



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



PAULO HENRIQUE ALVES DE LIMA

**AVALIAÇÃO DO CONCRETO GEOPOLIMÉRICO COMO
SUBSTITUTO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND:
RESISTÊNCIA MECÂNICA, RESISTÊNCIA AO FOGO E ACV**

**João Pessoa - PB
2021**

PAULO HENRIQUE ALVES DE LIMA

**AVALIAÇÃO DO CONCRETO GEOPOLIMÉRICO COMO
SUBSTITUTO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND:
RESISTÊNCIA MECÂNICA, RESISTÊNCIA AO FOGO E ACV**

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.

Dra. Kelly Cristiane Gomes
Orientadora

PhD. Monica Carvalho
Co-Orientadora

Dr. Thiago da Silva Almeida
Externo ao programa

Dr. Rodolfo Bezerra da Silva
Externo ao programa

**João Pessoa – PB
2021**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

L732a Lima, Paulo Henrique Alves de.
Avaliação do concreto geopolimérico como substituto do concreto de cimento Portland : resistência mecânica, resistência ao fogo e ACV / Paulo Henrique Alves de Lima. - João Pessoa, 2021.

59 f. : il.

Orientação: Kelly Cristiane Gomes.

Coorientação: Monica Carvalho.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Concreto. 2. Construção civil. 3. Geopolímero. 4. Portland.
I. Gomes, Kelly Cristiane. II. Carvalho, Monica. III. Título.

UFPB/BC

CDU 666.97(043)

Dedico este trabalho a todos os meus mestres e apoiadores, aos meus pais por sempre colocarem meus estudos em primeiro lugar e a minha esposa que está sempre ao meu lado dando apoio, carinho e força nos bons e nos maus momentos.

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, autor de meu destino, meu guia, socorro presente na hora da angústia, ao meu pai Roberto, minha mãe Jacqueline e ao meu irmão.

A minha esposa Rossany, que com muito carinho e apoio, não mediu esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Dedico este trabalho aos meus avós paternos e maternos, pela existência de meus pais, pois sem eles este trabalho e muitos dos meus sonhos não se realizariam.

Ao Curso de Engenharia civil da UFPB e às pessoas com quem convivi nesses espaços ao longo desses anos. A experiência de uma produção compartilhada na comunhão com amigos nesses espaços foram a melhor experiência da minha formação acadêmica.

Ao Curso de pós-graduação em Engenharia de Energias Renováveis da UFPB pela oportunidade que me foi dada de continuar os meus estudos com afinco e dedicação para me tornar um mestre.

Aos meus professores, desde os primeiros anos de escola, por terem passado um pouco dos seus conhecimentos e por sua paciência.

Em especial agradeço à Professora Kelly Gomes, por me dar a oportunidade de fazer parte deste programa de pós-graduação onde busco o desenvolvimento de materiais alternativos mais sustentáveis.

Enfim, a todos aqueles que, à sua maneira, contribuíram na minha formação e assim tornaram possível esse trabalho.

RESUMO

O alto consumo de energia e a elevada emissão de dióxido de carbono são os maiores problemas da indústria de cimento Portland relacionados à poluição do meio ambiente. Neste cenário, o concreto geopolimérico (CG) surge como um substituto potencial ao concreto de cimento Portland (CCP). Além do seu potencial ambiental, esse concreto alternativo possui características mecânicas semelhantes quando comparado com a solução convencional, apresentando ainda a vantagem de ter um ganho inicial de resistência superior ao concreto de cimento Portland, também são apontados por alguns pesquisadores interessantes propriedades termomecânicas, o que torna as estruturas de concreto armado mais seguras quando expostas a situações de incêndio. Sendo assim, este estudo tem como objetivo verificar as possíveis vantagens do concreto geopolimérico frente ao concreto de cimento Portland, através de ensaios de caracterização dos materiais, testes mecânicos, térmicos e avaliando a emissão de CO₂-eq e gasto energético através da Avaliação do ciclo de vida (ACV) tomando como unidade base 1m³ de cada material. Foi observado que o concreto geopolimérico alcançou mais de 95% da sua resistência final nos primeiros 7 dias de cura, que para o traço adotado, obteve uma resistência final superior a 50MPa. Além da resistência mecânica, o concreto geopolimérico apresenta uma perda de massa inferior ao concreto convencional quando exposto a altas temperaturas (até 1200°C), aos 28 dias, CG tem uma perda de massa de apenas 8.52% enquanto o CCP apresenta uma perda de massa superior a 25%. Quando comparado a emissão em kg de CO₂-eq observa-se que o concreto alternativo apresenta uma emissão 53.94% inferior ao concreto convencional, porém, com um maior consumo energético. Desse modo, é possível afirmar que o concreto geopolimérico tem um grande potencial de inserção dentro da construção civil como substituto do concreto a base de cimento Portland, tanto do ponto de vista de desempenho termo-mecânico quanto na mitigação de impactos ambientais.

Palavras-chave: *Construção civil, concreto, geopolímero, Portland, ACV, CO₂*

ABSTRACT

High energy consumption and high carbon dioxide emissions are the biggest problems in the Portland cement industry related to environmental pollution. In this scenario, geopolymeric concrete (CG) emerges as a potential substitute for Portland cement concrete (CCP). In addition to its environmental potential, this alternative concrete has similar mechanical characteristics when compared to the conventional solution, also presenting the advantage of having an initial gain of resistance superior to Portland cement concrete, are also pointed out by some researchers interesting thermomechanical properties, which makes reinforced concrete structures safer when exposed to fire situations. Thus, this study aims to verify the possible advantages of geopolymeric concrete against Portland cement concrete, through material characterization tests, mechanical and thermal tests and evaluating CO₂-eq emission and energy expenditure through life cycle evaluation (LCA) taking as base unit 1m³ of each material. It was observed that the geopolymeric concrete reached more than 95% of its final resistance in the first 7 days of curing, which for the adopted trait, obtained a final resistance higher than 50MPa. In addition to mechanical strength, geopolymeric concrete presents a lower mass loss than conventional concrete when exposed to high temperatures (up to 1200°C), at 28 days, CG has a mass loss of only 8.52% while the CCP presents a mass loss of more than 25%. When comparing the emission in kg of CO₂-eq, it is observed that the alternative concrete has a 53.94% lower emission than the conventional concrete, but with a higher energy consumption. Thus, it is possible to affirm that geopolyphenic concrete has a great potential for insertion within civil construction as a substitute for Portland cement-based concrete, both from the point of view of thermomechanical performance and in the mitigation of environmental impacts.

Keywords: *Construction, concrete, geopolymer, Portland, ACV, CO₂*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma do processo de produção do cimento.....	21
Figura 2. Moldagem dos corpos de prova – Concreto de cimento Portland.....	28
Figura 3. Moldagem dos corpos de prova – MAA.....	28
Figura 4. Desmolde dos corpos de prova (A - CCP, B – MAA).....	29
Figura 5: Regularização das bases dos corpos de prova.....	29
Figura 6: Ensaio de compressão axial para o MAA (a) e para o concreto de cimento Portland (b).....	37
Figura 7: Resultado do DRX normalizado do concreto de cimento Portland.....	42
Figura 8: Resultado do DRX normalizado do concreto geopolimérico.....	43
Figura 9: Análise térmica para concreto Portland e concreto geopolimérico.....	46
Figura 10: Fluxograma para concreto Portland.....	48
Figura 11: Fluxograma para concreto geopolimérico.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quantitativo de concreto em tonelada consumido no brasil.....	18
Tabela 2: Quantitativo de material para o concreto de cimento portland, volume de referência 1m ³	30
Tabela 3: Quantitativo de material para o concreto geopolimérico, volume de referência 1m ³	31
Tabela 4: Consumo de material para o concreto geopolimérico, para volume de referência 1m ³	31
Tabela 5: Lista de ensaios de caracterização	32
Tabela 6: Resultados do ensaio de Resistência a Compressão Simples dos Concretos a base de cimento Portland e a base de MAA em função da idade.....	38
Tabela 7: Ensaio de fluorescência de raio X (óxidos) das amostras de concreto a base de cimento Portland.....	39
Tabela 8: Ensaio de fluorescência de raio X (elementar) das amostras de concreto a base de cimento Portland.....	40
Tabela 9: Ensaio de fluorescência de raio X (óxidos) das amostras de concreto geopolimérico.....	40
Tabela 10: Ensaio de fluorescência de raio X (elementar) das amostras de concreto geopolimérico.....	41
Tabela 11: Perda de massa x temperatura.....	47
Tabela 12: Avaliação do impacto ambiental do concreto de cimento Portland pelo método IPCC 2013 GWP 100 ^a e CED.....	48
Tabela 13: Avaliação do impacto ambiental do concreto Geopolimérico pelos métodos IPCC 2013 GWP 100 ^a e CED.....	49
Tabela 14: Demanda energética dos constituintes do concreto a base de cimento Portland.....	50
Tabela 15: Demanda energética dos constituintes do concreto geopolimérico.....	51
Tabela 16: Demanda energética dos constituintes do concreto geopolimérico alternativo.....	51
Tabela 17: Fontes de energia para a produção de concreto.....	52

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	12
1. APRESENTAÇÃO.....	12
1.1 Introdução	12
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo geral.....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
1.3 Estrutura da dissertação	14
CAPÍTULO II.....	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Concreto convencional (Portland)	17
2.2 Concreto geopolimérico.....	19
2.3 Processo produtivo.....	20
2.3.1 Cimento Portland	20
2.3.2 Material Alcalinamente Ativado	21
CAPÍTULO III	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 Seleção dos materiais	25
3.1.1 Cimento.....	25
3.1.2 Metacaulim	26
3.1.3 Ativadores	26
3.1.4 Agregados	26
3.2 Moldagem dos corpos de prova	27
3.3 Caracterização dos materiais.....	30
3.3.1 Concreto Portland.....	30
3.3.2 Concreto geopolimérico	30
3.3.3 Técnicas de caracterização dos materiais.....	31
3.3.3.1 Ensaio de compressão axial.....	32
3.3.3.2 Fluorescência de raio-X	32
3.3.3.3 Difração de raio-X.....	33
3.3.3.4 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier.....	34
3.3.3.5 TG- DSC	34

3.3.4 Avaliação do ciclo de vida (ACV)	35
CAPÍTULO IV	37
4. RESULTADOS	37
4.1 Ensaio de compressão axial	37
4.2 Fluorescência de Raio-X.....	39
4.3 Difração de Raio-X.....	41
4.4 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier	43
4.5 TG-DTA-DSC.....	46
4.6 Avaliação do impacto ambiental dos concretos.....	47
CAPÍTULO V	53
5. CONCLUSÃO.....	53
7. REFERÊNCIAS.....	56

CAPÍTULO I

1. APRESENTAÇÃO

1.1 Introdução

Com o passar dos anos, o tema sustentabilidade tem estado cada vez mais em evidência, já se sabe que a quantidade de recursos naturais gastos para manter o padrão de vida da população mundial é insustentável e se não forem tomadas providências a este respeito, a situação do meio ambiente chegará a níveis nunca antes vistos de degradação.

O uso indevido e inadequado dos recursos naturais responsáveis por manter o padrão atual de vida da população mundial, torna o tema sustentabilidade uma discussão urgente e crucial ao longo dos anos, sobretudo acerca das consequências geradas pelo consumo irresponsável e a necessidade primordial para a manutenção da vida.

Segundo Edwards (2009), a indústria da construção civil consome 50% dos recursos mundiais, convertendo-se em uma das atividades menos sustentáveis do planeta. Dentre os produtos obtidos com a exploração destes recursos naturais está o cimento que é muito utilizado na confecção de argamassas e concretos com vários tipos de funções, dentre elas estruturais, de altas resistências e durabilidade. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2018), este material é responsável por, aproximadamente, 5% das emissões de CO₂ de origem antrópica no mundo.

Em busca de mitigar os impactos provenientes da construção civil, pesquisadores como FIGUEIREDO et al., (2016); ABRANTES et al., (2016); GOMES et al., (2016); MENEZES et al., (2015); vem buscando alternativas que não agridam tanto o ambiente quanto as alternativas convencionais. Essa busca além da mudança de hábitos, passa pelo estudo de materiais alternativos ao concreto armado de cimento Portland, que além de emitir uma grande quantidade de gases de efeito estufa durante a sua produção, consome uma grande quantidade de energia, principalmente para aquecimento de fornos para a produção de clínquer (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP, 2019).

Visando diminuir o gasto energético e o descarte inadequado de materiais na natureza, as empresas produtoras de cimento utilizam uma técnica chamada coprocessamento em forno de clínquer (ABCP, 2019). Essa técnica consiste na utilização de resíduos para a alimentação dos fornos de clínquer, substituindo assim uma parcela do combustível que seria utilizado.

Dessa forma, os fornos de cimento possuem capacidade de incineração adequada para grandes volumes de resíduos, que de outra forma seriam destruídos sem a recuperação da energia, além de contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa devido ao menor consumo de combustíveis fósseis (HENRIQUE et al., (2014)). Uma outra alternativa é a substituição do cimento Portland por um material estrutural de menor impacto ambiental.

O cimento geopolimérico é um material que pode funcionar como alternativa em substituição ao cimento Portland, podendo ser usado em infraestruturas de transportes, na construção civil, e em aplicações marítimas (DAVIDOVITS, 1994). Vários estudos como os de (DAVIDOVITS, 1994; HENRIQUE et al., (2014); GOMES et al., 2016, ARNAUD, 2018; ABRANTES, 2016; FIGUEIREDO, 2017); vêm sendo desenvolvidos no intuito de avaliar os reais impactos ambientais causados por esse cimento quando comparado ao cimento convencional.

