



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> POR ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV) E  
DESEMPENHO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS PARA CONSTRUÇÕES  
SUSTENTÁVEIS

ANA FLÁVIA SOUZA FOUREAUX

BELO HORIZONTE  
2015

ANA FLÁVIA SOUZA FOUREAU

AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> POR ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV) E  
DESEMPENHO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS  
PARA CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS

CEFET-MG  
2015

FOUREAUX, Ana Flávia Souza.

S---

Avaliação da emissão de CO<sub>2</sub> por Análise do Ciclo de Vida (ACV) e Desempenho de Argamassas Geopoliméricas para Construções Sustentáveis/ Ana Flávia Souza Foureaux. – Registro: 2015

72f.; -- cm

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Ribeiro Borges

Co-Orientador: Dr. Conrado de Souza Rodrigues

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental e Sanitária)  
– Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2015

1. Geopolímeros 2. Durabilidade 3. Emissão de CO<sub>2</sub> 4. Análise do Ciclo de vida, Foureaux, I. Ana Flávia Souza. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Avaliação da Emissão de CO<sub>2</sub> por Análise do Ciclo de Vida (ACV) e Desempenho de Argamassas Geopoliméricas para Construções Sustentáveis.

ANA FLÁVIA SOUZA FOUREAUX

AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> POR ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV) E  
DESEMPENHO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS PARA CONSTRUÇÕES  
SUSTENTÁVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Centro Federal de Educação  
Tecnológica de Minas Gerais como requisito  
parcial para obtenção do título de  
Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Professor Dr. Paulo Henrique Ribeiro Borges  
Co-Orientador: Professor Dr. Conrado de Souza Rodrigues

BELO HORIZONTE  
2015

ANA FLÁVIA SOUZA FOUREAUX

AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> POR ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV) E  
DESEMPENHO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS PARA CONSTRUÇÕES  
SUSTENTÁVEIS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação  
Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de  
Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Data de aprovação: 13/11/2015.

Banca Examinadora:



---

Prof. Dr. Paulo Henrique Ribeiro Borges– Orientador

---

Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues– Co-Orientador

---

Prof. Dra. Hersília de Andrade e Santos

---

Prof. Me. Evandro Carrusca de Oliveira

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por iluminar meu caminho, me abençoando e permitindo que eu alcance meus objetivos.

Aos meus pais por toda dedicação e amor incondicional, por valorizarem a minha educação e me incentivarem sempre.

A minha família pelo apoio, torcida e carinho.

Aos meus amigos pelos momentos alegres, difíceis, de muito estudo e de muitas conquistas, especialmente a Ana Paula e a Naiara. Aos amigos do grupo de pesquisa dos professores Paulo Borges e Conrado Rodrigues: Fê, Rê, Stefan e Thuany, que estiveram comigo e me ajudaram ao longo da iniciação científica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Henrique Ribeiro Borges, pelo imprescindível e valioso apoio prestado, da confiança, dedicação e ensinamentos.

Ao meu Co-orientador Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues pela solicitude, apoio e confiança em todas as fases de todo o trabalho.

Ao CEFET-MG e a todos os professores do Departamento Ciência e Tecnologia Ambiental a minha gratidão pelos ensinamentos, dedicação e convivência.

A empresa Metacaulim do Brasil Ltda pela doação do metacaulim, a empresa IBEC pela doação da escória granulada de alto forno e a empresa Diatom Brasil pela doação do hidróxido de sódio e silicato de sódio.

A FINEP pelo financiamento do software Umberto fundamental para este trabalho.

