



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, TERMOMEcÂNICO
E MICROESTRUTURAL DE ESTRUTURAS DE CONCRETOS SUSTENTÁVEIS
SUBMETIDAS A AMBIENTE MARINHO**

JOÃO PESSOA – PB

2019

MELINA CAVALCANTI DE MELO BICHINHO

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL, ENERGÉTICO, TERMOMECÂNICO
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.^a Dr.^a Kelly Cristiane Gomes

JOÃO PESSOA – PB

2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

B576a Bichinho, Melina Cavalcanti de Melo.

Avaliação do desempenho ambiental, energético, termomecânico e microestrutural de estruturas de concreto sustentáveis submetidas a ambiente marinho / Melina Cavalcanti de Melo Bichinho. - João Pessoa, 2019.

79 f. : il.

Orientação: Kelly Cristiane Gomes Gomes.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Material alcalinamente ativado. 2. Concreto. 3. Ambiente Marinho. 4. Desempenho ambiental. 5. Análise Microestrutural. I. Gomes, Kelly Cristiane Gomes. II. Título.

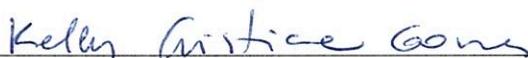
UFPB/BC

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.

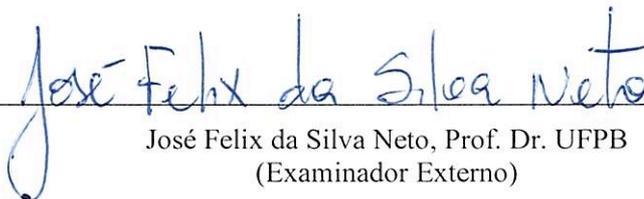
APROVADA em 28 de agosto de 2019.



Kelly Cristiane Gomes, Prof^a. Dr^a. UFPB
(Orientador)



Monica Carvalho, Prof^a. 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^a 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 Monica 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, calmaria 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, em especial a submetidas a ambiente marinho. Contudo, há algum tempo, seu processo produtivo vem sendo questionado pelos pesquisadores devido aos significativos impactos ambientais ocasionados pela alta liberação de CO₂ 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 compará-las ao concreto à base de cimento Portland, bem como comparar suas propriedades termomecânicas e correlaciona-la as 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 (7, 28 e 56 dias). As propriedades e microestruturas dos espécimes foram acessadas via Resistência à Compressão Simples, análises de Difração de Raios-X (DRX), Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Termogravimetria (TG) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Para avaliação do impacto ambiental foi utilizado o software Simapro para realização dos cálculos de emissão de CO₂-eq. Após a efetivação das análises observou-se a eficiência do concreto à base de material alcalinamente ativado no tocante à resistência mecânica (até 39% maior) e estabilidade térmica em temperaturas elevadas (1000°C), além de menor emissão de CO₂-eq na atmosfera (36% menor) e demanda energética (63% menor) 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, especially those subjected to the marine environment. 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 CO₂ 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 thermomechanical properties and correlate it with 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 (7, 28 and 56 days). The properties and microstructures of the specimens were accessed via Simple Compression Strength, X-Ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Thermogravimetry (TG) and Scanning Electron Microscopy (SEM) analyzes. For environmental impact assessment, the Simapro Software was used to perform CO₂-eq emission calculations. After the analysis, was observed the efficiency of the alkaline-activated concrete on the mechanical strength (up to 50% higher) and thermal stability at elevated temperatures (1000°C), as well as lower CO₂-eq emission in the atmosphere (36% lower) and energy demand (63% lower) 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

Figura 1. Fluxograma das fases da ACV.....	28
Figura 2. Fluxograma planejamento experimental.....	30
Figura 3. Fluxograma ACV.....	31
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).....	35
Figura 5. Tratamento e separação dos agregados (a); pesagem e preparação dos agregados após secagem em estufa (b).	36
Figura 6. Preparação dos moldes untados com óleo mineral (a); mistura dos agregados secos e do cimento na betoneira (b).	40
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).....	41
Figura 8. Moldagem dos corpos de prova à base de cimento portland (a) Moldagem dos corpos de prova à base de MAA (b).	42
Figura 9. Corpos de prova de concreto à base de cimento portland (a); Corpos de prova à base de MAA (b).	42
Figura 10. Corpos de prova rompidos (a); Amostras fragmentadas manualmente (b); Parte das amostras já maceradas após a moagem no moinho de bolas (c).	44
Figura 11. Peneiras utilizadas na preparação das amostras (a); Eppendorfs finalizados (b).....	45
Figura 12. Embutimento das amostras em resina rígida fluida (a); Corte das amostras já embutidas no Cutoff embebido em óleo mineral (b).	45
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).....	46
Figura 14. Ensaio de resistência mecânica MAA (a); Ensaio de resistência mecânica CP (b). ...	50
Figura 15. Gráfico de resistência mecânica do concreto à base de CP.	52
Figura 16. Gráfico de resistência mecânica do concreto à base de MAA.	53
Figura 17. Difratoograma adaptado do concreto CP submetidos ao ambiente natural e marinho nas idades 7, 28 e 56 dias.....	54

Figura 18. Difratoograma adaptado do concreto MAA submetidos ao ambiente natural e marinho nas idades 7, 28 e 56 dias.	56
Figura 19. Análise FTIR para concreto à base de CP Tradicional.	57
Figura 20. Análise FTIR para concreto à base de MAA.	58
Figura 21. Análise térmica do concreto CP em cura ambiente, com idade de 56 dias.....	59
Figura 22. Análise térmica do concreto MAA submetido ao ambiente marinho com idade de 7 dias.....	60
Figura 23. Amostra I com evidência de poros e microporos (a); Fissuras na interface (b); baixo adensamento entre matriz e agregado (c) e (d).....	61
Figura 24. Amostra II com evidência de poros e microporos mais profundos (a); Fissuras na interface (b); baixo adensamento entre matriz e agregado (c) e (d).	62
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)..	63
Figura 26. Amostra IV apresenta boa coesão entre matriz e agregados (a); Presença de carbonatos dentro da matriz (b).	64
Figura 27. Amostra V com presença de estruturas carbonáticas semelhantes às lamelas /escamas (a) e (b).	64
Figura 28. Amostra VI com presença de grandes poros (a) e (b).....	64
Figura 29. Amostra VIII (a) e IX (b) apresentam regularidade quanto ao aparecimento de poros e trincas.....	65
Figura 30. Amostra VIII (a) e IX (b) apresentam boa aderência entre matriz e agregado.	65
Figura 31. Amostra X (a, b, c, d) apresentando microfissuras.	66
Figura 32. Amostra XI (a, b, c, d) apresentando aumento na quantidade e no tamanho dos poros e das microfissuras.	67
Figura 33. Amostra XII (a, b, c, d) apresentando aumento na quantidade e no tamanho dos poros e das microfissuras.....	67
Figura 34. Fluxograma gerado pelo Simapro® 8.4.0.0 para o concreto Portland.....	69
Figura 35. Fluxograma gerado pelo Simapro® para o concreto MAA.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classe de Agressividade Ambiental.	25
Tabela 2. Demanda energética dos materiais.	32
Tabela 3. Composição dos cimentos Portland comuns e compostos.....	33
Tabela 4. Requisitos para concretos expostos a soluções contendo sulfatos.....	37
Tabela 5. Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.	38
Tabela 6. Determinação da composição granulométrica.	38
Tabela 7. Traço determinado para o concreto tradicional.	39
Tabela 8. Traço determinado para o concreto MAA.	39
Tabela 9. Quantitativo para moldagem da pasta MAA.	39
Tabela 10. Classificação das amostras de concreto.	43
Tabela 11. Composição dos materiais.	49
Tabela 12. Planejamento experimental para os ensaios de resistência à compressão simples.	51
Tabela 13. Resultado numérico dos ensaios de rompimento dos corpos de prova.....	51
Tabela 14. Resultado em diferença de percentual dos concretos analisados.....	53
Tabela 15. Legenda das fases presentes no difratograma e suas respectivas cartas.	55
Tabela 16. Legenda das fases presentes no difratograma e suas respectivas cartas.	56
Tabela 17. Emissões de CO ₂ eq do concreto CP.....	68
Tabela 18. Emissões de CO ₂ eq do concreto MAA.	69
Tabela 19. Comparativo de emissão de CO ₂ eq entre os concretos estudados.	70
Tabela 20. Demanda energética dos constituintes dos concretos estudados.	71

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
CP	Cimento Portland
DRX	Difração de Raios-X
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
GANA	Grupo de Apoio à Normalização Ambiental
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em ciência e tecnologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
LABEME	Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas
LABFILM	Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos
MAA	Material Alcalinamente Ativado
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
TG	Termogravimetria
TECNOM	Laboratório de Tecnologia de Novos Materiais

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	13
1. APRESENTAÇÃO	13
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
CAPÍTULO II	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
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 dos Materiais Alcalinamente Ativados	23
2.3.5. Aplicações.....	24
2.4. O ambiente marinho	264
2.5. Avaliação do ciclo de vida.....	246
CAPÍTULO III	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1. Introdução.....	29
3.2. Materiais	322

3.2.1.	Cimento Portland CP II – Z 32	322
3.2.2.	Metacaulim	34
3.2.3.	Soluções ativadoras	34
3.2.4.	Agregados.....	35
3.2.5.	Aditivos.....	36
3.3.	Métodos	37
3.3.1.	Definição dos traços	37
3.3.2.	Moldagem dos corpos de prova.....	400
3.3.3.	Preparação das amostras para análise microestrutural	433
3.3.4.	Técnicas de Caracterização	466
3.3.5.	Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).....	488
CAPÍTULO IV		500
4.	RESULTADOS	500
4.1.	Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS).....	500
4.2.	Difração de Raios X (DRX)	544
4.3.	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....	577
4.4.	Análise termogravimétrica (TG).....	59
4.5.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	61
4.6.	Impactos Ambientais e Demanda Energética	68
CAPÍTULO V		72
5.	CONCLUSÃO.....	722
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		73
REFERÊNCIAS.....		734

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, em especial aqueles que visam serem aplicados em ambientes agressivos, tais como o ambiente marinho. Isto se deve, em especial, aos materiais que são adicionados a sua produção, visando resistências compatíveis a sua aplicação.

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 CO₂ de origem química, sendo somado a ela 0,39 tonelada de CO₂ 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 CO₂ (PINTO, 2006).

Tais dados são absolutamente alarmantes pois, a emissão de CO₂, 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 sustentáveis, relacionados ao seu processo produtivo, ou mesmo em termos de durabilidade, relacionados ao seu desempenho termomecânico (PINTO, 2006).

Entre as décadas de 1940 e 1950 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 SiO_2 e Al_2O_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 MAA 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 e energético de estruturas de concreto tradicionais, a base de Cimento Portland, e alternativas, a base de MAA, quando submetidas ao ambiente natural e ao ambiente marinho, bem como acessar suas propriedades termomecânicas 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 termomecânicas e microestruturais e compará-las aos concretos tradicionais.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar o efeito do tipo de ligante nas propriedades termomecânicas 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.
- Aplicar a metodologia da ACV para determinar o impacto ambiental em kg CO₂-eq para produção dos concretos à base de cimento Portland e de MAA, estabelecendo assim um comparativo entre os mesmos;
- Estimar a demanda energética para produção do concreto à base de cimento Portland e de MAA.

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 gases do efeito estufa (CO₂-eq).

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 abordados as características relacionadas às estruturas de concreto 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 o capítulo V que apontam para as conclusões do referido trabalho além das sugestões para trabalhos futuros e as 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 de 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 CO₂ na atmosfera.

A construção civil é responsável por aproximadamente 40% do consumo de energia elétrica e 40% de emissão de CO₂ 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 CO₂ (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 CO₂, 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 CO₂ 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 calcáreas 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 clínquerização, 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) Clínquerização – 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 foram desenvolvidos 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; PALOMO, 2005; KOMNITSAS, 2011; GOMES *et al.*, 2012; PROVIS e BERNAL, 2014).