Busca-se por meio da Avaliação do ciclo de vida (ACV) quantificar as emissões de gases de efeito estufa e comparar as suas demandas energéticas bem como suas matrizes, a fim de identificar qual o potencial de mitigação de impactos ambientais quando substituimos o concreto convencional pelo concreto geopolimérico na indústria da construção civil. Além das vantagens para o meio ambiente, busca-se avaliar o desempenho mecânico e a capacidade de resistir a altas temperaturas, para que em situações de incêndio, seja possível garantir a segurança estrutural das edificações e minimizar o descarte de material para o meio ambiente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

- ✓ Avaliar o concreto geopolimérico como substituto do concreto de cimento Portland, em termos de resistência mecânica, resistência ao fogo e sustentabilidade.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Desenvolver um concreto geopolimérico que mantenha as suas características mecânicas quando submetido a altas temperaturas;
- ✓ Comparar através de ensaios de laboratório o concreto de cimento Portland e o concreto geopolimérico quando submetidos a altas temperaturas;
- ✓ Identificar quais componentes do concreto de cimento Portland e do concreto geopolimérico possuem maior consumo energético, bem como maior emissão de CO₂-eq;

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho divide-se em 6 capítulos, no primeiro capítulo é abordado a problemática de forma geral, expondo a importância do estudo de novos materiais que sirvam de substituto ao concreto a base de cimento Portland, tanto do ponto de vista de seu desempenho mecânico e térmico quanto do seu menor impacto ambiental, como o menor gasto energético e uma menor emissão de CO₂.

No segundo capítulo é apresentado todo o embasamento teórico desse estudo, apresentando o contexto histórico, o impacto ambiental causado pela indústria da construção civil, tendo o consumo do concreto como um dos principais vetores nocivos ao meio ambiente. Neste contexto, apresenta-se as propriedades do concreto de cimento Portland e do concreto geopolimérico, a fim de estabelecer um comparativo entre os dois materiais.

O capítulo III apresenta a escolha de todos os materiais e os seus métodos de dosagem que foram utilizados, levando em conta materiais e métodos de dosagem já utilizados por outros

pesquisadores. Apresenta-se os traços dos dois tipos de concreto, bem como os ensaios aos quais serão submetidos os dois materiais e a função de cada ensaio.

O Capítulo IV apresenta os resultados dos ensaios realizados para o concreto a base de cimento Portland e para o concreto geopolimérico. Os ensaios são feitos com os materiais em diferentes idades (7, 14, 21 e 28 dias), dessa forma, pode-se acompanhar a evolução de suas características à medida que passam pelo processo de cura. Além disso, através da avaliação do ciclo de vida, também será apresentado as quantidades de emissão de kg de CO₂-eq para 1m³ de concreto geopolimérico e de concreto a base de cimento Portland, bem como suas respectivas demandas energéticas.

O Capítulo V apresenta as conclusões do trabalho com base nos resultados apresentados no capítulo IV, sugestões para trabalhos futuros e toda a bibliografia utilizada como base para este trabalho.

CAPÍTULO II

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O cimento Portland foi patenteado em 1824 por Joseph Aspdin, desde então tornou-se o principal ligante estrutural utilizado no mundo devido a sua versatilidade. Porém, devido a grande demanda por recursos naturais para sua fabricação, por seu elevado grau de emissões de CO₂, por seu consumo energético na fase de fabricação (temperaturas na ordem de 1450°C) e por sua baixa resistência ao fogo e ao ataque que cloretos (CO, 1997), pesquisas que buscam por um substituto deste material tem sido desenvolvidas por muitos pesquisadores como (ABRANTES et al., (2016); BORGES et al., (2014); MOLINA; JUNIOR (2012)).

A produção de cimento demanda por elevadas quantidades de energia, sendo o combustível primário, fornecedor do poder calorífico ao processo de queima da matéria-prima, o item de maior peso na estrutura de custos de produção, enquanto a energia elétrica, utilizada em diversos outros processos, corresponde a uma pequena porcentagem do total necessário. Utiliza-se como combustíveis primários: carvão, coque de petróleo e óleo combustível e gás natural (TOSTA et al., (2007)). Parte dessa alta demanda de energia decorre principalmente da fabricação do clínquer e de equipamentos elétrica, como, por exemplo, os moinhos de cimento (HENRIQUE et al., (2014)).

Com o objetivo de reduzir o impacto ambiental gerado pela construção civil no meio ambiente, o homem vem estudando e desenvolvendo materiais alternativos, que tenham uma pegada de carbono inferior aos materiais convencionais bem como uma menor demanda energética.

O termo concreto “geopolimérico” surgiu na década de 1990, embora os estudos com de ligantes produzidos com ativação alcalina de aluminossilicatos date da década de 1940, esse material apresenta um potencial ecológico e físico-químico quando comparado ao cimento Portland. As emissões de CO₂ no processo produtivo do concreto geopolimérico estão relacionadas à obtenção de suas matérias-primas, ocorrem emissões no processo produtivo do metacaulim e do silicato de sódio; em ambos o CO₂ é proveniente da queima de combustíveis fósseis para fornecimento de calor (HENRIQUE et al., (2014)). Entretanto, estudos relatam uma menor emissão de CO₂ e uma menor demanda energética por parte deste material em comparação com o concreto convencional, visto que ele lida com temperaturas muito menores em sua produção.

Com base nesse potencial do concreto geopolimérico, busca-se avançar no estudo deste material como forma de mitigar os impactos ambientais ocasionados pela construção civil, desde a sua emissão de monóxido de carbono até o seu gasto energético.

2.1 Concreto convencional (Portland)

O concreto de cimento Portland é o material estrutural mais consumido no mundo, sendo que no Brasil, no ano de 2017, foram consumidos quase 54 milhões de toneladas deste material segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Concreto (2018). Sendo o concreto um material de composição simples (cimento Portland, areia, brita e água), é quase uma unanimidade quando se fala em construção civil. Utilizado em conjunto com o aço (concreto armado) é um material que apresenta uma grande resistência a compressão e uma boa resistência a flexão, não sendo, entretanto, muito eficiente para esforços axiais de tração.

Esse concreto convencional, porém, destaca-se negativamente no aspecto de sustentabilidade ambiental. Durante o processo de fabricação do cimento Portland emite-se grandes quantidades de CO₂ para a atmosfera, principalmente durante a fase de clínquerização (queima de matérias-primas), esta fase também requer uma grande quantidade de energia visto que o gradiente de temperatura alcança os 1500°C. À medida que o consumo de concreto cresce (Tabela 1) torna-se ainda mais importante a mitigação dos seus efeitos nocivos. Os dados fornecidos pelo Sindicato Nacional da Indústria do cimento mostram um pico de consumo no ano de 2014, e um decréscimo nos anos seguintes em virtude de uma crise econômica instaurada no país.

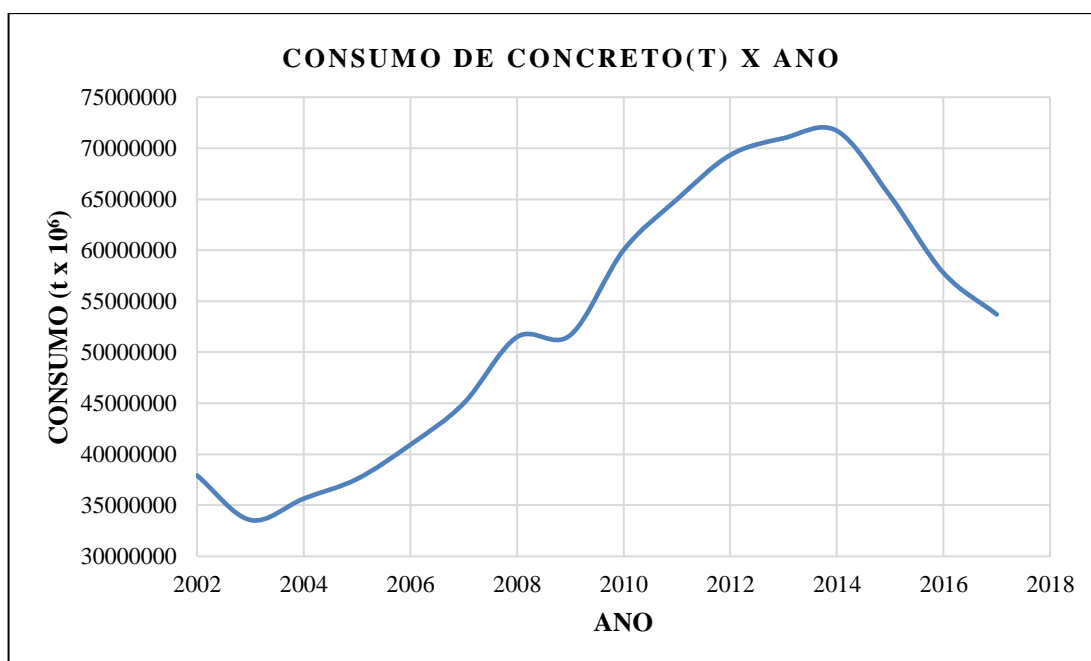
No entanto, com a crescente preocupação com o meio ambiente a própria indústria do cimento tem desenvolvido ações de forma a buscar por processos produtivos mais sustentáveis e estimulado pesquisas mundiais para a redução de emissão. (VAN OSS; PADOVANI, 2003; HABERT et al., 2010; SCHNEIDER et al., 2011; BENHELAL et al., 2013). Uma dessas ações é a utilização de pneus e outros resíduos para o aquecimento dos fornos de produção do clínquer, a destinação final em fornos de cimento possibilita o descarte de um grande volume de pneus inservíveis, tanto inteiros quanto picados. Um único forno, com capacidade de produção de 1.000 toneladas/dia de clínquer, pode consumir até 5.000 pneus por dia, de forma segura e eficiente. Os pneus apresentam um conteúdo energético maior que o do carvão e, quando queimados em ambiente controlado, não há aumento nas emissões, podendo em alguns casos haver até redução (ABCP, 2019).

Tabela 1: Quantitativo de Concreto em tonelada consumido no Brasil.

CONSUMO DE CONCRETO		
Ano	Consumo (t)	Variação
2002	37932460	-
2003	33564690	-13,0%
2004	35660175	5,9%
2005	37581698	5,1%
2006	40938315	8,2%
2007	44984102	9,0%
2008	51488180	12,6%
2009	51669850	0,4%
2010	60007980	13,9%
2011	64971753	7,6%
2012	69323633	6,3%
2013	70974211	2,3%
2014	71702803	1,0%
2015	65315622	-9,8%
2016	57783962	-13,0%
2017	53703188	-7,6%
2018	52780000	

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados da ABCP (2019).

Gráfico 1: Quantitativo de Concreto em tonelada consumido no Brasil.



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados da ABCP (2019).

2.2 Concreto geopolimérico

Há muitos anos o homem busca um material que consiga substituir de forma eficiente o cimento Portland na composição do concreto. Na década de 1940 pesquisadores ucranianos deram início a pesquisas que utilizavam materiais obtidos a partir da ativação alcalina de aluminossilicatos (como por exemplo, escória de alto forno) (KRIVENKO, 2008). Porém, foi só na década de 1990 que o termo geopolímero surgiu, o cimento geopolimérico é o termo que designa quimicamente os cimentos especiais à base de aluminossilicatos.

O geopolímero é um polímero inorgânico com propriedades aglomerantes semelhantes ao cimento Portland, além disso, o cimento geopolimérico apresentar uma série de vantagens em relação ao cimento convencional, tais como, grande ganho de resistência nas primeiras idades, maior resistência a fogo, maior resistência a ataques químicos, menor gasto energético na sua produção, menor emissão de gases de efeito estufa na produção dos seus componentes (BORGES, 2014).

A maioria dos estudos relacionados ao concreto geopolimérico utilizam em sua composição o hidróxido de sódio (NaOH) como parte da solução ativadora, utilizam também o silicato de sódio 37% ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) para garantir a presença do SiO_2 no concreto, que além de aumentar a velocidade de reação, garante uma maior resistência. Esses compostos são misturados ao metacaulim, a areia, a brita e a água. (HENRIQUE et al., (2014)).

Por ser um material de custo mais elevado e de mais difícil confecção, a indústria da construção civil como um todo ainda não abraçou a ideia de substituição do concreto a base de cimento Portland pelo concreto geopolimérico. Com o avanço da tecnologia e de novos estudos, espera-se que a indústria aceite o geopolímero como uma solução viável e vantajosa, principalmente quando observada do ponto de vista da eficiência energética, propriedades mecânicas e impactos ambientais.

Desde o início de suas pesquisas, o concreto a base de geopolímero foi pensado como um material alternativo com a possibilidade de substituir o Cimento Portland e ser utilizado em tecnologias tradicionais de construção. É importante destacar que o cimento Portland é um aglomerante baseado, principalmente, em reações de hidratação de óxidos de cálcio, silício e alumínio, com a formação de fases cristalinas distintas e de uma cadeia amorfa de silicato de cálcio hidrato e sua estrutura química é intrinsecamente diferente da dos geopolímeros que apresentam a formação de uma fase gel de aluminossilicato (DAVIDOVITS, 1991).

2.3 Processo produtivo

O concreto de cimento Portland, por ser um dos produtos mais utilizados do mundo, tem a sua cadeia produtiva bem desenvolvida, voltada para a máxima produtividade, possibilitando assim a redução do seu custo de produção, porém, mesmo com todo esse desenvolvimento, a produção de cimento continua tendo um alto consumo energético e um nível de emissão consideravelmente alto quando comparado a outros materiais da indústria da construção civil.

O concreto geopolimérico por outro lado, está em constante desenvolvimento, desde os seus primeiros estudos (década de 1940), tendo, segundo BORGES (2014) inúmeras vantagens em relação ao concreto de cimento Portland, sendo assim um substituto natural. Observa-se através do seu processo produtivo, algumas dessas vantagens, principalmente do ponto de vista do consumo energético.

2.3.1 Cimento Portland

Segundo Borges et al. (2014), Lima (2011) e Andofalto (2002) 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.

