



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**



**MELINA CAVALCANTI DE MELO BICHINHO**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL, ENERGÉTICO, MECÂNICO E  
MICROESTRUTURAL DE ESTRUTURAS DE CONCRETOS SUSTENTÁVEIS  
SUBMETIDAS A AMBIENTE MARINHO**

**JOÃO PESSOA – PB**

**2019**

**MELINA CAVALCANTI DE MELO BICHINHO**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL, MECÂNICO, ENERGÉTICO E  
MICROESTRUTURAL DE ESTRUTURAS DE CONCRETOS SUSTENTÁVEIS  
SUBMETIDAS A AMBIENTE MARINHO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em aproveitamento de Energias Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador (a)

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Kelly Cristiane Gomes

**JOÃO PESSOA – PB**

**2019**

**MELINA CAVALCANTI DE MELO BICHINHO**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL, MECÂNICO, ENERGÉTICO E  
MICROESTRUTURAL DE ESTRUTURAS DE CONCRETOS SUSTENTÁVEIS  
SUBMETIDAS A AMBIENTE MARINHO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em aproveitamento de Energias Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 28 de agosto de 2019.

---

Kelly Cristiane Gomes, Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. UFPB  
(Orientador)

---

Monica Carvalho, Prof<sup>ª</sup>. PhD. UFPB  
(Examinador Interno)

---

José Felix da Silva Neto, Prof. Dr. UFPB  
(Examinador Externo)

**JOÃO PESSOA - PB**

**2019**

À Deus, arquiteto do meu destino.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Édison e Ana Cláudia, por moldarem o meu caráter e os meus valores éticos e morais com tamanha paciência e sabedoria.

Aos meus avós, Nestor e Maria José, que também foram pais, mas com uma dose extra de afeto e cuidado.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup> Dra. Kelly Gomes, que abriu meus horizontes para além da arquitetura, me guiando pelo universo das ciências dos materiais de forma tão paciente, zelosa e amiga, assim como ela!

Aos professores, Flávia Medeiros, José Maurício Gurgel, Kléber Carneiro, Luiz Moreira, Márcio Souza, Marta Célia, Raphael Abrahão e Riuzuani Lopes, e em especial, à Mônica Carvalho, por todo o conhecimento ministrado em sala de aula e também fora dela. Contribuição fundamental para o desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus amigos e parceiros Gabriel e Ricardo, grandes companheiros, sempre prestativos e atenciosos à me auxiliarem a cada desafio e dificuldade que essa pesquisa apresentou.

À Delby, Cláudio Matias, Beto, Mirso, Otoniel e Sebastião. Tornaram possível a execução das etapas mais pesadas da pesquisa, vocês foram fundamentais!

À Gabi e Raissa, anjos que apareceram na reta final da dissertação, mas que tiveram papel mais que fundamental para a conclusão dessa pesquisa.

Ao meu marido, Rafael, companheiro fiel de todas as horas, colo firme em tempos difíceis, calma em tempos de paz. Meu trevo de quatro folhas.

À minha princesa, Isabela. Meu melhor projeto, minha melhor versão. Filha, como você tornou prazeroso escrever essa dissertação sentindo a tua presença no meu ventre. ‘Tu vens, tu vens... eu já escuto os teus sinais...’

## RESUMO

Em se tratando de construção civil, o cimento Portland e suas variações são os materiais protagonistas da atividade. Ele é o principal componente do concreto e da argamassa que servem de alicerce para a edificação dos mais diversos tipos de construções. Contudo, há algum tempo, seu processo produtivo vem sendo questionado pelos pesquisadores devido aos significativos impactos ambientais ocasionados pela alta liberação de CO<sub>2</sub> durante seu processo fabril. Em paralelo e na tentativa de mitigar tais impactos, outras alternativas de materiais vêm sendo desenvolvidas e aprimoradas ao longo dos anos, a exemplo do cimento à base de material alcalinamente ativado. Deste modo, o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho ambiental e energético de estruturas de concreto à base de material alcalinamente ativado submetidas a ambiente marinho e compara-las ao concreto à base de cimento Portland, bem como comparar suas propriedades mecânicas e avaliar suas características microestruturais. Para o empreendimento dessa pesquisa foram elaborados 60 corpos de prova, entre concreto à base de cimento Portland e material alcalinamente ativado submetidos à cura em ambiente natural e marinho e avaliados em 3 diferentes idades. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples, além de análises microestruturais através da difração de raios – X (DRX), espectroscopia no infravermelho com transformada de *Fourier* (FTIR), termogravimetria (TG) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) além da utilização do software Simapro para realização dos cálculos de emissão de CO<sub>2</sub> eq. Após a efetivação das análises observou-se a superioridade do concreto à base de material alcalinamente ativado no tocante à resistência mecânica, além de menor emissão de CO<sub>2</sub>eq na atmosfera e demanda energética para sua produção quando comparado ao concreto à base de cimento Portland. No material alcalinamente ativado também atesta-se a preservação de suas características microestruturais quando expostos ao ambiente marinho, tornando-o assim uma boa alternativa de ligante para a construção civil principalmente no tocante à durabilidade e a sustentabilidade.

**Palavras-chave:** Material alcalinamente ativado, concreto, ambiente marinho, desempenho ambiental, análise microestrutural.

## ABSTRACT

When it comes to construction, Portland cement and its variations are the protagonist materials of the activity. It is the main component of concrete and mortar that serve as the foundation for the construction of various types of buildings. However, for some time, its production process has been questioned by the researchers due to the significant environmental impacts caused by the high release of CO<sub>2</sub> during its manufacturing process. In parallel and in an attempt to mitigate such impacts, other material alternatives have been developed and improved over the years, such as alkaline activated material cement. Thus, the objective of this work is to evaluate the environmental and energy performance of concrete structures based of alkaline activated material submitted to marine environment and compare to Portland cement-based concrete, as well as to compare their mechanical properties and evaluate their microstructural characteristics. For this research, 60 specimens were prepared, including Portland cement concrete and alkaline activated material submitted to curing in natural and marine environment and evaluated at 3 different ages. Simple compressive strength tests were performed, as well as microstructural analyzes through X - ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetry (TG) and scanning electron microscopy (SEM) in addition to the use of Simapro software for performing CO<sub>2</sub> emission calculations eq. After the analysis, the superiority of the alkaline-activated concrete based on the mechanical resistance was observed, as well as lower CO<sub>2</sub> eq emission in the atmosphere and energy demand for its production when compared to the Portland cement concrete. Alkaline activated material also confirms the preservation of its microstructural characteristics when exposed to the marine environment, thus making it a good binder alternative for civil construction, especially regarding sustainability.

**Keywords:** Alkaline activated material, concrete, marine environment, environmental performance, microstructural analysis.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Fluxograma das fases da ACV.....	26
<b>Figura 2.</b> Fluxograma planejamento experimental.....	31
<b>Figura 3.</b> Fluxograma ACV.....	32
<b>Figura 4.</b> Sacas de metacaulim cedidos pela Metacaulim do Brasil e estocados no almoxarifado do LABEME (a); Hidróxido de Sódio em pérolas, cedido pela empresa Química Moderna (b); Galão de silicato de sódio cedido pela Diatom (c). ....	36
<b>Figura 5.</b> Tratamento e separação dos agregados (a); pesagem e preparação dos agregados após secagem em estufa (b). ....	37
<b>Figura 6.</b> Preparação dos moldes untados com óleo mineral (a); mistura dos agregados secos e do cimento na betoneira (b). ....	42
<b>Figura 7.</b> Separação e pesagem dos precursores para a pasta geopolimérica (a); mistura do NaOH com água ocasionando uma reação exotérmica (b) mistura da pasta geopolimérica com os agregados (c).....	43
<b>Figura 8.</b> Moldagem dos corpos de prova à base de cimento portland (a) Moldagem dos corpos de prova à base de MAA (b).....	44
<b>Figura 9.</b> Corpos de prova de concreto à base de cimento portland (a); Corpos de prova à base de MAA (b). ....	45
<b>Figura 10.</b> Corpos de prova rompidos (a); Amostras fragmentadas manualmente (b); Parte das amostras já maceradas após a moagem no moinho de bolas (c). ....	47
<b>Figura 11.</b> Peneiras utilizadas na preparação das amostras (a); Eppendorfs finalizados (b).....	47
<b>Figura 12.</b> Embutimento das amostras em resina rígida fluida (a); Corte das amostras já embutidas no Cutoff embebido em óleo mineral (b). ....	48
<b>Figura 13.</b> Amostras imersas em álcool isopropílico para o banho de ultrassom (a); Máquina de polimento com pasta diamantada (b) Processo de metalização das amostras (c).....	49
<b>Figura 14.</b> Ensaio de resistência mecânica MAA (a); Ensaio de resistência mecânica CP (b). ...	51
<b>Figura 15.</b> Gráfico de resistência mecânica do concreto à base de CP. ....	53
<b>Figura 16.</b> Gráfico de resistência mecânica do concreto à base de MAA. ....	54
<b>Figura 17.</b> Difratoograma adaptado do concreto CP submetidos ao ambiente natural e marinho nas idades 7, 28 e 56 dias.....	55



<b>Figura 18.</b> Difratoograma adaptado do concreto MAA submetidos ao ambiente natural e marinho nas idades 7, 28 e 56 dias. ....	57
<b>Figura 19.</b> Análise FTIR para concreto à base de CP Tradicional. ....	59
<b>Figura 20.</b> Análise FTIR para concreto à base de MAA. ....	60
<b>Figura 21.</b> Análise térmica do concreto CP em cura ambiente, com idade de 56 dias.....	61
<b>Figura 22.</b> Análise térmica do concreto MAA submetido ao ambiente marinho com idade de 7 dias.....	62
<b>Figura 23.</b> Amostra I com evidência de poros e microporos (a); Fissuras na interface (b); baixo adensamento entre matriz e agregado (c) e (d).....	63
<b>Figura 24.</b> Amostra II com evidência de poros e microporos mais profundos (a); Fissuras na interface (b); baixo adensamento entre matriz e agregado (c) e (d). ....	64
<b>Figura 25.</b> Amostra III com evidência de poros e microporos mais profundos (a); Fissuras na interface (b); melhora do adensamento entre matriz e agregado (c) presença de carbonatos (d)..	65
<b>Figura 26.</b> Amostra IV apresenta boa coesão entre matriz e agregados (a); Presença de carbonatos dentro da matriz (b). ....	66
<b>Figura 27.</b> Amostra V com presença de estruturas carbonáticas semelhantes às lamelas /escamas (a) e (b). ....	66
<b>Figura 28.</b> Amostra VI com presença de grandes poros (a) e (b).....	67
<b>Figura 29.</b> Amostra VIII (a) e IX (b) apresentam regularidade quanto ao aparecimento de poros e trincas. ....	67
<b>Figura 30.</b> Amostra VIII (a) e IX (b) apresentam boa aderência entre matriz e agregado.....	68
<b>Figura 31.</b> Amostra X (a, b, c, d) apresentando microfissuras. ....	69
<b>Figura 32.</b> Amostra XI (a, b, c, d) apresentando aumento na quantidade e no tamanho dos poros e das microfissuras. ....	70
<b>Figura 33.</b> Amostra XII (a, b, c, d) apresentando aumento na quantidade e no tamanho dos poros e das microfissuras. ....	70
<b>Figura 34.</b> Fluxograma gerado pelo Simapro® 8.4.0.0 para o concreto Portland.....	72
<b>Figura 35.</b> Fluxograma gerado pelo Simapro® para o concreto MAA. ....	73

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Classe de Agressividade Ambiental. ....	29
<b>Tabela 2.</b> Demanda energética dos materiais. ....	33
<b>Tabela 3.</b> Composição dos cimentos Portland comuns e compostos. ....	35
<b>Tabela 4.</b> Requisitos para concretos expostos a soluções contendo sulfatos.....	39
<b>Tabela 5.</b> Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. ....	39
<b>Tabela 6.</b> Determinação da composição granulométrica. ....	40
<b>Tabela 7.</b> Traço determinado para o concreto tradicional. ....	41
<b>Tabela 8.</b> Traço determinado para o concreto MAA. ....	41
<b>Tabela 9.</b> Quantitativo para moldagem da pasta MAA. ....	41
<b>Tabela 10.</b> Classificação das amostras de concreto. ....	46
<b>Tabela 11.</b> Planejamento experimental para os ensaios de resistência à compressão simples. ....	52
<b>Tabela 12.</b> Resultado numérico dos ensaios de rompimento dos corpos de prova. ....	52
<b>Tabela 13.</b> Resultado em diferença de percentual dos concretos analisados.....	54
<b>Tabela 14.</b> Legenda das fases presentes no difratograma e suas respectivas cartas. ....	56
<b>Tabela 15.</b> Legenda das fases presentes no difratograma e suas respectivas cartas. ....	57
<b>Tabela 16.</b> Emissões de CO <sub>2</sub> eq do concreto CP. ....	71
<b>Tabela 17.</b> Emissões de CO <sub>2</sub> eq do concreto MAA. ....	72
<b>Tabela 18.</b> Comparativo de emissão de CO <sub>2</sub> eq entre os concretos estudados. ....	73
<b>Tabela 19.</b> Demanda energética dos constituintes dos concretos estudados. ....	74

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>ABCP</b>	Associação Brasileira de Cimento Portland
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ACV</b>	Avaliação de Ciclo de Vida
<b>CP</b>	Cimento Portland
<b>DRX</b>	Difração de Raios X
<b>FTIR</b>	Espectroscopia no infravermelho com transformada de <i>Fourier</i>
<b>GANA</b>	Grupo de Apoio à Normalização Ambiental
<b>IBICT</b>	Instituto Brasileiro de Informação em ciência e tecnologia
<b>INMETRO</b>	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
<b>IPCC</b>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
<b>ISSO</b>	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
<b>LABEME</b>	Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas
<b>MAA</b>	Material Alcalinamente Ativado
<b>MEV</b>	Microscopia Eletrônica de Varredura
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>SNIC</b>	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
<b>TG</b>	Termogravimetria
<b>TECNOMAT</b>	Laboratório de Tecnologia de Novos Materiais

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>13</b>
<b>1. APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1. Introdução.....	13
1.2. Objetivos.....	14
1.2.1. Objetivo Geral .....	14
1.2.2. Objetivos Específicos.....	15
1.3. Estrutura da dissertação .....	15
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>17</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1. Impactos Ambientais x Sustentabilidade.....	17
2.2. Cimento Portland .....	18
2.2.1. Histórico .....	18
2.2.2. Processo produtivo .....	19
2.3. Material Alcalinamente Ativado.....	21
2.3.1. Síntese Alcalina.....	21
2.3.2. Ativadores Alcalinos .....	22
2.3.3. Precursores .....	22
2.3.4. Propriedades .....	23
2.3.5. Aplicações.....	24
2.4. Avaliação do Ciclo de Vida.....	24
2.4.1. Definições e Histórico.....	24
2.4.2. Metodologia.....	26
2.4.3. Software.....	27
2.5. O ambiente marinho .....	27
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>30</b>

<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>30</b>
3.1. Introdução.....	30
3.2. Materiais .....	34
3.2.1. Cimento Portland CP II – Z 32.....	34
3.2.2. Metacaulim .....	35
3.2.3. Soluções ativadoras .....	35
3.2.4. Agregados.....	36
3.2.5. Aditivos.....	37
3.3. Métodos .....	38
3.3.1. Definição dos traços .....	38
3.3.2. Moldagem dos corpos de prova.....	42
3.3.3. Preparação das amostras para análise microestrutural.....	45
3.3.4. Técnicas de Caracterização .....	49
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>51</b>
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>51</b>
4.1. Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS) .....	51
4.2. Difração de raios X (DRX) .....	55
4.3. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) .....	58
4.4. Análise térmica (TG).....	60
4.5. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	62
4.6. Impactos ambientais e demanda energética .....	71
<b>CAPÍTULO V</b> .....	<b>75</b>
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>75</b>
<b>CAPÍTULO VI</b> .....	<b>76</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>76</b>

# CAPÍTULO I

## 1. APRESENTAÇÃO

### 1.1. Introdução

Em todo o mundo, a construção civil é um dos campos mais importantes da economia e, ao mesmo tempo, um dos mais impactantes ao meio ambiente. Segundo Barreto (2005) seus impactos ambientais negativos são percebidos desde a extração das matérias-primas necessárias, passando pela fabricação de seus produtos, até a destinação final dos resíduos gerados, provocando assim uma grande modificação na paisagem urbana.

Um dos maiores responsáveis por parte dos impactos ambientais negativos relacionados à construção civil refere-se ao processo produtivo do cimento. De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2018), o Brasil possui um parque produtor de cimento composto por 100 fábricas que são controladas por 24 grupos industriais. No ano de 2016 foram produzidos 57 milhões de toneladas de cimento, tendo o país a capacidade de produção de até 100 milhões de toneladas ao ano (SNIC, 2018).

Importante ressaltar que a produção de 1 tonelada de cimento gera 0,55 tonelada de CO<sub>2</sub> de origem química, sendo somado a ela 0,39 tonelada de CO<sub>2</sub> referente à queima de combustíveis fósseis necessários ao processo fabril. Assim, durante a produção de 1 tonelada de cimento, são produzidos também 1 tonelada de CO<sub>2</sub> (PINTO, 2006).

Tais dados são absolutamente alarmantes pois, a emissão de CO<sub>2</sub>, de forma antrópica, na atmosfera resulta no agravamento do efeito estufa e, por conseguinte, no aumento da temperatura global, ocasionando assim, uma série de eventos naturais tais como o desequilíbrio dos ecossistemas, o degelo das calotas polares, incêndios naturais, inundações, dentre muitos outros.

De acordo com o IPCC (2013), *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas) a temperatura média global nos primeiros 10 meses de 2018 ficou 0,98°C acima dos níveis de 1850 - 1900.

Diante desse contexto, a comunidade científica não tem poupado esforços no sentido de tentar desenvolver ligantes alternativos ao cimento Portland capazes de um melhor desempenho, quer em termos ambientais ou mesmo em durabilidade (PINTO, 2006).

Entre as décadas de 40 e 50 foram iniciados estudos pelos pesquisadores ucranianos Glukovisky e Krivenko, acerca da substituição do cimento Portland por materiais obtidos através da ativação alcalina de aluminossilicatos (BORGES *et al.*, 2014), que são também conhecidos como Material Alcalinamente Ativado ou MAA.

Os cimentos à base de MAA são formados por aluminossilicatos, compostos basicamente por  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em proporções definidas e, em especial, na forma amorfa (a exemplo de cinzas, argilas ativas, pozolanas e escórias), ativados por uma solução alcalina aquosa, como hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de sódio (NaOH), silicato de sódio ou silicato de potássio (BUCHWALD, ZELLMAN e KAPS, 2011).

Estabelecendo um comparativo geral entre o concreto à base de Material Alcalinamente Ativado e o concreto à base de Cimento Portland, observa-se uma evolução clara do material ligante tanto em relação aos aspectos ambientais quanto aos aspectos funcionais. O concreto à base de MAA possui características como baixa condutibilidade térmica, elevada resistência mecânica obtida em poucas horas, além de apresentar alta estabilidade térmica e dimensional e boa durabilidade quando submetido em ambientes agressivos (PINTO, 2006).

Portanto, pretende-se neste trabalho avaliar o desempenho ambiental, energético e de estruturas de concreto tradicionais, a base de Cimento Portland, e sustentáveis, a base de MAA, quando submetidas ao ambiente natural e ao ambiente marinho, bem como acessar suas propriedades mecânicas e microestruturais.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho ambiental e energético de estruturas de concreto sustentáveis submetidas a ambiente marinho, bem como acessar suas propriedades mecânicas e microestruturais e compara-las aos concretos tradicionais.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar, o impacto ambiental em kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>3</sup> para produção do concreto à base de cimento Portland e de MAA, estabelecendo assim um comparativo entre os mesmos;
- Determinar, a demanda energética para produção do concreto à base de cimento Portland e de MAA, estabelecendo assim um comparativo entre os mesmos;
- Avaliar o efeito do tipo de ligante nas propriedades mecânicas dos concretos produzidos quando submetidos ao ambiente natural e ao ambiente marinho;
- Avaliar o efeito do tipo de ligante nas propriedades microestruturais dos concretos produzidos quando submetidos ao ambiente natural e ao ambiente marinho.

### 1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos. No capítulo I, realizou-se uma abordagem geral sobre os impactos ambientais relacionados à indústria da construção civil abordando de forma direcionada o processo produtivo do cimento e seus impactos ambientais negativos no tocante à emissão de CO<sub>2</sub>.

No capítulo II empreendeu-se a revisão bibliográfica da temática, onde contextualizou-se o histórico dos materiais em estudo, suas principais utilizações, normativas pertinentes, dentre outras informações inerentes ao tema. Ainda no capítulo II foram abordadas as características relacionadas às estruturas submetidas ao ambiente marinho além da conceituação da análise do ciclo de vida e o empreendimento da metodologia sobre os concretos em estudo através do software SIMAPRO.

O capítulo III discorreu sobre o fornecimento e a especificação dos materiais utilizados na presente pesquisa, como também apresentou os métodos de avaliação empregados para verificação da resistência mecânica e das características microestruturais dos concretos, além de detalhar toda a metodologia utilizada para alcançar os resultados propostos nos objetivos anteriormente citados.