FOUREAUX, Ana Flávia Souza; *Avaliação da emissão de CO<sub>2</sub> por Análise do Ciclo de Vida (ACV) e Desempenho de Argamassas Geopoliméricas para Construções Sustentáveis*. 2015. 72f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

## RESUMO

Este trabalho aborda o efeito do teor de silicato de sódio e a adição da escória de alto forno (EAF) sobre as propriedades mecânicas, durabilidade e impacto ambiental (emissão de CO<sub>2</sub>) nas argamassas geopoliméricas à base de metacaulim (MC). A argamassa de referência (REF), confeccionada com 100% de MC, foi comparada a argamassas acrescidas de 40% de EAF, ou seja, 60/40 MC / EAF que contém diferentes razões molares de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> / NaOH na solução ativadora. As propriedades avaliadas foram resistência à compressão, porosidade (saturação de água), distribuição de tamanho dos poros por porosimetria de intrusão de mercúrio (MIP) e capilaridade por absorção de água. A microestrutura foi avaliada utilizando a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados mostram que a adição de EAF contribuiu para o desenvolvimento da resistência mecânica e promoveu redução da porosidade, permeabilidade e redução do uso do silicato de sódio na solução ativadora. Além disso, uma proporção ótima de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> / NaOH na solução ativadora produz melhores resultados em propriedades relacionadas com a durabilidade das argamassas geopoliméricas, bem como um menor impacto ambiental na emissão de CO<sub>2</sub> contribuindo assim para a diminuição de cerca de 17 % na emissão desse gás, o qual foi quantificado utilizando a ferramenta de análise do ciclo de vida.

FOUREAUX, Ana Flávia Souza; *Evaluation of CO<sub>2</sub> Emission for Life Cycle Analysis (LCA) and Geopolimetric Mortars Performance for Sustainable Buildings*. 2015 72p. Monograph (Degree in Environmental and Sanitary Engineering) - Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

### **ABSTRACT**

This work studies the effect of sodium silicate content and addition of blast furnace slag (BFS) on the mechanical properties, durability and environmental impact (CO<sub>2</sub> emission) of geopolimetric mortars based on metakaolin (MK). A reference mortar made with 100% MK was compared with 60/40 MK / BFS mortars containing different % wt.ratios of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> / NaOH in the activator solution. The properties evaluated were compression strength, porosity (water saturation), pore size distribution by mercury intrusion porosimetry (MIP) and capillary sorption. The microstructure was evaluated using scanning electron microscopy (SEM). The results show that the addition of BFS contributed to the development of mechanical strength and up to around 47 MPa and promoted a reduction in porosity, capillary sorption, as well as a reduced demand for sodium silicate in the activator solution, thus contributing to lower CO<sub>2</sub> emissions. Furthermore, an optimal ratio of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> / NaOH in the activator solution is required to produce better durability properties as well as a lower environmental impact (CO<sub>2</sub> emissions), the latter quantified using a Life Cycle Assessment software.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Malha tridimensional de átomos de silício e de alumínio .....	19
Figura 2 - Produção do NaOH.....	21
Figura 3 - Distinção da formação entre os géis N-A-S-(H) e C-A-S-H.....	26
Figura 4 - Mistura homogeneizada da argamassa geopolimérica. ....	36
Figura 5 - Moldagem do corpo de prova na fôrma cúbica. ....	37
Figura 6 - Ensaio de resistência à compressão. ....	38
Figura 7 - Fronteira do sistema e processos considerados para a ACV nesse trabalho.....	41
Figura 8 - Fluxograma para 100% MC (REF) .....	43
Figura 9 - Fluxograma 60/40 (MC/EAF).....	45
Figura 10 - Resistência mecânica à compressão X $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ .....	50
Figura 11 - Porosidade aparente.....	51
Figura 12 - Porosidade aparente por absorção de água e MIP .....	51
Figura 13 - Distribuição do tamanho dos poros das argamassas geopoliméricas obtidos com o ensaio MIP .....	53
Figura 14 - Volume acumulado MIP.....	54
Figura 15 - Porcentagem de macro e mesoporos de acordo coma relação.....	56
Figura 16 - Resultado da absorção de água nas argamassas geopoliméricas .....	57
Figura 17 - Microestrutura REF: (a) SEI a 5000x; (b) BSE a 5000x; (c) BSE a 1000x; (d) mapeamento de elementos a 1000x .....	58
Figura 18 - Microestrutura G5: (a) SEI a 5000x; (b) BSE a 5000x; (c) BSE a 1000x; (d) mapeamento de elementos a1000x .....	59
Figura 19 - Microestrutura G3: (a) SEI a 5000x; (b) BSE a 5000x; (c) BSE a 1000x; (d) mapeado de elementos a1000x .....	60
Figura 20 - Resistência à compressão X Emissão de $\text{CO}_2$ .....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química das matérias primas da matriz geopolimérica. ....	34
Tabela 2 - Formulações estudadas.....	35
Tabela 3 - Resultados MIP.....	55
Tabela 4 - Quantidade de cada matéria prima (kg) para REF e G1 a G5.....	61
Tabela 5 - Emissão de CO <sub>2</sub> para cada quantidade determinada previamente de matéria prima .....	61
Tabela 6 - Relação da emissão de CO <sub>2</sub> com as propriedades de durabilidade das formulações: REF, G2 e G3.....	64