O processo se dá da seguinte forma:

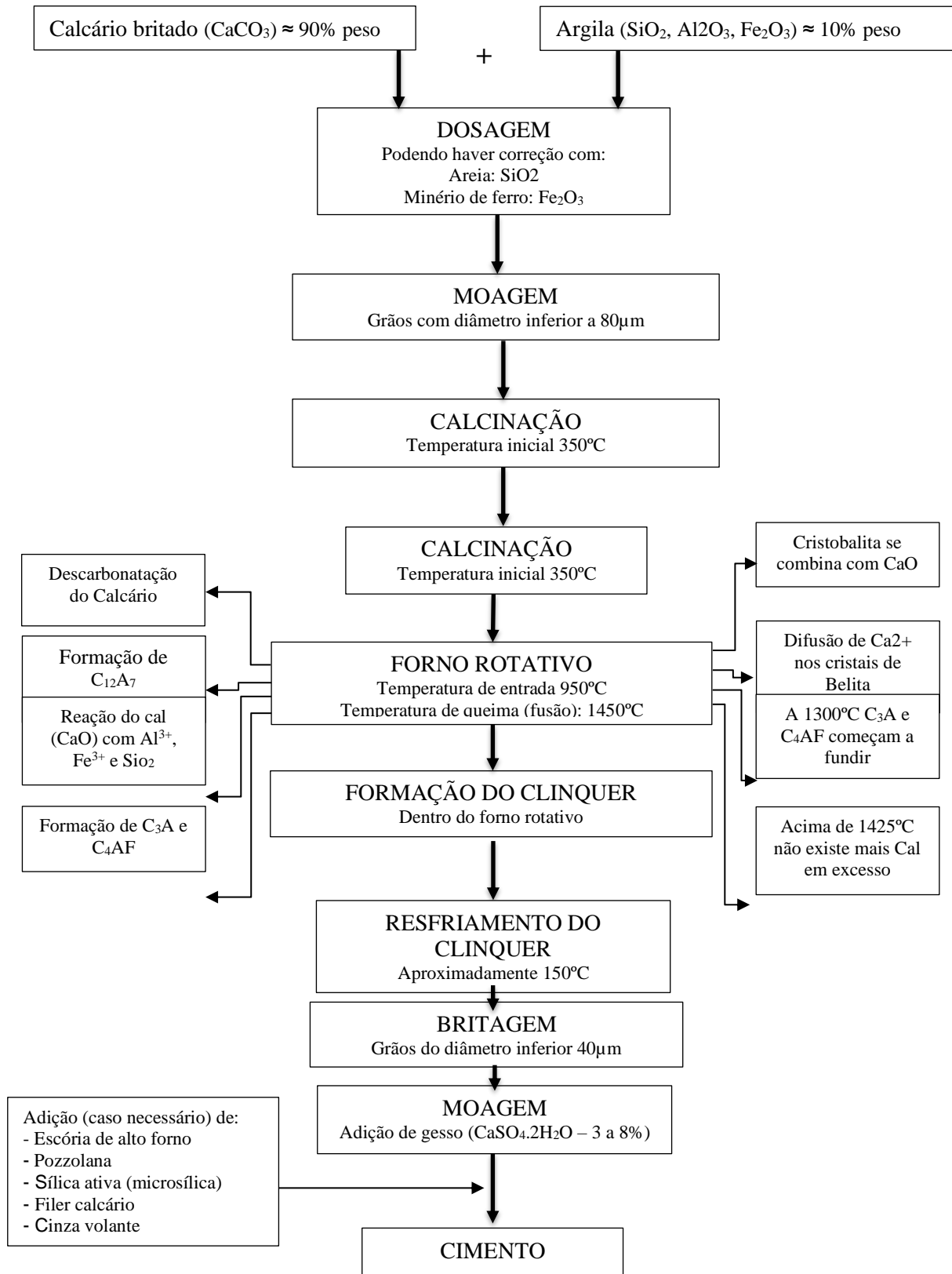


Figura 1: Fluxograma do processo de produção do cimento.

Fonte: (Autor, 2020)

2.3.2 Material Alcalinamente Ativado

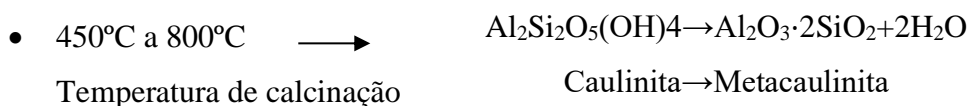
O Material Alcalinamente Ativado (MAA) é um material desenvolvido com precursores ricos em SiO₂ e Al₂O₃ ativados em solução alcalina por meio de um processo de polimerização, no qual unidades de estruturas tetraédricas de aluminossilicatos se organizam em repetições compartilhando oxigênios (AGUILAR et al., (2014)).

Para a produção do geopolímetro (material alcalinamente ativado), podem ser utilizados diversos aluminossilicatos e resíduos ricos em sílica e alumina. Em geral o Metacaulim é o material escolhido como precursor fonte de alumina (Al₂O₃) e sílica (SiO₂), já para a ativação alcalina, utiliza-se o silicato de sódio (Na₂SiO₃) e o hidróxido de sódio (NaOH) com pureza de 96 a 98% diluído em água.

A Metacaulinita é sintetizada através da transformação da caulinita por meio de um processo de calcinação. Durante o processo de calcinação da caulinita, ocorre a desidratação (de 20 a 200°C) e a desidroxilação (de 400 a 650°C) da mesma, ou seja, a caulinita perde água de sua estrutura cristalina dando origem a uma estrutura amorfa. Se o processo de calcinação continuar, a elevação da temperatura provoca a evolução da estrutura amorfa da metacaulinita para uma fase cristalina intermediária chamada espinélio até a nucleação da mulita. (MOTHÉ, 2004 e MOHAMMED, 2017)

Ainda, 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.

As reações de modificação da caulinita durante a calcinação são dadas pelas expressões abaixo, se amostra contiver umidade livre, a evaporação será a primeira reação no processo de calcinação (TEKLAY et al., (2016)):



Tanto o hidróxido de sódio quanto o silicato de sódio são fornecidos pela indústria química. O hidróxido de sódio (NaOH) fornecido em formato de pérola foi fornecido pela indústria química Moderna, localizada na cidade de Barueri-SP, já o silicato de sódio (Na₂SiO₃) 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 (Na₂O) e 32% de óxido de silício (SiO₂) apresentando assim a razão SiO₂/ Na₂O = 2,15

A polimerização acontece por meio de uma rápida reação química em condições fortemente alcalinas. Os polissialatos formam anéis de polímeros entre Si⁴⁺ e Al³⁺ coordenados com oxigênio, variando seu estado de amorfo e semicristalino. (DAVIDOVITS, 1994).

Após a mistura, é adicionado água para facilitar a trabalhabilidade do material, diferente do concreto de cimento Portland, o Material alcalinamente ativado (MAA) apresenta uma coloração alaranjada e um aspecto mais denso.

2.4 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

Considerando a fabricação dos mais diversos produtos, como um potencial agente impactante para o meio ambiente, por meio da matéria-prima ou seu processo produtivo, a ACV (Avaliação de Ciclo de Vida) entra como um método para avaliar o desempenho ambiental dos materiais, percorrendo todas as etapas da sua vida útil, desde a retirada da matéria-prima até a disposição final. Com essa análise podemos avaliar o desempenho em toda vida útil, com base em critérios ambientais, medindo os custos ecológicos de recursos ou da fabricação de produtos. (EDWARDS, 2013).

A ACV é padronizada pela International Organization for Standardization (ISO), que elaborou as ISO 14040 (2006), ISO 14044 (2006) sobre a Avaliação do Ciclo de Vida, publicada no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) como NBR14040 (2014) e NBR14044 (2014). De acordo com a ISO 14040 (2006), a ACV é a compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (WILLERS et.al (2013)). A metodologia de ACV é dividida em fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados (NBR14040, 2014).

A Avaliação do ciclo de vida compreende algumas etapas, dentre elas: definição de objetivo e escopo, na qual é feita uma descrição do sistema de produto a ser estudado, apresentando o propósito e a extensão, por meio do estabelecimento de suas fronteiras (HAUSCHILD, 2005); análise de inventário, ferramenta importante para a avaliação quantitativa de impactos ambientais; avaliação de impactos, o qual, por suas características se torna o foco do trabalho em questão, que permite avaliar a significância de aspectos ambientais

apresentados durante a etapa de inventário e agregar as intervenções em vários ou um único indicador; e interpretação de resultados, que avalia o estudo de acordo com o objetivo de reunir recomendações, com base na análise dos resultados, a serem seguidas a fim de minimizar os impactos ambientais provenientes do sistema. (GRAEDEL, 1998).

A avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) é a terceira fase da ACV. O objetivo da AICV é prover informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados do ICV de um sistema de produto, visando ao melhor entendimento de sua significância ambiental.

A interpretação do ciclo de vida é a fase final do procedimento de ACV, na qual os resultados de um ICV e/ou de uma AICV, ou de ambos, são sumarizados e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com a definição de objetivo e escopo.

Em seu trabalho, Figueiredo (2017) destaca dois exemplos de ACV na construção civil, destacando os blocos de alvenaria por sua natureza moldável e possibilidade de uma execução planejada, minimizando o desperdício, além de uma variedade de materiais que proporcionam diferentes tipos de funções: acabamento, vedação ou estrutural.

Foram também aplicados à ACV diferentes composições de estruturas de cobertura, aonde os dados revelaram que a alternativa de cobertura que representa a menor emissão de kg CO₂-eq é a composta pela associação de Laje de MAA com telha cerâmica e madeira e o teto jardim, representando uma emissão 60% menor em relação à primeira alternativa em concreto de cimento Portland (FIGUEIREDO, 2017).

Trazendo mais exemplos, podemos destacar o estudo realizado no trabalho de Abrantes (2017) que avaliou o concreto geopolimérico em oposição a um à base de cimento Portland, na confecção da fundação de uma residência, em que foi confirmado uma viabilidade ambiental muito maior do concreto geopolimérico, em termos de emissões de CO₂-eq, além de destacar um alto desempenho mecânico e durabilidade. O concreto a base MAA também demonstrou uma menor emissão de CO₂-eq mesmo com uma demanda de energia três vezes menor comparado ao concreto à base de CP, o que corrobora em ser uma boa alternativa para a construção civil, no caráter sustentável.

CAPÍTULO III

3. MATERIAL E MÉTODOS

Visando atender aos objetivos deste trabalho, foi adotada uma metodologia que divide-se nas seguintes etapas:

- ✓ Seleção e dos materiais
- ✓ Moldagem dos corpos de prova
- ✓ Caracterização do concreto
- ✓ Avaliação do ciclo de vida

3.1 Seleção dos materiais

Os traços para os dois concretos foram determinados com base em trabalhos científicos já realizados (BICHINHO (2019), MEHTA (2008)), estes estudos apontavam potenciais benefícios do concreto geopolimérico frente ao concreto de cimento Portland. Tomou-se como base para escolha deste traço que ele tivesse uma resistência compatível para o tipo de aplicação ao qual se destina, que é para a construção de edificação que se encaixem dentro dos requisitos de altura e área exigidos para as verificações decorrentes da NBR14432 (2004).

O traço escolhido para o concreto a base de cimento Portland foi definido com base no método experimental da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), onde através dos conhecimentos das características dos materiais utilizados, pode-se definir a proporção ótima de cada material na mistura a fim de se alcançar uma resistência desejada.

3.1.1 Cimento

Para o concreto a base de cimento Portland, foi utilizado como ligante o cimento da empresa Elizabeth tipo CII – Z32. A empresa localizada no município de Alhandra – PB, e foi escolhida para o fornecimento devido a grande facilidade de aquisição desse tipo de cimento no mercado.

O CP II-Z contém adição de material pozolânico que varia de 6% à 14% em massa, o que confere ao cimento menor permeabilidade podendo também conter adição de material carbonático (fíler) no limite máximo de 10% em massa segundo a NBR 11578/1991.

3.1.2 Metacaulim

Nesta pesquisa optou-se pelo uso do metacaulim, que 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 CO₂ (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 (SiO₂); 40,50% de óxido de alumínio (Al₂O₃); 2,8% de óxido de ferro (Fe₂O₃); 0,08% de óxido de sódio (Na₂O); 0,18% de óxido de potássio (K₂O).

3.1.3 Ativadores

- 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.

- 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 (Na₂SiO₃). 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 (Na₂O) e 32% de óxido de silício (SiO₂) apresentando assim a razão SiO₂/ Na₂O = 2,15.

3.1.4 Agregados

Para ambos os concretos (à base de cimento Portland e geopolimérico) foram utilizados os mesmos agregados, sempre seguindo as mesmas proporções para o agregado graúdo (brita 19, brita 12,5 e cascalhinho), visando obter um concreto de maior resistência.

O agregado miúdo utilizado para a elaboração dos traços é de origem quartzosa, proveniente das regiões próximas da cidade de João Pessoa, além disso, é importante salientar que, para eliminar a umidade presente neste material, o agregado foi previamente colocado em uma estufa a 100°C por 48 horas.

Já para o agregado graúdo, foi utilizado um material de origem basáltica, salientando que este material foi previamente lavado para a retirada de impurezas, e passou por um processo de peneiração, para garantir as proporções de diâmetro dos agregados estabelecidas para o estudo.

3.2 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados com base na NBR 12655/2006. Todos os corpos de prova foram moldados no laboratório de materiais da Faculdade Asper na cidade de João Pessoa. A fim de se garantir as mesmas condições de temperatura, a sala foi mantida sempre com temperatura de 23°C. Os ensaios foram descritos no item 3.3.3 foram todos realizados nos laboratórios da Universidade Federal da Paraíba.