O Material Alcalinamente Ativado (MAA) é um material desenvolvido com precursores ricos em SiO_2 e Al_2O_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 Al^{+3} em coordenação IV sendo compensada por íons tais como Na^+ , K^+ e 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 polissilatos formam anéis de polímeros entre Si_4^+ e 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 (Na_2SiO_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, vêm destacando o uso dos caulins calcinados, popularmente conhecidos como metacaulim (DUXSON *et al.*, 2007; GOMES *et al.*, 2012; 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

pozolânico 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°C).

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 CO₂ na atmosfera. As características físico-químicas garantem propriedades especiais, tais como rápido desenvolvimento de resistência mecânica e excelente durabilidade química. Os autores referenciados destacam 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 CO₂, 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 (LATELA *et al.*, 2006; GOMES *et al.*, 2007), isolantes térmicos, revestimentos balísticos e estruturas expostas à ambientes agressivos (DAVIDOVITS, 2002).

Destaca-se que algumas aplicações já foram patenteadas, a exemplo da utilização como revestimento de reforço da fibra em compósitos de concreto e aço (DAVIDOVITS, 1999), como superfícies contendo carbono (LAURENT e PAILLET, 1998), na construção de sensores piezoelétricos para temperaturas até 1360°C (VILJOEN, 2000), na construção de resistores e varistores (GREUTER e STRUMPLER, 1999), entre várias outras aplicações.

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 (PALOMO e GLASSER, 1992; PALOMO *et al.*, 1999; SILVA *et al.*, 2000; DAVIDOVITS, 2002; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ e PALOMO, 2003; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2005).

2.4. 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.

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

¹ 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.

² 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.

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

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.

2.5. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

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 (GANNA). 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 avaliação do ciclo de vida está estruturada sob a égide da NBR 14040 de 2014 subdividindo-se em dois volumes: a ISO14040 que aborda os princípios e a estrutura da ACV (ABNT, 2014a) e a ISO14044 que aponta os requisitos e diretrizes da ACV (ABNT, 2014b).

De acordo com a NBR 14040 (ABNT, 2014a) 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 (ABNT, 2014a). A figura 1 apresenta a estrutura da avaliação do ciclo de vida.

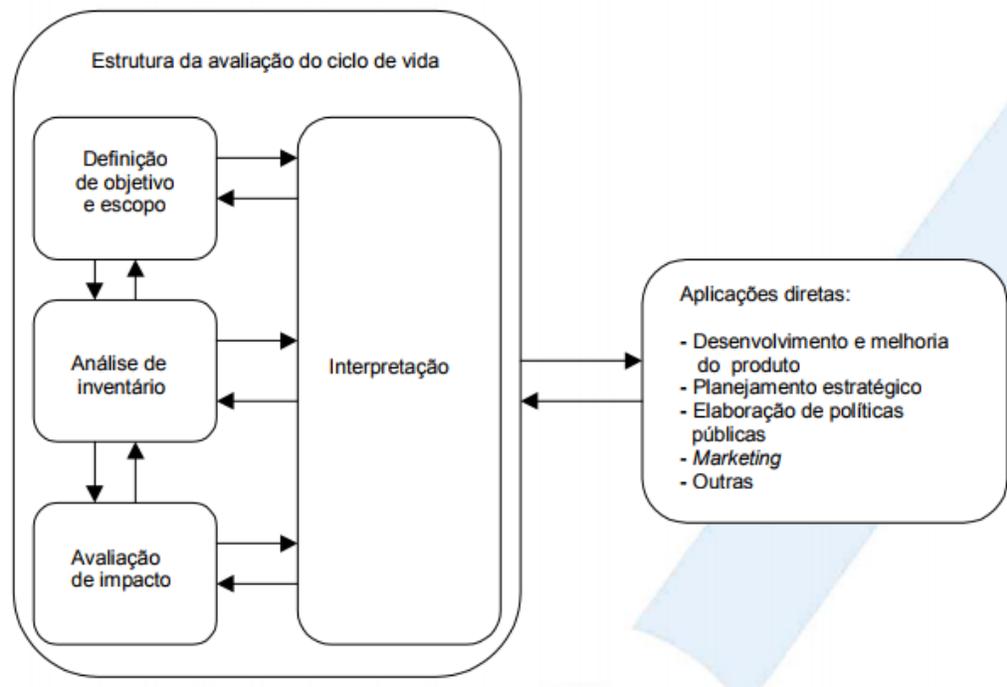


Figura 1. Fluxograma das fases da ACV.

Fonte: ABNT NBR ISO 14040, 2014a.

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).

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.

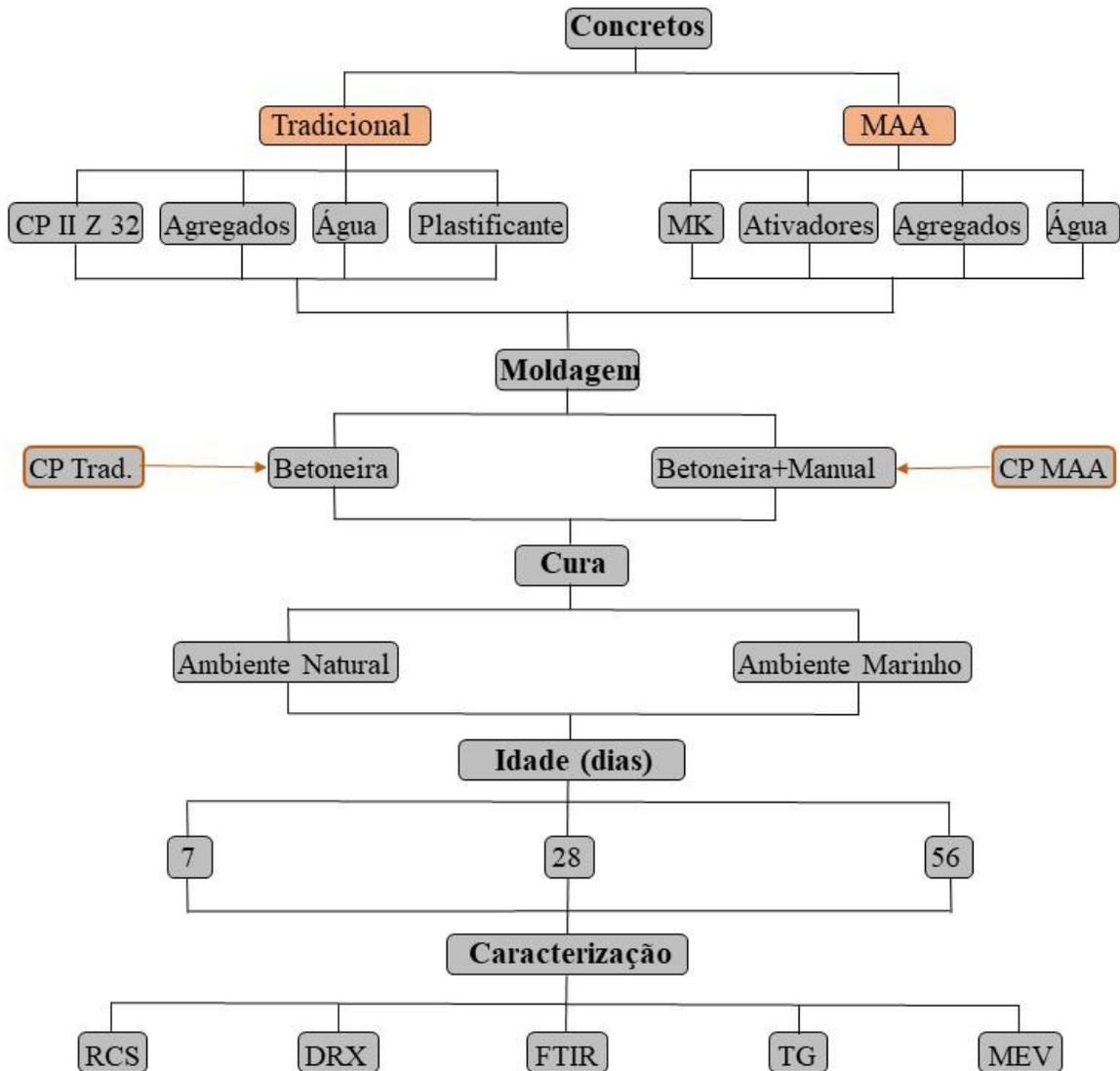


Figura 2. Fluxograma planejamento experimental.

Fonte: Autora, 2019.

Em paralelo ao planejamento experimental, para a realização da avaliação do ciclo de vida, o software Simapro® 9.0.0.35 foi alimentado com as informações oriundas da literatura e dos materiais utilizados na pesquisa com o intuito de estabelecer a emissão de CO₂ – eq para cada precursor e agregado dos concretos empregados no projeto, conforme apresentado na Fig. 03.

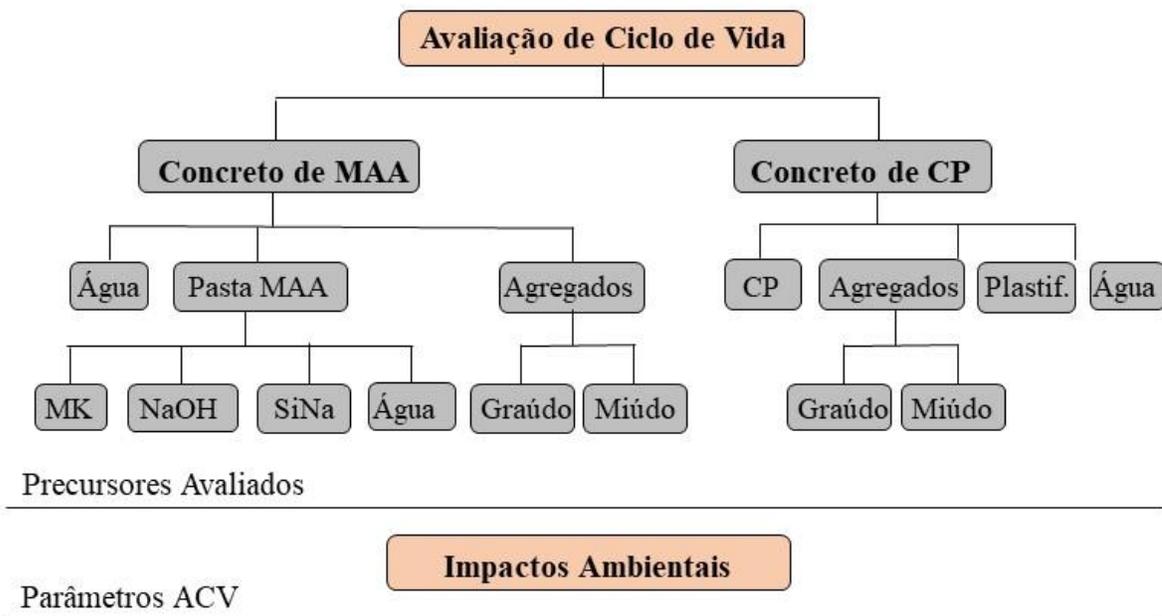


Figura 3. Fluxograma ACV.

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 CO₂-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.

CONSTITUINTES DO CONCRETO DE CP		
	Quantidade	Referência Bibliográfica
Produção do agregado (MJ/ton de agregado)		
Agregado	83,00	Hammond e Jones (2008)
Produção da escória (MJ/ton de escoria)		
Moagem da escória	210,30	
Produção do aditivo (MJ/ton de aditivo)		
Plastificante	6400,00	EFCA (EUROPEAN...,2015)
Produção do cimento Portland (MJ/ton de cimento)		
Britagem do Calcário	9,31	
Moagem da Argila	2,28	
Moagem do Cru	74,96	
Homogeneização	10,71	
Alimentação e exaustão do forno rotativo	39,51	
Acionamento do forno	6,70	Paula (2009)
Acionamento do soprador de ar primário	2,15	
Resfriador de clínquer	14,51	
Transporte de clínquer	5,63	
Moagem de clínquer	99,82	
Precipitador eletrostático	1,45	
CONSTITUINTES DO CONCRETO DE MAA		
	Quantidade	Referência Bibliográfica
Produção do agregado (MJ/ton de agregado)		
Agregado	83,00	Hammond e Jones (2008)
Produção do metacaulim (MJ/ton de metacaulim)		
Produção do Caulim	57,60	Pacheco (2012)
Produção do Na₂SiO₃ (MJ/ton de Na₂SiO₃)		
Energia de fusão do Na ₂ SiO ₃	4.183,00	Fawer, Concannon e Rieber (1999)
Energia de dissolução do Na ₂ SiO ₃	467,00	
Produção do NaOH (MJ/ton de NaOH)		
Energia eletrólise	10,80	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 Tab. 03.