Já o capítulo IV dedicou-se à apresentação dos resultados obtidos através de análises, dados, gráficos, tabelas e comparativos empreendidos para a compreensão dos dados alcançados.



Para finalizar, têm-se os capítulos V e VI que apontam para as conclusões do referido trabalho além das referências bibliográficas utilizadas para o empreendimento do mesmo.

## CAPÍTULO II

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Impactos Ambientais x Sustentabilidade

Nos dias atuais a questão ambiental é um fator extrema importância e que merece atenção em qualquer atividade realizada pelo ser humano, desde a indústria de base chegando até as atividades domésticas. O consumo desenfreado de produtos, bens e serviços, o aumento da população mundial, da pecuária, além da crescente utilização de veículos automotivos são fatores que colaboram para as altas taxas de emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

A construção civil é responsável por aproximadamente 40% do consumo de energia elétrica e 40% de emissão de CO<sub>2</sub> no mundo, pois a geração de gases está distribuída em toda cadeia produtiva, começando pela extração de matéria prima, passando por seu beneficiamento, se estendendo aos transportes, consumos energéticos e inúmeros outros processos, até a finalização de uma obra (BENVEGNÚ, 2013).

Com demanda anual da ordem de 3,6 bilhões de toneladas/ano, o consumo do cimento deverá aumentar 2,5 vezes até 2050, puxado pelo crescimento dos países em desenvolvimento. Nos dias atuais, estima-se que o setor já emita 5% do total de CO<sub>2</sub> (USP, 2013).

A indústria cimenteira é caracterizada pelo alto consumo energético, tanto de energia térmica demandada na fabricação do clínquer quanto de energia elétrica utilizada por outros equipamentos (BORGES *et al.*, 2014). Assim, dentro das etapas da construção civil, o processo fabril do cimento é um dos que mais se destacam na emissão de CO<sub>2</sub>, pois durante a clínquerização – processo de queima do calcário e da argila – as temperaturas dos fornos de queima podem chegar até 1.500°C sem contar que para que os fornos atinjam tal temperatura, faz-se necessário a queima de combustíveis fósseis, geralmente derivados do petróleo e do carvão.

Tais dados são absolutamente alarmantes, pois a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera resulta no agravamento do efeito estufa e, por conseguinte, no aquecimento global, ou seja, no aumento da temperatura global, ocasionando assim, uma série de catástrofes naturais tais como o

desequilíbrio dos ecossistemas, o degelo das calotas polares, incêndios naturais, inundações, dentre muitos outros. De acordo com o IPCC (2013), impactos em sistemas naturais e humanos do aquecimento global já foram observados. Muitos ecossistemas terrestres e oceânicos e alguns dos serviços que eles fornecem já mudaram devido ao aquecimento global.

Portanto, é iminente a necessidade de mudança de postura dos seres humanos através do desenvolvimento, aprimoramento e consumo de novos materiais que tenham como característica principal o baixo impacto ao meio ambiente, contribuindo assim para a conservação do planeta.

## **2.2. Cimento Portland**

### **2.2.1. Histórico**

O termo cimento é originário do latim *CAUMENTU* e refere-se a um tipo de pedra natural de rochedos não esquadrejada. Os egípcios, há 4.500 anos, já faziam uso de uma liga à base de gesso calcinado para a construção de seus monumentos, assim como o Panteão e o Coliseu tiveram como um de seus materiais constituintes solos de origem vulcânica, que endureciam quando misturados à água, comportamento semelhante ao do cimento que conhecemos na atualidade. (BATTAGIN, 2014).

Nos séculos XVIII e XIX, o engenheiro inglês John Smeaton e o francês Vicat, respectivamente, obtiveram resultados semelhantes quando desenvolveram um material de alta resistência através da calcinação de calcários moles e argilosos. Ainda em meados do século XIX, o construtor inglês Joseph Aspdin, incinerou pedras calcárias e argila, transformando-as em um pó fino que, quando submetido à presença da água, configurava-se em um material tão duro quanto uma rocha. Aspdin patenteou o material e deu-lhe o nome de Portland em homenagem as rochas presentes na ilha de Portland, uma alusão ao alto coeficiente de durabilidade e solidez que elas possuíam (BATTAGIN, 2014).

No Brasil, a primeira fábrica de cimento Portland iniciou suas atividades no ano de 1926, já os fornos para produção de cimento branco só entraram em funcionamento no ano de 1952, tendo o comércio de cimento branco iniciado apenas dois anos depois. Em 1984, com o desenvolvimento do material, foi lançado um tipo de cimento mais resistente, indicado para utilização em concreto armado e em pisos de alta resistência. (VOTORANTIM, 2017).

Dáí em diante, com o desenvolvimento da economia, e com o direcionamento dos fluxos migratórios do campo para a cidade resultando no alargamento dos grandes centros, o consumo de cimento passou a crescer de forma exponencial. De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2018), as vendas internas de cimento no Brasil totalizaram 53,8 milhões de toneladas no ano de 2017.

### **2.2.2. Processo produtivo**

O processo de produção do cimento tem como base a clinquerização, método que consiste na queima das matérias-primas - calcário e argila – sob ação de altas temperaturas, tendo como resultado a obtenção do silicato tricálcico, mais conhecido como clínquer (BORGES *et al.*, 2014).

Após a obtenção do clínquer o material passa pelo processo de resfriamento e em seguida, é moído, adquirindo assim a textura de pó e, por consecutivo, segue para o despacho (SNIC, 2018).

Ainda de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2018), o processo produtivo do cimento deve ser dividido em sete etapas:

- (i) Extração da matéria-prima – Calcário e Argila
- (ii) Britagem
- (iii) Moagem da mistura crua
- (iv) Homogeneização da mistura crua
- (v) Clinquerização – Calcinação
- (vi) Moagem do Clínquer
- (vii) Despacho do cimento para o comércio.

Segundo Associação Brasileira de Cimento Portland (2018), o clínquer em pó tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água na qual, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. Essa característica alcançada pelo clínquer faz dele um ligante hidráulico muito resistente, sendo essa uma de suas propriedades mais importantes.

Durante a moagem do clínquer, levando em consideração as características que se objetiva alcançar, outras matérias-primas podem ser adicionadas à mistura. Dentre elas: gesso, escórias de alto-forno, materiais pozolânicos e carbonáticos, Assim, de acordo com o tipo de adição e sua respectiva proporção, obtém-se diversos tipos de cimento que também possuem propriedades distintas, sendo os principais:

- (i) Cimento Portland Comum CP I, CP I-S;
- (ii) Cimento Portland Composto CP II-E, CP II-Z, CP II-F;
- (iii) Cimento Portland de Alto-Forno CP - III;
- (iv) Cimento Portland Pozolânico CP - IV;
- (v) Cimento Portland de Alta Resistência Inicial CP V-ARI;
- (vi) Cimento Portland Resistente aos Sulfatos CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V-ARI;
- (vii) Cimento Portland Branco CPB, CPB-25, CPB-32, CPB-40;
- (viii) Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação;
- (ix) Cimento para Poços Petrolíferos CPP.

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2018), todos os cimentos supracitados, para efetivação de seu processo fabril, deverão ser regidos pelas seguintes NBRs:

- (i) NBR 5732 (1991) – Cimento Portland Comum
- (ii) NBR 5733 (1991) – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
- (iii) NBR 5735 (1991) – Cimento Portland de Alto Forno
- (iv) NBR 5736 (1991) – Cimento Portland Pozolânico
- (v) NBR 11578 (1991) – Cimento Portland Composto
- (vi) NBR 13116 (1994) – Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação
- (vii) NBR 12989 (1993) – Cimento Portland Branco
- (viii) NBR 16697 (2018) – Cimento Portland Requisitos

### 2.3. Material Alcalinamente Ativado

Diferentes tipos de cimentos ativados por álcalis foi desenvolvida nas últimas décadas, tendo como principal responsável pela ativação alcalina o uso de materiais naturais (argila ou feldspatos) ou subprodutos industriais (escória, cinza volante e lodo de papel) como matérias-primas (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2005; KOMNITSAS, 2011; GOMES *et al.*, 2012; PROVIS e BERNAL, 2014).

O Material Alcalinamente Ativado (MAA) é um material desenvolvido com precursores ricos em  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ativados em solução alcalina por meio de um processo de polimerização, no qual unidades de estruturas tetraédricas de aluminossilicatos se organizam em repetições compartilhando oxigênios (AGUILAR, GUMIERI e VASSALO, 2014).

Desta forma, os geopolímeros (leia-se: material alcalinamente ativado) consistem de unidades tetraédricas de aluminato e silicato ligados por átomos de oxigênio, com a carga negativa do  $\text{Al}^{+3}$  em coordenação IV sendo compensada por íons tais como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Li}^+$ . (DAVIDOVITS, 1991).

#### 2.3.1. Síntese Alcalina

Uma das etapas mais importantes para o empreendimento do material alcalinamente ativado é, como o próprio nome já diz, a ativação alcalina. Popularmente conhecida como geopolimerização, ela consiste num processo químico que permite transformar estruturas vítreas em um composto bem adensado e cimentante (PALOMO, GRUTZECK e BLANCO, 1999).

A polimerização acontece por meio de uma rápida reação química em condições fortemente alcalinas. Os polissilicatos formam anéis de polímeros entre  $\text{Si}_4^+$  e  $\text{Al}_3^+$  coordenados com oxigênio, variando seu estado de amorfo e semicristalino. (DAVIDOVITS, 2002).

A reação de um aluminossilicato sólido com uma solução aquosa altamente concentrada de hidróxido alcalino ou silicato produz um cimento alcalino sintético de aluminossilicato com propriedades que variam de acordo com as condições de cura e com a estequiometria da mistura (PALOMO, GRUTZECK e BLANCO, 1999; DUXSON *et al.*, 2007; PROVIS e BERNAL, 2014).

### 2.3.2. Ativadores Alcalinos

Para a efetivação da reação de polimerização, faz-se necessário a presença de um ativador químico. Segundo Lima (2019), diferentes tipos de soluções têm sido utilizados como ativadores na síntese da ativação alcalina, e as propriedades químicas e físicas de cada um possuem um papel importante na determinação das propriedades e dos materiais sintetizados.

O silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) e os hidróxidos de sódio (NaOH) e potássio (KOH) são as soluções ativadoras habitualmente utilizadas, sendo as soluções à base de sódio menos dispendiosas. Porém, as soluções à base de potássio exibem comportamento de fase mais favorável e melhor reologia (LIMA, 2019).

Soluções ativadoras alternativas como carbonatos, aluminatos e até mesmo água, também são utilizadas, mas nenhuma delas teve ampla utilização na síntese do material alcalinamente ativado (PROVIS e VAN DEVENTER, 2009).

### 2.3.3. Precursores

Nos dias atuais há uma forte tendência na utilização de resíduos industriais como matéria-prima para novos produtos, com o intuito de atender a demanda do mercado de fornecer opções ambientalmente amigáveis para o planeta. Muitos estudos apontam para a alta reatividade dos aluminossilicatos amorfos, que podem estar presentes em materiais naturais ou em materiais que tenham sido submetidos a tratamento térmico, como por exemplo, as escórias de alto forno, cinzas leves e pesadas, resíduos de construções, cinzas vulcânicas, metacaulim, dentre outros (ANTUNES *et al.*, 2014).

Como visto acima, diversos aluminossilicatos e resíduos ricos em sílica e alumina podem ser utilizados para a fabricação do material alcalinamente ativado. Várias pesquisas, no entanto, vem destacando o uso dos caulins calcinados, popularmente conhecidos como metacaulim (BORGES *et al.*, 2014) para o empreendimento do ligante MAA.

Contudo, para a transformação do caulim em metacaulim, faz se necessário que o material passe por um processo de calcinação. Segundo Brito (2018), o metacaulim é um material pozzolânico amorfo (de estrutura cristalina desordenada), obtido por processo industrial de ativação térmica (calcinação) entre 600 °C e 850 °C e moagem de argilas caulinitas e caulins.

#### 2.3.4. Propriedades dos Materiais Alcalinamente Ativados

No tocante às propriedades, de acordo com Davidovits (2002), os geopolímeros (leia-se: materiais alcalinamente ativados) são resistentes ao ácido e ao fogo, têm características semelhantes às zeólitas, são úteis para a contenção de resíduos tóxicos, sua liga possui excelente trabalhabilidade e são curados rapidamente em baixas temperaturas (de 40° a 80° - 100°).

É importante ressaltar que o material alcalinamente ativado geralmente é composto por resíduos industriais ricos em aluminossilicatos como cinzas de carvão e escórias de alto forno, possuindo assim uma pegada ecológica muito pequena quando comparado aos concretos tradicionais (DUXSON *et al.*, 2007).

Tais propriedades elevam o material alcalinamente ativado a um patamar distinto pois, ele pode ser utilizado em substituição a outros materiais que contenham as mesmas propriedades – a exemplo do cimento Portland – porém, fazendo uso de prerrogativas ambientalmente amigáveis antes não exploradas.

De acordo com Borges *et al.* (2014), também chamados de polímeros inorgânicos, esses materiais possuem vantagens ecológicas e físico-químicas quando comparados ao cimento Portland. As vantagens ecológicas se tornaram evidentes com a possibilidade de ser produzidos à temperatura ambiente (ou até 100 °C) sem aparente liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera. As características físico-químicas garantem propriedades especiais, tais como rápido desenvolvimento de resistência mecânica e excelente durabilidade química. O autor supracitado destaca ainda as seguintes propriedades referentes ao material alcalinamente ativado:

- (i) A inércia química em relação a algumas patologias comuns aos produtos à base de cimento Portland (DAVIDOVITS, 1991).
- (ii) Baixos valores de permeabilidade, que favorecem sua aplicação na imobilização de resíduos tóxicos e radioativos (GIANNOPOULOU e PANIAS, 2008).
- (iii) Resistência a altas temperaturas (KONG e SANJAYAN, 2010).
- (iv) Alta durabilidade química (BAKHAREV, 2005).



### **2.3.5. Aplicações**

De acordo com Lima (2019), as pesquisas acerca da ativação alcalina, além de buscarem alternativas com baixa pegada de CO<sub>2</sub>, vêm abrangendo diversos segmentos tecnológicos, desde aplicações tradicionais como a substituição parcial ou total das matrizes de cimento Portland, a imobilização de resíduos químicos (metais pesados), até aplicações mais específicas como resinas adesivas poliméricas, isolantes térmicos, revestimentos balísticos e estruturas expostas à ambientes agressivos.

No tocante ao uso do material alcalinamente ativado para além da construção civil, pode-se elencar o uso do ligante nas indústrias automobilísticas e aeronáuticas, na fundição não ferrosa e metalúrgica, na engenharia civil, na indústria de plásticos, dentre outras diversas aplicações (DAVIDOVITS, 2002).

## **2.4. Avaliação do Ciclo de Vida**

### **2.4.1. Definições e Histórico**

De acordo com Chehebe (1997) todo produto, não importa de que material seja feito – madeira, vidro, plástico, metal ou qualquer outro elemento – provoca um impacto no meio ambiente, seja em razão de seu processo produtivo, das matérias-primas que consome ou de seu uso e disposição final. Assim, em virtude da preocupação no que tange a relação homem x meio ambiente, estudar e analisar cada etapa de fabricação de um produto, desde a extração até a sua disposição final é de suma importância para o conhecimento dos seus principais impactos para com o planeta e também para o apontamento das possíveis mitigações necessárias ao abrandamento desses impactos.

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é essencialmente um instrumento científico qualitativo e quantitativo, que avalia todos os estágios do ciclo de vida e tipos de impactos ambientais de um produto, com o intuito de levantar e interpretar os aspectos e impactos potenciais envolvidos em todo o processo (BARBOSA *et al.*, 2008).

Pode-se entender que a ACV é uma grande aliada à tentativa de mitigação de impactos ambientais negativos na indústria da construção civil, pois ela fornece informações que auxiliam os arquitetos e engenheiros desde a concepção projetual, passando pelo canteiro de obras até o fim da vida útil da edificação. De acordo com FIGUEIREDO (2017) a ACV se destaca de outros sistemas de auditoria ambiental por avaliar os impactos dos materiais fora do local de implantação, além de considerar também diferentes alternativas possíveis para as edificações no final de sua vida útil, sugerindo que o arquiteto ou engenheiro também as considere no início da fase de projeto.

Segundo Curran (2006), o primeiro estudo que pode ser entendido como uma ACV foi realizado em 1965 nos Estados Unidos pela Coca-Cola *Company*, com o intuito de identificar qual embalagem para refrigerantes possuiria as menores emissões e utilizaria menos recursos em sua fabricação. O estudo fez um inventário das matérias-primas, dos combustíveis utilizados e das cargas ambientais do processo produtivo de cada embalagem. Esse estudo ficou conhecido como *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia IBICT (2015), a ACV teve início no Brasil na metade dos anos 1990, com a implantação de um subcomitê específico ao tema dentro do Grupo de Apoio à Normalização Ambiental (GANA). Em 1998 foi lançada a primeira publicação didática sobre a metodologia, em português. No ano seguinte foi produzido o primeiro resultado de pesquisa científica com aplicação da metodologia da ACV. Já a normatização no Brasil veio apenas três anos depois, com o lançamento da norma NBR ISO 14040 em 2001, a versão da norma internacional traduzida (IBICT, 2015). No ano de 2002 a ACV passou a ser tratada institucionalmente no país através da criação da Associação Brasileira de Ciclo de Vida.

E nos anos subsequentes importantes institutos de pesquisa passaram a utilizar a ACV como metodologia de pesquisa, a exemplo do próprio IBICT e do INMETRO.

A pesquisa em questão utilizou a ACV do tipo *cradle-to-gate*. Ela analisa os insumos até a produção do material, considerando sua vida útil, porém, excluindo o descarte final.

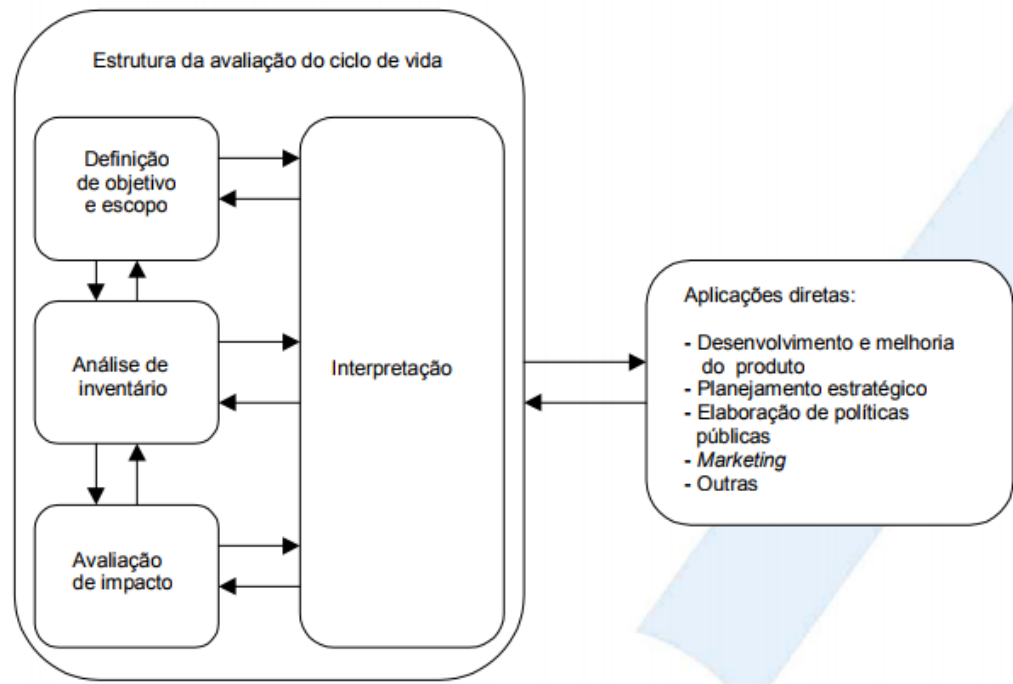
### 2.4.2. Metodologia

A metodologia da avaliação do ciclo de vida está estruturada sob a égide da NBR 14040 de 2006 subdividindo-se em dois volumes: a ISO14040 que aborda os princípios e a estrutura da ACV (ISO, 2006a) e a ISO14044 que aponta os requisitos e diretrizes da ACV (ISO, 2006b).

De acordo com a NBR 14040 (ISO, 2006a) um estudo de avaliação de ciclo de vida é composto por quatro fases: a definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados.

Na fase de definição do objetivo e escopo devem ser elencados os limites do sistema e o nível de detalhamento da ACV; Na fase de análise de inventário realiza-se o levantamento dos dados de entrada e saída do sistema, no qual utilizamos os softwares como ferramenta de apoio;

Já na fase de avaliação de impacto são fornecidas informações adicionais que auxiliam na análise; e na fase de interpretação os resultados são apresentados e discutidos para eventuais conclusões, recomendações e tomadas de decisões (ISO, 2006a).



**Figura 1.** Fluxograma das fases da ACV.

Fonte: ABNT NBR ISO 14040, 2014.

### 2.4.3. Software

Conforme citado anteriormente, durante a fase de inventário do ciclo de vida são coletados os dados de entrada e saída do produto em análise. Para auxiliar o agrupamento e o exame desses dados, foram criados softwares que tem como objetivo facilitar a realização dos cálculos de balanço de massa e energia, realizar comparações entre ciclo de vida de produtos, analisar o fluxo de materiais e energia e, principalmente, realizar análise de impactos ambientais e interpretação dos resultados (CAMPOLINA, MORIS e SIGRIST, 2015).