Todos os corpos de prova, tanto os de concreto de cimento Portland (Figura 2) quanto os de concreto geopolimérico (Figura 3) foram moldados utilizando as mesmas proporções entre os agregados graúdos (40% brita 19, 50%, brita 12,5 e 10% cascalhinho), para o desmolde (Figura 4), não foram utilizados nenhum aditivo químico que pudesse influenciar nos ensaios realizados, além disso, para garantir a precisão dos ensaios, o topo e o fundo circular dos corpos de provas foram regularizados (Figura 5). Também é importante ressaltar que nenhum tipo de aditivo químico adicionado ao traço.

Foram moldados 24 corpos de prova de concreto de cimento Portland (CCP) dos quais foram escolhidos 16 que apresentavam visualmente um melhor adensamento, de forma análoga, também foram moldados 24 corpos de prova de concreto geopolimérico (MAA) dos quais foram selecionados 16 corpos de prova. Os corpos de prova foram divididos em 4 grupos, e serão rompidos em diferentes idades (7, 14, 21 e 28 dias).



Figura 2: Moldagem dos corpos de prova – Concreto de cimento Portland.

Fonte: (Autor, 2020).



Figura 3: Moldagem dos corpos de prova - MAA

Fonte: (Autor, 2020).

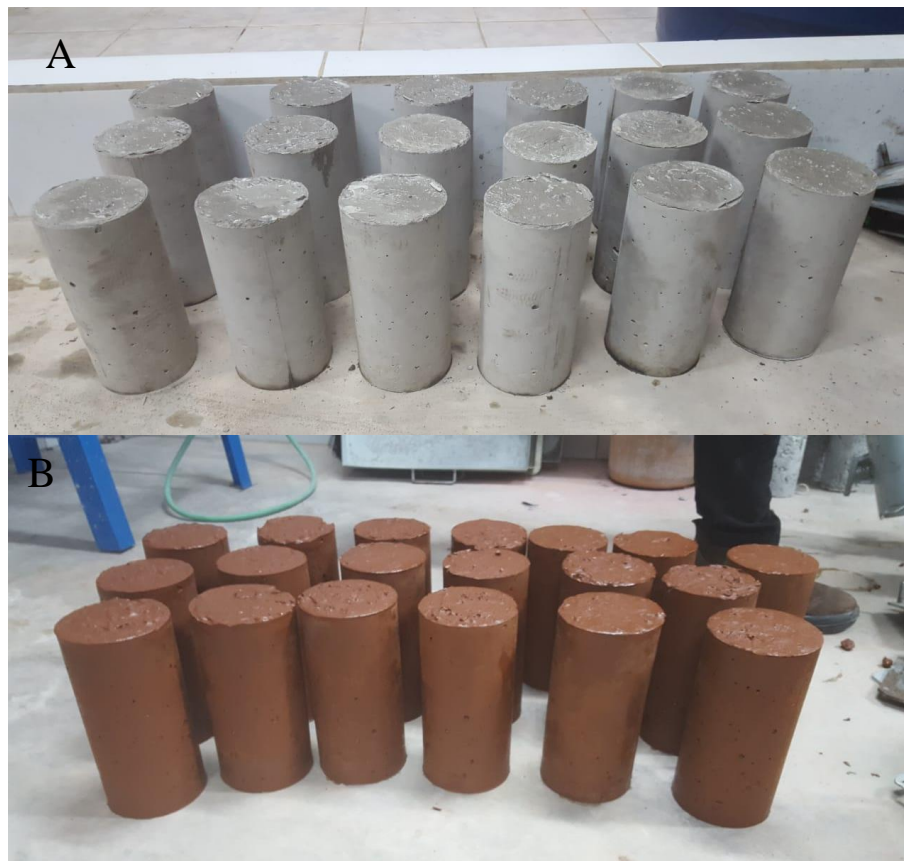


Figura 4: Desmolde dos corpos de prova (A - CCP, B – MAA).

Fonte: (Autor, 2020).



Figura 5: Regularização das bases dos corpos de prova.

Fonte: (Autor, 2020).

3.3 Caracterização dos materiais

3.3.1 Concreto Portland

O concreto de cimento Portland é o material estrutural mais consumido no mundo, sendo que no Brasil, no ano de 2017, foram consumidos quase 54 milhões de toneladas deste material segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Concreto (2018). Sendo o concreto um material de composição simples (cimento Portland, areia, brita e água), é quase uma unanimidade quando se fala em construção civil. Utilizado em conjunto com o aço (concreto armado) é um material que apresenta uma grande resistência a compressão e uma boa resistência a flexão, não sendo, entretanto, muito eficiente para esforços axiais de tração.

Tabela 2: Quantitativo de material para o concreto de cimento Portland, volume de referência 1m³.

TRAÇO- CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND			
Cimento	Areia	Brita	Água/Cimento
1	1,34	2,44	0,45
CONSUMO DE MATERIAL			
Cimento	Areia	Brita	Água
328,37Kg	385,81Kg	747,05kg	147,76L

Fonte: Autor (2018).

3.3.2 Concreto geopolimérico

A maioria dos estudos relacionados ao concreto geopolimérico utilizam em sua composição o hidróxido de sódio (NaOH) como parte da solução ativadora, utilizam também o silicato de sódio 37% (SiO₂/Na₂O) para garantir a presença do SiO₂ no concreto, que além de aumentar a velocidade de reação, garante uma maior resistência. Esses compostos são misturados ao metacaulim, a areia, a brita e a água. (HENRIQUE et al., (2014)). Com base em estudos recentes do concreto geopolimérico (BICHINHO, 2019), foi adotado o traço mostrado na Tabela 3 para um traço de 30MPa aos 28 dias de cura. A tabela 4 informa o consumo de material para o mesmo traço.

Tabela 3: Quantitativo de material para o concreto geopolimérico, para volume de referência 1m³.

TRAÇO- CONCRETO GEOPOLIMÉRICO		
MAA	Areia	Brita
1	0,83	1,71

Fonte: Autor (2018).

Tabela 4: Consumo de material para o concreto geopolimérico, para volume de referência 1m³.

CONSUMO DE MATERIAL		
Metacaulinita	318,47	kg
Silicato de sódio	147,90	kg
Hidróxido de Sódio	24,84	kg
Água	187,49	kg
Areia	265,20	kg
Brita	548,25	kg

Fonte: Autor (2018).

3.3.3 Técnicas de caracterização dos materiais

Selecionou-se experimentos com base nas características buscadas em cada material e na literatura encontrada na etapa de pesquisa bibliográfica. O traço do concreto de cimento Portland foi definido com base no método ABCP, enquanto o traço do Concreto geopolimérico foi definido a partir das publicações científicas acerca do tema.

Quanto a caracterização, os dois materiais serão caracterizados do ponto de vista físicos, químicos, mineralógicos, microestruturais e térmicos (Tabela 5), em seguida, será feita uma avaliação do ciclo de vida para se avaliar a emissão de carbono de cada tipo de concreto.

Tabela 5: Lista de ensaios de caracterização.

TABELA DE ENSAIOS	
Físico	Ensaio de compressão axial
Químico	FRX (Fluorescência de Raio-X)
Mineralógico	DRX (Difração de Raio-X)
Microestrutural	FTIR (Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier)
Térmico	TG-DTA-DSC

Fonte: Autor (2018)

3.3.3.1 Ensaio de compressão axial

O ensaio de compressão axial é um dos mais utilizados para se verificar a resistência mecânica do concreto. Mehta (2008) afirmam que as propriedades mecânicas do concreto endurecido têm uma relação intrínseca com as características físicas e químicas dos materiais a ele incorporados e com as suas quantidades.

Para que o ensaio seja realizado corretamente, é preciso primeiro nivelar o CP para que encaixe perfeitamente na prensa. O equipamento exercerá uma forma gradual de compressão sobre o corpo de prova até que este rompa. Dessa forma, conhecendo a força aplicada pela máquina, e as dimensões do corpo de prova, é possível descobrir a tensão resistente de compressão do concreto.

Para este ensaio, 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).

3.3.3.2 Fluorescência de raio-X

A análise por fluorescência de raios X é um método quali-quantitativo baseado na medida das intensidades (número de raios X detectados por unidade de tempo) dos raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra. Os raios X emitidos por tubos de raios X, ou raios X ou gama por uma fonte radioativa, excitam os elementos que constituintes, os quais, por sua vez, emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra. (NASCIMENTO, 1999)

Em resumo, essa técnica é baseada na medida das intensidades dos raios X característicos emitidos pelos elementos químicos componentes da amostra, quando devidamente excitada.

A análise química foi realizada no LABINSA, sendo utilizada a metodologia da pastilha com 30 mm de diâmetro e análise realizada no vácuo. O equipamento utilizado durante o ensaio foi o do fabricante *Bruker*, modelo S2 Ranger.

3.3.3.3 Difração de raio-X

A difração de raio X é uma das técnicas mais utilizadas para a caracterização microestrutural de materiais cristalinos. Essa técnica consiste em atingir a amostra com raios X, ao atingir o material os raios podem ser espalhados elasticamente, sem perda de energia pelos elétrons do átomo. O fóton de raios X emitidos após a colisão com elétrons mudam a sua trajetória, mantendo, porém, a mesma fase e energia no fóton incidente, desta forma a onda eletromagnética gerada é absorvida pelo elétron e reemitida, dessa forma, cada elétron atua como um centro emissor de raio X (CULLITY, 1978).

Dessa forma, se os átomos que eram esse espalhamento estiverem arranjados de maneira sistêmica, como uma estrutura cristalina, é possível verificar as relações de fase entre os espalhamentos tornam-se periódicas e que efeitos de difração de raios X podem ser observados em vários ângulos (CULLITY, 1978).

As amostras são preparadas como pastilhas (em formato semelhante a um disco), com o material proveniente do rompimento dos corpos de prova já triturado. Essa trituração foi realizada em parte de forma manual em parte com o auxílio de um moinho de esferas. Após a trituração, foi realizado o peneiramento desse material até a peneira de *mesh* 270. Esse material é então moldado com o auxílio de espátula, molde e uma peça de vidro.

Para o ensaio utilizou-se o difratograma modelo D2 Phaser – da Bruker) operando com radiação $K\alpha$ do Cu, 30 kV, 10 mA e com faixa de varredura 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).

3.3.3.4 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier

A Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) é o estudo da interação entre a matéria e a radiação eletromagnética, essa análise fornece evidências da presença de grupos funcionais presentes na estrutura de uma substância, podendo ser utilizada na identificação de um composto ou para a investigar sua composição química.

Dessa forma, busca-se através desta técnica, identificar o surgimento/desaparecimento de picos e bandas que apontem para a transformação ao aparecimento de novas fases durante o processo de envelhecimento de ambos os concretos (BICHINHO, 2019).

A amostra é preparada com o auxílio de uma balança de precisão, o material triturado (semelhante ao item 3.3.3.3) é disperso numa proporção de 1:100mg em Kbr, em seguida, essa mistura é pesada para a confecção de uma pastilha de 1.2cm de diâmetro, confeccionada com o auxílio de uma prensa.

Para a realização da análise das amostras através do FTIR, foi utilizado um espectrofotômetro IR Tracer 100, da marca Shimadzu, com os seguintes parâmetros de análise: Região 4000-400 cm^{-1} ; Resolução: 4 cm^{-1} ; N° acumulações: 40; Modo: transmitância.

3.3.3.5 TG- DSC

Termogravimetria (TG) é a técnica na qual a mudança da massa de uma substância é medida em função da temperatura enquanto esta é submetida a uma programação controlada.

Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) é a técnica na qual a diferença de temperatura entre uma substância e um material de referência é medida em função da temperatura enquanto a substância e o material de referência são submetidos a uma programação controlada de temperatura. Essa técnica é capaz de quantificar a energia envolvida nas reações.

O equipamento utilizado na análise termogravimétrica é basicamente constituído por uma micro balança, um forno, termopares e um sistema de fluxo de gás.

Para o estudo térmico dos concretos obtidos na pesquisa, foi realizado uma taxa de aquecimento de 10°C/min em atmosfera de argônio com fluxo de 100 mL/s em cadinho de platina com temperatura de análise de 20° C a 1200° C.

3.3.4 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

Com o objetivo de comparar o impacto causado por dois tipos de concreto (os geopoliméricos e os concretos à base de cimento Portland composto), determinou-se assim o volume de comparativo de 1m³ para um traço que forneça uma resistência teórica entre 30 MPa a 50 MPa. Lista-se a quantidade de material gasto para a confecção dos concretos nas Tabelas 02 e 03, então, através da Análise do Ciclo de Vida (ACV), compara-se os dois materiais através do software SimaPro®, para definir a melhor alternativa do ponto de vista da sustentabilidade. O impacto ambiental foi calculado através da estimativa das emissões em kg CO₂-eq para determinar o potencial sustentável de ambos materiais.

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 no banco de dados do software, esse processo levou em consideração apenas os impactos causados a partir da produção dos insumos necessários para a confecção de cada concreto até a sua produção final. O software então gera a rede da cadeia produtiva, expressando os resultados em kg CO₂-eq. Além disso, também com o uso do SimaPro® foi avaliada a demanda energética necessária para a produção de cada um dos concretos em MJ.

Para esse tipo de análise considera-se que os dois concretos têm a mesma vida útil, visto que o concreto desempenha sua função estrutural por longos prazos, sendo muito difícil quantificar a vida útil real do material e a forma como será descartado. Desse modo, para realizar uma ACV completa, ou cradle-to-tomb, seria necessário avaliar questões como as condições climáticas as quais os materiais seriam submetidos, por exemplo, o que dificultaria ou até mesmo impossibilitaria a realização desta análise em alguns casos, para o concreto é comumente utilizada a análise, chamado no âmbito internacional, cradle-to-gate. Nesta pesquisa, a avaliação foi realizada utilizando o Software SimaPro® 9.1.1.1 (2020), a base de dados Ecoinvent e os método IPCC 2013 GWP 100^a e Cumulative energy demand (CED).

O método IPCC 2013 GWP 100^a foi desenvolvido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC,

2015). Levando-se em conta a atual preocupação com as mudanças climáticas, este método quantifica o impacto ambiental em kg CO₂- equivalente.

