas Dúcteis de Cimento Portland*. Rio de Janeiro: Tese de Doutorado: COPPE/UFRJ.

VON SPERLING, M., 1996. *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos*. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais.

VOTORANTIM, 2019. *Boletim de Ensaios de Cimento - CP III E-40 - 16/05/2019*. Rio de Janeiro: Votorantim Cimentos.

WORLD BANK, 2014. *Renewable internal freshwater resources per capita*. The World Bank: World Bank Group.