Tabela 3. Composição dos cimentos Portland comuns e compostos.

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + Gesso	Escória de Alto Forno (Sigla E)	Material Pozolânico (sigla Z)	Material Carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100		-		NBR 5732
	CP I-S	99-95		1-5		
Composto	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_2 (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_2); 40,50% de óxido de alumínio (Al_2O_3); 2,8% de óxido de ferro (Fe_2O_3); 0,08% de óxido de sódio (Na_2O); 0,18% de óxido de potássio (K_2O).

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 (Na_2SiO_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 (Na_2O) e 32% de óxido de silício (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 pasta de MAA.



Figura 4. (a) Sacas de Metacaulim cedidos pela Metacaulim do Brasil e estocados no almoxarifado do LABEME; (b) Hidróxido de Sódio em pérolas, da empresa Química Moderna; (c) Silicato de sódio da empresa Diatom S/A.

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 9,5 mm a 19,0 mm) e a brita do tipo 2 (variando de 19,0 mm a 25 mm) nas devidas proporções estabelecidas através do traço. Foi realizado também o melhoramento do agregado miúdo através do peneiramento do mesmo na malha 6,35 mm (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. (a) Tratamento e separação dos agregados; (b) Pesagem e preparação dos agregados após secagem em estufa.

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, lançou-se 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 4, 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.

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO₄) presente no solo % em massa	Sulfato solúvel (SO₄) presente na água Ppm	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal*	Mínimo FCK (para concreto com agregado normal ou leve) MPa
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	--	--
Moderada**	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	25
Severa***	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,45	40

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

**Água do mar.

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

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

Fonte: Adaptado da ABNT NBR NM 53, 2003.

Tabela 6. Determinação da composição granulométrica.

Areia		Brita Maior		Brita Menor	
Peneira	Peso retido (g)	Peneira	Peso retido (g)	Peneira	Peso retido (g)
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	-
TOTAL	1.001,6g	TOTAL	1990,4g	TOTAL	1.158,5g

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 8 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.

Precursores	Quantidades
Metacaulim	0,500 kg
Hidróxido de Sódio (NaOH)	0,039 kg
Silicato de Sódio (Na ₂ SiO ₃)	0,460 kg

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

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

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. (a) Moldagem dos corpos de prova à base de cimento portland; (b) Moldagem dos corpos de prova à base de MAA.

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 CP e MAA moldados.



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

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 10 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					
Tipo de Concreto											
Ambiente Natural			Ambiente Marinho			Ambiente Natural			Ambiente Marinho		
Condição de Cura											
7° D	28° D	56°D	7° D	28° D	56°D	7° D	28° D	56°D	7° D	28° D	56°D
Idades de Rompimento											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Amostras											

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

Fonte: Autora, 2019.

Após a moagem das amostras no moinho de bolas, com o intuito de refinar ainda mais a qualidade do material, realizou-se o peneiramento manual na peneira de 270 *mesh*, sendo em seguida realizada sua separação em seus respectivos *ependorf*, conforme podem ser observados na Figura 11.



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

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 12). A realização do corte justifica-se para que a face do fragmento embutido fique devidamente exposta para a realização da análise.

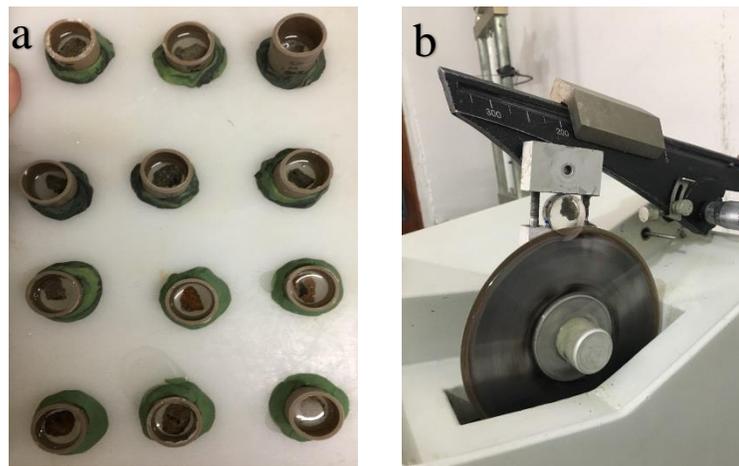


Figura 12. (a) Embutimento das amostras em resina rígida fluida; (b) Corte das amostras, já embutidas, no Cutoff embebido em óleo mineral.

Fonte: Autora, 2019.

Por conseguinte, as amostras passaram por um processo de lixamento, através das lixas d'água nº 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. (a) Amostras imersas em álcool isopropílico para o banho de ultrassom; (b) Máquina de polimento com pasta diamantada; (c) Processo de metalização das amostras.

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 difratometro modelo D2 Phaser – da Bruker) operando com radiação $K\alpha$ do Cu, 30 kV, 10 mA e com faixa de varredura 2θ entre 5° - 70° , 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 cm^{-1} ; Resolução: 4 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 realizada 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.

3.3.5. Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

Dentre os vários programas existentes no mercado, destaca-se o software holandês SimaPro® 9.0.0.35, escolhido e utilizado nesta pesquisa.

O SimaPro® 9.0.0.35 possui vários métodos de avaliação de impacto (CML 1992, Eco-indicator 99, EPS2000, entre outros) e banco de dados (BUWAL 250, EcoInvent, dentre outros) que podem ser editados e ampliados. 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.

Na tabela 11, observa-se a composição dos materiais utilizados para o empreendimento dos concretos à base de cimento Portland e MAA. Através dessas informações o software calcula a emissão de CO₂eq conforme apresentado no capítulo subsequente.

Tabela 11. Composição dos materiais.

Concreto Tradicional		Concreto MAA	
Material	Unidade (kg)	Material	Unidade (kg)
Cimento Portland	1	Metacaulinita	0,500
Plastificante	0,009	Silicato de Sódio	0,460
		Hidróxido de Sódio	0,039
Areia	1,710	Areia	0,830
Brita	1,890	Brita	1,710
Água	0,269	Água	0,199

Fonte: Autora, 2019.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Ensaios 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. (a) Ensaio de resistência mecânica MAA; (b) Ensaio de resistência mecânica CP.

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 12 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 12. Planejamento experimental para os ensaios de resistência à compressão simples.

TIPOS DE CONCRETO											
Concreto à base de CP II – Z 32 30						Concreto à base de MAA 30					
AMBIENTES PARA CURA											
Ambiente Natural			Ambiente Marinho			Ambiente Natural			Ambiente Marinho		
15			15			15			15		
IDADES DE ROMPIMENTO											
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 12, 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 13. 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
7	30,17	0,67	30,77	1,28	32,72	0,36	45,62	2,47
28	32,08	1,38	32,34	1,02	37,93	2,22	39,81	1,21
56	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.

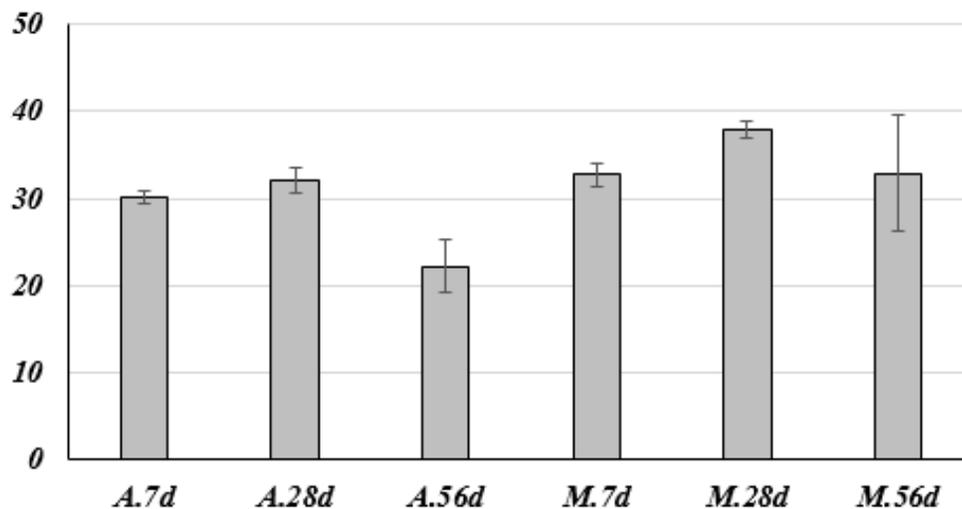


Figura 15. Gráfico de resistência mecânica do concreto à base de CP.

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.

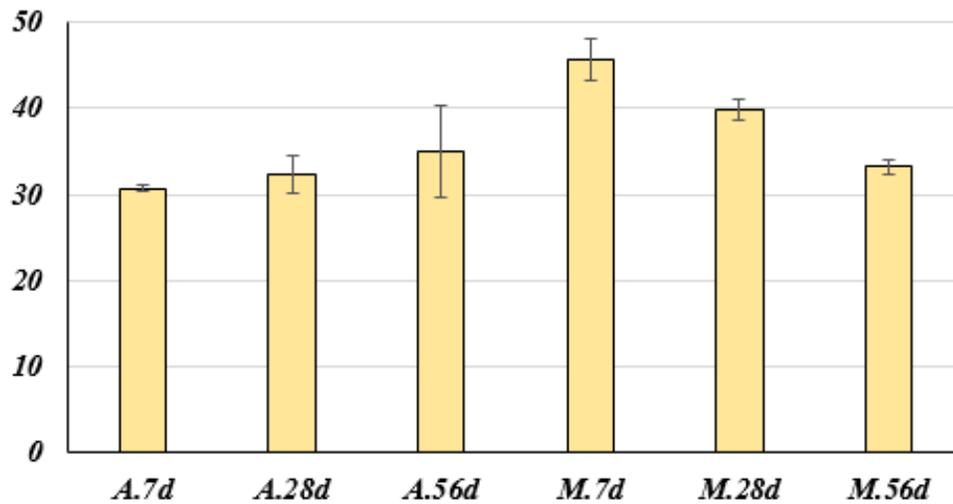


Figura 16. Gráfico de resistência mecânica do concreto à base de MAA.

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 14. 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.

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

Legenda	Mineral	Número da Carta
<i>M</i>	Muscovita	01-075-0948
<i>Q</i>	Quartzo	01-083-2466
<i>C</i>	Calcita	01-089-1304
<i>A</i>	Albita	00-010-0393
<i>L</i>	Portlandita	01-076-0570
<i>P</i>	Polihalita	00-021-0982
<i>Z</i>	Zeolita	00-021-0132
<i>B</i>	Biotita	01-076-0884
<i>H</i>	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 SiO_2); calcita (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 16 apresenta as legendas referentes às fases encontradas no difratograma e suas respectivas cartas.