Já o método Cumulative energy demand (CED) é usado para quantificar o uso direto e indireto de energia primeira em MJ por todo o ciclo de um produto ou processo, incluindo a energia consumida durante a extração, fabricação e descarte de materiais. Considera a demanda acumulada de energia para todas as fontes incluindo combustíveis fósseis, carvão mineral, gás natural, nuclear, biomassa, hidráulica, eólica e solar (MENOUI, 2011).

Para esta análise, além da demanda energética, será avaliada a fonte geradora de energia a fim de avaliar qual concreto se utiliza de fontes de energia renováveis e não renováveis. Para essa análise, será utilizado dois tipos de concreto geopolimérico, um deles onde os componentes vêm em sua totalidade do mercado da indústria química e outro onde parte dos componentes são sintetizados a partir de rejeitos da indústria utilizando como base o trabalho de Ferreira (2013) e Mothé (2004).

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1 Ensaio de compressão axial

A Tabela 6 e o Gráfico 2 abaixo apresentam o comparativo dos resultados das propriedades mecânicas dos CPs (Tradicional e de MAA) obtidos em diferentes idades, para cada idade, foram rompidos 5 corpos de prova de cada tipo de concreto.

Todos os corpos de prova foram mantidos em condições semelhantes, dentro do tanque de cura e em temperatura e pressão ambientes até 12 horas antes dos respectivos ensaios. A Figura 6 ilustra o procedimento do ensaio de resistência a compressão simples realizados para o concreto geopolimérico e para o concreto de cimento Portland.

Fora realizados 40 ensaios de rompimento de corpo de prova, 20 para o concreto convencional e 20 para o concreto geopolimérico, para 4 diferentes idades (7, 14, 21 e 28 dias).



Figura 6: Ensaio de compressão axial para o MAA (a) e para o concreto de cimento Portland(b)

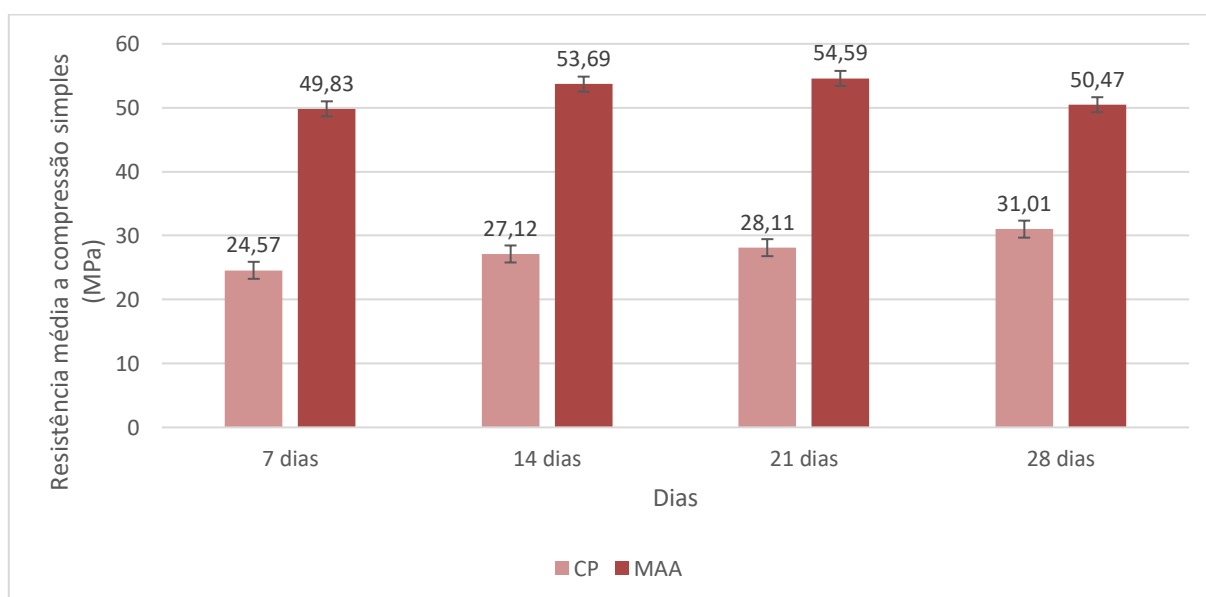
Fonte: (Autor, 2020).

Tabela 6: Resultados do ensaio de Resistência à Compressão Simples dos Concretos a base de cimento Portland e a base de MAA em função da idade.

ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL								
Material	CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND				CONCRETO GEOPOLIMÉRICO			
	7d	14d	21d	28d	7d	14d	21d	28d
Média (MPa)	24,57	27,12	28,11	31,01	49,83	53,69	54,59	50,47
Mediana (MPa)	24,94	27,10	28,06	30,70	50,48	54,21	55,94	49,39
Desvio padrão	0,903	0,869	0,75	0,567	8,248	3,751	7,979	3,325

Fonte: (Autor, 2018).

Gráfico 2: Resistência à Compressão Simples dos Concretos a base de cimento Portland e a base de MAA em função da idade.



Fonte: (Autor, 2018).

Como pode ser observado pelos dados da Tabela 6 e do gráfico 2, os corpos de prova (CP) foram ganhando resistência com o aumento da idade. Contudo, pode ser observado que o CP a base de MAA apresenta resistências elevadas logo nas primeiras idades (7 dias) quando comparado ao CP a base de Cimento Portland, que apresentou a resistência mínima esperada apenas com 28 dias.

Nota-se também, através dos valores do desvio padrão, uma grande variação das resistências dos corpos de provas do concreto geopolimérico quando comparados ao concreto de cimento Portland. Nota-se também uma diminuição na resistência a compressão do concreto

geopolimérico, diferente do concreto de cimento Portland que apresenta um comportamento crescente quanto ao ganho de resistência.

Neste sentido, é possível observar que o Concreto a base de MAA apresenta grande potencial de aplicação visto apresentar resistências elevadas com idades pequenas, favorecendo sua aplicação nas mais diversas configurações de obras, bem como uma grande viabilidade econômica visto a desforma antecipada.

4.2 Fluorescência de Raio-X

Tabela 7: Ensaio de fluorescência de raio X (óxidos) das amostras de concreto a base de cimento Portland.

ELEMENTOS	TEOR (%)			
	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
CaO	69,71%	70,70%	68,60%	68,91%
SiO ₂	18,39%	17,47%	19,77%	19,43%
Fe ₂ O ₃	5,68%	6,08%	6,31%	5,95%
SO ₃	3,36%	2,79%	2,10%	2,78%
K ₂ O	1,52%	1,62%	1,72%	1,59%
TiO ₂	0,76%	0,86%	0,82%	0,80%
ZnO	0,21%	0,11%	0,17%	0,14%
SrO	0,13%	0,13%	0,13%	0,12%
ZrO ₂	0,11%	0,11%	0,13%	0,12%
MnO	0,07%	0,07%	0,08%	0,08%
CuO	0,06%	0,06%	0,05%	0,05%
Ag ₂ O	0,00%	0,00%	0,10%	0,00%
V ₂ O ₂	0,00%	0,00%	0,03%	0,03%
Elementos Majoritários	Ca, Si;			
Elementos em pequeno percentual	Fe, S, K;			
Elementos traços	Ti, Zn, Sr, Mn, Cu, Ag, V			

Fonte: (Autor, 2021)

Observamos na tabela 7 (óxidos) os componentes característicos de materiais cimentícios, tendo como elementos majoritários o cálcio (Ca) e o Silício (Si) representando mais de 85% da amostra, essa característica é confirmada na tabela 9 (elementar). Nota-se em menor quantidade a presença de outros elementos, tais como Ferro (F), Enxofre (S) e Potássio (K), representando aproximadamente 10% da amostra, além disso, estão presentes na amostra traços de Ti, Zn, Sr, Mn, Cu, Ag e V.

Tabela 8: Ensaio de fluorescência de raio X (elementar) das amostras de concreto a base de cimento Portland.

ELEMENTOS	TEOR (%)			
	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
Ca	77,30%	77,57%	75,00%	76,17%
Si	11,08%	10,33%	12,32%	11,65%
Fe	6,98%	7,10%	7,54%	7,22%
K	1,80%	1,92%	2,04%	1,86%
S	1,12%	1,47%	1,50%	1,54%
Ti	0,80%	0,90%	0,85%	0,80%
Zn	0,30%	0,17%	0,23%	0,21%
Sr	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%
Zr	0,15%	0,14%	0,17%	0,16%
Ag	0,12%	0,00%	0,00%	0,00%
Mn	0,08%	0,09%	0,10%	0,09%
Cu	0,08%	0,09%	0,06%	0,07%
V	0,00%	0,03%	0,00%	0,04%

Fonte: (Autor, 2021)

Tabela 9: Ensaio de fluorescência de raio X (óxidos) das amostras de concreto geopolimérico.

ELEMENTOS	TEOR (%)			
	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
SiO ₂	55,70%	55,50%	60,76%	62,33%
Al ₂ O ₃	28,28%	29,07%	22,51%	23,29%
Fe ₂ O ₃	7,40%	7,86%	5,34%	5,63%
K ₂ O	3,24%	2,90%	3,40%	3,06%
CaO	1,99%	1,46%	4,88%	2,57%
TiO ₂	1,36%	1,68%	0,82%	1,38%
SO ₃	1,00%	0,83%	1,15%	1,26%
BaO	0,37%	0,00%	0,60%	0,00%
ZrO ₂	0,27%	0,28%	0,24%	0,17%
MnO	0,16%	0,17%	0,11%	0,10%
ZnO	0,10%	0,13%	0,05%	0,10%
NbO	0,05%	0,06%	0,03%	0,03%
SrO	0,05%	0,03%	0,08%	0,05%
CuO	0,02%	0,02%	0,02%	0,03%
Rb ₂ O	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%

Elementos Majoritários

Si, Al;

Elementos em pequeno percentual

Fe, K, Ca, Ti, S

Elementos traços

Ba, Zr, Mn, Nb, Sr, Cu, Rb

Fonte: (Autor, 2021)

Tabela 10: Ensaio de fluorescência de raio X (elementar) das amostras de concreto geopolimérico.

ELEMENTOS	TEOR (%)			
	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
Si	48,73%	48,31%	50,58%	54,70%
Al	23,40%	24,34%	17,21%	18,72%
Fe	13,50%	14,45%	11,38%	11,18%
K	6,22%	5,52%	6,75%	6,09%
Ca	3,45%	2,26%	9,64%	4,68%
Ti	2,26%	2,25%	1,80%	2,10%
S	0,94%	1,14%	1,15%	1,29%
Zr	0,61%	0,65%	0,62%	0,41%
Mn	0,32%	0,35%	0,30%	0,22%
Zn	0,23%	0,26%	0,07%	0,27%
Nb	0,13%	0,15%	0,09%	0,10%
Sr	0,12%	0,07%	0,24%	0,13%
Cu	0,06%	0,06%	0,07%	0,07%
Rb	0,03%	0,04%	0,05%	0,02%
Ag	0,00%	0,15%	0,05%	0,02%

Fonte: (Autor, 2021)

Para o concreto geopolimérico, podemos observar pela tabela 9 (óxidos) uma grande presença de silício (Si) e alumínio (Al), muito presentes no MAA em decorrência do material precursor utilizado, rico em SiO_2 e Al_2O_3 . Esse resultado é confirmado pelos dados da tabela 10 (elementar) que ainda destaca o Ferro (Fe) como elemento de grande presença no material.

Observa-se que o Si e o Al representam mais de 80% do material, e que o Fe, K, Ca, Ti e S representam em média 15% da amostra.

4.3 Difração de Raio-X

Como observado na figura 7, o concreto de cimento Portland é formado basicamente de Quartzo (SiO_2), Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), Gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Calcita (CaCO_3), Etringita ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) e Silicato de cálcio (Na_2SiO_3). Essas fases são encontradas com bastante frequência em amostras de concreto, compactuando com os resultados obtidos por Bichinho (2018) e Romano, (2016).

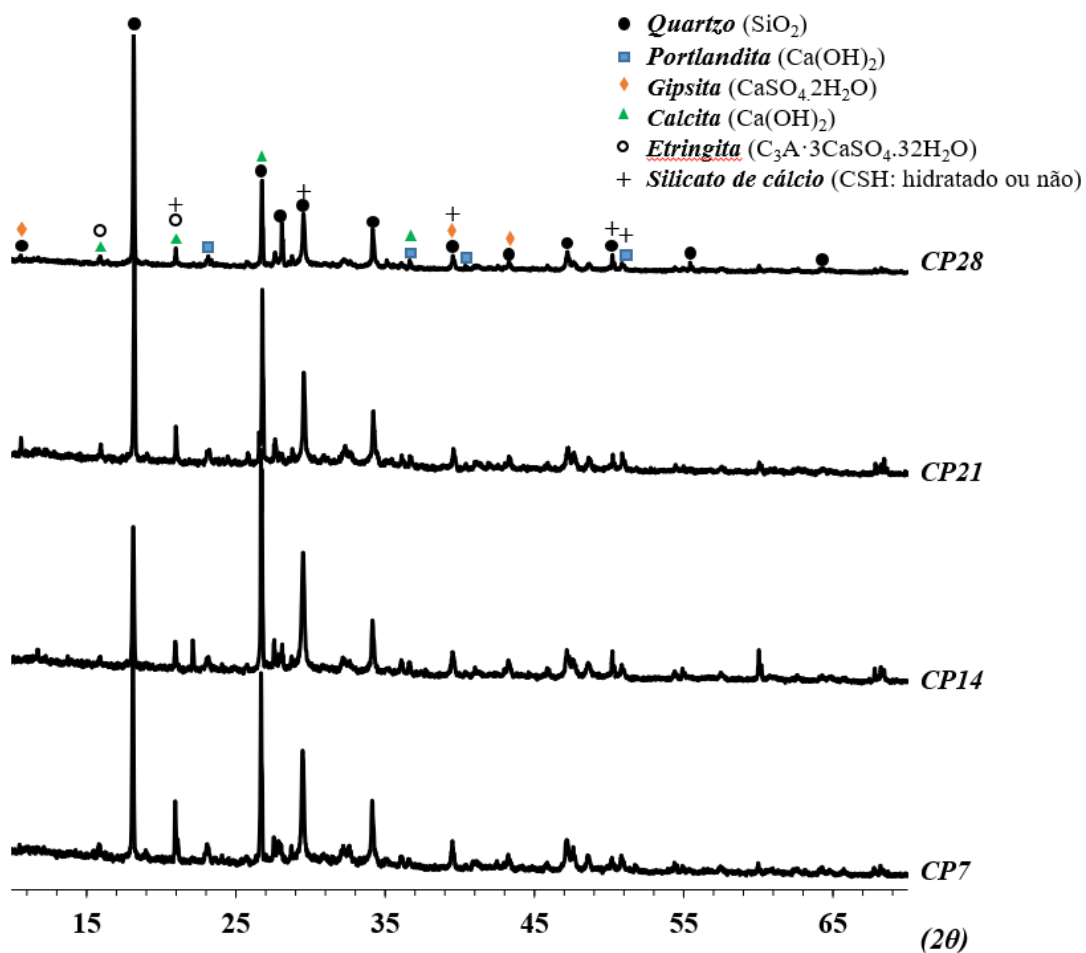


Figura 7: Resultado do DRX normalizado do concreto de cimento Portland.