Dentre os vários programas existentes no mercado, destacamos o software holandês SimaPro® 8.4.0.0, escolhido e utilizado nesta pesquisa.

O SimaPro® 8.4.0.0 possui vários métodos de avaliação de impacto (CML 1992, Eco-indicator 99, EPS2000, entre outros) e banco de dados (BUWAL 250, ecoivent, IVAM LCA Data, entre outros) que podem ser editados e ampliados sem limitação. É possível comparar e analisar produtos com ciclos de vida complexos como é o caso de produtos que possuem diferentes componentes em sua composição como, por exemplo, o ciclo de vida de equipamentos elétricos e eletrônicos (SIMAPRO, 2018). Desde o momento em que foi introduzido, em 1990, o SimaPro® é o software mais utilizado para a análise ambiental dos produtos visando na tomada de decisão conforme o desenvolvimento de produtos e política dos mesmos.

## 2.5. O ambiente marinho

As estruturas de concreto, localizadas em meio ao ambiente marinho, têm um interesse peculiar de estudos, uma vez que este ambiente constitui um meio natural de elevado grau de agressividade (KOPSCH, 2001).

No ambiente marinho são encontrados vários agentes que atuam negativamente sobre as estruturas de concreto, reduzindo seu desempenho. A água salgada é o principal agente responsável por processos físicos e químicos de degradação. Isso se explica pelo fato de que, na água do mar, estão presentes todos os elementos naturais conhecidos da tabela periódica, cada um em uma determinada proporção (BRITO *et al.*, 2016).

Por esse motivo, sendo o concreto um material poroso e heterogêneo, ele é suscetível a degradação quando exposto a produtos químicos ou a meios agressivos, como o marinho.

Segundo Burigo (2017), dentre todas as opções que possam vir a surgir quanto ao ataque de cloretos no concreto, a mais preocupante, é a interação do material com a água do mar. Esta interação pode ser observada na deposição de água marinha sobre a superfície do concreto na forma de gotículas, através do transporte pelo vento, ou mesmo pela interação pela inserção total do concreto em meio salino.

Em tais condições o concreto acaba sofrendo uma deterioração precoce que, eventualmente, reduz a vida útil das estruturas e requer reparos e manutenções dispendiosas. Apenas nos Estados Unidos, são gastos aproximadamente 18 a 21 bilhões de dólares todo ano para reparar, reabilitar e fortalecer as estruturas de concreto (BISWAS, PRADIP e SARKER, 2017).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004), na NBR 6118, a agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas de concreto.

A tabela 01, extraída da NBR 6118, classifica em nível III (forte) a agressividade do meio marinho, atestando assim que o risco de deterioração da estrutura é grande.

**Tabela 1.** Classe de Agressividade Ambiental.

<b>Classe de agressividade ambiental</b>	<b>Agressividade</b>	<b>Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto</b>	<b>Risco de deterioração da estrutura</b>
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana <sup>1 2</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>1</sup> Industrial <sup>1 2</sup>	Grande
IV	Muito Forte	Industrial <sup>1 3</sup> Respingos de Maré	Elevado

<sup>1</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas, e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura.

<sup>2</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

<sup>3</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 6118, 2014.

Deste modo, atestar a resistência do concreto com base no material alcalinamente ativado, sendo este superior ao concreto tradicional quando expostos ao meio ambiente marinho é de suma importância tanto na preservação das estruturas quanto no atendimento das questões sustentáveis.

## CAPÍTULO III

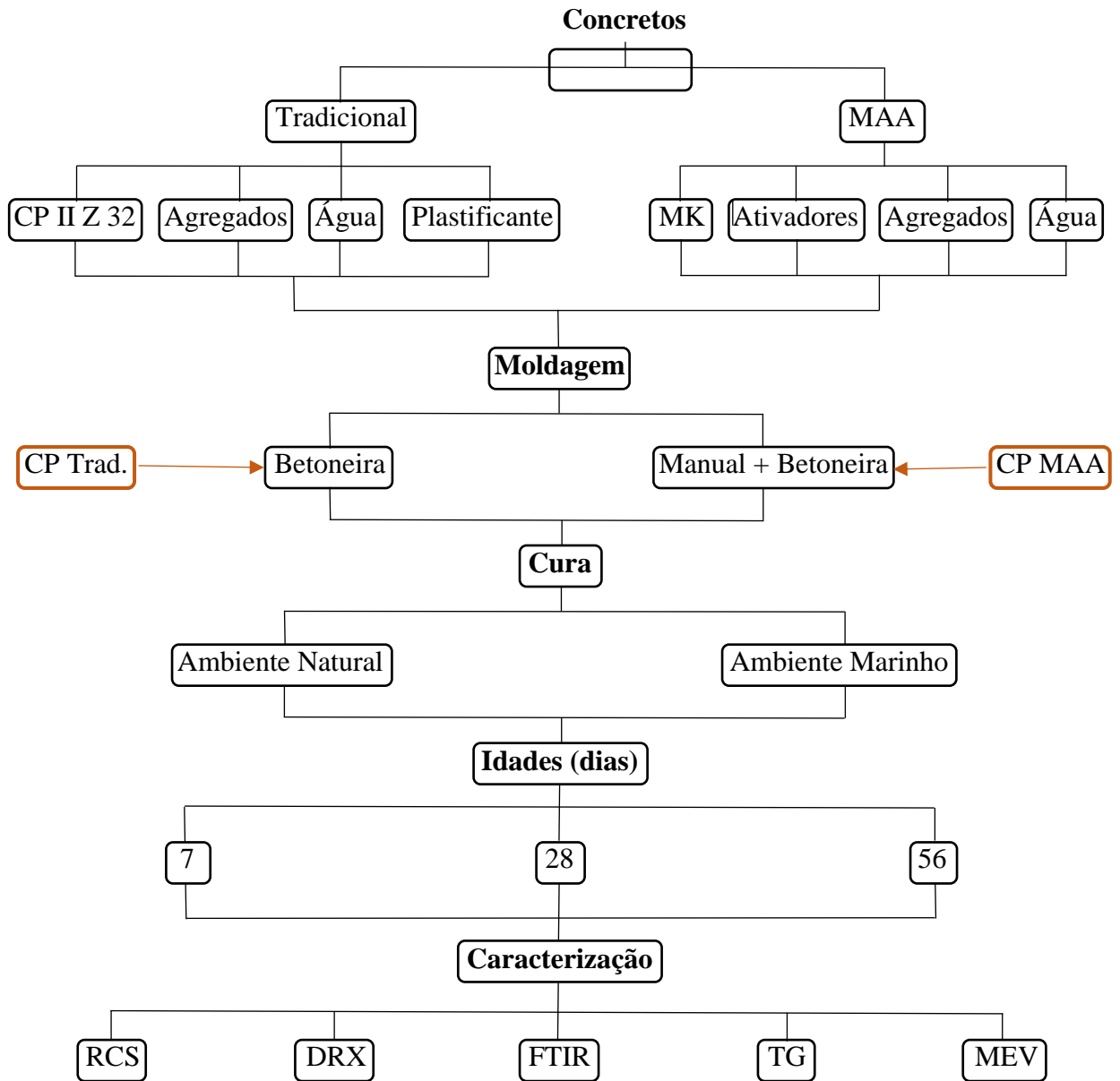
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Introdução

Para a efetivação dos comparativos entre os concretos apresentados, foram realizadas uma série de análises de caráter físico-químico com o intuito de conhecer o desempenho mecânico e a microestrutura dos materiais abordados, observando assim, o potencial e as peculiaridades de cada concreto. Para o planejamento experimental dessa pesquisa, desenvolveu-se as seguintes fases de trabalho:

- (i) Definição dos precursores
- (ii) Estabelecimento dos quantitativos (traços)
- (iii) Preparação dos corpos de prova
- (iv) Caracterização dos concretos obtidos
- (v) Avaliação do ciclo de vida dos concretos e seu impacto ambiental
- (vi) Avaliação da demanda energética

A figura 02 apresenta o fluxograma estabelecido para a realização do planejamento experimental.

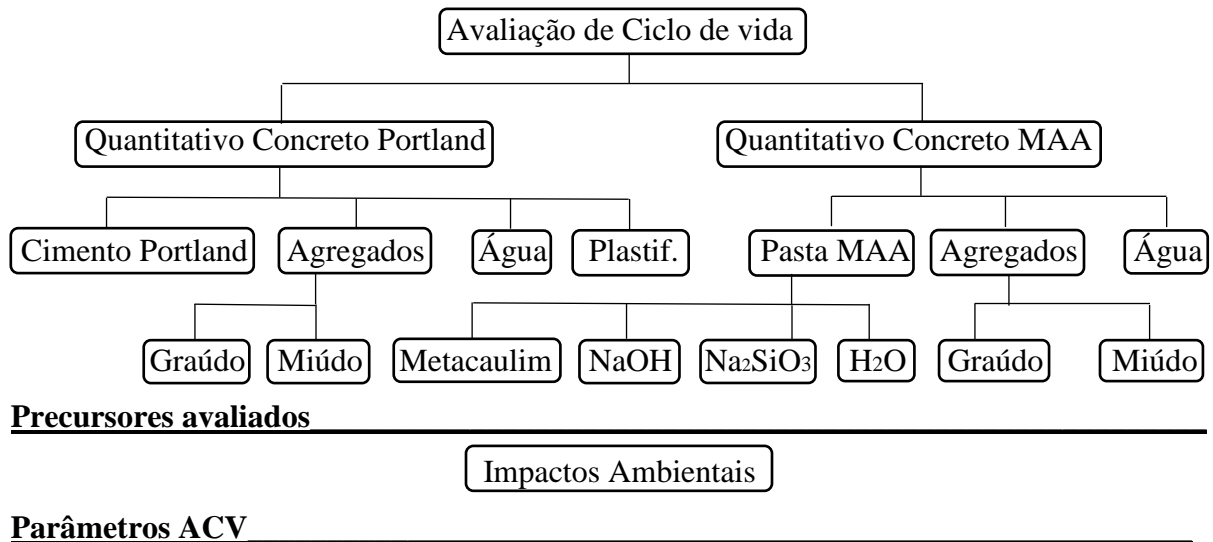


**Figura 2.** Fluxograma planejamento experimental.

Fonte: Autora, 2019.

Em paralelo ao planejamento experimental, para a realização da avaliação do ciclo de vida, o software Simapro® 8.4.0.0 foi alimentado com as informações oriundas da literatura e dos materiais utilizados na pesquisa com o intuito de estabelecer a emissão de CO<sub>2</sub> para cada precursor e agregado dos concretos empregados no projeto, conforme apresentado na figura 03.





**Figura 3.** Fluxograma ACV.

Fonte: Autora, 2019.

O referido processo consistiu em realizar o levantamento do quantitativo de toda a matéria-prima necessária à fabricação de cada material e implantá-las no software através da busca em seu banco de dados (FIGUEIREDO, 2017). O software então gerou a rede da cadeia produtiva, expressando os resultados em kg CO<sub>2</sub>-eq.

Do mesmo modo, para a realização do cálculo da demanda energética dos concretos estudados, a pesquisa foi baseada no inventário de ciclo de vida de concreto empreendimento por Borges *et al.* (2014). Vale salientar que o processo de transporte, moldagem e cura foi semelhante para os dois tipos de concreto, não sendo necessário sua contabilização em modo comparativo.

Já para fins comparativos, foram levados em consideração a produção dos materiais de acordo com a tabela 02:

**Tabela 2.** Demanda energética dos materiais.

<b>CONSTITUINTES DO CP</b>		
	<b>Quantidade</b>	<b>Referência Bibliográfica</b>
<b>Produção do agregado (MJ/ton. de agregado)</b>		
Agregado	83	Hammond e Jones (2008)
<b>Produção do aditivo (MJ/kg de aditivo)</b>		
Plastificante	6,4	EFCA (EUROPEAN...,2015)
<b>Produção do cimento Portland (kJ/ton. de cimento)</b>		
Britagem do Calcário	9.309,672	
Moagem da Argila	2276,64	
Moagem do Cru	74.959,488	
Homogeinização	10.713,6	
Alimentação e exaustão do forno rotativo	39.506,4	
Acionamento do forno	6.696	Paula (2009)
Acionamento do soprador de ar primário	2.151,648	
Resfriador de clínquer	14.508	
Transporte de clínquer	5.624,64	
Moagem de clínquer	99.819,504	
Precipitador eletrostático	1.450,8	
<b>CONSTITUINTES DO MAA</b>		
	<b>Quantidade</b>	<b>Referência Bibliográfica</b>
<b>Produção do Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (MJ/ton. de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)</b>		
Energia de fusão do Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	4.183	Fawer, Concannon e Rieber (1999)
Energia de dissolução do Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	467	
<b>Produção do NaOH (MJ/ton. de NaOH)</b>		
Energia eletrólise	10.800	Pacheco (2012)

Fonte: Adaptado de BORGES *et al.*, 2014.

## 3.2. Materiais

### 3.2.1. Cimento Portland CP II – Z 32

No caso do concreto tradicional, definiu-se como elemento ligante o Cimento Portland do tipo CP II – Z 32 cedido pela empresa Elizabeth Cimentos, localizada no município de Alhandra - PB. A escolha do cimento supracitado justifica-se pela sua indicação para usos em ambientes agressivos e obras marítimas.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992), na NBR 5737, qualquer um dos cinco tipos básicos (CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V-ARI) podem ser considerados resistentes aos sulfatos, desde que obedeça a pelo menos, uma das seguintes condições:

- (i) Teor de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) do clínquer e teor de adições carbonáticas de, no máximo, 8% e 5% em massa, respectivamente.
- (ii) Cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa.
- (iii) Cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa.
- (iv) Cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

No caso do cimento adotado para a presente pesquisa, o mesmo possui em sua composição, de acordo com o fabricante, de 6 a 14% de pozolana e até 10% de material carbonático, obedecendo assim os parâmetros necessários para o seu enquadramento na tabela 03.

**Tabela 3.** Composição dos cimentos Portland comuns e compostos.

<i>Tipo de Cimento Portland</i>	<i>Sigla</i>	<i>Composição (% em massa)</i>				<i>Norma Brasileira</i>
		<i>Clínquer + Gesso</i>	<i>Escória de Alto Forno (Sigla E)</i>	<i>Material Pozolânico (sigla Z)</i>	<i>Material Carbonático (sigla F)</i>	
<b>Comum</b>	CP I	100		-		NBR 5732
	CP I-S	99-95		1-5		
<b>Composto</b>	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5737, 1992.

### 3.2.2. Metacaulim

Na presente pesquisa optou-se pelo uso do metacaulim. O metacaulim é o produto resultante do processo de calcinação da Caulinita onde, um dos produtos resultantes é a água, diferentemente da calcinação do clínquer, que tem como produto o CO<sub>2</sub> (BORGES *et al.*, 2014).

O metacaulim utilizado foi cedido pela empresa Metacaulim do Brasil, localizada na cidade de São Paulo – SP. Sua composição química é constituída por 51,57% de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>); 40,50% de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); 2,8% de óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); 0,08% de óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O); 0,18% de óxido de potássio (K<sub>2</sub>O).

### 3.2.3. Soluções ativadoras

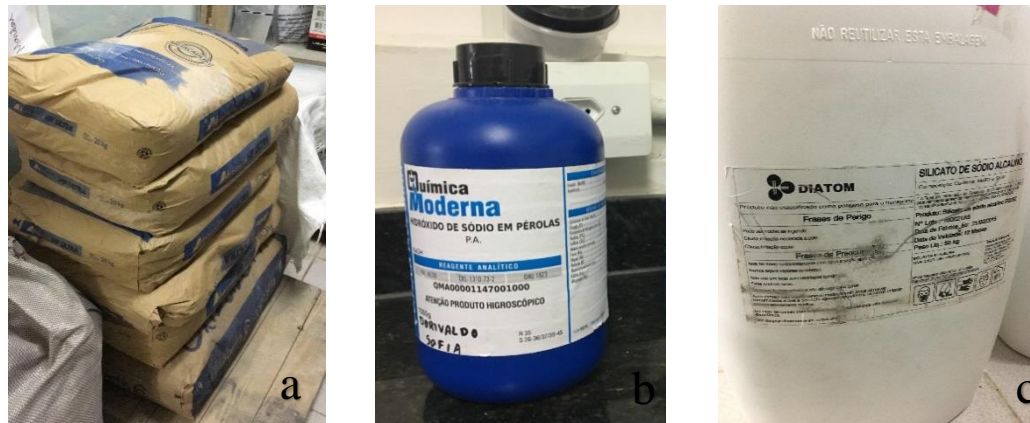
#### a) Hidróxido de Sódio

No tocante a solução alcalina ativadora, utilizou-se o hidróxido de sódio (NaOH) no formato de pérolas. A escolha é justificada pela intenção de manter o ph próximo à 13, como também acelerar a polimerização da síntese. O NaOH utilizado apresenta 99% de pureza e foi cedido pela empresa Química Moderna, localizada na cidade de Barueri – SP.

b) Silicato de Sódio

Para auxiliar a velocidade da reação e garantir alta resistência mecânica nas primeiras horas, foi adicionado uma solução aquosa de silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). O silicato de sódio foi fornecido pela empresa Diatom que encontra-se localizada na cidade de Mogi das Cruzes – SP. Sua composição química é constituída por 14,6% de óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) e 32% de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) apresentando assim a razão  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,15$ .

A figura 04 apresenta os componentes supracitados e utilizados para a fabricação da da pasta de MAA.



**Figura 4.** Sacas de metacaulim cedidos pela Metacaulim do Brasil e estocados no almoxarifado do LABEME (a); Hidróxido de Sódio em pérolas, cedido pela empresa Química Moderna (b); Galão de silicato de sódio cedido pela Diatom (c).

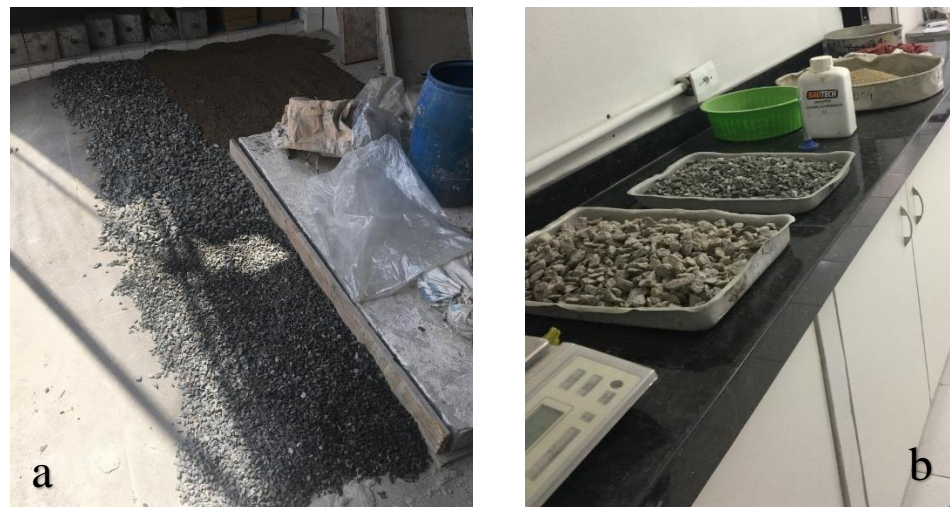
Fonte: Autora, 2019.

### 3.2.4. Agregados

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), na norma NBR 7211, agregado para concreto deve ser “composto por grãos de minerais duros, compactos, duráveis, estáveis, limpos e que não interfiram no endurecimento e hidratação do cimento e também na proteção contra corrosão da armadura”.

Para a moldagem de ambos os concretos (Tradicional e MAA) foram utilizados os mesmos agregados, variando apenas o traço utilizado para cada um deles. A brita e a areia utilizada foram fornecidas pela empresa Brita Forte, localizada na cidade de João Pessoa – PB.

No tocante à brita, utilizaram-se dois tipos diferentes, conforme a sua granulometria. De acordo com a classificação do Ministério de Minas e Energia (MME), foram utilizadas a brita do tipo 1 (variando de 9,5mm a 19,0mm) e a brita do tipo 2 (variando de 19,0mm a 25mm) nas devidas proporções estabelecidas através do traço. Foi realizado também o melhoramento do agregado miúdo através do peneiramento do mesmo na malha 6.35mm (1/4 de polegada). Todos os agregados foram levados à estufa antes da etapa de moldagem dos corpos de prova. A figura abaixo apresenta os agregados utilizados para a elaboração de ambos os concretos da presente pesquisa.



**Figura 5.** Tratamento e separação dos agregados (a); pesagem e preparação dos agregados após secagem em estufa (b).

Fonte: Autora, 2019.

### 3.2.5. Aditivos

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992), na NBR 11768, aditivos são produtos que quando adicionados em pequenas quantidades de concretos de cimento Portland modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições.

Com o intuito de melhorar o desempenho mecânico do concreto, lançamos mão do aditivo plastificante (tipo P). O plastificante é um produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 6% da quantidade de água de amassamento para produzir um concreto com determinada consistência (ABNT, 1992).