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	Objetivos.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Cimento Portland e questões ambientais .....	17
2.2	Geopolímeros como materiais alternativos ao cimento Portland.....	18
2.2.1.	Principais matérias primas utilizadas na produção de geopolímero .....	21
2.2.1.1.	Soluções ativadoras .....	21
2.2.1.2.	Precusores sem cálcio – formação do gel N-A-S-H .....	22
2.2.1.3.	Precusores contendo cálcio – formação do gel C-A-S-H .....	24
2.2.1.4.	Sistemas mistos: ativação de metacaulim com escórias de alto forno .....	27
2.3	Análise do ciclo de vida (ACV).....	27
2.4	Técnicas de caracterização de argamassas geopoliméricas .....	29
2.4.1.	Comportamento mecânico - Resistência à compressão.....	29
2.4.2.	Absorção de água e porosidade aparente .....	30
2.4.3.	Porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) .....	31
2.4.4.	Absorção de água por capilaridade.....	32
2.4.5.	Caracterização microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	32
3	METODOLOGIA .....	34
3.1	Materiais utilizados .....	34
3.2	Formulações estudadas .....	34
3.3	Produção dos geopolímeros .....	35
3.4	Caracterização física e mecânica .....	37
3.5	Caracterização microestrutural .....	39
3.5.1	Porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) .....	39
3.5.2.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por energia de dispersão.....	40
3.6	Análise do Ciclo de Vida das Argamassas Geopoliméricas .....	40
3.6.1	Unidade funcional.....	40
3.6.2	Premissas e limites da ACV .....	40
3.6.3	Montagem dos fluxogramas .....	41
3.6.4	Software utilizado para a ACV .....	46

3.6.5	Dados de emissão de CO <sub>2</sub> utilizados nas entradas do software Umberto 5.5 para a ACV das argamassas REF e G1 a G5 .....	46
3.6.5.1	Emissão de CO <sub>2</sub> para os agregados finos .....	46
3.6.5.2	Emissão de CO <sub>2</sub> para as fontes de aluminossilicato MC e EAF .....	47
3.6.5.3	Emissão de CO <sub>2</sub> para a solução ativadora .....	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	49
4.1	Propriedades mecânicas e relacionadas a durabilidade das argamassas geopoliméricas estudadas .....	49
4.1.1	Resistência à compressão .....	49
4.1.2	Absorção de água e Porosidade aparente.....	50
4.1.3	Porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) .....	51
4.1.4	Absorção por capilaridade.....	56
4.1.5	Caracterização microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS).....	57
4.2	Impacto ambiental das argamassas geopoliméricas .....	60
4.3	Emissões de CO <sub>2</sub> relacionadas com a resistência à compressão.....	62
5	CONCLUSÃO .....	65

## 1 INTRODUÇÃO

Com a finalidade de buscar alternativas para minimizar a emissão de gases contribuintes para o efeito estufa, estudos voltados para questões ambientais são cada vez mais demandados. Muitas pesquisas de âmbito científico e tecnológico estão sendo desenvolvidas para encontrar possíveis substituintes para o cimento Portland objetivando diminuir os impactos ambientais negativos da indústria da construção civil.