Fonte: (Autor, 2021)

No difratograma (Figura 8) do concreto geopolimérico observamos o quartzo (SiO_2) como fase cristalina predominante, além disso, foram observadas fases características da Muscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$). Ainda segundo Boschi, Lote e Melchiades (2016), a presença de algumas fases cristalinas como o quartzo e a muscovita nos metacaulins afetam a sua reatividade na geopolimerização.

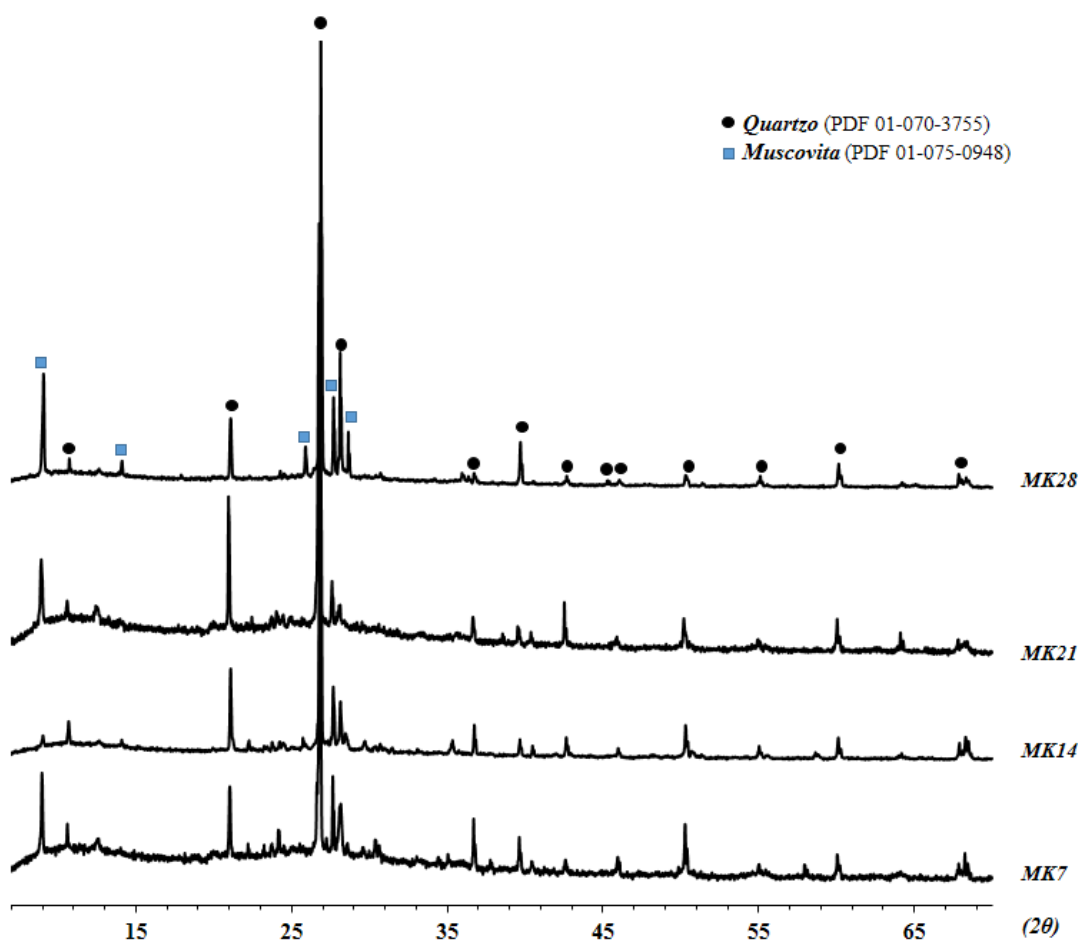


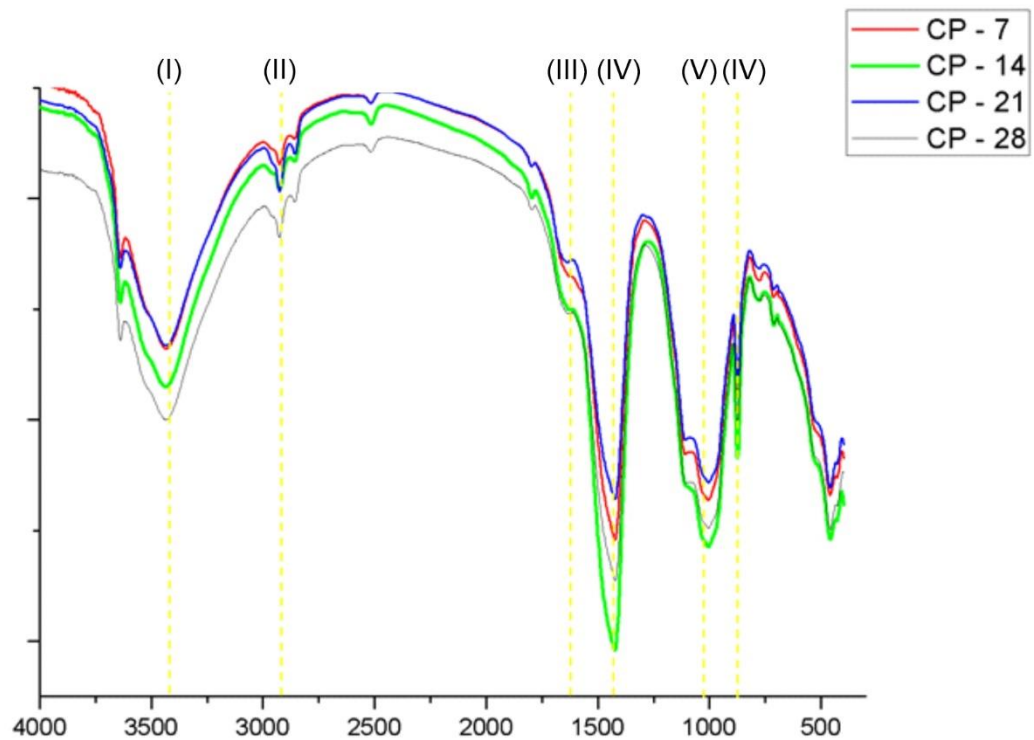
Figura 8: Resultado do DRX normalizado do concreto geopolimérico.

Fonte: (Autor, 2021)

4.4 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier

No gráfico 3, verifica-se que apresenta o espectro de FTIR gerado para os concretos à base de cimento Portland, pode-se observar os seguintes pontos identificados na literatura por Aguilar et al. (2014), João (2015) e Batista e Godinho (2017).

Gráfico 3: Análise FTIR para concreto à base de cimento Portland Tradicional.



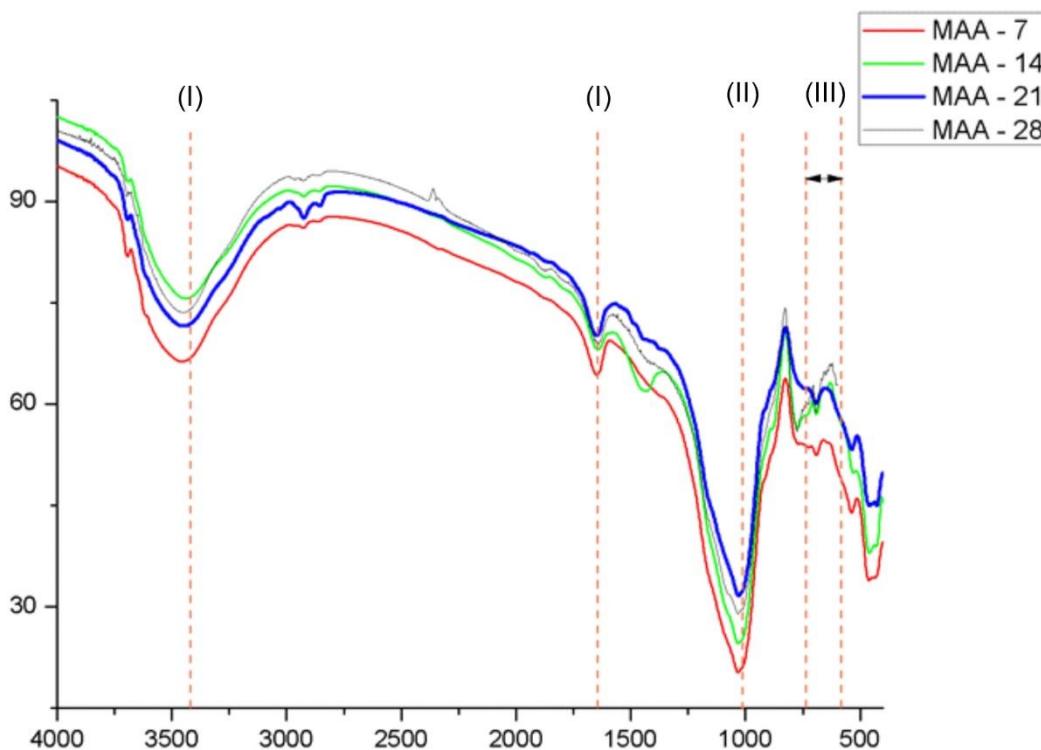
Fonte: (Autor, 2021)

- I. As bandas na ordem de 3470 cm^{-1} referentes à água constituinte e absorvida pelos silicatos de cálcio, com isso pode-se verificar que os concretos Portland hidrataram (PANZERA et al, 2010).
- II. Entre 2966 cm^{-1} e 2587 cm^{-1} a banda de CaCO_3 carbonato de cálcio, pode ser do calcário utilizado como matéria prima do cimento (TREZZA e LAVAT, 2001).
- III. A banda de 1677 cm^{-1} está associada às deformações referentes à fase etringita (TREZZA e LAVAT, 2001).
- IV. As bandas em 1419 , 1423 e 1421 cm^{-1} e as em 877 e 875 cm^{-1} são caracterizadas como o estiramento antissimétrico e a deformação angular C-O da calcita, respectivamente (BESSLER e RODRIGUES, 2008).

V. As bandas em 995, 1008 e 1.002 cm^{-1} são referentes às vibrações de alongamento Si-O (TREZZA, 2007).

Com Base em dados e informações coletados da literatura (AGUILAR et.al (2014)), pode-se destacar do gráfico FTIR (gráfico 4) do concreto geopolimérico que:

Gráfico 4: Análise FTIR para concreto geopolimérico



Fonte: (Autor, 2021)

- I. Bandas de 1.630-1.660 cm^{-1} e próximas a 3.400 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.
- II. Bandas entre 950-965 cm^{-1} representam a posição principal dos tetraedros de Si – O em todas as amostras.
- III. Picos em torno de 710 cm^{-1} indicam a formação de Al, um dos principais componentes do material alcalinamente ativado.

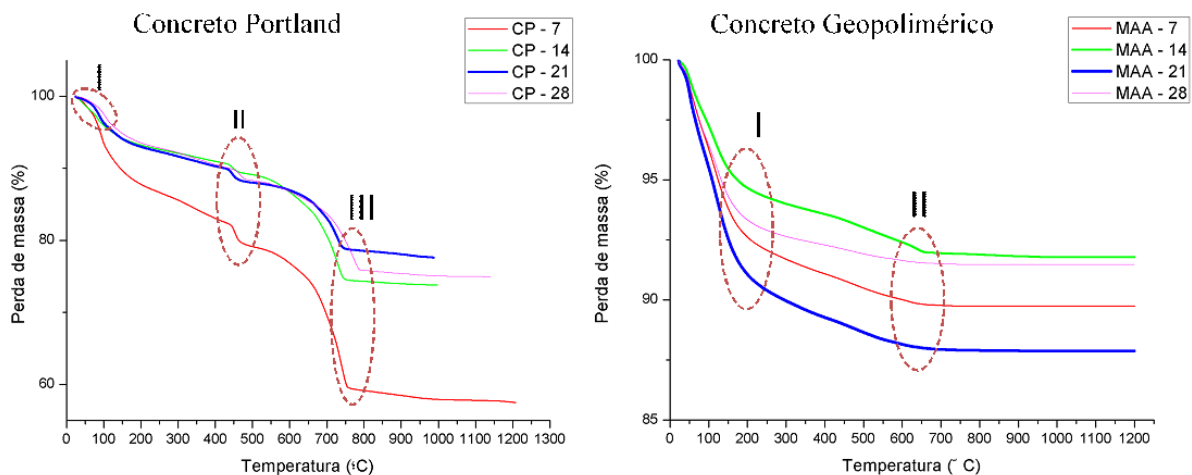
Apesar de algumas pequenas diferenças entre os picos, não se pode afirmar que houve aparecimento de novas fases do produto ou que houve intensificação de uma andá em relação a outra.