Para a presente pesquisa, foi utilizado o superplastificante Bautech fornecido pela empresa Bautech, localizada no município de São Paulo - SP. De acordo com o fabricante, o superplastificante promove uma redução de 10 a 25% da necessidade de água do concreto, dependendo do traço utilizado, promovendo assim um aumento das resistências mecânicas do concreto e/ou aumento da plasticidade.

### **3.3. Métodos**

#### **3.3.1. Definição dos traços**

Para a efetivação da moldagem dos corpos de prova de concreto tradicional, primeiramente foi necessário o estabelecimento do traço. Com base em literaturas anteriores, e na norma NBR 12655/2006 estabeleceu-se parâmetros para que o traço do concreto obedeça aos requisitos necessários para a exposição do material à ambiente agressivo, como é o caso da água do mar.

Na tabela abaixo, extraída da norma NBR 12655 (ABNT, 2006), observa-se o grau de exposição dos corpos de prova em função da agressividade do meio e o mínimo de resistência que eles devem possuir para suportar tais condições. Desta forma, para o estabelecimento do traço levou-se como referência a necessidade de um concreto com resistência mínima de 25MPa.

**Tabela 4.** Requisitos para concretos expostos a soluções contendo sulfatos.

<b>Condições de exposição em função da agressividade</b>	<b>Sulfato solúvel em água (SO<sub>4</sub>) presente no solo % em massa</b>	<b>Sulfato solúvel (SO<sub>4</sub>) presente na água Ppm</b>	<b>Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal*</b>	<b>Mínimo FCK (para concreto com agregado normal ou leve) MPa</b>
<b>Fraca</b>	0,00 a 0,10	0 a 150	--	--
<b>Moderada**</b>	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	25
<b>Severa***</b>	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,45	40

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

\*\*Água do mar.

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

Fonte: ABNT NBR 12655, 2015.

Para auxiliar a formatação do traço e assim garantir um bom desempenho da resistência mecânica dos corpos de prova, também foi realizado um estudo da massa específica e da composição granulométrica dos agregados.

As tabelas 05 e 06 apresentam a massa específica e a composição granulométrica dos agregados.

**Tabela 5.** Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.

<b>Amostra</b>	<b>Massa seca em estufa</b>	<b>Massa do recipiente + Água Destilada</b>	<b>Massa do recipiente + Água Destilada + Amostra</b>	<b>Massa Específica</b>
<b>Areia</b>	500g	1286,9g	1597,3g	2,63g/cm <sup>3</sup>
<b>Brita Maior</b>	500g	1286,9g	1599,5g	2,66g/cm <sup>3</sup>
<b>Brita Menor</b>	500g	1286,9g	1606,1g	2,76g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Adaptado da ABNT NBR NM 53, 2003.



**Tabela 6.** Determinação da composição granulométrica.

<b>Areia</b>		<b>Brita Maior</b>		<b>Brita Menor</b>	
<b>Peneira</b>	<b>Peso retido (g)</b>	<b>Peneira</b>	<b>Peso retido (g)</b>	<b>Peneira</b>	<b>Peso retido (g)</b>
75mm	-	75mm	-	75mm	-
63mm	-	63mm	-	63mm	-
50mm	-	50mm	-	50mm	-
37,5mm	-	37,5mm	-	37,5mm	-
31,5mm	-	31,5mm	-	31,5mm	-
25mm	-	25mm	-	25mm	-
19mm	-	19mm	155,2g	19mm	-
12,5mm	-	12,5mm	1132,5g	12,5mm	-
9,5mm	-	9,5mm	478,6g	9,5mm	126,8g
6,3mm	-	6,3mm	233,7g	6,3mm	620,5g
4,75mm	5,8g	4,75mm	-	4,75mm	261,2g
2,36mm	39,5g	2,36mm	-	2,36mm	-
1,18mm	88,8g	1,18mm	-	1,18mm	-
600 µm	277,1g	600 µm	-	600 µm	-
300 µm	429,3g	300 µm	-	300 µm	-
150 µm	136,4g	150 µm	-	150 µm	-
Resíduos	23,1g	Resíduos	-	Resíduos	-
<b>TOTAL</b>	<b>1.001,6g</b>	<b>TOTAL</b>	<b>1990,4g</b>	<b>TOTAL</b>	<b>1.158,5g</b>

Fonte: Adaptado da ABNT NBR NM 248, 2003.

Desta forma, com base nos parâmetros supracitados, chegou-se ao seguinte traço para o concreto tradicional: 1 parte de cimento para 1,71 partes de agregado graúdo (obedecendo a proporção de 40% de brita tipo 1 e 60% de brita tipo 2) e 1,89 partes de agregado miúdo. Na presente mistura foram adicionados 10 ml do aditivo superplastificante Bautech e a relação água cimento (a/c) foi de 0,37. Na tabela 07 observa-se o traço descrito para a elaboração do concreto tradicional.

**Tabela 7.** Traço determinado para o concreto tradicional.

Cimento	Agregados		Relação a/c
	Brita	Areia	
1	1,71	1,89	0,37

Fonte: Autora, 2019.

Para o concreto à base de MAA utilizamos um traço já conhecido na literatura (FIGUEIREDO, 2017) que assegura a resistência mecânica do concreto MAA já nos primeiros dias. Abaixo, segue a tabela que apresenta o traço empregado na pesquisa.

**Tabela 8.** Traço determinado para o concreto MAA.

MAA	Agregados		Relação a/c
	Brita	Areia	
1	1,71	0,83	0,03

FONTE: Adaptado de Figueiredo, 2017.

Contudo, para a moldagem da pasta MAA, que fará o papel do cimento no concreto em questão, também houve a necessidade de se estabelecer os quantitativos dos precursores que alimentam a mistura. Assim, também com base na literatura (SILVA, 2008), estabeleceram-se os seguintes quantitativos:

**Tabela 9.** Quantitativo para moldagem da pasta MAA.

Precursos	Quantidades
Metacaulim	0,50 kg
Hidróxido de Sódio (NaOH)	0,039kg
Silicato de Sódio (Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )	0,46kg

Fonte: Adaptado de Silva, 2008.

### 3.3.2. Moldagem dos corpos de prova

A primeira etapa para a execução dos corpos de prova de ambos os concretos foi a preparação dos moldes. Foram utilizados sessenta (60) moldes metálicos cilíndricos medindo 100 mm x 200 mm cedidos pelo LABEME e untados com óleo mineral.

Com os moldes prontos para receber os concretos, partiu-se primeiramente para a preparação do concreto à base de cimento tradicional. Levou-se então à betoneira, a combinação dos agregados graúdos, miúdos e cimento para serem misturados à seco. Após detectada a homogeneidade do material, passou-se a adicionar a água de forma fracionada, mexendo a mistura na betoneira até alcançar à consistência desejada.

A figura 06 apresenta duas etapas na moldagem dos corpos de prova, sendo a primeira referente à preparação dos moldes e a segunda referente à mistura dos agregados secos na betoneira.



**Figura 6.** Preparação dos moldes untados com óleo mineral (a); mistura dos agregados secos e do cimento na betoneira (b).

Fonte: Autora, 2019.

Para o concreto à base de MAA, primeiramente deu-se início a preparação da pasta geopolimérica com base nos precursores citados anteriormente.

Após definirmos os quantitativos dos precursores e da água, iniciou-se então a preparação da pasta de MAA através da mistura de hidróxido de sódio (NaOH), apresentado em formato de micropérolas, em água destilada à temperatura ambiente. A solução alcalina foi misturada de forma manual até atingir homogeneidade e, por se tratar de uma reação exotérmica, a solução foi deixada em repouso até que atingisse a temperatura ambiente, evento este que durou cerca de 40 minutos.

Com o cumprimento da primeira etapa, adicionamos então o silicato de sódio à solução alcalina e, por conseguinte, inserimos a metacaulinita em pó até atingirmos uma mistura homogênea. Com a pasta de MAA pronta, partiu-se então para a mistura junto aos agregados na betoneira sendo mexido até alcançar a consistência desejada.

A figura 07 apresenta a preparação e pesagem dos precursores, o processo de mistura do NaOH em água e a preparação do concreto MAA, respectivamente.



**Figura 7.** Separação e pesagem dos precursores para a pasta geopolimérica (a); mistura do NaOH com água ocasionando uma reação exotérmica (b) mistura da pasta geopolimérica com os agregados (c).

Fonte: Autora, 2019.

Com ambos os concretos prontos, passou-se então a despejar o material nos moldes conforme rege a norma NBR 5738 (ABNT, 2015), para cada corpo de prova foram colocadas duas camadas de concreto sendo adensada por doze batidas em cada camada, garantindo assim a uniformidade da moldagem e evitando o aparecimento de bolsas de ar.

A figura 08 mostra o adensamento do concreto nos corpos de prova.



**Figura 8.** Moldagem dos corpos de prova à base de cimento portland (a) Moldagem dos corpos de prova à base de MAA (b).

Fonte: Autora, 2019.

Ao final desta etapa, os corpos de prova foram curados em temperatura ambiente, e desmoldados após 24 horas. Com o intuito de regularizar as superfícies dos CPs diminuindo assim o risco de alterações no resultado do ensaio de resistência mecânica, fora realizado o caponamento de todos os corpos de prova e a imersão de metade deles em reservatórios com água do mar, para então serem submetidos aos ensaios de resistência mecânica após o cumprimento das idades de 7, 28 e 56 dias.

A figura 09 apresenta os corpos de prova de ambos os concretos após a etapa de moldagem.





**Figura 9.** Corpos de prova de concreto à base de cimento portland (a); Corpos de prova à base de MAA (b).

Fonte: Autora, 2019.

### 3.3.3. Preparação das amostras para análise microestrutural

Após a moldagem dos Corpos de Prova e a realização dos ensaios de resistência mecânica à compressão em suas respectivas idades e condições de cura, partiu-se então para a etapa de seleção das amostras para a caracterização microestrutural dos concretos em questão.

Desta forma, selecionamos fragmentos dos corpos de prova referente a cada concreto (CP e MAA), idade (7, 28 e 56 dias) e condição de cura (ambiente natural ou marinho). Assim, chegamos ao total de 12 amostras para a realização da caracterização microestrutural. A tabela abaixo apresenta a classificação das amostras caracterizadas de acordo com o tipo de concreto, condição de cura e idade de rompimento.

**Tabela 10.** Classificação das amostras de concreto.

Concreto Tradicional						Concreto Geopolimérico					
<b>Tipo de Concreto</b>											
Ambiente Natural			Ambiente Marinho			Ambiente Natural			Ambiente Marinho		
<b>Condição de Cura</b>											
7° D	28° D	56°D	7° D	28° D	56°D	7° D	28° D	56°D	7° D	28° D	56°D
<b>Idades de Rompimento</b>											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<b>Amostras</b>											

Fonte: Autora, 2019.

Com a definição da amostragem através dos corpos de prova anteriormente executados, partiu-se então para a fragmentação manual do material para que os corpos de prova se partissem em partes pequenas o suficiente para serem macerados no moinho de bola.

Para a moagem dos fragmentos de concreto, foi utilizado o moinho de bolas modelo SONNEX I-4205, da marca CONTENCO, pertencente ao Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas da UFPB (LABEME). O moinho é constituído de uma carcaça de ferro, revestida internamente com blocos de sílex e carregado de corpos moedores (SILVA, 2008).

Foram realizadas 12 sessões de moagem no moinho de bolas. Cada sessão com duração de 40 minutos. Após o término de cada sessão de moagem, o moinho era esvaziado e preenchido com areia e brita comum para que os resquícios da amostra anterior não contaminassem a amostra subsequente e assim por diante.

A composição da carga de bolas foi constituída por 12 bolas com diâmetros variando entre 20 mm e 40 mm. De acordo com SILVA (2008) a heterogeneidade no tamanho das bolas visa obter um maior rendimento da moagem, uma vez que as esferas de maior diâmetro atuarão preferencialmente na ruptura do material e as de menor diâmetro na obtenção de partículas menores.

As imagens a seguir apresentam 3 etapas de preparação das amostras para o empreendimento das análises microestruturais, iniciando pelo processo de seleção dos corpos de prova anteriormente rompidos durante os ensaios de resistência mecânica, passando pelo

processo de fragmentação dos concretos em partículas menores aptas a moagem no moinho de bola e, posteriormente, partes das amostras já devidamente moídas.



**Figura 10.** Corpos de prova rompidos (a); Amostras fragmentadas manualmente (b); Parte das amostras já maceradas após a moagem no moinho de bolas (c).

Fonte: Autora, 2019.

Após a passagem das amostras pelo moinho de bolas com o intuito de refinar ainda mais a qualidade do material, realizou-se o peneiramento manual na peneira de *mesh* 270 e a separação das amostras em seus respectivos *ependorfs*.



**Figura 11.** Peneiras utilizadas na preparação das amostras (a); Eppendorfs finalizados (b).

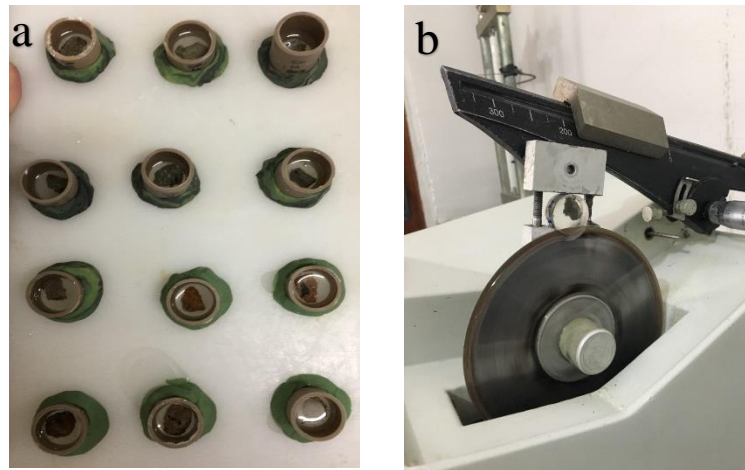
Fonte: Autora, 2019.

Com as amostras prontas para análise, elas foram direcionadas para os respectivos laboratórios para serem examinadas pelo DRX, FTIR, e TG. Contudo, para a efetivação da microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi necessário um segundo preparo.

Após a etapa de maceração manual (anteriormente citada), pequenos fragmentos das amostras foram embutidos em resina NovaJer Rígida Fluida NJ0200 fornecida pelo Novajer.



Foram utilizados recortes de cano de PVC de 25mm de diâmetro para determinação da forma das amostras. Depois do embutimento, partiu-se para o corte das amostras no *Cutoff* lubrificado com óleo mineral (figura X). A realização do corte justifica-se para que a face do fragmento embutido fique devidamente exposta para a realização da análise.



**Figura 12.** Embutimento das amostras em resina rígida fluida (a); Corte das amostras já embutidas no Cutoff embebido em óleo mineral (b).

Fonte: Autora, 2019.

Por conseguinte, as amostras passaram por um processo de lixamento, através das lixas d'água n° 400, 600, 800, 1.000 e 1.200. Durante o processo de lixamento, cada amostra fora rotacionada à 90° em igual período de tempo com o intuito de que o lixamento não direcionasse à microestrutura do material. A cada troca de lixa, as amostras passavam por banho de ultrassom durante o período de 3 minutos.

Finalizada a etapa de lixamento, partiu-se então para o polimento das amostras com pasta diamantada seguida da metalização. A figura 13 apresenta os materiais utilizados para a realização do banho de ultrassom, polimento e metalização das amostras, respectivamente.



**Figura 13.** Amostras imersas em álcool isopropílico para o banho de ultrassom (a); Máquina de polimento com pasta diamantada (b) Processo de metalização das amostras (c).

Fonte: Autora, 2019.

### 3.3.4. Técnicas de Caracterização

#### a) Resistência à compressão simples

Para o empreendimento do ensaio de resistência mecânica foi utilizado o equipamento de ensaios dinâmicos SHIMADZU SERVOPULSER com capacidade máxima de 100 kN, com velocidade de 0,02 mm/s, sendo o ensaio realizado no Laboratório de Tecnologia de novos materiais (TECNOM/UFPB).

#### b) Difração de Raios – X (DRX)

Para a efetivação das análises em DRX utilizou-se o difratograma modelo D2 Phaser – da Bruker) operando com radiação  $K\alpha$  do Cu, 30 kV, 10 mA e com faixa de varredura  $2\theta$  entre  $5^\circ$ - $70^\circ$ , utilizando fenda de 0,6 mm e incremento de  $0,02^\circ$  por segundo. O ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia de novos materiais (TECNOM/UFPB).

A técnica versa em fazer com que se incida um feixe de raios-x interagindo com os átomos presentes nos planos cristalinos da amostra, originando o fenômeno da difração, que obedece a lei de Bragg, estabelecendo a relação entre o ângulo de incidência e a distância entre os planos cristalinos (SILVA, 2008).

c) Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Para a realização da análise das amostras através do FTIR, foi utilizado um espectrofotômetro da marca Shimadzu, modelo IR Prestige-21, com os seguintes parâmetros de análise: Região 4000-400  $\text{cm}^{-1}$ ; Resolução: 4  $\text{cm}^{-1}$ ; N° acumulações: 20; Modo: transmitância.

O preparo das amostras foi disperso em KBr na proporção 1: 100 mg para confecção de pastilhas de 1,2 cm de Diâmetro. O ensaio foi realizado no Laboratório de Combustíveis e Materiais (LACOM/UFPB).

Através da espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), observa-se o surgimento/desaparecimento de picos e bandas que apontam para a transformação ou aparecimento de novas fases durante o processo de envelhecimento e exposição de ambos os concretos ao ambiente natural e ao ambiente marinho.

d) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para a realização da análise através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foi utilizado o equipamento modelo Leo 1430 Superscan da Zeiss. O ensaio e a metalização das amostras foram realizados no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR).

O MEV é um aparelho que pode fornecer rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida. A principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas (valores da ordem de 2 a 5 nanômetros). Outra característica importante é a aparência tridimensional da imagem das amostras, resultado direto da grande profundidade de campo (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007).

e) Análise Termogravimétrica (TG)

Para as análises térmicas foi utilizado um analisador termogravimétrico simultâneo SDT 650 da TA Instruments. Para o estudo térmico dos concretos obtidos na pesquisa, foi realizado uma taxa de aquecimento de 10°C/min em atmosfera de argônio com fluxo de 100 mL/s em cadinho de platina com temperatura de análise de 20° C a 1000° C.

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS

#### 4.1. Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)

A figura 14 ilustra a realização dos ensaios de resistência à compressão simples para os concretos à base de MAA e à base de cimento Portland, ambos curados em ambiente natural e com idade de 7 dias. O mesmo procedimento foi realizado para os demais concretos submetidos às demais idades e expostos às duas condições de cura.



**Figura 14.** Ensaio de resistência mecânica MAA (a); Ensaio de resistência mecânica CP (b).

Fonte: Autora, 2019.

Conforme já explanado anteriormente, foram realizados 60 ensaios de rompimento, sendo 30 ensaios referentes aos corpos de prova de concreto tradicional onde 15 foram curados em ambiente natural e 15 submetidos ao ambiente marinho, e 30 ensaios referentes aos corpos de

prova de concreto à base de MAA, também submetidos à cura em ambiente natural e ao ambiente marinho. As idades de rompimento adotadas foram 7 dias, 28 dias e 56 dias.

A Tabela 11 apresenta o planejamento experimental dos concretos para os ensaios de resistência à compressão correlacionando a quantidade de corpos de prova de acordo com o tipo de concreto, os ambientes de cura e as idades para rompimento.

**Tabela 11.** Planejamento experimental para os ensaios de resistência à compressão simples.

<b>TIPOS DE CONCRETO</b>											
Concreto à base de CP II – Z 32 30						Concreto à base de MAA 30					
<b>AMBIENTES PARA CURA</b>											
Ambiente Natural			Ambiente Marinho			Ambiente Natural			Ambiente Marinho		
15			15			15			15		
<b>IDADES DE ROMPIMENTO</b>											
7 D	28 D	56D	7 D	28 D	56 D	7 D	28 D	56 D	7 D	28 D	56 D
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Fonte: Autora, 2019.

Na tabela abaixo, segue a média dos resultados (5 corpos de prova para cada condição) e seus respectivos desvios padrão, dos ensaios de resistência mecânica realizados na presente pesquisa conforme o planejamento experimental supracitado.