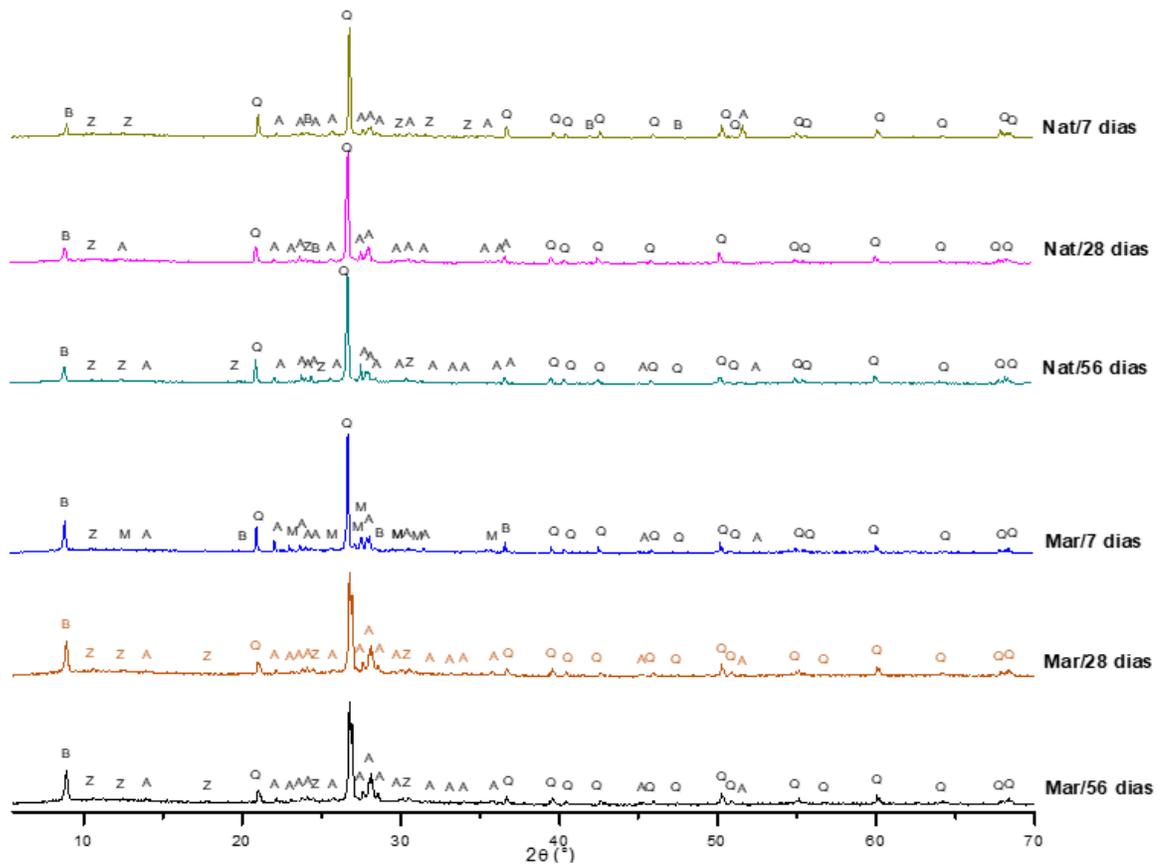


Figura 18. Difratoograma adaptado do concreto MAA submetidos ao ambiente natural e marinho nas idades 7, 28 e 56 dias.

Fonte: Autora, 2019.

Tabela 16. Legenda das fases presentes no difratograma e suas respectivas cartas.

Legenda	Mineral	Número da Carta
<i>Q</i>	Quartzo	01-083-2466
<i>B</i>	Biotita	01-076-0884
<i>A</i>	Albita	00-010-0393
<i>Z</i>	Zeolita	00-021-0132
<i>M</i>	Microlina	00-019-0932

Fonte: Autora, 2019,

No difratograma dos concretos à base de MAA observa-se as fases de quartzo (SiO_2) em destaque sucedida por albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), biotita ($\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$) e zeólita ($\text{Al}_2\text{CaH}_{3,4}\text{O}_{19,7}\text{Si}_7$), em ambas as curas e nas 3 idades.

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)

A Figura 19 apresenta o espectro de infravermelho dos concretos à base de cimento Portland.

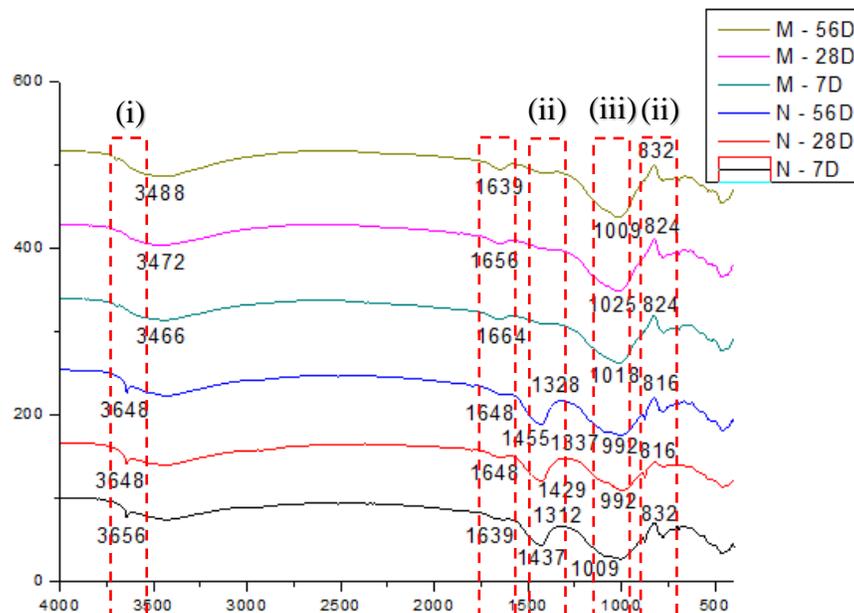


Figura 19. Análise FTIR para concreto à base de CP Tradicional.

Fonte: Autora, 2019.

Na Figura 19, pode-se observar a presença das bandas na ordem de 3470 cm^{-1} e que 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). As bandas em torno de 1419 cm^{-1} , 1423 cm^{-1} e 1421 cm^{-1} e as bandas em torno de 877 e 875 cm^{-1} são caracterizadas como o estiramento antissimétrico e a deformação angular da ligação C-O da calcita, respectivamente (BESSLER e RODRIGUES, 2008). Já as bandas em torno de 995 cm^{-1} , 1008 cm^{-1} e 1002 cm^{-1} são referentes às vibrações de alongamento Si-O (TREZZA, 2007). Estas mesmas evidencias já foram observadas na literatura por Aguilar, Gumieri e Vassalo (2014).

A Figura 20 apresenta o espectro de infravermelho dos concretos à base de material alcalinamente ativado.

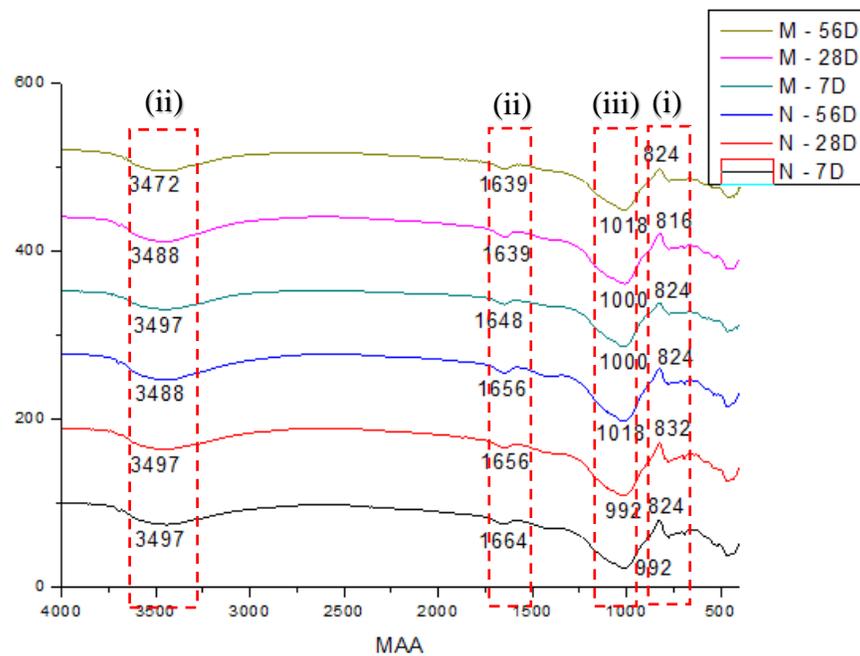


Figura 20. Análise FTIR para concreto à base de MAA.

Fonte: Autora, 2019

Observando o espectro exposto na Figura 20, para os concretos à base de MAA, pode-se atestar, de acordo com a literatura (AGUILAR, GUMIERI e VASSALO, 2014) que as bandas em torno de 710 cm^{-1} indicam a formação de Al, um dos principais componentes do material alcalinamente ativado. Já as bandas em torno de $1630\text{-}1660\text{ cm}^{-1}$ e próximas a 3400 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. A presença da banda em torno de $950\text{-}965\text{ cm}^{-1}$ representa a posição principal dos tetraedros de Si - O em todas as amostras.

4.4. Análise Termogravimétrica (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.

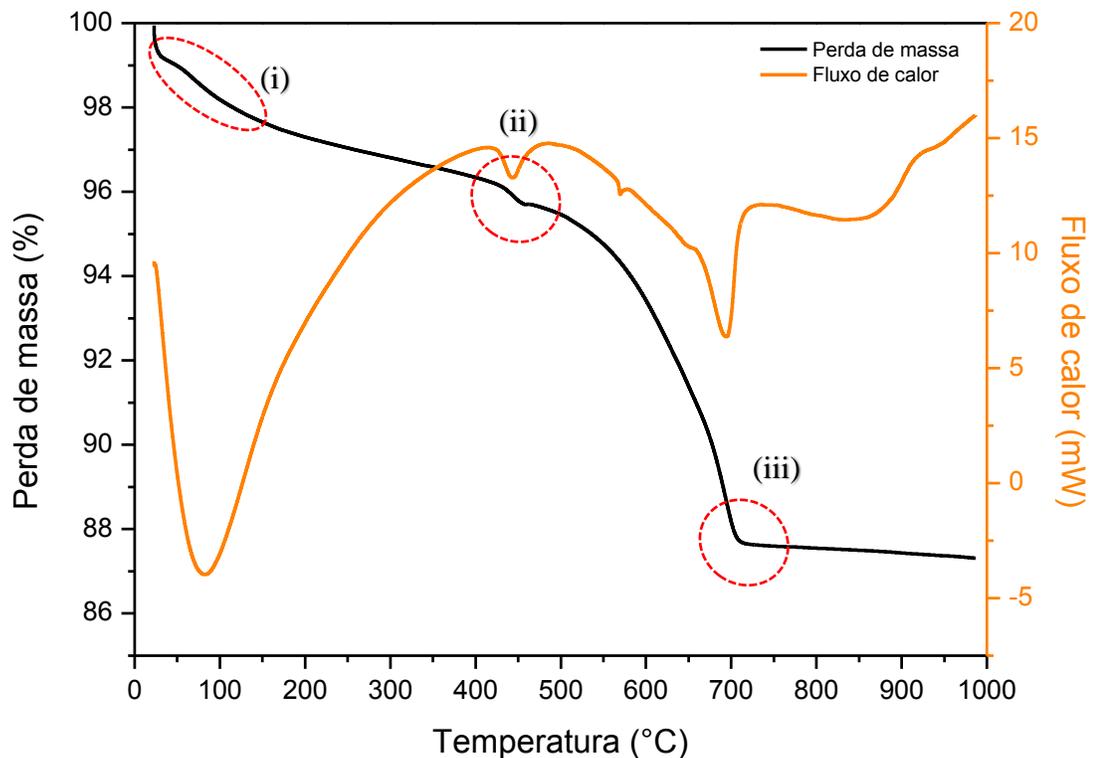


Figura 21. Análise térmica do concreto CP em cura ambiente, com idade de 56 dias.

Fonte: Autora, 2019.

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).

A Figura 22 apresenta o comportamento do concreto à base de MAA em ambiente marinho com idade de 7 dias.