4.5 TG-DTA-DSC

A análise térmica nos apresenta um comportamento térmico estável dos concretos Portland e geopolimérico (Figura 9), todas as análises apresentam pontos de inflexão em temperaturas semelhantes, alterando-se apenas quanto ao percentual de massa perdida.

O concreto a base de cimento Portland segue um comportamento característico descrito por outros estudiosos (LIMA, 2019, BICHINHO, 2019):

- (I) Na faixa de temperatura inicial que vai até aproximadamente 150°, acontece a perda de massa que pode ser atribuída à evaporação de água livre do concreto, e da redução de fases hidratadas.
- (II) Na faixa de temperatura entre 400 e 500 °C também ocorre uma ligeira perda de massa.
- (III) Já a partir de 700 °C nota-se o comportamento estável das curvas indicando a estabilidade das transformações de fases até o término do ensaio (LIMA, 2019).



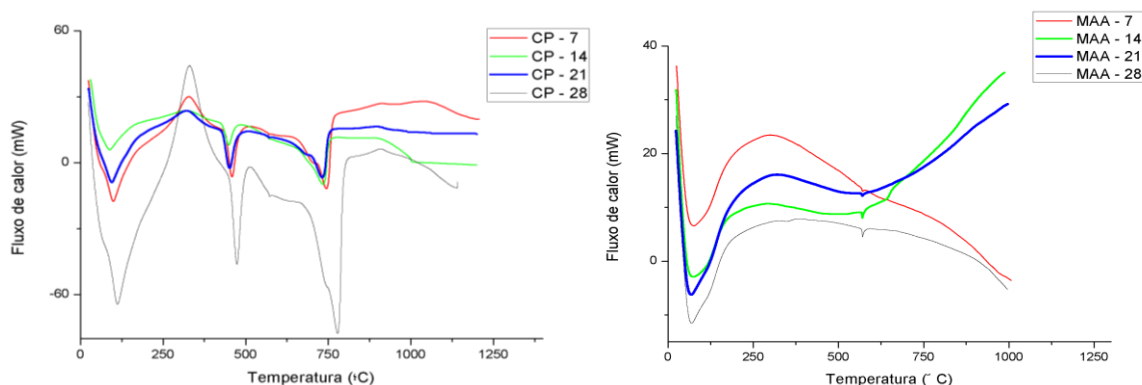


Figura 9: Análise térmica para concreto Portland e concreto geopolimérico.

Fonte: (Autor, 2021)

Para o comportamento do concreto geopolimérico:

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

Tabela 11: Perda de massa x temperatura.

TERMOGRAVIMETRIA (PERDA DE MASSA X TEMPERATURA)				
Concreto	Temperatura			
	Até 200°C	Até 500°C	Até 800°C	Até 1200°C
CP 7	14.60%	20.85%	40.80%	42.45%
CP 14	6.76%	10.86%	25.67%	26.19%
CP 21	7.02%	11.97%	21.43%	22.36%
CP 28	6.45%	11.67%	24.16%	25.03%
MAA 7	7.38%	9.50%	10.26%	10.26%
MAA 14	5.34%	6.98%	8.11%	8.21%
MAA 21	8.93%	11.34%	12.10%	12.12%
MAA 28	6.67%	8.08%	8.51%	8.52%

Fonte: (Autor, 2021)

Observa-se através da tabela 11 que, em geral, o concreto geopolimérico consegue manter melhor a sua massa em altas temperaturas, caso seja utilizado como material de proteção, o concreto geopolimérico pode apresentar melhor desempenho frente ao concreto de cimento Portland.

4.6 Avaliação de emissão de gases do efeito estufa e demanda energética

Com base nos quantitativos apresentados nas tabelas 12 e 13, é possível com a ajuda do software SimaPro® verificar as emissões em kg de CO₂-eq dos dois concretos analisados pelos métodos IPCC 2013 GWP 100a e CED.

Pode-se observar pela figura 13, que 97,17% das emissões de CO₂-eq são provenientes do uso do cimento Portland, e que os agregados (miúdo e graúdo) representam apenas 2,8% das emissões de CO₂-eq.

Tabela 12: Avaliação da emissão de gases de efeito estufa do concreto de cimento Portland pelo método IPCC 2013 GWP 100^a.

CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND	
MATERIAL	Kg-CO ₂ -eq
Cimento	279
Areia	1,60
Brita	6,34
Água	0,162
TOTAL	287,1

Fonte: Resultados retirados do software SimaPro® (2019).

Grande parte dessas emissões se deve ao processo de clínquerização do cimento descrito no ítem 2.3.3.

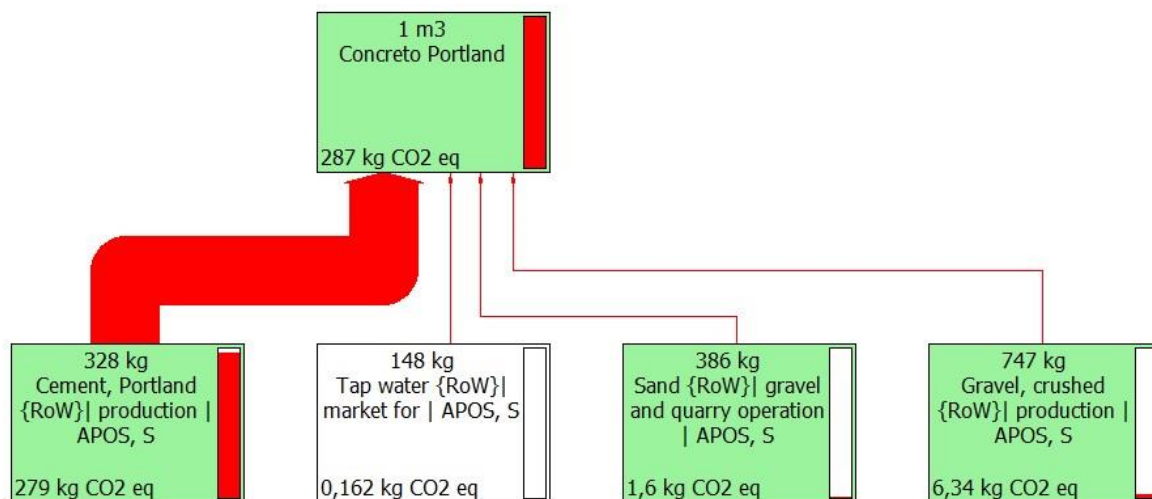


Figura 10: Fluxograma para concreto Portland.

Fonte: Adaptado de Simapro® 9.1.1.1, 2020

Já o concreto geopolimérico apresenta uma emissão de CO₂ – eq inferior ao concreto de cimento Portland como observado na tabela 13. Observamos que semelhante ao concreto geopolimérico, as maiores emissões de CO₂ – eq acontecem nos materiais ligantes (Metacaulinita, silicato de sódio e hidróxido de sódio), essa proporção fica evidente quando observamos a figura 11 gerada pelo software Simapro® 9.1.1.1 (2020).

Tabela 13: Avaliação do impacto ambiental do concreto Geopolimérico pelos métodos IPCC 2013 GWP 100^a e CED.

CONCRETO DE MAA	
MATERIAL	Kg-CO ₂ -eq
Metacaulinita	72,5
Silicato de sódio	40,1
Hidróxido de sódio	32,6
Água	0,191
Areia	4,59
Brita	4,87
TOTAL	154,86

Fonte: Resultados retirados do software SimaPro® (2021).

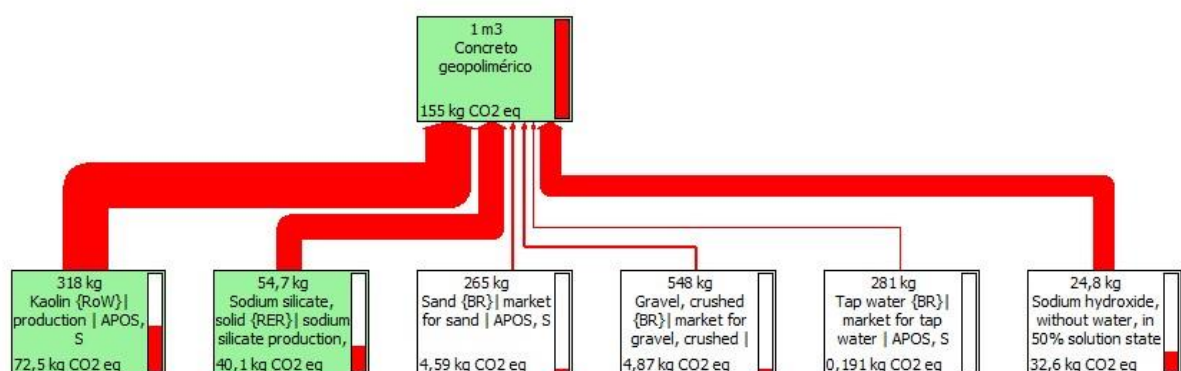


Figura 11: Fluxograma para concreto geopolimérico.

Fonte: Adaptado de Simapro® 9.1.1.1, 2020

Para o caso do concreto geopolimérico, os materiais ligantes representaram um total de 96% das emissões de CO₂ – eq, sendo a Metacaulinita representando 72,8% do total, o silicato

de sódio representando 40,1% das emissões e o hidróxido de sódio representando 32,6% do CO₂ – eq emitido por esse material.

Observa-se que o concreto geopolimérico, assim como esperado, apresenta uma menor emissão de CO₂ equivalente quando comparado com o Concreto a base de cimento Portland. Assim como mostrado na tabela 6, é importante ressaltar que os traços do concreto Portland e MAA da forma como estão, apresentam uma grande diferença de resistência média aos 28 dias (CP – 31.1MPa, MAA – 50.47MPa), sendo assim, para obtermos um concreto geopolimérico com uma resistência semelhante ao concreto de cimento Portland, poderíamos diminuir a quantidade de ligantes do MAA, o que iria impactar fortemente nas emissões de CO₂ – eq desse material.

Além da emissão de carbono, é importante observar o consumo energético para a produção de cada concreto. Nota-se através das tabelas 14 e 15 que os ligantes possuem a demanda energética mais representativa, superando 88% de toda a energia gasta para a produção de ambos com concretos.

Comparando os dois concretos, observamos que o cimento é o material de maior demanda energética dentre todos os outros, isso devido à temperatura requerida para o processo de clínquerização, que atinge temperaturas próximas a 1400°C. Porém, tratando-se de ligantes, o cimento apresenta uma demanda energética de apenas 1485,83 MJ, que é inferior aos 1869,41 MJ necessários para a produção de todos os ligantes do concreto geopolimérico.

Tabela 14: Demanda energética dos constituintes do concreto a base de cimento Portland.

Demanda energética do concreto Portland (MJ)		
Material	Energia	Percentual
Cimento	1485,83	88,4%
Agregado miudo	97,95	5,8%
Agregado graudo	95,77	5,7%
água	1,64	0,1%
Total	1681,19	

Fonte: Adaptado de Simapro® 9.1.1.1, 2020

Tabela 15: Demanda energética dos constituintes do concreto geopolimérico.

Demanda energética do concreto Geopolimérico (MJ)		
Material	Energia	Percentual
Metacaulinita	962,87	47,9%
Silicato de sódio	437,50	21,8%
Hidróxido de sódio	469,04	23,3%

Agregado miúdo	67,33	3,3%
Agregado graúdo	70,28	3,5%
água	3,11	0,2%
Total	2010,14	

Fonte: Adaptado de Simapro® 9.1.1.1, 2020

Alguns trabalhos, porém, apontam que a demanda energética do concreto geopolimérico é inferior a demanda energética do concreto a base de cimento Portland (Borges, 2014; Bichinho 2019). Isso se deve a novas técnicas de sintetização de ligantes para o concreto geopolimérico. Essas técnicas, em geral, utilizam temperaturas mais baixas para a síntese dos materiais, muitas vezes fazendo proveito de rejeito de outras indústrias.

Sendo o concreto geopolimérico um material em constante desenvolvimento, novas técnicas e estudo surgem a cada dia, visando trazer mais economia e mitigar possíveis impactos ambientais. Ferreira (2013) descreve em seu estudo uma técnica para obtenção de silicato de sódio por lixiviação a partir da cinza da casca de arroz. Além dele, Mothé (2004) descreve a forma de sintetizar metaculinita através da calcinação da caulinita com temperaturas entre 400°C e 650°C.

Utilizando os trabalhos de Ferreira (2013) e Mothé (2004) como base, é possível calcular a demanda energética de um concreto geopolimérico alternativo como apresentado na tabela 10. Esse concreto geopolimérico alternativo apresenta uma demanda energética inferior ao concreto geopolimérico convencional e se aproxima da demanda energética com concreto a base de cimento Portland.

Ressalta-se mais uma vez que a resistência do concreto geopolimérico deu aproximadamente 40% maior do que resistência do concreto de cimento Portland, dessa forma, a quantidade de ligantes poderia ser reduzida de modo a que esse concreto tivesse uma menor demanda energética.

Tabela 16: Demanda energética dos constituintes do concreto geopolimérico alternativo.

Demanda energética do concreto Geopolimérico alternativo (MJ)		
Material	Energia	Percentual
Metacaulinita	896,35	50,9%
Silicato de sódio	255,21	14,5%
Hidróxido de sódio	469,04	26,6%
Agregado miudo	67,33	3,8%
Agregado graudo	70,28	4,0%
água	3,11	0,2%

Total**1761.33**

Fonte: Adaptado de Simapro® 9.1.1.1, 2020

Além da demanda energética, é importante analisar as fontes geradoras de energia de para cada tipo de concreto como apresentado na Tabela 17. Semelhante ao concreto a base de cimento Portland, o concreto geopolimérico tem como sua principal fonte de energia os combustíveis fósseis.