**Tabela 12.** Resultado numérico dos ensaios de rompimento dos corpos de prova.

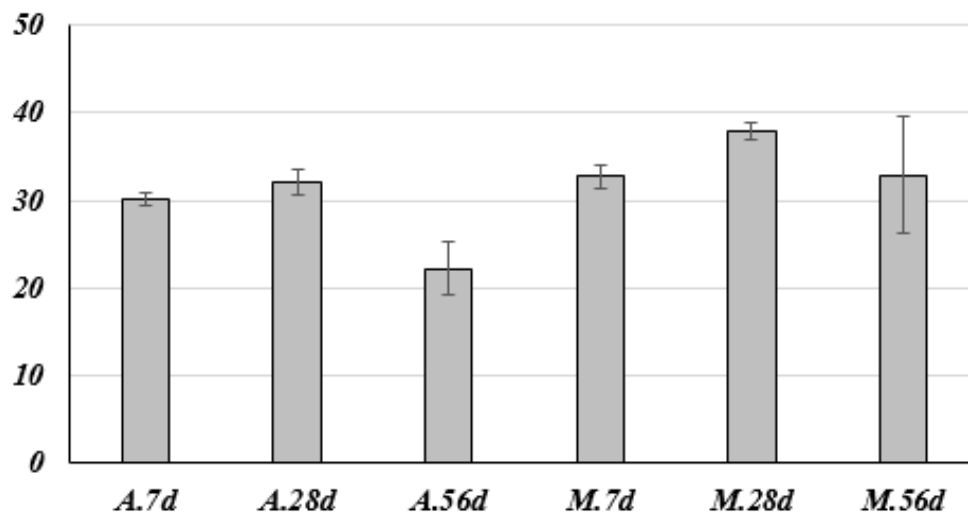
Id	Ambiente Natural				Ambiente Marinho			
	CP (MPa)	DP	MAA (MPa)	DP	CP (MPa)	DP	MAA (MPa)	DP
<b>7</b>	30,17	0,67	30,77	1,28	32,72	0,36	45,62	2,47
<b>28</b>	32,08	1,38	32,34	1,02	37,93	2,22	39,81	1,21
<b>56</b>	22,22	1,62	34,96	6,74	32,94	5,37	33,25	0,89

\*DP = Desvio Padrão

Fonte: Autora, 2019.

A figura 15 apresenta o gráfico que aponta os resultados das médias de resistências obtidas para o concreto tradicional, tanto submetido as condições naturais de cura, quanto submetido ao ambiente marinho durante as três idades avaliadas.

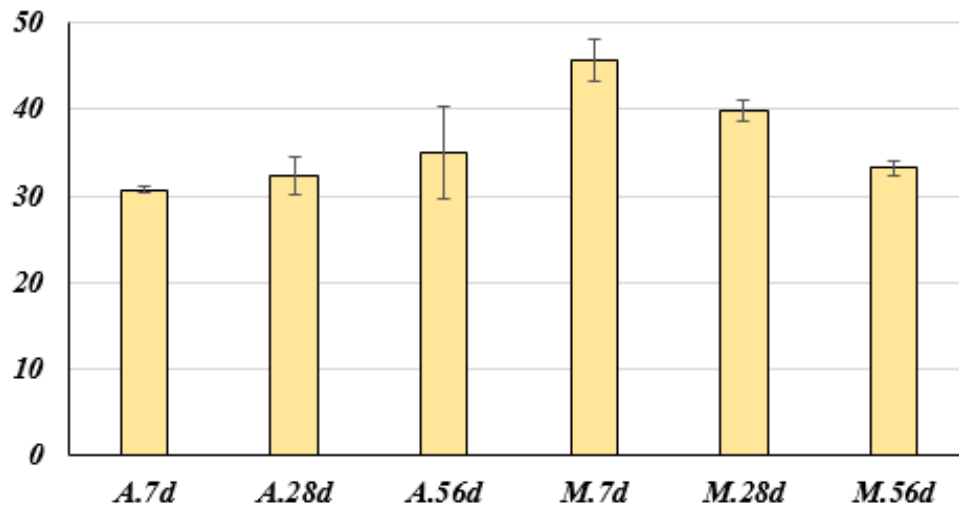
Observando o gráfico, pode-se perceber que os concretos à base de cimento tradicional, curados em ambiente natural seguiram com crescimento na resistência mecânica no intervalo de 7 a 28 dias. Entretanto, eles passam a apresentar um decréscimo significativo na resistência após o 28º dia. Quando expostos ao ambiente marinho, os concretos possuíram comportamento semelhante, com crescimento da resistência nas primeiras idades e diminuição da mesma também a partir do 28º dia. Isto pode estar relacionado as interações químicas ocorridas durante o processo de cura.



**Figura 15.** Gráfico de resistência mecânica do concreto à base de CP.

Fonte: Autora, 2019.

A figura 16 apresenta os resultados das médias de resistências obtidas para o concreto a base de material alcalinamente ativado, tanto submetido as condições naturais de cura, quanto submetido ao ambiente marinho nas três idades avaliadas.



**Figura 16.** Gráfico de resistência mecânica do concreto à base de MAA.

Fonte: Autora, 2019.

Em se tratando do concreto à base de MAA curado em ambiente natural, observa-se o crescimento contínuo da resistência mecânica dos corpos de prova ao longo das idades de 7, 28 e 56 dias. Contudo, quando expostos ao ambiente marinho, a resistência mecânica dos corpos de prova atinge seu melhor resultado na primeira idade, decrescendo de forma linear com o passar dos dias.

Ainda assim, podemos verificar que estabelecendo um comparativo entre as mesmas idades e condições de cura, o concreto à base de material alcalino ativado possui resistência superior ao concreto à base de cimento Portland em todos os cenários abordados.

Na tabela 13, observam-se os resultados com a diferença em percentual entre as resistências mecânicas dos concretos comparados.

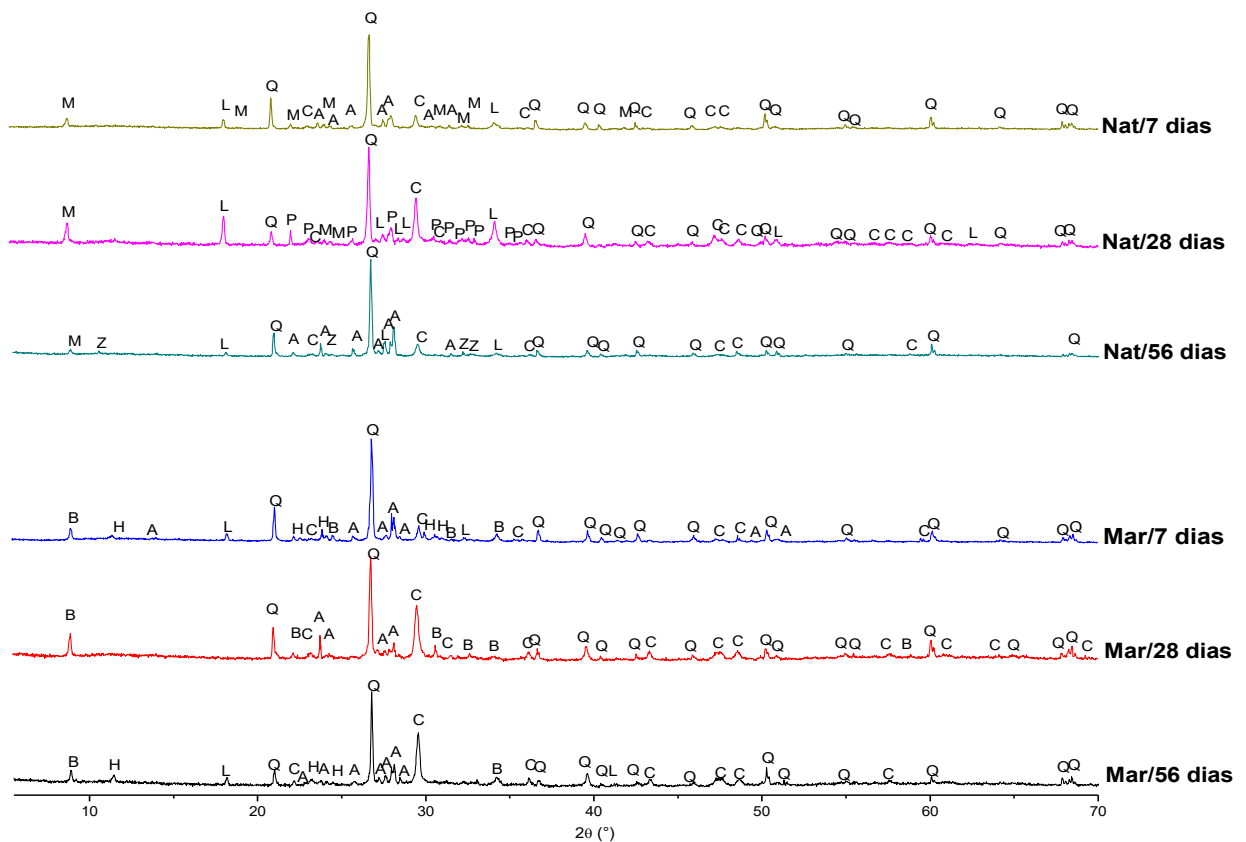
**Tabela 13.** Resultado em diferença de percentual dos concretos analisados.

Idade	Ambiente Natural			Ambiente Marinho		
	CP	MAA	%	CP	MAA	%
7	30,17 MPa	30,77 MPa	1,98	32,72 MPa	45,62 MPa	39,42
28	32,08 MPa	32,34 MPa	0,81	37,93 MPa	39,81 MPa	4,95
56	22,22 MPa	34,96 MPa	57,33	32,94 MPa	33,25 MPa	0,91

Fonte: Autora, 2019.

#### 4.2. Difração de raios X (DRX)

A figura 17 apresenta o difratograma dos concretos à base de cimento Portland submetidos ao ambiente natural e ao ambiente marinho nas três idades empreendidas ao longo dessa pesquisa (7, 28 e 56 dias), enquanto a tabela 14 apresenta as legendas referentes às fases encontradas no difratograma e suas respectivas cartas.



**Figura 17.** Difratograma adaptado do concreto CP submetidos ao ambiente natural e marinho nas idades 7, 28 e 56 dias.

Fonte: Autora, 2019.



**Tabela 14.** Legenda das fases presentes no difratograma e suas respectivas cartas.

<b>Legenda</b>	<b>Mineral</b>	<b>Número da Carta</b>
M	Muscovita	01-075-0948
Q	Quartzo	01-083-2466
C	Calcita	01-089-1304
A	Albita	00-010-0393
L	Portlandita	01-076-0570
P	Polihalita	00-021-0982
Z	Zeólita	00-021-0132
B	Biotita	01-076-0884
H	Hidrocalumita	00-031-0245

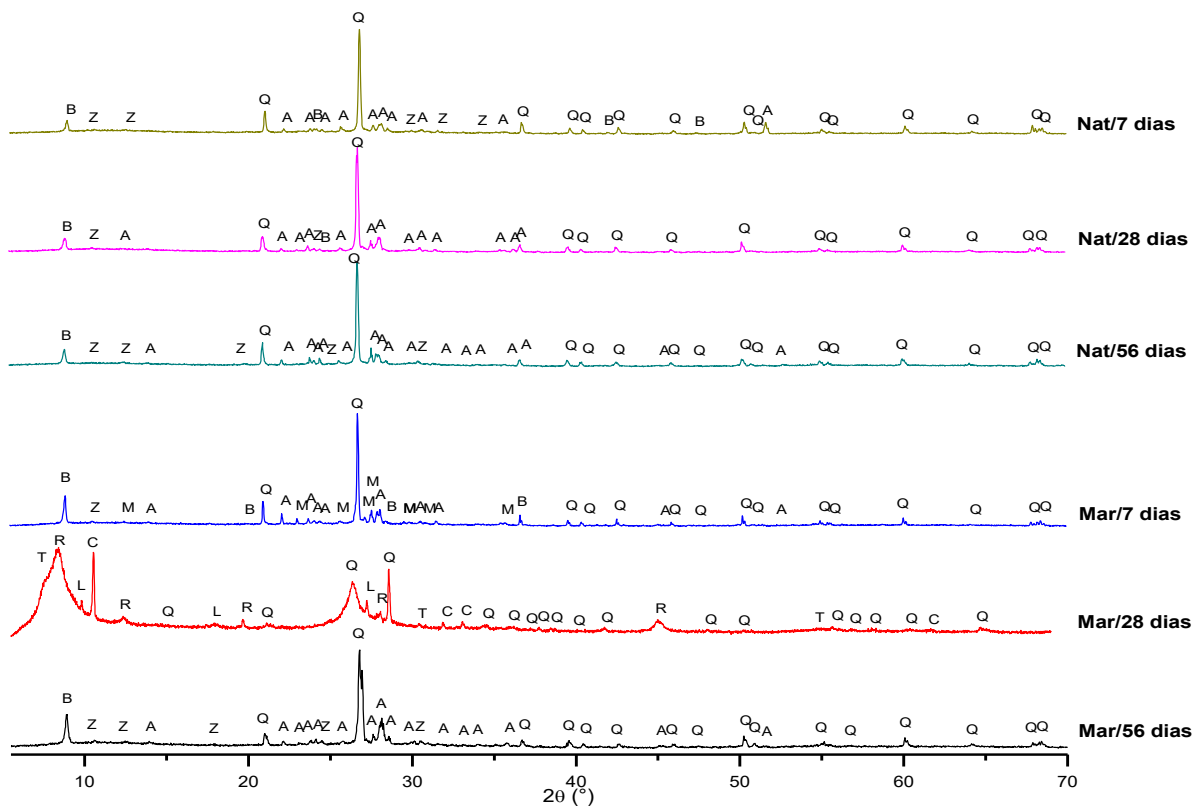
Fonte: Autora, 2019

Através da figura 17, pode-se observar que o concreto à base de cimento Portland é composto por quartzo (fonte de  $\text{SiO}_2$ ); calcita ( $\text{CaCO}_3$ ); muscovita ( $\text{H}_2\text{KAl}_3(\text{SiO}_4)_3$ ) que é pertencente ao grupo de minerais mica; portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), também conhecida como hidróxido de cálcio; albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) que é pertencente à família dos feldspatos; polihalita ( $\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ); e zeólita ( $\text{Al}_2\text{CaH}_{3,4}\text{O}_{19,7}\text{Si}_7$ ).

Em relação aos concretos curados em ambiente natural, observa-se a presença constante das fases de quartzo, calcita, muscovita e portlandita, nas três idades avaliadas, a fase da polihalita surge na idade de 28 dias e as fases de albita e zeólita somente aparecem a partir do 56º dia.

Entretanto, quando se observa os difratogramas dos concretos submetidos ao ambiente marinho, percebe-se a constância apenas das fases de quartzo, calcita e albita nas três idades estudadas. Duas novas fases aparecem nesse contexto, são elas a biotita, que é um mineral comum oriundo da classe dos silicatos, pertencente ao grupo das micas e também a hidrocalumita.

A figura 18 apresenta o difratograma dos concretos à base de material alcalinamente submetidos ao ambiente natural e ao ambiente marinho nas três idades empreendidas ao longo dessa pesquisa (7, 28 e 56 dias), enquanto a tabela 15 apresenta as legendas referentes às fases encontradas no difratograma e suas respectivas cartas.



**Figura 18.** Difratoograma adaptado do concreto MAA submetidos ao ambiente natural e marinho nas idades 7, 28 e 56 dias.

Fonte: Autora, 2019

**Tabela 15.** Legenda das fases presentes no difratoograma e suas respectivas cartas.

Legenda	Mineral	Número da Carta
Q	Quartzo	01-083-2466
B	Biotita	01-076-0884
A	Albita	00-010-0393
Z	Zeolita	00-021-0132
M	Microlina	00-019-0932
T	Al - Tobermorita	00-019-0052
L	Aluminato de Cálcio	00-012-0408
R	<i>Brinrobertsite</i>	00-054-1146
C	CAC	00-042-0063

Fonte: Autora, 2019,

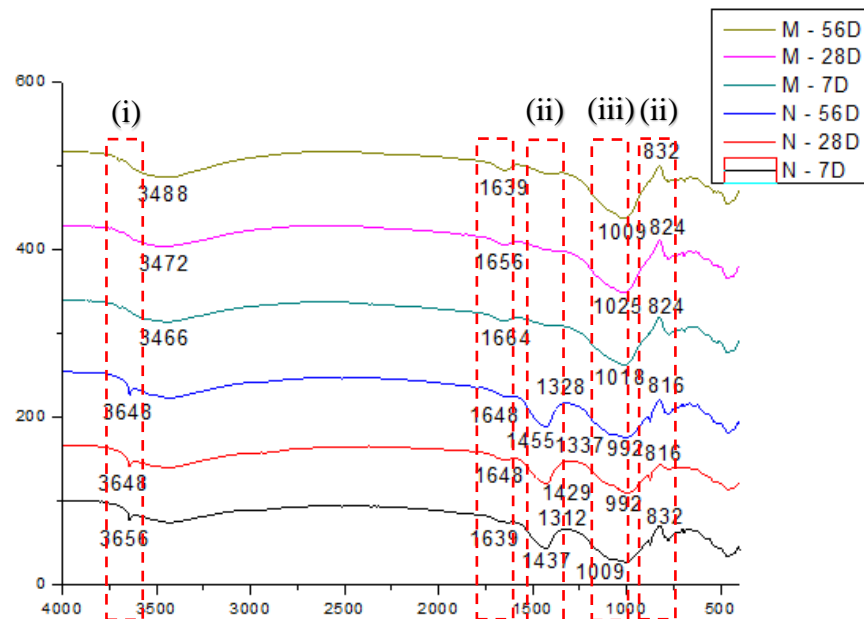
No difratograma dos concretos à base de MAA também observa-se as fases de quartzo em destaque sucedida por albita, biotita e zeólita, em ambas as curas e nas 3 idades, com exceção do concreto à base de MAA submetido à ambiente marinho com idade de 28 dias. O referido concreto apresenta um comportamento distinto em relação aos demais com o desaparecimento das fases de biotita, albita e zeólito ao mesmo tempo em que as fases T- tobermorita, L- aluminato, R- brinrobetsite e C- CAC aparecem. Tal comportamento pode ser justificado por uma possível hidratação da amostra durante a manipulação para análise, que será posteriormente averiguada.

Desta forma, através das análises de DRX pode-se perceber que os concretos à base de cimento Portland atestam seu comportamento condizente ao material cimentício devido a constância dos picos de quartzo, além de possuir uma maior concentração de fases cristalinas, possivelmente oriundas dos agregados utilizados (brita e areia), enquanto os concretos à base de material alcalinamente ativado possuem composição mais amorfa.

#### **4.3. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)**

Verificando a figura 19 que apresenta o espectro de FTIR gerado para os concretos à base de cimento Portland, pode-se observar os seguintes pontos já identificados na literatura por Aguilar, Gumieri e Vassalo (2014):

- (i) As bandas na ordem de  $3.470 \text{ cm}^{-1}$  são referentes à água constituinte e absorvida pelos silicatos de cálcio, com isso pode-se verificar que os concretos Portland hidrataram (PANZERA *et al.*, 2010).
- (ii) As bandas em  $1.419$ ,  $1.423$  e  $1.421 \text{ cm}^{-1}$  e as em  $877$  e  $875 \text{ cm}^{-1}$  são caracterizadas como o estiramento antissimétrico e a deformação angular C-O da calcita, respectivamente (BESSLER e RODRIGUES, 2008).
- (iii) As bandas em  $995$ ,  $1008$  e  $1.002 \text{ cm}^{-1}$  são referentes às vibrações de alongamento Si-O (TREZZA, 2007).

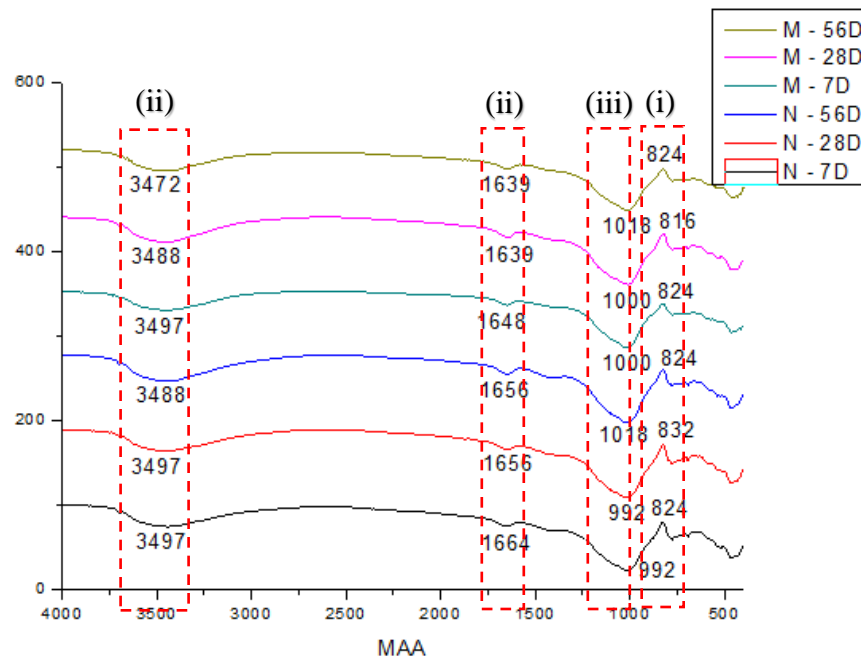


**Figura 19.** Análise FTIR para concreto à base de CP Tradicional.

Fonte: Autora, 2019.

Já observando o gráfico de FTIR, exposto através da figura 20, para os concretos à base de MAA, pode-se atestar, de acordo com a literatura (AGUILAR, GUMIERI e VASSALO, 2014) que:

- (i) Picos em torno de  $710\text{ cm}^{-1}$  indicam a formação de Al, um dos principais componentes do material alcalinamente ativado.
- (ii) Bandas de  $1.630\text{-}1.660\text{ cm}^{-1}$  e próximas a  $3.400\text{ cm}^{-1}$  sugerem presença de grupos isolados de fraca absorção, mas que possuem intensidade de acordo com a concentração de Na e K, fato consistente com o conhecimento de que o pH elevado favorece a despolimerização de aluminossilicatos.
- (iii) Bandas entre  $950\text{-}965\text{ cm}^{-1}$  representam a posição principal dos tetraedros de Si - O em todas as amostras.