O cimento Portland é um dos materiais mais utilizados na construção civil, devido a sua grande aplicabilidade em diversas fases da construção. Entretanto, o crescente consumo desse material vem causando preocupações em relação à elevada quantidade de emissão de gás carbônico durante o seu processo de fabricação. Uma das alternativas ao cimento Portland, amplamente estudada nas últimas três décadas, é o cimento geopolimérico. Esta família de materiais é produzida pela ativação alcalina de aluminossilicatos naturais, resíduos industriais ou de mineração e apresentam características específicas que contribuem para o seu grande potencial como aglomerante em substituição ao cimento Portland (SILVA *et al.*, 2002). Esses materiais podem oferecer grandes vantagens em termos de resistência mecânica (FERNÁNDEZ-JIMENEZ *et al.*, 2006) e durabilidade química (PALOMO *et al.*, 1999), bem como a aplicação de resíduos provenientes de outras atividades. A principal vantagem ecológica é a redução da emissão de dióxido de carbono para a atmosfera na etapa de produção dos geopolímeros, quando comparada com a emissão oriunda da fabricação cimento Portland (SILVA, 2000, *apud* FREITAS, 2007). Esses benefícios oferecem potenciais e perspectivas para aplicações do geopolímero no futuro.

Uma fonte de aluminossilicato amplamente utilizada na confecção dos geopolímeros é o metacaulim (MC). A escolha dessa matéria prima baseia-se na sua abundância, principalmente no Brasil. Além disso, esse material se destaca pelo fato de ser uma fonte amorfa de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . A ativação alcalina desse material, praticamente isento da presença de cálcio, produz uma matriz composta por um gel de  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  (NASH), também descrita como gel geopolimérico.

Outra matéria prima normalmente utilizada como fonte de aluminossilicato para produção de geopolímeros é a escória granulada de alto forno (EAF), a qual é muito utilizada nas matrizes cimentícias de cimento Portland por suas vantagens

técnicas, tais como elevação da resistência mecânica em longo prazo, redução do calor de hidratação e boa durabilidade em meios agressivos (LOTTHENBACH *et al.*, 2011). A EAF também promove vantagens na produção de geopolímeros. Por ser rico em CaO em sua composição, a ativação alcalina de escórias produz um gel  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  (CASH), assemelhando-se com a composição dos silicatos de cálcio hidratados em matrizes de cimento Portland (C-S-H) (YIP *et al.*, 2005). A ativação de aluminossilicatos ricos em cálcio pode apresentar vantagens em relação à ativação de um aluminossilicato isento de cálcio, tais como a aceleração das reações (BUCHWALD *et al.*, 2009), melhor resistência residual após exposição a alta temperatura, bem como uma melhoria significativa na resistência mecânica (BERNAL *et al.*, 2011).

Alguns estudos, como este trabalho, propõem o uso de ambas as fontes de aluminossilicato (MC e EAF) para a confecção de geopolímeros objetivando conciliar as vantagens provenientes do gel C-A-S-H e do gel N-A-S-H. Bernal *et al.*, (2011, 2012) estudaram vários geopolímeros contendo tanto MC e EAF, relatando os benefícios dessa mistura, porém, as propriedades mecânicas e relacionadas a durabilidade só foram abordados para pequenas inclusões de MC (até 20%) em EAF ativado. Quantidades mais elevadas de EAF em argamassas, bem como uma menor quantidade silicato na solução ativadora pode ser de interesse especial, pois com a mistura desses dois aluminossilicatos pode-se esperar uma redução de silicato de sódio na solução ativadora o que pode trazer benefícios ambientais, haja visto que este ativador desempenha um papel importante nas emissões de  $\text{CO}_2$  em geopolímeros (MCLELLAN *et al.*, 2011).