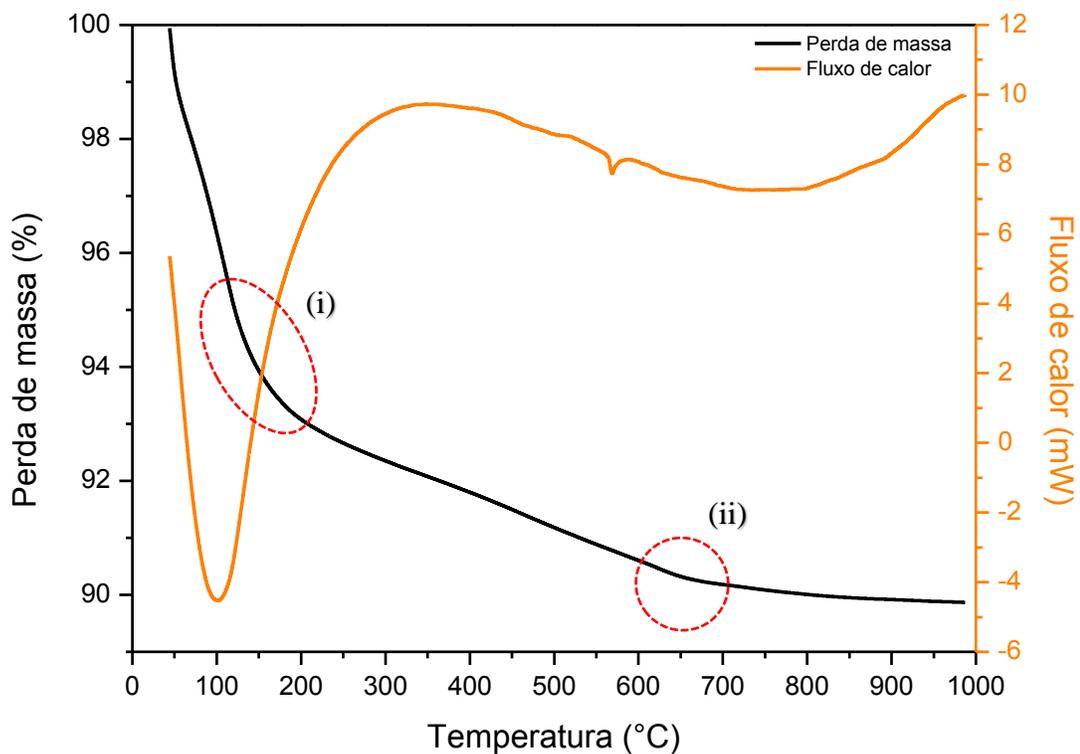


Figura 22. Análise térmica do concreto MAA submetido ao ambiente marinho com 7 dias.

Autora, 2019.

Na Figura 22, percebe-se que na faixa de temperatura que abrange o início do ensaio até aproximadamente 200 °C (i), ocorre perda de massa, que pode ser atribuída à evaporação de água livre (PROVIS e BERNAL, 2014). Já a partir de 650 °C (ii) pode-se aferir a perda de OH associada

a caulinita residual da amostra de MK. Após 750° C nota-se o comportamento estável das curvas indicando a estabilidade das transformações de fases até o término do ensaio (LIMA, 2019).

4.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As Figuras 23 a 33, 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.

As Figuras 23 a 25 apresentam as micrografias da amostra de concreto a base de CP curado em ambiente natural com a idade de 7, 28 e 56 dias, respectivamente.

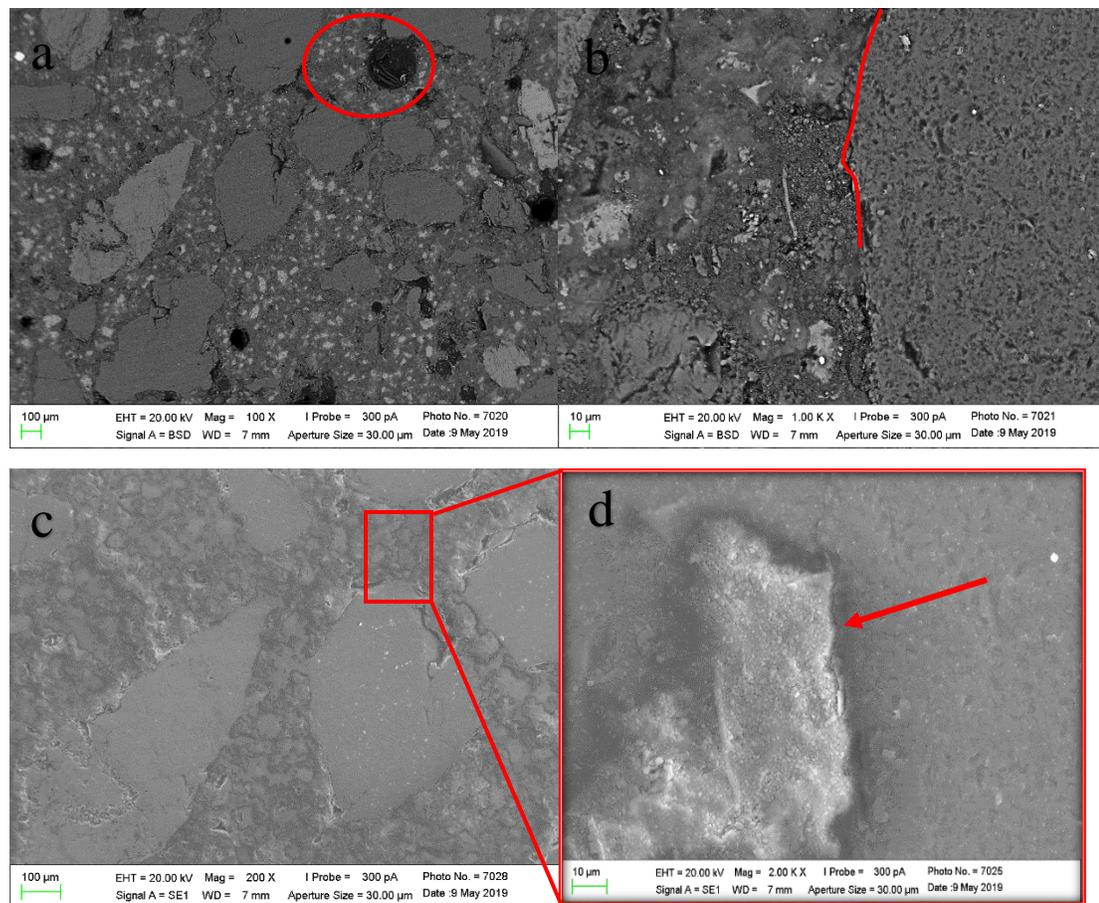


Figura 23. Amostra I com evidência de poros e microporos (a); Fissuras na interface (b); baixo adensamento entre matriz e agregado (c) e (d).

Fonte: Autora, 2019.

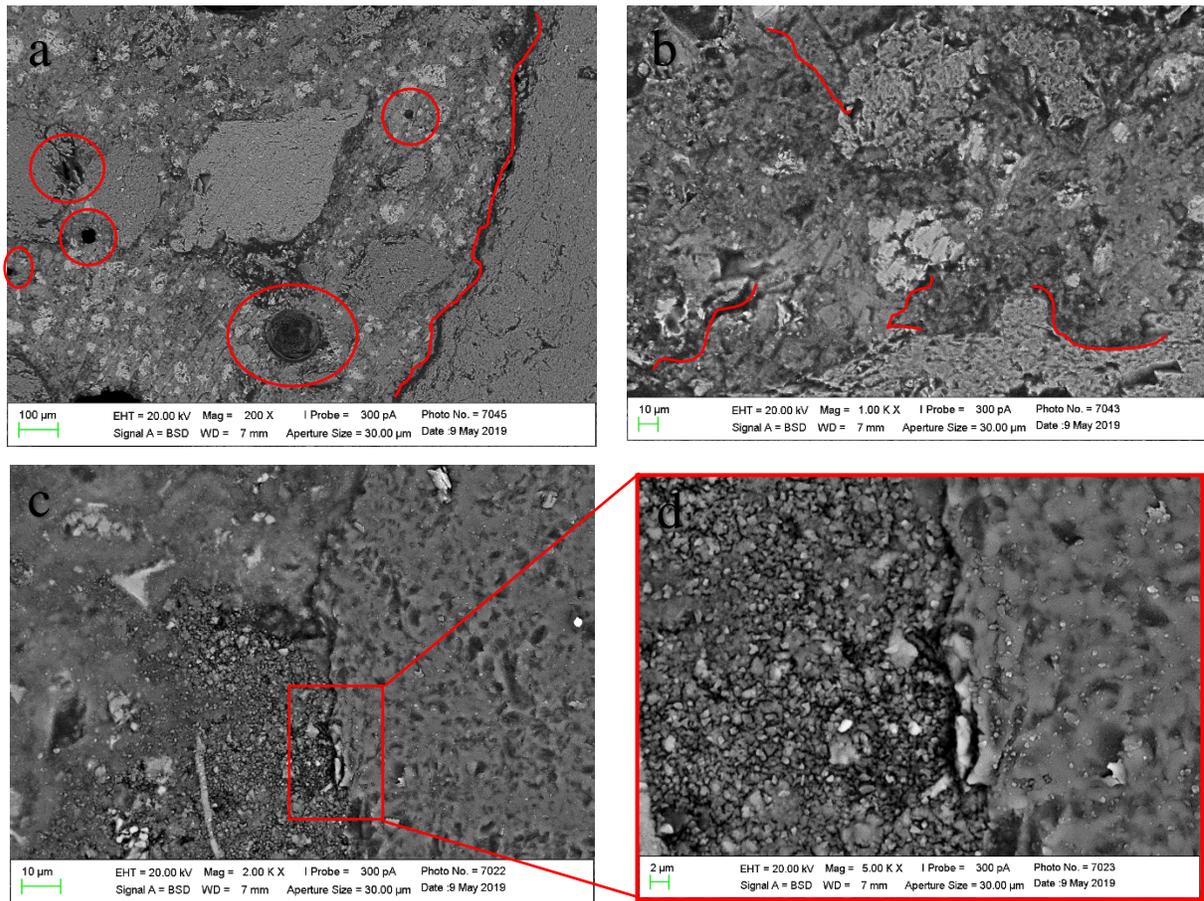


Figura 24. Amosta II com evidência de poros e microporos mais profundos (a); Fissuras na interface (b); baixo adensamento entre matriz e agregado (c) e (d).

Fonte: Autora, 2019.

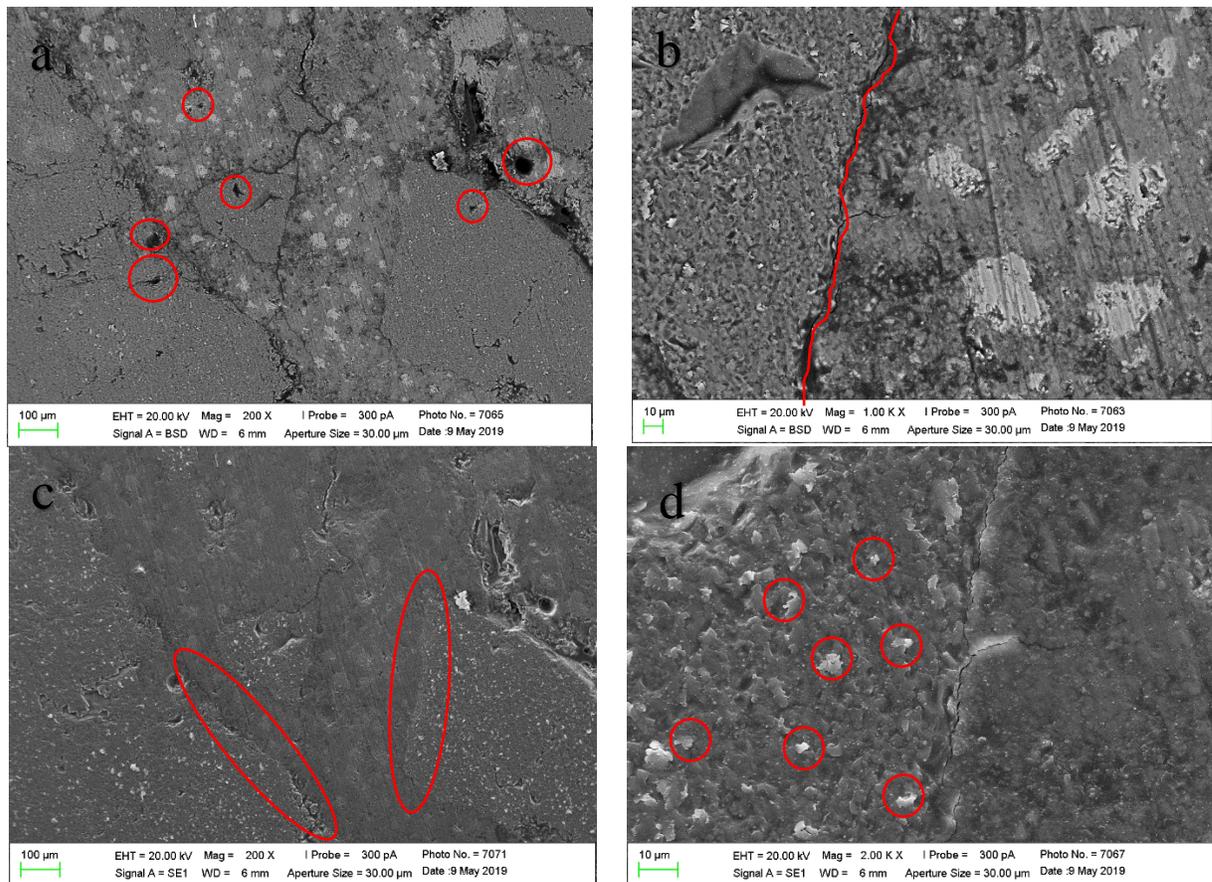


Figura 25. Amostra III com evidência de poros e microporos mais profundos (a); Fissuras na interface (b); melhora do adensamento entre matriz e agregado (c) presença de carbonatos (d).