**Figura 20.** Análise FTIR para concreto à base de MAA.

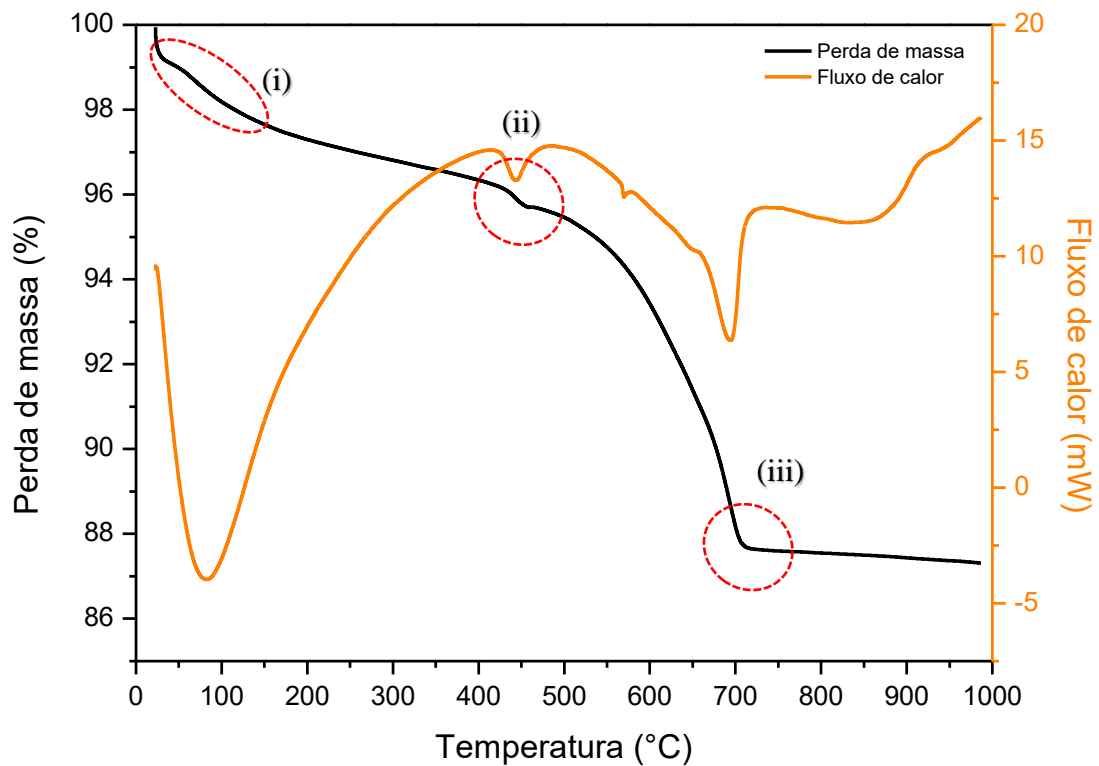
Fonte: Autora, 2019

#### 4.4. Análise térmica (TG)

As análises de perda de massa indicam um comportamento térmico estável (LIMA, 2019) dos concretos à base de CP e MAA quando submetidos ao ambiente natural e ao ambiente marinho na idade de 56 dias, designadas ao ensaio de termogravimetria.

A figura 21 apresenta o comportamento do concreto à base de cimento Portland em ambiente natural com idade de 56 dias. Segundo Lima (2019), na faixa de temperatura que envolve o início do ensaio até aproximadamente 150 °C (i), ocorre perda de massa, que pode ser atribuída à evaporação de água livre e da redução de fases hidratadas.

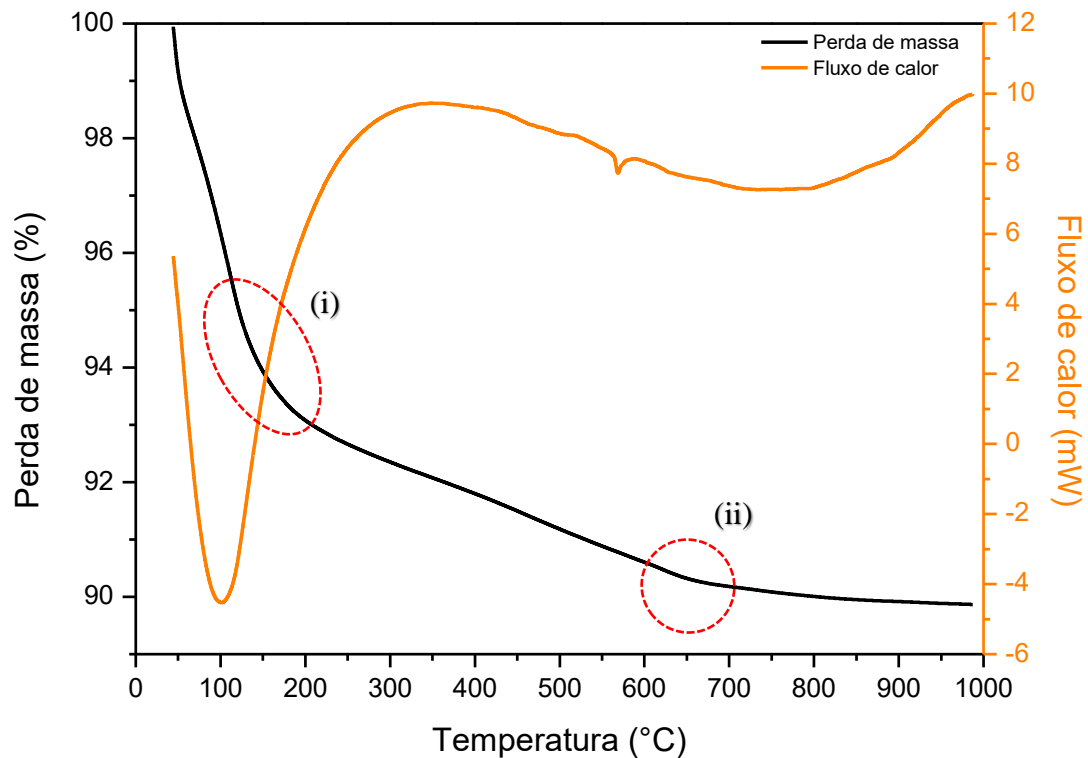
Na faixa de temperatura entre 400 e 500 °C (ii) também ocorre uma ligeira perda de massa. Já a partir de 700 °C nota-se o comportamento estável das curvas indicando a estabilidade das transformações de fases até o término do ensaio (LIMA, 2019).



**Figura 21.** Análise térmica do concreto CP em cura ambiente, com idade de 56 dias.

Fonte: Autora, 2019.

Na faixa de temperatura que abrange o início do ensaio até aproximadamente 200 °C (i), também ocorre perda de massa, que pode ser atribuída à evaporação de água livre (PROVIS e BERNAL, 2014). A partir de 650 °C (ii) nota-se o comportamento estável das curvas indicando a estabilidade das transformações de fases até o término do ensaio (LIMA, 2019).



**Figura 22.** Análise térmica do concreto MAA submetido ao ambiente marinho com idade de 7 dias.

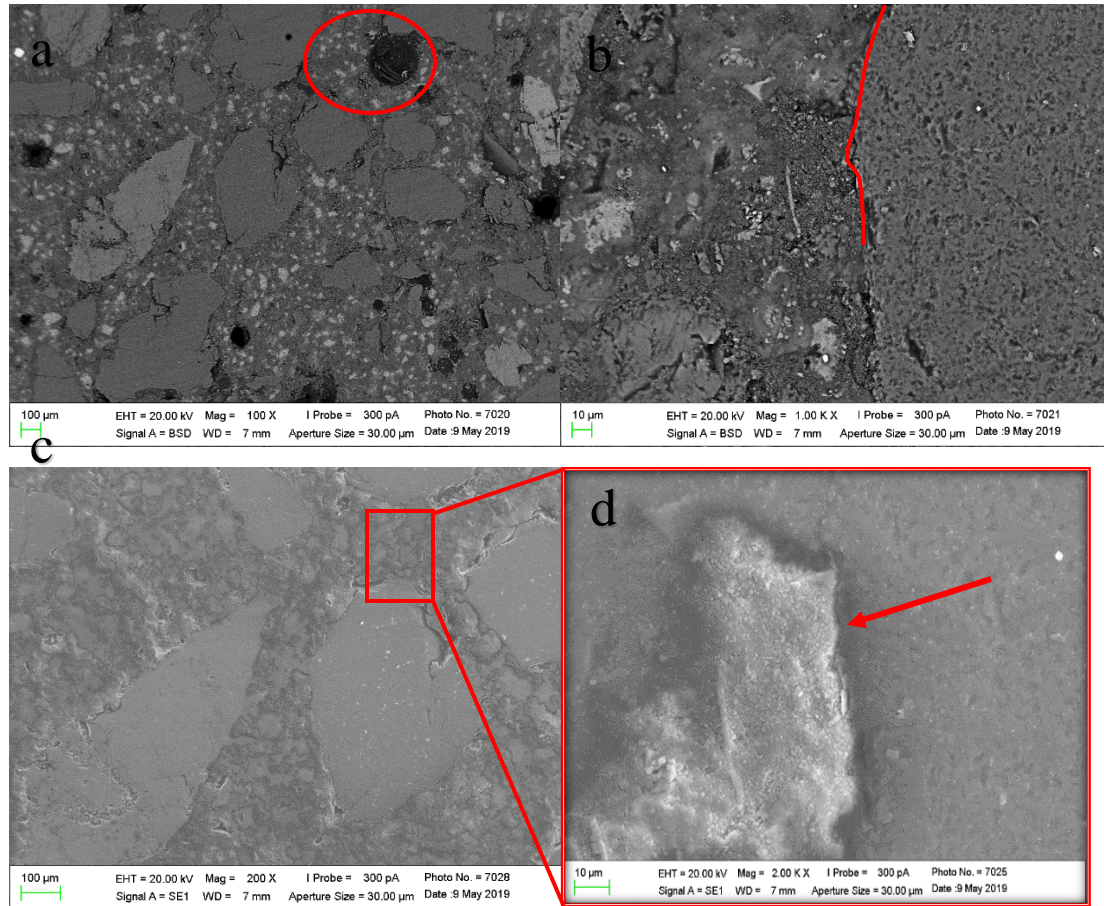
Autora, 2019.

#### 4.5. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As figuras a seguir, referem-se às imagens geradas através da microscopia eletrônica de varredura da amostra I, nos parâmetros de retroespalhamento e elétrons secundários com *mags* em 100x, 1.00kx, 200x e 2.00kx, respectivamente.

A amostra I, apresentada na figura 23, refere-se ao concreto à base de CP II Z- 32 exposto ao ambiente natural e rompido ao 7º dia. Nela, observa-se a presença de alguns poros e microporos na matriz além de microfissuras na região de interface entre os agregados e a matriz, condições essas inerentes ao processo de cura em ambiente natural.

Palomo *et al.* (2004), considera que as microfissuras são o resultado de um conjunto de tensões internas geradas no material durante o desenvolvimento da microestrutura, no qual o sistema não consegue absorver devido a coesão do mesmo.

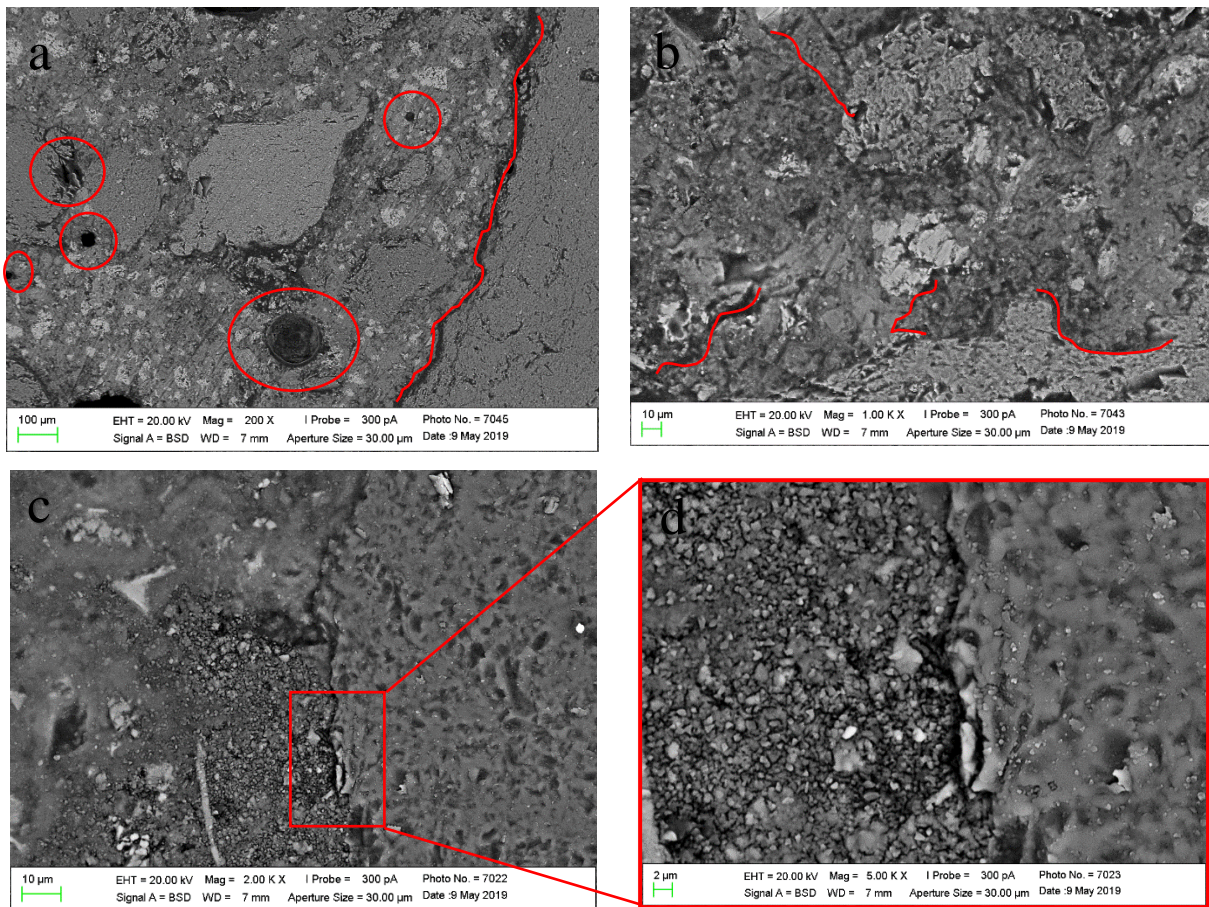


**Figura 23.** Amostra I com evidência de poros e microporos (a); Fissuras na interface (b); baixo adensamento entre matriz e agregado (c) e (d).

Fonte: Autora, 2019.

Nas amostras II e III, apresentadas nas figuras 24 e 25, respectivamente, ainda fazem parte do grupo de concretos à base de CP tradicional submetidos ao ambiente natural. Pode-se observar que, com o avanço das idades de dos concretos, a quantidade de poros e microporos tende a aumentar. Importante salientar que também observa-se um aumento no diâmetro e na profundidade dos mesmos.

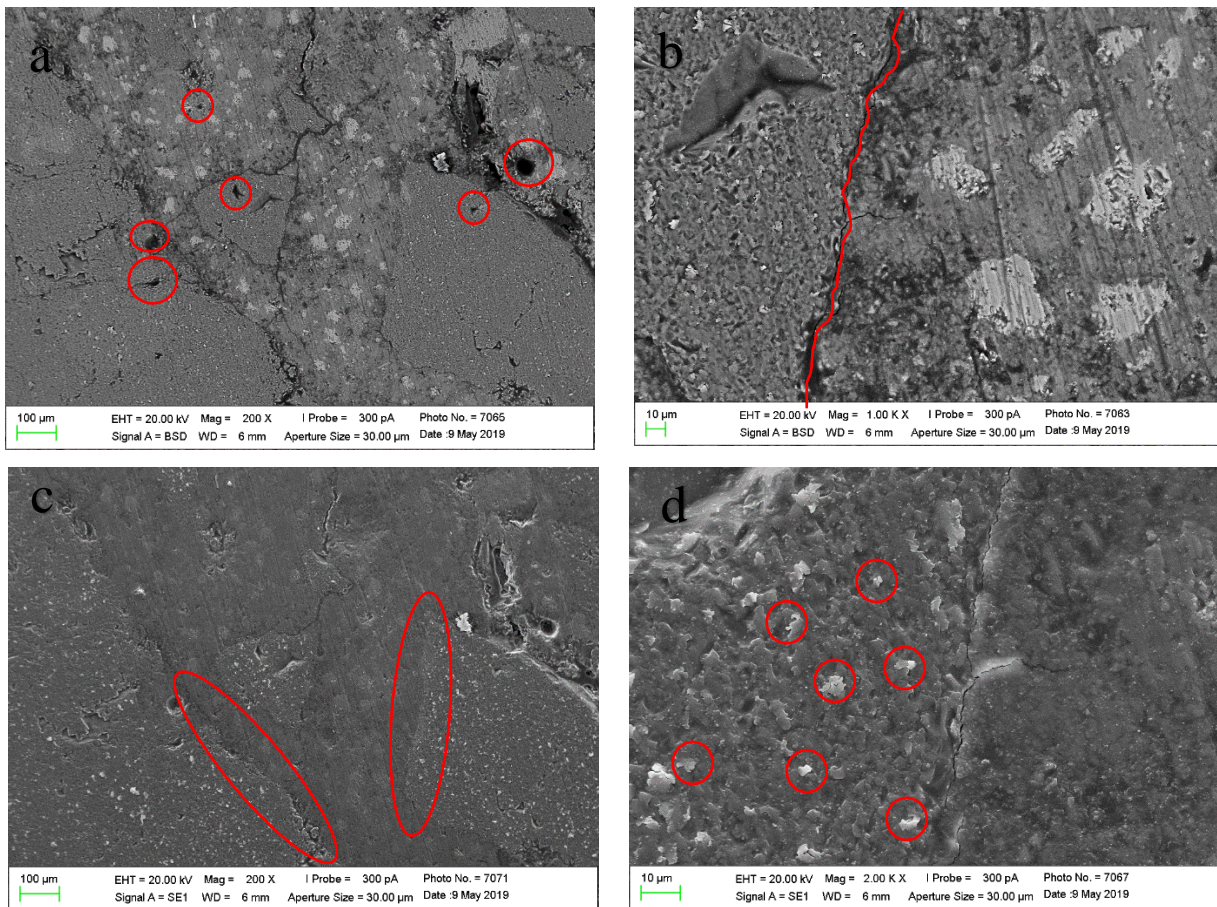




**Figura 24.** Amosta II com evidência de poros e microporos mais profundos (a); Fissuras na interface (b); baixo adensamento entre matriz e agregado (c) e (d).

Fonte: Autora, 2019.

A figura 25 apresenta o adensamento matriz/agregados nos primeiros dias verificando-se assim uma tímida coesão, que passa a ser melhor desenvolvida com o advir dos dias. Também observa-se a presença de carbonatos a partir do 56<sup>o</sup> dia.

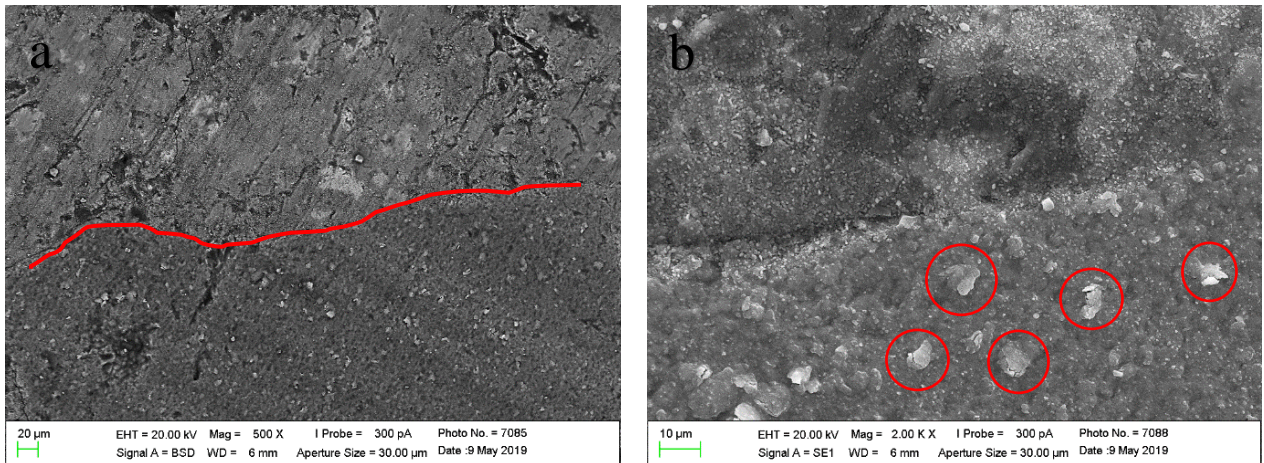


**Figura 25.** Amostra III com evidência de poros e microporos mais profundos (a); Fissuras na interface (b); melhora do adensamento entre matriz e agregado (c) presença de carbonatos (d).

Fonte: Autora, 2019.