Sendo ainda um material em desenvolvimento, o concreto geopolimérico pode ter uma evolução voltada para a redução do consumo energético bem como a mudança da sua matriz que geração, que semelhante ao concreto a base de cimento Portland, é baseada nos combustíveis fósseis.

Tabela 17: Fontes de energia para a produção de concreto.

Fontes de energia de cada concreto			
 FONTE	 CP	 MAA	 MAA (ALTERNATIVO)
Combustível Fóssil	80.0%	81.4%	78.8%
Energia Nuclear	1.6%	8.8%	10.0%
Biomassa (não renovável)	0.0%	0.0%	0.0%
Biomassa (renovável)	11.1%	4.3%	5.1%
Eólica/solar	0.5%	1.1%	1.1%
Energia derivada da água	6.8%	4.4%	5.0%
Fontes de Energia não renováveis	81.6%	90.2%	88.8%

Fonte: Adaptado de Simapro® 9.1.1.1, 2020

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÃO

Conclui-se o presente trabalho ressaltando a superioridade do concreto geopolimérico frente ao concreto tradicional, tanto no tocante às suas características mecânicas, físicas e químicas, quanto do ponto de vista da emissão de GEE.

Através do ensaio de compressão axial notamos que o concreto geopolimérico apresenta uma grande resistência inicial, ao passo que o concreto Portland só atinge a resistência desejada após os 28 dias. Além disso, quando comparamos as resistências aos 28 dias, notamos uma superioridade na resistência do concreto geopolimérico na ordem de 38,5%.

Através do ensaio de fluorescência de raio X observamos os principais elementos que compõem ambos os concretos, elementos esses que são comumente encontrados nesses tipos de material, tais como Silício, Cálcio, alumínio e ferro. Esse ensaio além de contribuir para a caracterização do material, serve de guia para os demais ensaios de caracterização.

No DRX notamos o surgimento das fases que são normalmente observadas nesse tipo de material, dessa forma, confirmamos os resultados do DRX e contribuímos de forma afirmativa para a caracterização química e mineralógica de ambos os materiais.

Nas análises referentes à espectroscopia com transformada de Fourier (FTIR) e a termogravimetria (TG), observa-se a estabilidade microestrutural de ambos os concretos nas duas condições apresentadas. Além disso, podemos observar claramente que o concreto geopolimérico suporta altas temperaturas muito melhor do que o concreto a base de cimento Portland. Essa vantagem pode ser refletida em ganho econômico, uma vez que garante uma maior vida útil e uma maior proteção das armaduras em uma situação de incêndio. Em todas as idades, notamos que mais de 85% do material do concreto geopolimérico permanece presente, por outro lado, essa característica não é observada em nenhuma das idades do concreto convencional, que tem o seu melhor desempenho aos 21 dias.

Por fim, a quantificação das emissões de GEE e da demanda energética do concreto Portland e do concreto geopolimérico ressaltou o grande ganho do ponto de vista ambiental que o MAA pode trazer para a indústria da construção civil.

As emissões de CO₂-eq do concreto geopolimérico são 47% menores em comparação com o concreto tradicional, se esses números forem extrapolados para uma escala mundial de consumo, podem significar uma redução significativa do impacto ambiental provocado pela indústria da construção civil. Além disso, esse material está evoluindo e sendo estudado por

diversos pesquisadores já citados anteriormente por esse trabalho, o que pode representar em um rápido desenvolvimento desse concreto e em uma diferença de emissões de CO₂-eq ainda maior em relação a solução convencional.

Para o traço utilizado, o concreto Portland apresentou uma demanda energética 16.36% menor em comparação com o concreto geopolimérico e 4.5% menor em comparação com o concreto geopolimérico alternativo. Ressalta-se que o concreto geopolimérico apresentou uma resistência mecânica mais de 35% superior ao concreto Portland, dando a entender que para um traço de MAA com uma resistência mecânica menor e com uma menor quantidade de ligantes o concreto geopolimérico poderia se mostrar um material mais atrativo do ponto de vista energético.

Tanto o concreto geopolimérico quanto o concreto a base de cimento Portland apresentam uma matriz energética baseada em combustíveis fósseis. Sendo o concreto geopolimérico um material em desenvolvimento, esse desenvolvimento pode envolver uma mudança em sua matriz energética visando fontes mais limpas de geração de energia.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- I. Através do ensaio de TG-DTA observou que o concreto geopolimérico apresentou uma resistência maior a altas temperaturas, desse modo, recomenda-se que este material seja submetido a mais ensaios térmicos, com o objetivo de avaliar melhor a sua capacidade de isolamento e resistência térmica.
- II. O concreto geopolimérico não possui nenhum método de dosagem específico, o que geralmente apresenta-se como primeiro obstáculo pra pesquisadores que buscam estudar esse material, desse modo, seria de grande importância o estudo de um método de dosagem para esse concreto.
- III. Diferente do concreto a base de cimento Portland, o concreto geopolimérico não está bem desenvolvido como material estrutural na indústria da construção civil brasileira, muito disso se deve à falta de normatização desse material, desse modo, recomenda-se como proposta de trabalho uma normativa básica para esse material.
- IV. Além de normativas e métodos de dosagem, é importante que esse material seja testado nos mais diversos tipos de estrutura a fim de avaliar o seu potencial construtivo, tanto do ponto de vista executivo, quanto do ponto de vista financeiro.
- V. O concreto convencional além do uso estrutural, tem uma função protetiva para outros elementos, como por exemplo uma estrutura de aço, sendo assim, um estudo voltado para o uso desse concreto geopolimérico como material de proteção pode apresentar bons resultados.

REFERÊNCIAS

ABRANTES, Rafael de Carvalho Costa. Elaboração e análise de viabilidade de projeto arquitetônico unifamiliar com conceitos sustentáveis integrados. Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2017.

ABRANTES, R.C.C.; JUNIOR, P.R.O.C.; BRANCO, M.A.; GOMES, K.C; CARVALHO, M. Pegada de carbono como ferramenta para alcançar a sustentabilidade na construção: estudo de caso em uma fundação de uma residência unifamiliar, II Congresso Luso-brasileiro de Materiais de Construção Sustentável, UFPB, 8, 2016.

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.

ANDOLFATO, Rodrigo Piernas. Controle tecnológico básico do concreto. Universidade estadual paulista “Júlio de Mesquita Filho”. – Ilha solteira – 2002.

ARNAUD, Bárbara K. Lacerda. Avaliação de desempenho de blocos pré-moldados de material alcalinamente ativado aplicado ao telhado verde. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2018.

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: 25 jan. 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro. 2006

BARBOSA, V.F.F.; MACKENZIE, K.J.D.; THAUMATURGO, C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. International Journal of Inorganic Materials 2 (4):309–317. (2000).

BATISTA, Maurício Alves; GODINHO, Daiane dos Santos da Silva. Avaliação da resistência residual de concretos submetidos a elevadas temperaturas por meio de análise macro e microestrutural. Artigo submetido ao Curso de Engenharia Civil da UNESC - como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Civil. 2017.

BENHALAL, E. et al. Global Strategies and Potentials to Curb CO2 Emissions in Cement Industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 51, p. 142-161, jul. 2013.

BICHINHO, Melina Cavalcanti de Melo. Avaliação do desempenho ambiental, energético, mecânico e microestrutural de estruturas de concretos sustentáveis submetidas a ambiente marinho. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2019

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, abr./jun. 2014.

BOSCHI, A.; LOT, A.; MELCHIADES, F. Efeito das características das matérias-primas de partida no desempenho de geopolímeros. 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2016. Águas de Lindóia, SP.

BRAGANÇA, L.; MATEUS, R. Análise do ciclo de vida de construções metálicas. In I Congresso Luso-africano de Construção Metálica Sustentável, Luanda, Angola, 2012.

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.

CO, D. Cimento Portland versus ligantes geopoliméricos. *Terra*, 1997. Disponível em: <<http://www.geopolymer.com.br>>

CRIADO, M.; PALOMO, A.; Fernandez-Jimenez, A. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. *Fuel* 84 (2005) 2048–2054.

CULLITY, B. D. Elements of x-ray diffraction. Second edition. Department of Metallurgical Engineering and Materials Science University of Nôtre Dame. 1978.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal Of Thermal Analysis*, Saint-Quentin, v. 37, n. 8, p.1633-1656, ago. 1991.

DAVIDOVITS, J. “Properties of Geopolymer Cements”, 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev, 1994.

DIAS, D.P.; THAUMATURGO, C. Avaliação da aderência entre barras lisas de aço e concretos geopoliméricos. *CEP*, v. 22, p. 270, 2001.

EDWARDS, B. Rough guide to sustainability. 3ª Ed. RIBA Enterprises, Londres, 2009.

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

GRAEDEL, T.E. Streamlined Life-Cycle Assessment. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 310p

HABERT, G; D'ESPINOSE DE LACAILLERIE, J.B; ROUSSEL, N. An Environmental Evaluation of Geopolymer Based Concrete Production: reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 11, p. 1229-1238, 2011.

HABERT, G. et al. Cement Production Technology Improvement Compared to Factor 4 Objectives. *Cement and Concrete Research*, v. 40, n. 5, p. 820-826, 2010.

HAUSCHILD, M.Z. Assessing Environmental Impacts in a Life Cycle Perspective. *Environmental Science and Technology*, v. 39, n.4, p. 81A-88A, 2005.

HENRIQUE, P.; BORGES, R.; 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). n. Cp II, p. 153–168, 2014.

IPCC, Intergovernmental panel on climate change: Organization. 2015. Informação obtida em <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>.

IPCC , Intergovernmental panel on climate change: 2013. Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol. 2013. Informação obtida em <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/>.

IPCC, Intergovernmental panel on climate change. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/index.htm>>. Acesso em: 14 de dezembro de 2018.

KRIVENKO, P. Alkali-Activated Aluminosilicates: past, present and future. *Chemické Listy*, v. 102, p. s265-s277, 2008.

LIMA, André Barbosa de. O processo produtivo do cimento Portland. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizontal, 2011.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. CONCRETO. Microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo – IBRACON. 2008.

MENEZES, H. A. F. ; CARVALHO, M. ; FREIRE, R. S. . IDENTIFICAÇÃO DE BOAS PRÁTICAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA NA PARAÍBA. In: 10º Congresso Internacional de Bioenergia, 2015, São Paulo. Anais do 10º Congresso Internacional de Bioenergia, 2015.

MENOUFI, K. A. I, 2011. Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment methodologies: A state of the art. Tese de Mestrado, Universitat de Lleida, Escola Politècnica Superior.

MOHAMMED, Siline. Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: A review. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 140, p.10-19, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.078>.

MOLINA, Júlio Cesar; JÚNIOR, Armando Lopes Moreno. Considerações de interesse sobre a

avaliação em laboratório de elementos estruturais em situação de incêndio: contribuições à revisão da NBR 5628:2001. Porto Alegre, v. 12, n. 4, p. 37-53, out./dez. 2012.

MOTHÉ, Leonardo Paes. Avaliação das condições ideais para a produção de metacaulinita através da análise da sua atividade pozolânica. Dissertação de mestrado apresentada ao centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro- UENF Campos dos goytacazes – Rio de Janeiro – 2004.

NASCIMENTO, Virgílio F. Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios x por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF). Lab. de Instrumentação Nuclear/CENA - julho/1999.

ROMANO, R. C. O. et al. Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita. Cerâmica. São Paulo, vol.62, n.363, pp.215-223. 2016.

SCHNEIDER, M. et al. Sustainable Cement Production: present and future. Cement and Concrete Research, v. 41, n. 7, p. 642-650, 2011.

SIMAPRO – Life cycle assessment software. 2020. Informação obtida em <https://network.simapro.com/pre/>, em março de 2016.

EcoInvent v3.6 Database. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, Switzerland, 2019.

SNIC, Sindicato Nacional da Industria do Cimento. Relatório sobre produção anual de cimento Portland. 2018.

TEKLAY, Abraham; YIN, Chungen; ROSENDAHL, Lasse. Flash calcination of kaolinite rich clay and impact of process conditions on the quality of the calcines: A way to reduce CO 2 footprint from cement industry. Applied Energy, [s.l.], v. 162, p.1218-1224, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.127>.

TOSTA. L. I.; SOUZA, A. C.; ROGÉRIO, J. S. Gestão Da Energia Na Produção De Cimento Portland Com Uso De Mineralizadores E Combustíveis Alternativos. Xxvii Encontro Nacional De Engenharia De Produção, p. 10, 2007.

VAN OSS, H. G.; PADOVANI, A. C. Cement Manufacture and the Environment: part II: environmental challenges and opportunities. Journal of industrial Ecology, v. 3, n. 1, p. 93–126, 2003.

WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B.; SILVA, C. A. da. Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais. Production, v. 23, n. 2, p. 436–447, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132013000200016&lng=pt&tlng=pt>.

TEKLAY, Abraham; YIN, Chungen; ROSENDAHL, Lasse. Flash calcination of kaolinite rich clay and impact of process conditions on the quality of the calcines: A way to reduce CO 2 footprint from cement industry. Applied Energy, [s.l.], v. 162, p.1218-1224, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.127>.

TOSTA, L. I.; SOUZA, A. C.; ROGÉRIO, J. S. Gestão Da Energia Na Produção De Cimento Portland Com Uso De Mineralizadores E Combustíveis Alternativos. Xxvii Encontro Nacional De Engenharia De Produção, p. 10, 2007.

VAN OSS, H. G.; PADOVANI, A. C. Cement Manufacture and the Environment: part II: environmental challenges and opportunities. *Journal of industrial Ecology*, v. 3, n. 1, p. 93–126, 2003.

WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B.; SILVA, C. A. da. Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais. *Production*, v. 23, n. 2, p. 436–447, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132013000200016&lng=pt&tlng=pt>.