Fonte: Autora, 2019.

Pela Figura 23, 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.

Pelas Figuras 24 e 35, pode-se observar que, com o avanço das idades dos concretos, a quantidade de poros e microporos tende a aumentar. Importante salientar que também se observa um aumento no diâmetro e na profundidade dos mesmos. Pela Figura 25, pode-se perceber uma melhoria no adensamento matriz/agregados. Pode-se observar, ainda, a presença de carbonatos a partir do 56º dia de cura.

As Figuras 26 a 28 apresentam as micrografias da amostra de concreto a base de CP curado em ambiente marinho com a idade de 7, 28 e 56 dias, respectivamente.

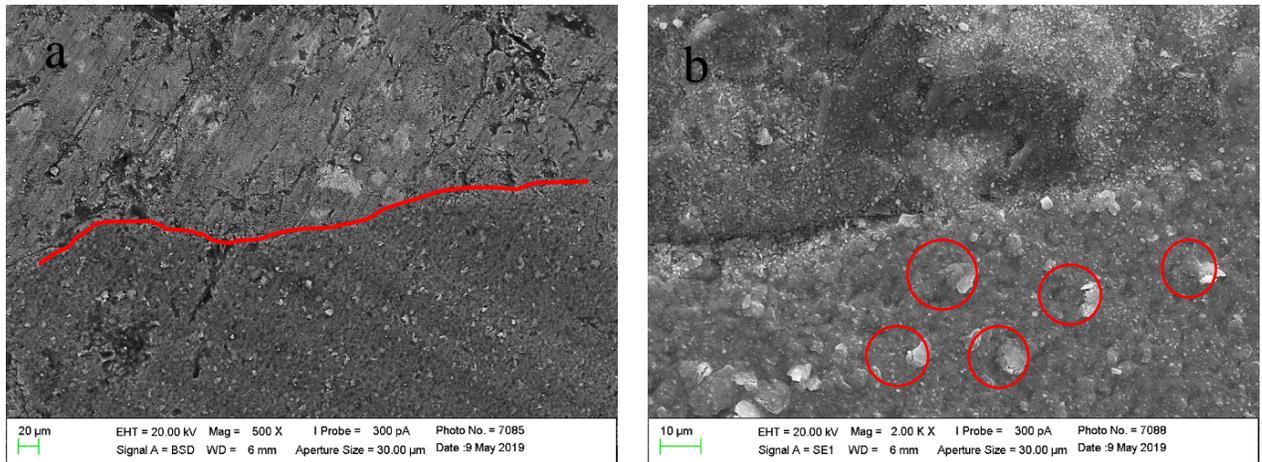


Figura 26. Amostra IV apresenta boa coesão entre matriz e agregados (a); Presença de carbonatos dentro da matriz (b).

Fonte: Autora, 2019.

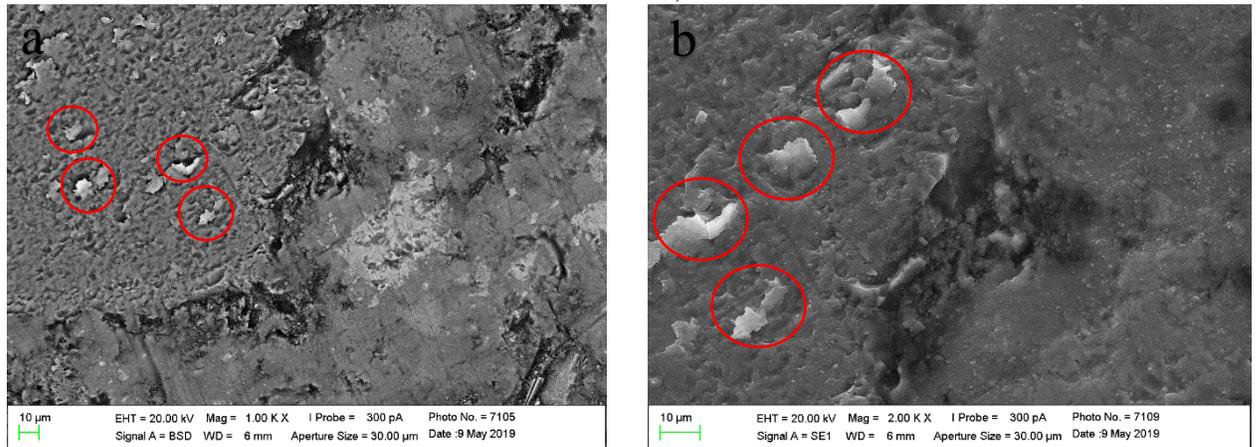


Figura 27. Amostra V com presença de estruturas carbonáticas (a) e (b).

Fonte: Autora, 2019.

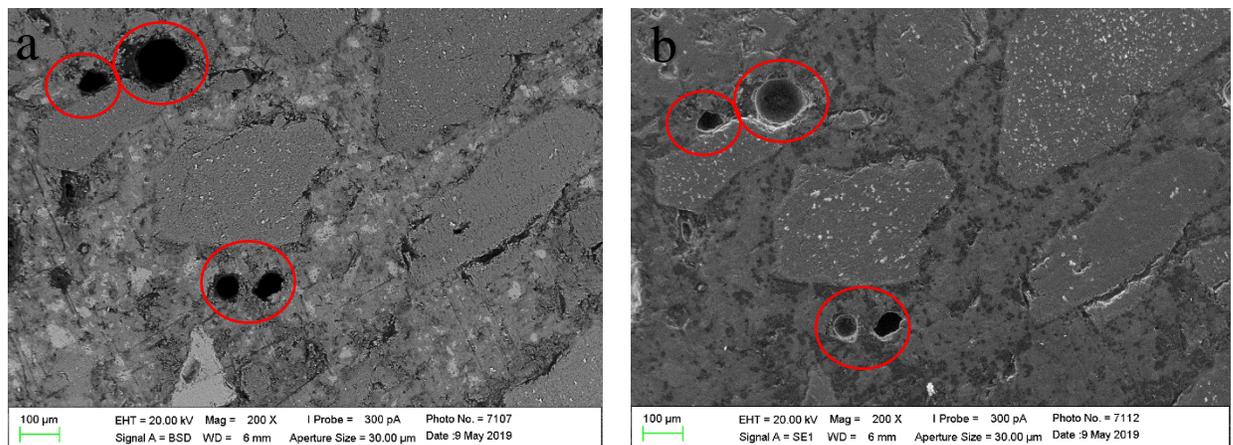


Figura 28. Amostra VI com presença de grandes poros (a) e (b).

Fonte: Autora, 2019.

Nas Figuras 26 a 28, pode-se observar o aparecimento de grandes poros e de estruturas semelhantes às escamas ou lamelas, tanto dentro dos agregados quanto na matriz dos concretos a base de cimento Portland submetidos ao ambiente marinho. 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 e que vão sendo incrementadas com o aumento da idade.

As Figuras 29 a 30 apresentam as micrografias da amostra de concreto a base de MAA curado em ambiente natural com a idade de 7, 28 e 56 dias, respectivamente.

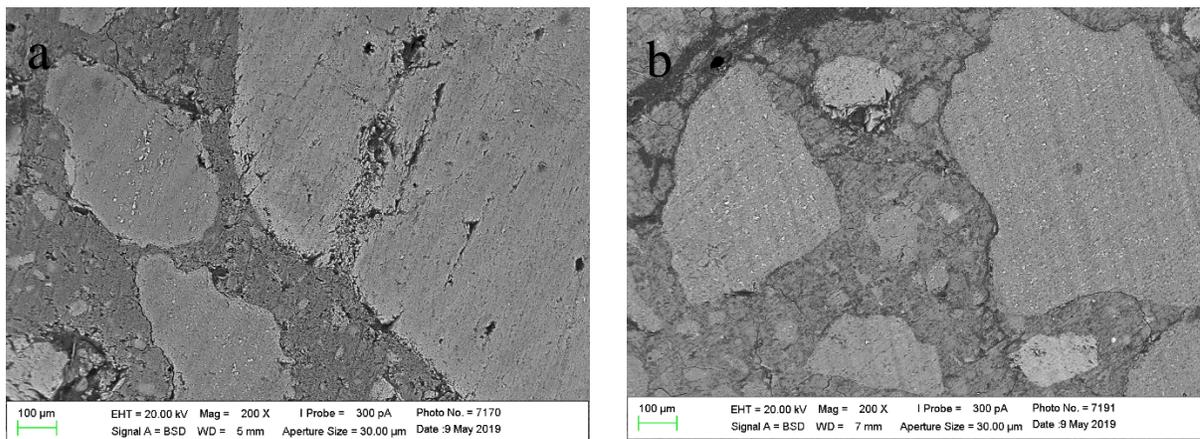


Figura 29. Amostra VIII (a) e IX (b) apresentam pouca porosidade e trincas.

Fonte: Autora, 2019.

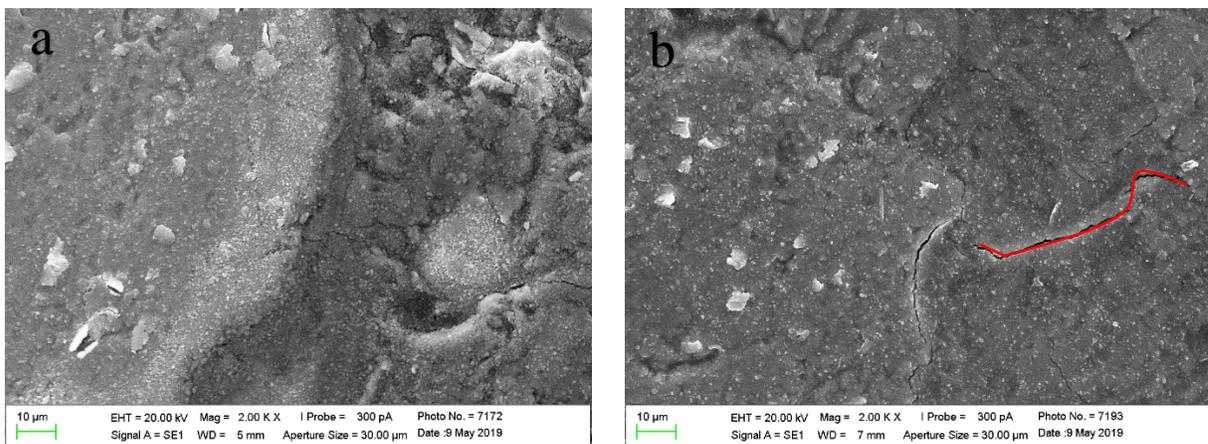


Figura 30. Amostra VIII (a) e IX (b) apresentam boa aderência entre matriz e agregado.