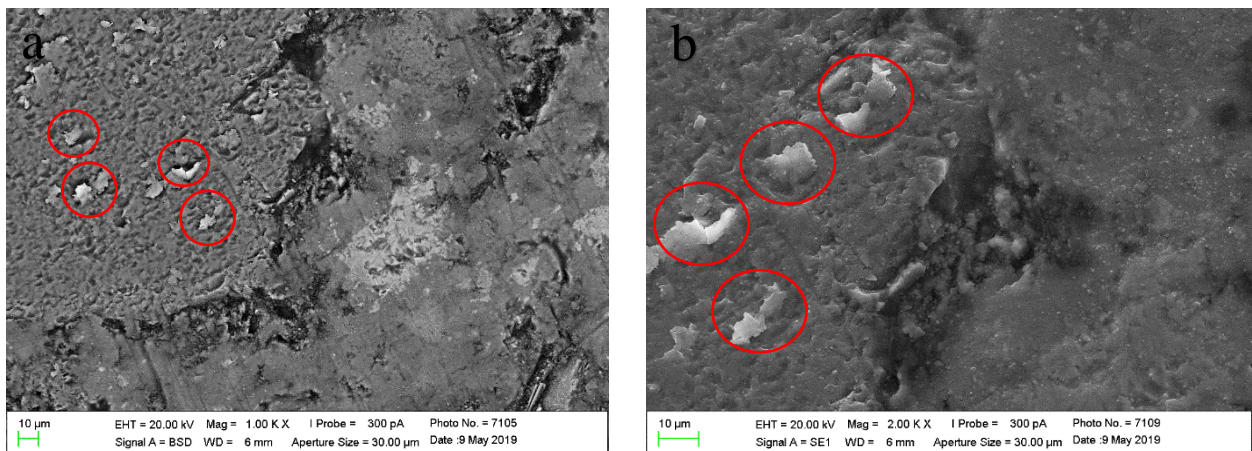
Já nas amostras IV, V e VI (figuras 26, 27 e 28 respectivamente) referentes aos concretos à base de CP natural submetidos ao ambiente marinho, observa-se o aparecimento de grandes poros e de estruturas semelhantes à escamas ou lamelas, tanto dentro dos agregados quanto na matriz. Essa condição pode ser justificada devido as interações das matérias prima do concreto CP com o ambiente marinho, que propicia as reações, sendo muitas delas deletérias.





**Figura 26.** Amostra IV apresenta boa coesão entre matriz e agregados (a); Presença de carbonatos dentro da matriz (b).

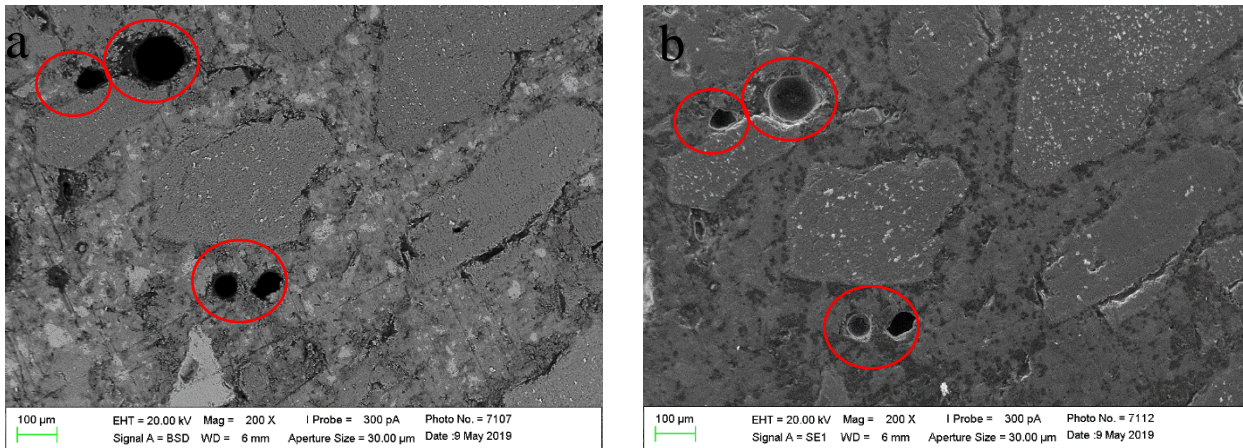
Fonte: Autora, 2019.



**Figura 27.** Amostra V com presença de estruturas carbonáticas semelhantes às lamelas /escamas (a) e (b).

Fonte: Autora, 2019.

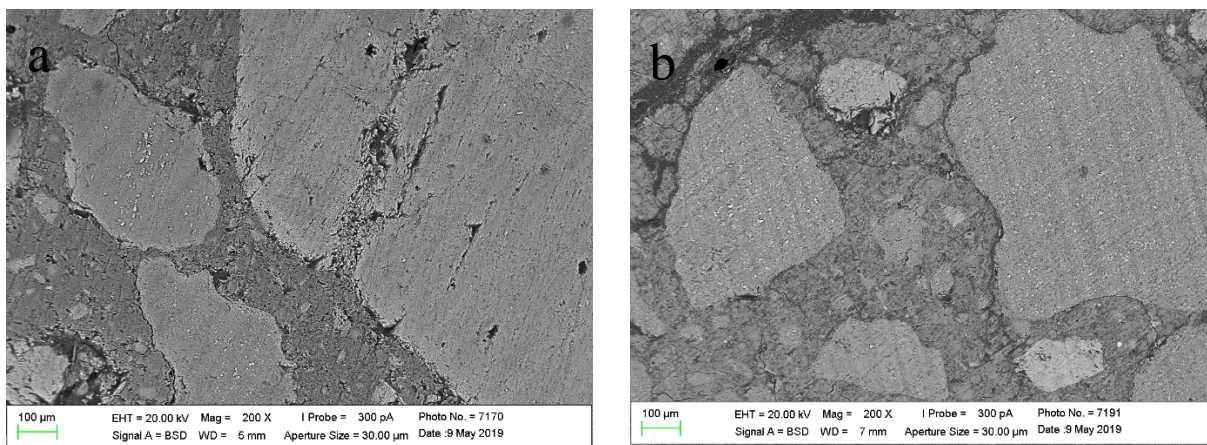




**Figura 28.** Amostra VI com presença de grandes poros (a) e (b).

Fonte: Autora, 2019.

Em relação aos concretos à base de MAA submetidos à cura em ambiente natural, apresentado na figura 29, não se observa o aumento de trincas e elementos porosos com o passar o tempo de exposição. Assim, pode-se verificar que o ambiente natural preservou as características da microestrutura do material. Tal averiguação também pode ser corroborada quando correlaciona-se os resultados dos ensaios de resistência mecânica desse grupo de amostras no qual pode-se perceber que a variação da resistência dos materiais decresceu de forma tímida com o passar do tempo (menos de 10%).

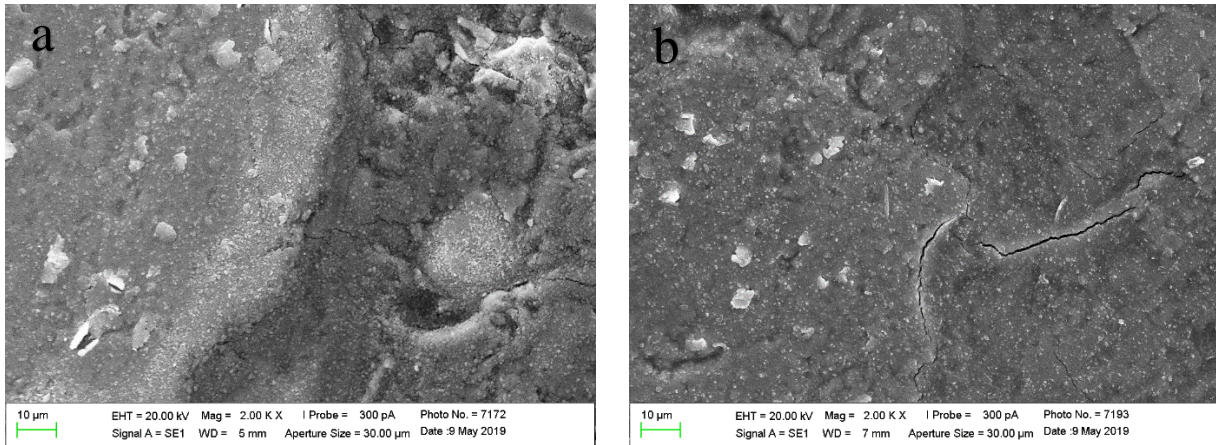


**Figura 29.** Amostra VIII (a) e IX (b) apresentam regularidade quanto ao aparecimento de poros e trincas.

Fonte: Autora, 2019.



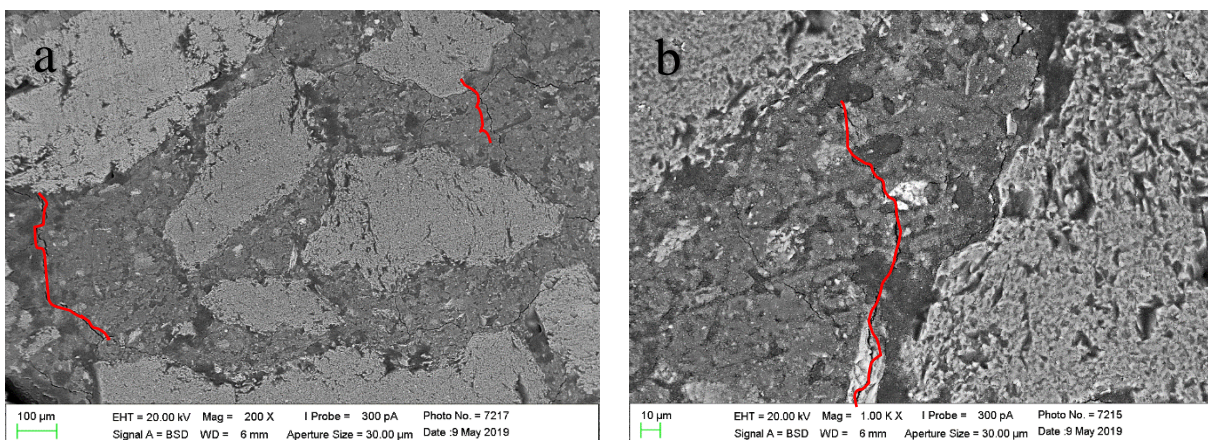
Assim, observando a figura 30, constata-se que apesar amostras de concreto à base de MAA possuírem fissuras na matriz, os agregados apresentaram boa aderência com a mesma, diferentemente do observado no concreto à base de cimento Portland.



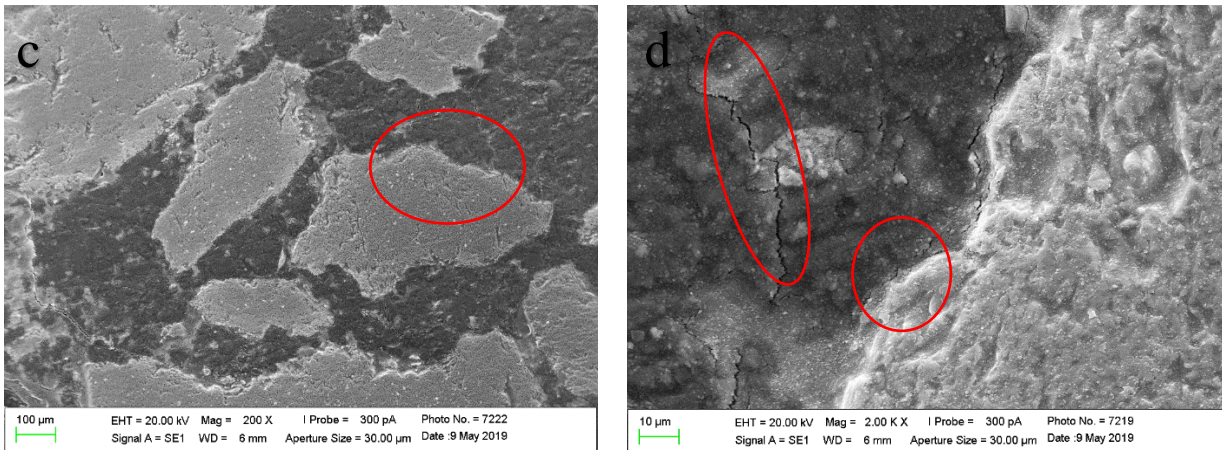
**Figura 30.** Amostra VIII (a) e IX (b) apresentam boa aderência entre matriz e agregado.

Fonte: Autora, 2019.

Para os concretos à base de MAA submetidos ao ambiente marinho, apresentados pela figura 31, verificou-se que as amostras desenvolveram uma maior quantidade de poros e microfissuras com o passar tempo. Tais eventos, podem justificar os resultados obtidos através dos ensaios de resistência mecânica apresentados anteriormente no qual observou-se uma diminuição da resistência desses concretos em função do tempo de exposição das amostras ao ambiente marinho.



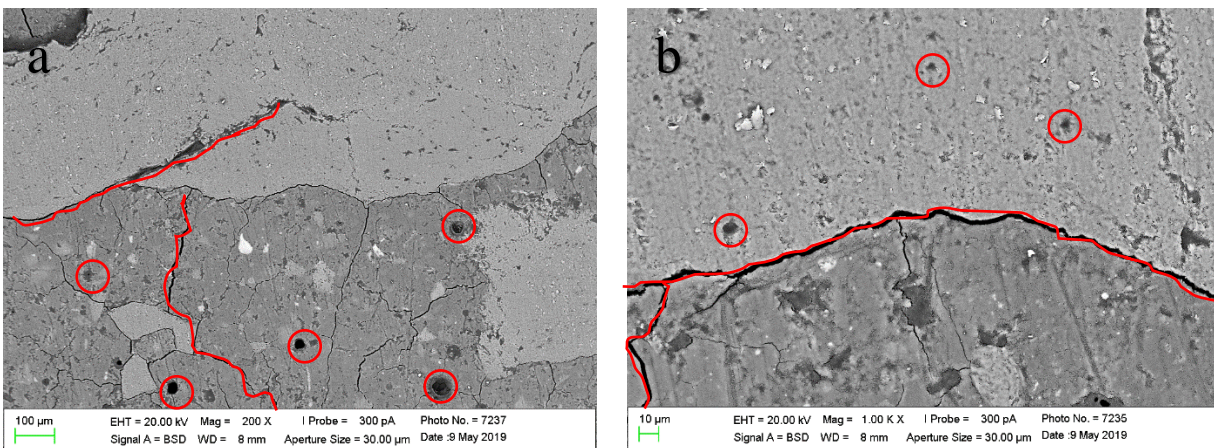


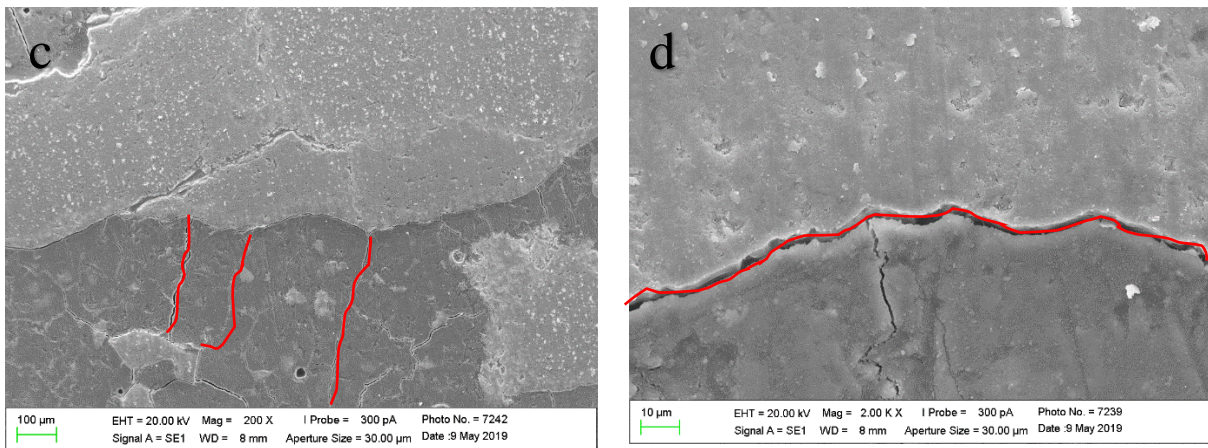


**Figura 31.** Amostra X (a, b, c, d) apresentando microfissuras.

Fonte: Autora, 2019.

De acordo com Aguilar, *et al.* (2011), a porosidade e a distribuição dos poros são fatores importantes na microestrutura do material, uma vez que determinam a permeabilidade do ligante e, conseqüentemente, a extensão de penetração dos agentes agressivos. A figura 32 evidenciam os poros e as microfissuras aparentes na amostra.

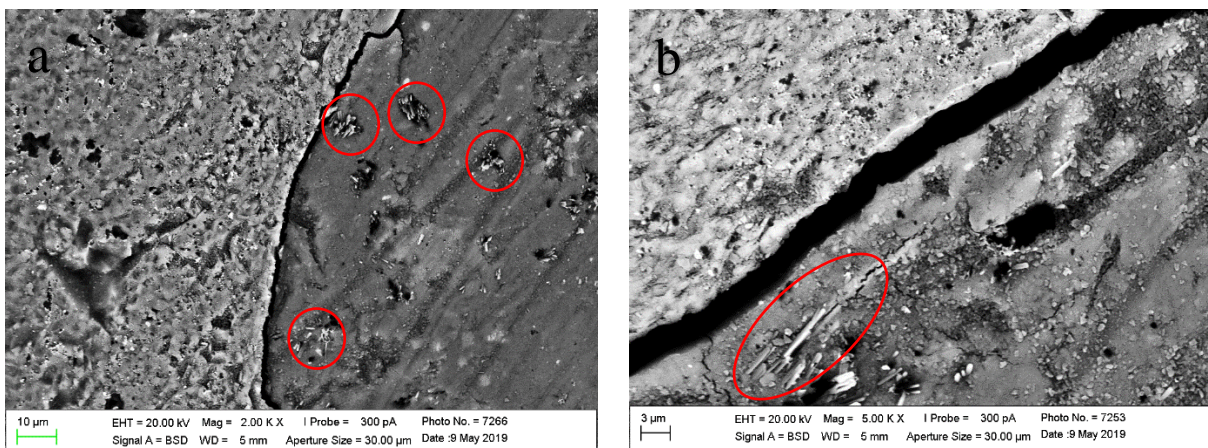




**Figura 32.** Amostra XI (a, b, c, d) apresentando aumento na quantidade e no tamanho dos poros e das microfissuras.

Fonte: Autora, 2019.

Na amostra XII, representada pela figura 33, já se identifica com clareza a presença de grãos de carbonato no formato de ‘agulhas’, o que não é tão perceptível nas amostras de idade anterior, apresentadas na figura 32 (amostras X e XI).



**Figura 33.** Amostra XII (a, b, c, d) apresentando aumento na quantidade e no tamanho dos poros e das microfissuras.

Fonte: Autora, 2019.

Contudo, apesar da presença de fissuras, poros e carbonatos, o concreto à base de MAA ainda apresentou melhores resultados quando comparado ao concreto à base de cimento Portland, tanto quando submetido à condições naturais quanto submetido ao ambiente marinho.

#### 4.6. Impactos ambientais e demanda energética

Analisando os dados gerados pelo *software* Simapro® 8.4.0.0 para o concreto tradicional (tabela 14), pode-se observar que 94,89% da emissão de CO<sub>2</sub> - eq refere-se à presença do cimento Portland em sua composição, sendo menos de 6% do restante das emissões de CO<sub>2</sub> eq dividida entre os agregados (graúdo e miúdo), a água e o plastificante.

**Tabela 16.** Emissões de CO<sub>2</sub> eq do concreto CP.

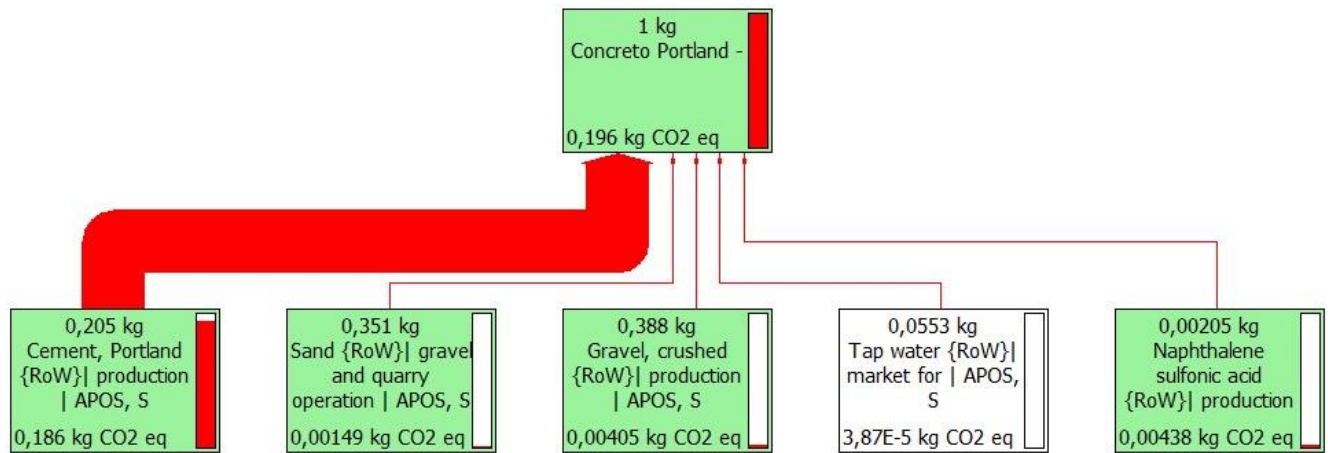
<b>Concreto CP (1kg)</b>	
<b>Insumos</b>	<b>Emissões de kg CO<sub>2</sub> – eq</b>
Cimento Portland	0,186
Plastificante	0,00438
Água	3,87 x 10 <sup>-5</sup>
Agregado Miúdo	0,00149
Agregado Graúdo	0,00406

Fonte: Autora, 2019.

Segundo Borges *et al.* (2014), essa elevada contribuição está relacionada ao processo de clínquerização do cimento e toda sua demanda térmica.

A figura 34 demonstra através da espessura de suas setas a relação e a proporção da emissão de CO<sub>2</sub> -eq com cada insumo avaliado, atestando assim, a forte emissão do cimento Portland em detrimento dos demais materiais.





**Figura 34.** Fluxograma gerado pelo Simapro® 8.4.0.0 para o concreto Portland.

Fonte: Adaptado de Simapro® 8.4.0.0, 2019.

Desta forma, observando os dados gerados pelo software Simapro® 8.4.0.0 para o concreto à base de MAA pode-se perceber que existe uma semelhança entre o comportamento dos dois concretos estudados, no qual as maiores emissões de CO<sub>2</sub> -eq acontecem no material ligante, ficando os agregados e a água com um percentual de emissão pouco relevante. A tabela 17 apresenta os resultados da emissão de CO<sub>2</sub> eq para o concreto MAA.

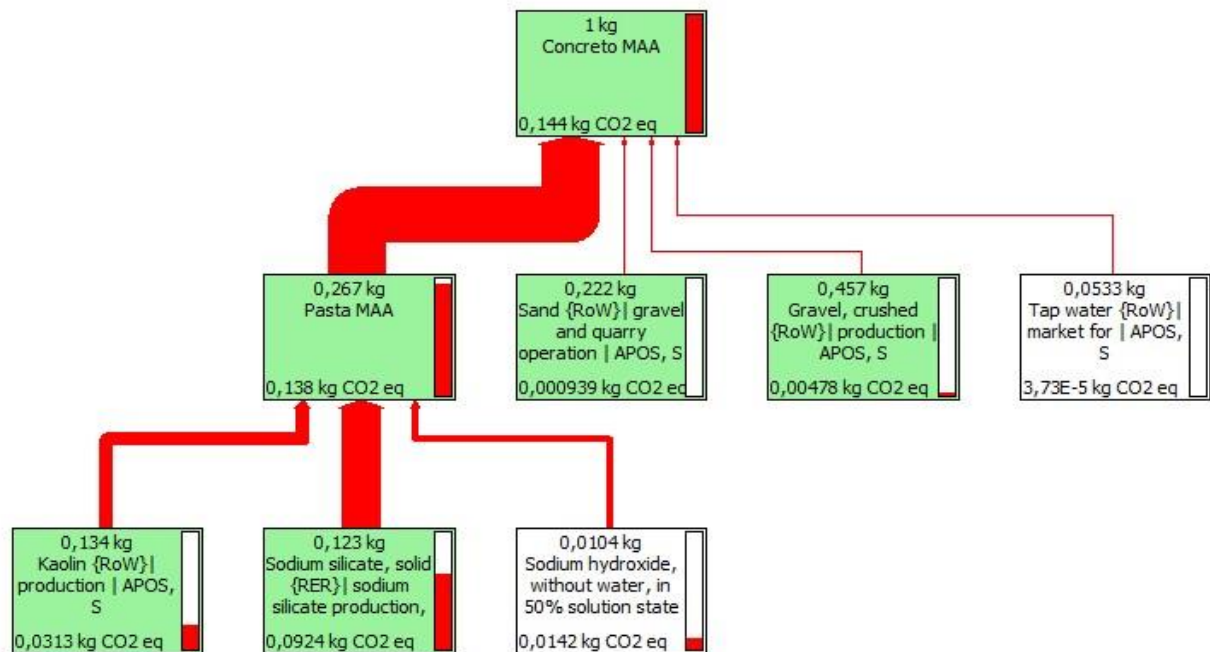
**Tabela 17.** Emissões de CO<sub>2</sub> eq do concreto MAA.

Concreto MAA (1kg)	
Insumos	Emissões de kg CO <sub>2</sub> – eq
Metacaulim	0,0313
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	0,123
NaOH	0,0104
Água	3,73 x 10 <sup>-5</sup>
Agregado Miúdo	0,000939
Agregado Graúdo	0,00478

Fonte: Autora, 2019

No caso do concreto MAA, 95,83% das emissões de CO<sub>2</sub> -eq referem-se aos precursores componentes da pasta geopolimérica, Sendo esse percentual subdividido entre o Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (66,25%), a metacaulinita (22,68%) e o NaOH (10,28%).

De acordo com Fawer, Concannon e Rieber (1999), a maior contribuição na emissão de CO<sub>2</sub>-eq está relacionado com a obtenção da solução alcalina, em especial a demanda energética das etapas de fusão e dissolução do Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, conforme o fluxograma apresentado na figura 35.



**Figura 35.** Fluxograma gerado pelo Simapro® para o concreto MAA.

Fonte: Autora, 2019

Contudo, realizando um comparativo entre os dois concretos em questão (tradicional e à base de MAA) pode-se aferir que a emissão de CO<sub>2</sub> – eq do concreto à base de MAA é 36,11% inferior à emissão de CO<sub>2</sub> – eq do concreto tradicional. A tabela 18 realiza o comparativo relacionado à emissão de CO<sub>2</sub> eq de ambos os concretos comparados.

**Tabela 18.** Comparativo de emissão de CO<sub>2</sub> eq entre os concretos estudados.

Massa (kg)	Concreto	Emissão de kg CO <sub>2</sub> -eq
1	CP	0,196
1	MAA	0,144

Fonte: Autora, 2019

Com base na literatura anteriormente citada (BORGES *et al.*, 2014), empreendeu-se a tabela 19, onde pode ser observada a demanda energética para a produção de cada constituinte dos concretos estudados. Desta forma, percebe-se que a demanda energética do concreto à base de MAA é significativamente inferior à demanda energética do concreto tradicional.

**Tabela 19.** Demanda energética dos constituintes dos concretos estudados.

<b>Concreto CP</b>		<b>Concreto MAA</b>	
<b>Material</b>	<b>Demanda Energética</b> (KJ/kg de cimento)	<b>Material</b>	<b>Demanda Energética</b> (KJ/kg de ligante)
<b>Cimento CP</b>	266,9	<b>Cimento MAA</b>	20,55
<b>Agregado Graúdo</b>	141,9	<b>Agregado Graúdo</b>	141,9
<b>Agregado Miúdo</b>	156,8	<b>Agregado Miúdo</b>	68,9
<b>Plastificante</b>	64		
<b>Total</b>	629,6		231,35

Fonte: Autora, 2019.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSÃO

Após o empreendimento das análises propostas pelo presente estudo, podemos atestar a superioridade do material alcalinamente ativado frente ao cimento Portland no tocante à resistência à compressão simples onde a resistência do MAA foi superior em ambas as curas realizadas chegando o MAA a ser 39,42% mais resistente do que o concreto à base de cimento Portland quando submetido ao ambiente marinho.

No que concerne à análise microestrutural, percebe-se uma melhor preservação das características microestruturais do material alcalinamente ativado quando submetido ao ambiente marinho. Através da microscopia eletrônica de varredura, observou-se uma menor quantidade de trincas e poros quando comparado ao concreto à base de cimento Portland. Mesmo com a presença da carbonatação no material alcalinamente ativado, este ainda mostrou-se mais preservado, corroborando os resultados aferidos no ensaio de resistência à compressão simples.

Durante a análise de DRX, foram identificadas as fases comumente encontradas em ambos os materiais como também foi atestada uma intercorrência com o resultado do concreto à base de material alcalinamente ativado submetido à ambiente marinho com idade de 28 dias. Acredita-se que durante o processo de análise, a amostra tenha sofrido uma hidratação, acarretando assim no surgimento de fases não comumente encontradas nesse tipo de material, abrindo questionamentos para investigações futuras.

Nas análises referentes à espectroscopia com transformada de Fourier (FTIR) e a termogravimetria (TG), observa-se a estabilidade microestrutural de ambos os concretos nas duas condições apresentadas.

Por fim, com relação aos impactos ambientais e à demanda energética, novamente atesta-se a superioridade do concreto à base material alcalinamente ativado frente ao concreto à base de cimento Portland. A emissão de CO<sub>2</sub> eq do concreto à base de MAA é 36,11% inferior enquanto a demanda energética é quase três vezes menor quando comparado ao concreto à base de CP.

Desta forma, reafirma-se o caráter sustentável do material alcalinamente ativado, tornando-o assim uma boa alternativa de ligante para a construção civil.

## CAPÍTULO VI

### REFERÊNCIAS

AGUILAR, M. T. P.; GUMIERI, A.G.; VASSALO, E. A. S.; Caracterização Microestrutural do Geopolímero Obtido de Metacaulim Rico em Ferro. In: 21° CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 21, 2014, Cuiabá. **Anais[...]** Cuiabá, MT, 2014. p. 598-605.

AGUILAR, F.G.; GARCIA, L.F.R.; ROSSETTO, H.L.; PARDINI, L.C.; PANZERI, SOUZA F.C.P.; Radiopacity evaluation of calcium aluminate cement containing different radiopacifying agents. **Journal of Endodontics**. 2011; 37(1):67-71.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 150**: Standard Specification for Portland Cement. Disponível em: <<https://www.astm.org/Standards/C150.htm>>. Acesso em: 25 jan. 2018.

ANTUNES, R. A.; NONES, J.; KUHNEN N. C.; RIELLA H. G. Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas por ativação alcalina. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 20, 2014, Florianópolis. **Anais[...]** Florianópolis, 2014. p. 1 -7.

ARAÚJO, J. C. de, ASSIS, J. T. de, MONINE, V. I., BERTOLINO, L. C. Caracterização da Microestrutura de Caulinitas pela Difração de Raios-X. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.11, n.3, p. 361-371, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CICLO DE VIDA (ABCV). Disponível em:<<http://abcvbrasil.org.br>>. Acesso em: 15 fev. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia Básico de Utilização do cimento Portland**. São Paulo, 2002. Disponível em: <[http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2016/05/BT106\\_2003.pdf](http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2016/05/BT106_2003.pdf)>. Acesso em: 25 jan. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. São Paulo, SP. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT). **Norma NBR ISO 14044**: Gestão ambiental – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, RJ. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, p. 5. 2001.

BAKHAREV, T. Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. **Cement and concrete research**, v. 35, n. 6, p. 1224-1232, 2005.

BARBOSA, A. F.; MOARES, R. M.; EMERENCIANO, S. V.; PIMENTA, H. C.; GOUVINHAS, R., P. Conceitos e aplicações de Análise do Ciclo Vida (ACV) no Brasil. **Revista Gerenciais**. São Paulo, v.7, n.1, p. 39-44, 2008. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=331227111005>>. Acesso em: 24 jan. 2018.

BARRETO, I. M. C. B. do N. **Gestão de resíduos na construção civil**. SENAI/SE; SENAI/DN; COMPETIR; SEBRAE/SE; SINDUSCON/SE, 28p. il. Sergipe, 2005.

BATTAGIN, A. F. **Uma breve história do cimento**. ABCP. 2014. Disponível em: <<http://cimento.org/historia-do-cimento>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

BENVEGNÚ, A. V.; SANTOS, F. F.; SILVA, F. C.; Emissão de CO<sub>2</sub> na construção civil. Salão internacional de ensino, pesquisa e extensão. **Resumos [...]**, v. 5, n. 1, 2013.

BESSLER, K. E., RODRIGUES, L. C. Os polimorfos de carbonato de cálcio - uma síntese fácil de aragonita. **Química Nova**, v. 31, n. 1, p. 178-180, 2008.

BISWAS, W. K.; PRADIP, N.; SARKER, P. K.; Effect of fly ash on the service life, carbon footprint and embodied energy of high strength concrete in the marine environment. **Energy and Buildings**, Austrália, v. 158, p. 1694-1702, 2017.

BORGES, P. H. R.; LOURENÇO, T. M. F.; FOUREAUX, A. F. S.; PACHECO, L. S. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 153-168, 2014.

BRANDÃO, A. M. S.; **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado**. Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

BRITO, W. S. **Ativação alcalina para a produção de geopolímeros a partir de resíduo industrial**. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal do Pará. P. 37. Belém, 2018.

BRITO P. C.; LENCIONI, J. W.; LIMA, M. G.; MAZER W.; MORELLI, F.; Durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho – importância dos estudos envolvendo microclima. In: IV SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA, 9.2016 . Rio Grande do Sul. **Anais [...]**. 2016.

BUCHWALD, A; ZELLMANN, H.-D; KAPS, C.; Condensation of Aluminosilicate Gels: model system for geopolymer binders. **Journal of NonCrystalline Solids**, v. 357, n. 5, p. 1376-1382, 2011.

BURIGO, G. M.; **Estudo sobre o efeito da difusão de cloreto no concreto com alteração na relação água/cimento**. Monografia apresentada à Universidade do Sul de Santa Catarina. Palhoça, 2017.

CAMPOLINA, J. M.; MORIS, V. A. S.; SIGRIST, C. S. L.; Uma revisão de literatura sobre softwares utilizados em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. V. 19, n. 2, p. 735-750, mai-ago. 2015.

CAVALHEIRO, E. T. G.; DENARI, G. B. **Princípios e aplicações de análises térmicas**. Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos, 48p., 2012.

CHEHEBE, J. R. **Análise do Ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, CNI, 1997.

CURRAN, M. A. **Life Cycle Assessment: Principles and Practice**. EPA – Environmental Protection Agency: Cincinnati, EUA, 2006.

DAVIDOVITS J.; 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. In: Keynote Conference on Geopolymer Conference Melbourne, Australia, **Anais [...]**. 2002. Disponível em: <[https://www.geopolymer.org/fichiers\\_pdf/30YearsGEOP.pdf](https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/30YearsGEOP.pdf)>. Acesso em: 27 jan. 2018.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**. v.37, p.1633–1656, 1991.

DEDAVID, A. B.; GOMES, I. C.; MACHADO, G.. **Microscopia Eletrônica de Varredura, aplicações e preparações de amostras. Materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Pg. 10; Editora: Edipucrs, Porto Alegre, 2007.

DEMANBORO, A. C.; FERRÃO, A. M. A.; MARIOTONI, C. A.; Desafios da construção sustentável sob o enfoque do estoque de recursos naturais. In: I Conferência Latino-americana de construção sustentável x encontro nacional de tecnologia do ambiente construído 18-21 julho, São Paulo, **Anais [...]**. 2004.

DUXSON, P.; PROVIS, J.L.; LUKEY, G.C.; DEVENTER, J.S.J. The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’. **Elsevier - Cement and Concrete Research**, nº 37 pp.1590 –1597, 2007.

ESCOLA POLITÉCNICA (USP). **Cimento – Produção mundial pode dobrar sem aumentar CO<sub>2</sub>**. Disponível em: <<https://www.poli.usp.br/noticias/1527-cimento-producao-mundial-pode-dobrar-sem-aumentar-co2>>. Acesso em 12 mar. 2019.

FAWER, M.; CONCANNON, M.; RIEBER, W.; Life Cycle Inventories for the Production of Sodium Silicates, **Int. J. LCA**, n 4, p. 207-212. 1999.

FERNÁNDEZ-JIMENEZ, A.; PALOMO, A. Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator. **Cement and Concrete Research**, 35, 1984-1992. 2005.

FIGUEIREDO, C. F. **Aplicação da avaliação do ciclo de vida como critério de seleção para materiais utilizados em construções sustentáveis.** Tese de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 118p., 2017.

FREITAS JUNIOR, J. DE; ARTIGAS, L.; BATTAGIN, I.; PANOSSIAN, Z.; HELENE, P. R. L.; BATTAGIN, A. F.; BEVILAQUA, A.; JACINTHO, H. Ambientes Agressivos. **Revista Techné**, São Paulo, v. 21, n. 196, p. 36-41. 2013.

GIANNOPOULOU, I.; PANIAS, D. Fire resistant geopolymers synthesized from industrial wastes. **World Journal of Engineering**, v. 5, n. 3, p. 130-131, 2008.

GOMES, K. C.; TORRES, S. M.; BARROS, S. DE; BARBOSA, N. P. Activation Alkaline Waste Kaolin for Fabrication of Building Blocks. In: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications, 2012. p. 622-627. 2012.

GOMES, K. C.; TORRES, S. M.; DA SILVA, Z. E.; PERAZZO BARBOSA, N.; LIMA FILHO, M. R. F. Alkaline Activation of Aluminum and Iron Rich Precursors. **Key Engineering Materials**, v. 600, p. 329-337, mar. 2014.

HELENE, P. **A Nova ABNT NBR 6118 e a Vida Útil das Estruturas de Concreto.**In.: SEMINÁRIO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, NOVOS MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES, LEME, UFRGS, v. 1. p. 1-30, 2004.

IBTC Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. Histórico da ACV. 2015. Disponível em: <<http://acv.ibict.br/acv/historico-da-acv/>>. Acesso em: 22 abr. 2019.

*Intergovernmental panel on climate change (IPCC). Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol.* 2013. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/>>. Acesso em: 22 mai. 2019.

ISO 14040: Environmental management - **Life cycle assessment - Principles and framework.** **International Organization for Standardization (ISO)**, Genebra, 2006a.

ISO 14044: Environmental management - **Life cycle assessment - Requirements and guidelines.** **International Organization for Standardization (ISO)**, Genebra, 2006b.

KOMNITSAS, K. A. Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities. **Procedia Engineering**, v. 21, p. 1023-1032, 2011.

KONG, D. L.Y; SANJAYAN, J. G. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. **Cement and concrete research**, v. 40, n. 2, p. 334-339, 2010.

KOPSCH, W. **Durabilidade de estruturas de concreto armado em ambiente marinho: estudo de caso.** Tese de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 175p., 2001.



LIMA, G. T. **Efeito da carbonatação na microestrutura e nas propriedades mecânicas de material alcalinamente ativado à base de metacaulinita.** Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2019.

NETTO, R. M. **Materiais Pozolânicos.** Monografia (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 148p., 2006.

OLIVEIRA, I. L.; ROSSIGNOLO, J. A. **Efeito do metacaulim nas propriedades do concreto leve estrutural.** Maringá, v. 29, n. 1, p. 55-60, 2007.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. Alkali-Activated Fly Ashes: a cement for the future. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n.8, p. 1323-1329, 1999.

PALOMO, A.; JIMENEZ, F.A.; CRIADO M. **‘Geopolimeros’: una única base química y diferentes microestructuras.** Instituto de Ciências de la construcción Eduardo Torroja (CSIC), Espanha, N°. 275, p. 77-91, 2004.

PANZERA, T. H.; STRECKER, K.; MIRANDA, J. S.; PAIVA, F. C.; BORGES, P. H. R.. Compósito cimentício reforçado com fibras de carbono para recuperação de monumentos históricos. **Cerâmica**, São Paulo , v. 56, n. 340, p. 405-410, Dez. 2010.

PINTO, A. T. **Cimento Portland versus Ligantes Geopoliméricos - Considerações econômicas sobre as implicações do mercado de carbono no custo dos concretos.** Universidade de Trás-os-Montes e Alto, 2006. Disponível em: <<http://www.geopolymer.com.br>> Acesso em: 06 nov. 2017.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and related alkali-activated materials. **Annual Review of Materials Research**, v. 44, p. 299-327, 2014.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications. **Elsevier**. CRC Press ed. [s.l.] Woodhead Publishing Limited, 464p., 2009.

RIBEIRO, D.; CUNHA, M.; HELENE, P. Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise. **Elsevier**. Brasil, 2015.

SILVA, K. C. G.. **Potencial de Ativação Alcalina de Materiais Residuais Aluminosilicosos no Desenvolvimento de Matrizes Cimentícias.** Tese de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2008.

SIMAPRO – **Life cycle assessment software.** Disponível em: <<https://network.simapro.com/pre>>. Acesso em 30 jan. 2018.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório anual 2017.** 2018. Disponível em: < <http://snic.org.br/numeros-industria.php> > acesso em: 19 jan. 2018.

SIQUEIRA, E. **Companhia Brasileira de Cimento Portland Perus: contribuição para uma história da indústria pioneira do ramo no Brasil (1926-1987)**. 2001. 230 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Letras, 2001. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/93459>>. Acesso em: 25 jan. 2018.

TREZZA, M. A.; Hydration study of ordinary portland cement in the presence of zinc ions. **Mat. Res.**, São Carlos , v. 10, n. 4, p. 331-334, Dez. 2007 .

VIEIRA, J. J. **Avaliação do desempenho de materiais alcalinamente ativados frente à reação álcali-agregado**. Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação – PIBITI, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

VOTORANTIM CIMENTOS. **A história do cimento**. 2017. Disponível em: <[http://www.ecivilnet.com/artigos/historia\\_do\\_cimento.htm](http://www.ecivilnet.com/artigos/historia_do_cimento.htm) >. Acesso em: 19 jan. 2018.