Fonte: Autora, 2019.

Em relação aos concretos à base de MAA submetidos à cura em ambiente natural, apresentado nas Figuras 29 a 30, 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 se correlaciona 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%).

Observa-se ainda, na Figura 30, que apesar amostras de concreto à base de MAA possuírem pequenas fissuras na matriz, os agregados apresentaram boa aderência com a mesma, diferentemente do observado no concreto à base de cimento Portland.

As Figuras 31 a 33 apresentam as micrografias da amostra de concreto a base de MAA curado em ambiente marinho com a idade de 7, 28 e 56 dias, respectivamente.

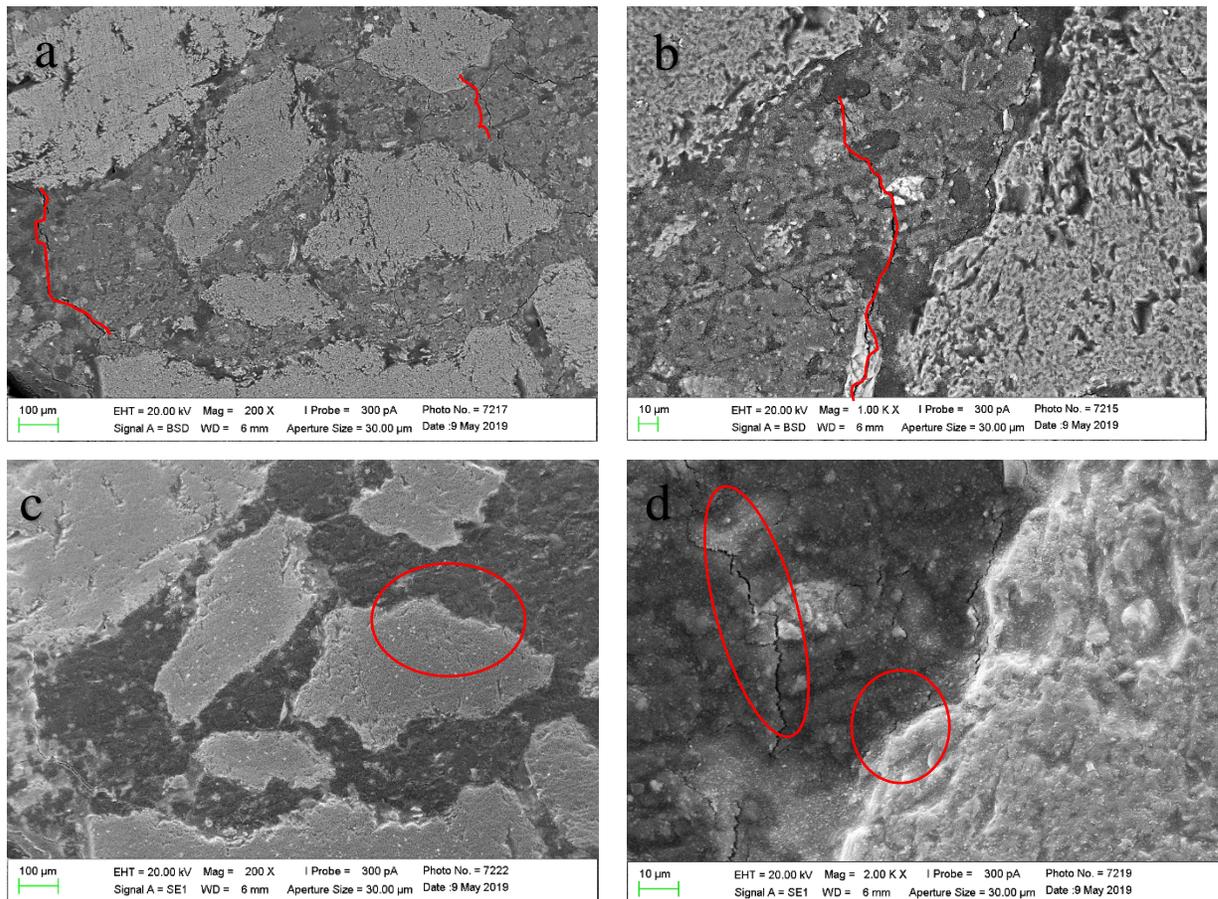


Figura 31. Amostra X (a, b, c, d) apresentando microfissuras.

Fonte: Autora, 2019.

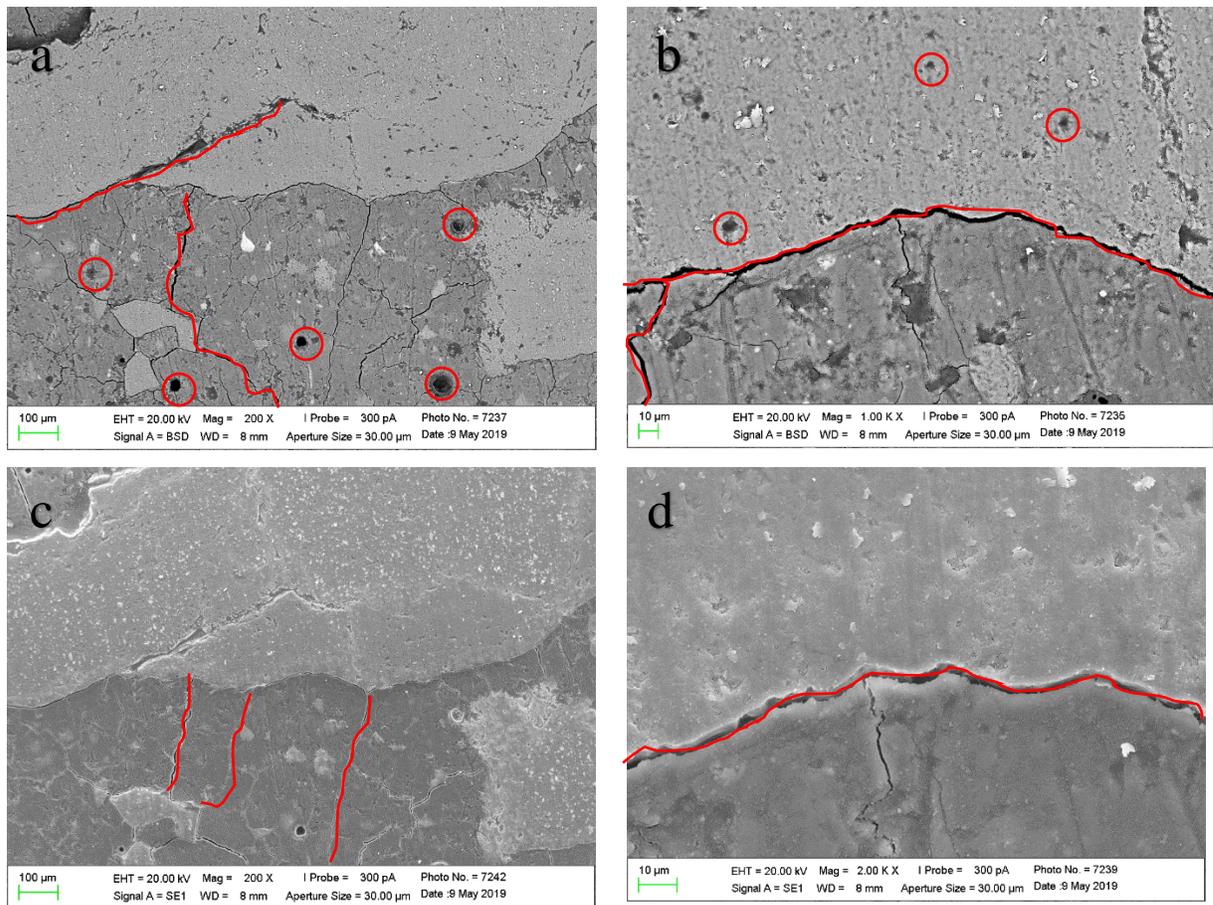


Figura 32. Amostra XI (a, b, c, d) apresentando aumento na quantidade e no tamanho dos poros e das microfissuras.

Fonte: Autora, 2019.

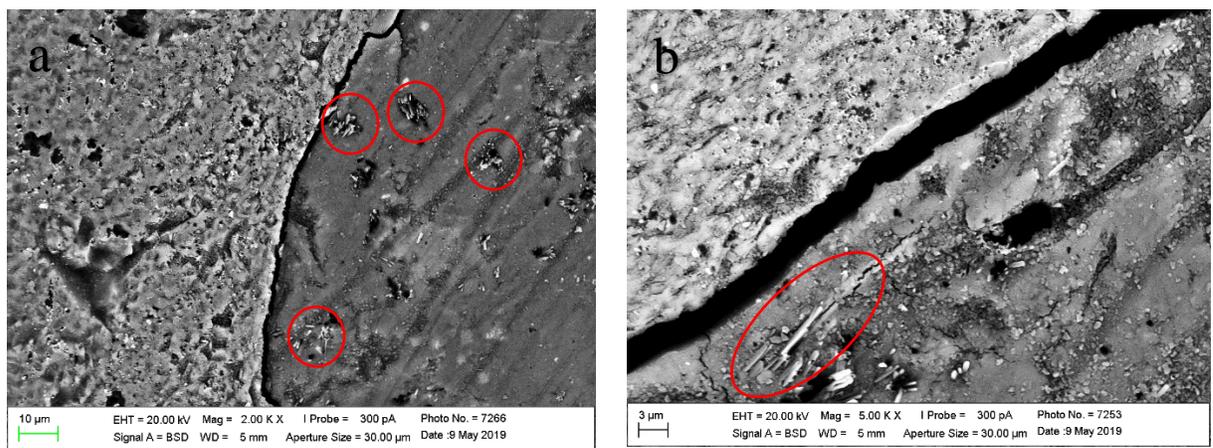


Figura 33. Amostra XII (a, b, c, d) apresentando aumento na quantidade e no tamanho dos poros e das microfissuras.

Fonte: Autora, 2019.

Para os concretos à base de MAA submetidos ao ambiente marinho, apresentados na 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.

Pela Figura 32 pode-se observar a evidencia de poros e microfissuras aparentes na amostra. 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.

Na amostra XII, apresentada na Figura 33, já se identifica com clareza a presença de grãos de carbonato no formato de ‘agulhas’, o que o não é tão perceptível nas amostras de idade anterior, apresentadas nas Figuras 31 e 32 (amostras X e XI).

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® 9.0.0.35 para o concreto tradicional (Tabela 17), pode-se observar que 94,89% da emissão de CO₂-eq refere-se à presença do cimento Portland em sua composição, sendo menos de 6% do restante das emissões de CO₂ eq dividida entre os agregados (gráudo e miúdo), a água e o plastificante.

Tabela 17. Emissões de CO₂-eq do concreto CP.

Concreto CP (1kg)	
Insumos	Emissões de kg CO₂ – eq
Cimento Portland	0,186
Plastificante	0,00438
Água	$3,87 \times 10^{-5}$
Agregado Miúdo	0,00149
Agregado Graúdo	0,00406
Total	0,196

Fonte: Autora, 2019.

Segundo Borges *et al.* (2014), essa elevada contribuição está relacionada ao processo de clinquerização 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 CO₂-eq com cada insumo avaliado, atestando assim, a forte emissão do cimento Portland em detrimento dos demais materiais.

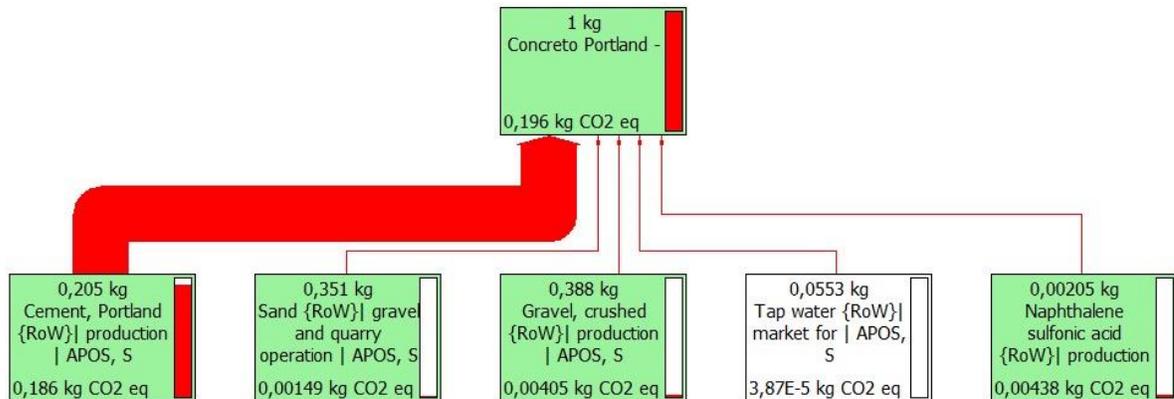


Figura 34. Fluxograma gerado pelo Simapro® 9.0.0.35 para o concreto Portland.

Fonte: Adaptado de Simapro® 9.0.0.35, 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 CO₂-eq acontecem no material ligante, ficando os agregados e a água com um percentual de emissão pouco relevante. A tabela 18 apresenta os resultados da emissão de CO₂-eq para o concreto MAA.

Tabela 18. Emissões de CO₂ eq do concreto MAA.

Concreto MAA (1kg)	
Insumos	Emissões de kg CO ₂ -eq
Metacaulim	0,0313
Na ₂ SiO ₃	0,123
NaOH	0,0104
Água	3,73 x 10 ⁻⁵
Agregado Miúdo	0,000939
Agregado Graúdo	0,00478
Total	0,144

Fonte: Autora, 2019.

No caso do concreto MAA, 95,83% das emissões de CO₂-eq referem-se aos precursores componentes da pasta geopolimérica, Sendo esse percentual subdividido entre o Na₂SiO₃ (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 CO₂-eq está relacionado com a obtenção da solução alcalina, em especial a demanda energética das etapas de fusão e dissolução do Na₂SiO₃, conforme o fluxograma apresentado na Figura 35.

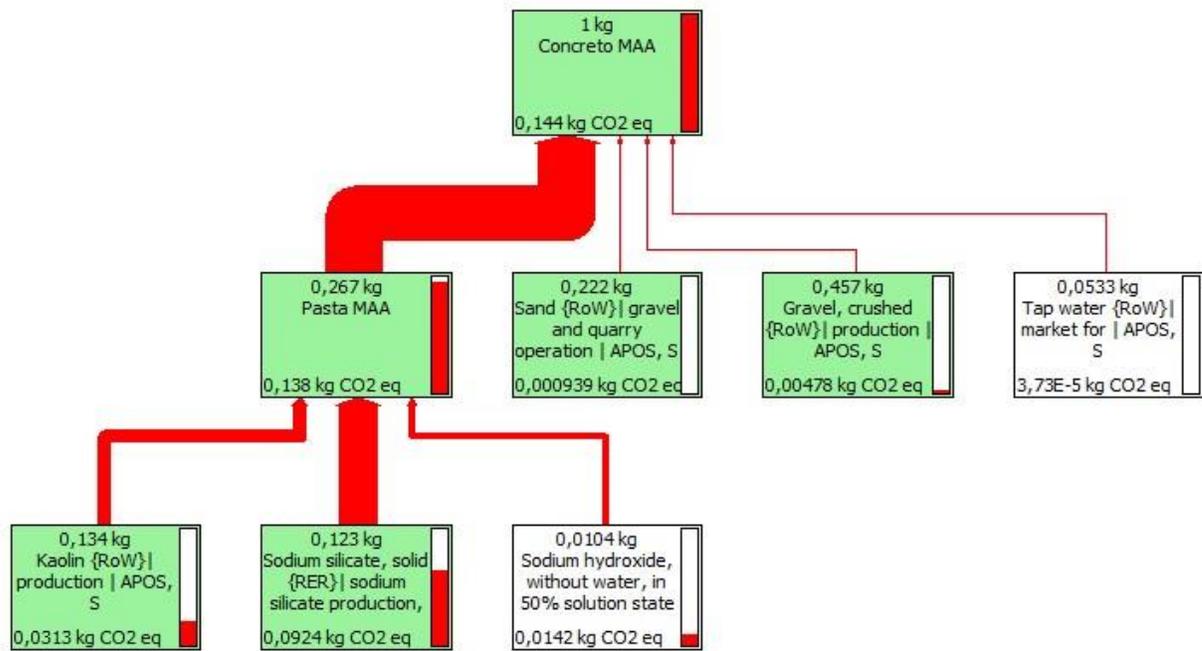


Figura 35. Fluxograma gerado pelo Simapro® 9.0.0.35 para o concreto MAA.

Fonte: Autora, 2019.

Contudo, realizando um comparativo entre os dois concretos em questão (tradicional e à base de MAA) pode-se inferir que a emissão de CO₂-eq do concreto à base de MAA é 36,11% inferior à emissão de CO₂-eq do concreto tradicional. A Tabela 19 realiza o comparativo relacionado à emissão de CO₂-eq de ambos os concretos comparados.

Tabela 19. Comparativo de emissão de kg CO₂-eq entre os concretos estudados.

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

Fonte: Autora, 2019

Com base em BORGES *et al.* (2014), empreendeu-se a Tabela 20, 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, atestando assim o caráter sustentável do concreto à base material alcalinamente ativado.

Tabela 20. Demanda energética dos constituintes dos concretos estudados.

Concreto CP		Concreto MAA	
Material	Demanda Energética (kJ/kg de concreto CP)	Material	Demanda Energética (kJ/kg de concreto MAA)
Cimento CP	266,9	Cimento MAA	20,55
Agregado Graúdo	141,9	Agregado Graúdo	141,9
Agregado Miúdo	156,8	Agregado Miúdo	68,9
Plastificante	64		
Total	629,6		231,35

Fonte: Autora, 2019.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÃO

Após o empreendimento das análises propostas pelo presente estudo, podemos atestar a eficiência do concreto de material alcalinamente ativado frente ao de 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 se mostrou mais preservado, corroborando os resultados aferidos no ensaio de resistência à compressão simples.

Nas análises referentes à espectroscopia de infravermelho, observou-se uma estabilidade microestrutural do MAA, independente do meio ao qual foi submetido, evidenciando o potencial de aplicação de concretos a base de MAA em ambientes agressivos, tais como o ambiente marinho. De modo similar, no tocante as análises termogravimétricas, evidenciou-se uma estabilidade térmica em temperaturas elevadas (1000°C) para o concreto a base de MAA.

Por fim, com relação aos impactos ambientais e à demanda energética, novamente atesta-se a eficiência do concreto à base material alcalinamente ativado frente ao concreto à base de cimento Portland. A emissão de CO₂-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 e durável do material alcalinamente ativado, tornando-o assim uma boa alternativa de ligante para a construção civil, em especial quando submetidas a condições adversas, tais como o ambiente marinho.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se:

- Avaliar o concreto de MAA proposto em idades mais avançadas;
- Avaliar o efeito dos parâmetros de dosagem e cura, na retração por secagem e fluência dos concretos de MAA produzidos;
- Realizar ensaios de permeabilidade;
- Investigar a existência ou não de zonas de transição a partir de imagens de microscopia eletrônica de varredura e verificar a qualidade desta interface em função dos ambientes aos quais os concretos serão submetidos;
- Realizar estudos com diferentes razões molares da pasta de MAA aplicada no concreto, mantendo um material de referência, para avaliar a influência das razões molares nas propriedades mecânicas, na microestrutura e na durabilidade dos concretos produzidos;
- Realizar estudo da mistura de MAA e CP no desenvolvimento de concretos híbridos e avaliar estas misturas nas propriedades mecânicas, na microestrutura e na durabilidade dos concretos produzidos.

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: 20 ago. 2019.

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.

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>. Acesso em: 20 ago. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR 11578**: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, RJ. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR 11768**: Aditivos para concreto de Cimento Portland. Rio de Janeiro, RJ. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR 12655**: Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação. Rio de Janeiro, RJ. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR 12989**: Cimento Portland branco – Especificação. Rio de Janeiro, RJ. 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR 13116**: Cimento Portland de baixo calor de hidratação – Especificação. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, RJ. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR 5732**: Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, RJ. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR 5733:** Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, RJ. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR 5735:** Cimento Portland de Alto Forno. Rio de Janeiro, RJ. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR 5736:** Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, RJ. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR 5737:** Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, RJ. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR 5738:** Concreto – Moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, RJ. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR 6118:** Projetos de estruturas de concreto – procedimentos. Rio de Janeiro, RJ. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, RJ. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR ISO 14040:** Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. São Paulo, SP. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, RJ. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, RJ. 2003.

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

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: 20 ago. 2019.

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: 20 ago. 2019.

BENVEGNÚ, A. V.; SANTOS, F. F.; SILVA, F. C.; Emissão de CO₂ 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.

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.

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>._Acesso em: 20 ago. 2019.

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.

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.

EUROPEAN FEDERATION OF CONCRETE ADMIXTURE ASSOCIATIONS. **Normal Plasticizing Admixtures**, EFCA doc.124ETG; 2002. Disponível em <<https://www.efca.org/resources/document/2015-efca-theology-conference-resources> >. Acesso em: 20 ago. 2019.

ESCOLA POLITÉCNICA (USP). **Cimento – Produção mundial pode dobrar sem aumentar CO₂**. 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-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. **Fuel**, v.82, p. 2259–2265 (2003).

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**. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 118p., 2017.

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.; DE BARROS, S.; BARBOSA, N.P. **Geopolymer Bonded Steel Plates**. ETDCM8- 8th Seminar on Experimental Techniques and Design in Composite Materials. 3-6 October 2007 – Sant’Elmo Beach Hotel – Castiadas – Costa Rei – Sardinia (Italy). (2007).

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.

GREUTER, F.; STRUMPLER, R. Composite material. **U.S. Patent 5.858.533** (1999). 12 Jan 1999.

HAMMOND, G. P.; JONES C. I. **Embodied Energy and Carbon in Construction Materials**. 2008. Disponível em: <www.bath.ac.uk/mech/eng/sert/embodied/>. Acesso em: 20 ago. 2019.

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.

LATELLA B.A., PERERA, D. S., ESCOTT, T. R., Cassidy, D. J. Adhesion of glass to steel using a geopolymer. **J. Mater Sci**, 41 1261–1264 (2006).

LAURENT, V.; PAILLET, D. Coating composition for carbon-containing products and said coating. **U.S. Patent 5.851.677** (1998). 22 Dez 1998.

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.

PACHECO, L. S. **Comparativo da Emissão de Gás Carbônico e Consumo Energético na Produção dos Concretos Convencional e Geopolimérico**. Belo Horizonte, 2012. Monografia (Curso de Engenharia de Produção Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

PALOMO, A.; GLASSER, F.P. Chemically-bonded cementitious materials based on metakaolin. **British Ceramic Transactions and Journal**, 91(4): 107-112. (1992).

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, Nº. 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.

PAULA, L. G. **Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland Com Co-Processamento de Misturas de Resíduos. 158 f. Itajubá, 2009**. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

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: 20 ago. 2019.

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.

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.

SILVA, F.J.; OLIVEIRA, M. C.; MACHADO, M.V.S.; DUARTE, F. P. THAUMATURGO, C. **Cimentos Geopoliméricos**, 2000.

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.

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.

VILJOEM, H. J.; JOOSTER, B.R. Piezoelectric sensors/actuators for use in refractory environments. **U.S. Patent 6.057.628** (2000). 02 Mai 2000.

VOTORANTIM CIMENTOS. **A história do cimento**. 2017. Disponível em: <http://www.ecivilnet.com/artigos/historia_do_cimento.htm >. Acesso em: 20 ago. 2019.