Este trabalho compara a argamassa geopolimérica com 100% de MC (aqui denominada de argamassa de referência ou (REF) com demais argamassas constituídas por uma mistura de 60/40 MC/EAF (60% MC e 40% EAF em massa) com foco nas propriedades e avaliação da emissão de  $\text{CO}_2$  das diferentes formulações. Entre as argamassas 60/40 MC/EAF são estudadas diferentes quantidades de silicato de sódio, reduzindo, assim, a proporção  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  global da solução ativadora a partir de 2,0 para 1. A microestrutura, propriedades mecânicas e relacionadas a durabilidade são apresentadas, e a avaliação da emissão de  $\text{CO}_2$ , será discutida não só para as formulações com resistência semelhante, mas também para a matriz com melhores propriedades relacionadas a durabilidade.

Para um resultado mais preciso sobre essa questão ambiental, é necessário o uso de técnicas que permitem realizar a mensuração real dos impactos associados à produção da argamassa geopolimérica. Uma dessas técnicas é a Análise do Ciclo de Vida (ACV), a qual é uma ferramenta de gestão ambiental, normatizada pela ISO 14.040 (ABNT, 2009). Essa ferramenta tem como foco de análise os impactos ambientais evidenciando as etapas mais críticas no processo de fabricação de um produto considerando desde a obtenção das matérias primas até o produto final. Essa avaliação mais criteriosa das etapas de produção e dos potenciais impactos ambientais negativos, que se obtêm analisando os resultados da ACV, auxilia nas tomadas de decisões, na identificação de oportunidades para melhoria da eficiência ambiental do produto em vários pontos de sua fabricação e na seleção de indicadores de desempenho ambiental (ABNT, 2009).

Apesar do emprego crescente de ACV para materiais de construção, percebeu-se ao longo da pesquisa uma falta de informação sobre a relação entre o impacto ambiental e as propriedades relacionadas a durabilidade das matrizes. Em outras palavras, a ACV é amplamente realizada utilizando resistência mecânica, como parâmetro de comparação, mas não leva em conta que este parâmetro não garante, necessariamente, durabilidade alongo prazo, o que é essencial na metodologia ACV e o que será considerado nesse trabalho.

## 1.1 **Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar propriedades de desempenho e avaliação da emissão de CO<sub>2</sub> de argamassas geopoliméricas confeccionadas com metacaulim e metacaulim com escória granulada de alto forno, visando possível aplicação como materiais de construção. São objetivos específicos deste trabalho:

- Realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre geopolímeros, dando ênfase aos benefícios ambientais da utilização desses materiais;
- Analisar efeito da substituição parcial de metacaulim por escória de alto forno na matriz do geopolímero, no que diz respeito às propriedades mecânicas, físicas e relacionadas a durabilidade;

- Avaliar a emissão de CO<sub>2</sub> das argamassas geopoliméricas estudadas utilizando a ferramenta da análise do ciclo de vida dando subsídios para a escolha de materiais de construção mais duráveis e com menor emissão de CO<sub>2</sub>.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Cimento Portland e questões ambientais

O cimento Portland é o material de construção civil de maior utilização no mundo. A sua produção global vem aumentando continuamente e em 2013 foi superior a 4 bilhões de toneladas (CIMENTO, 2013). O Brasil chegou ao final de 2013 com 2,4% de crescimento em relação ao ano anterior, atingindo 71 milhões de toneladas consumidas em todo o território nacional. Isso significou um consumo per capita de 353 kg/hab.ano, o que representou a maior marca de toda a história (SNIC,2013). Como consequência desse aumento contínuo da produção do cimento Portland, as indústrias cimenteiras estão enfrentando desafios ambientais relacionados às emissões de CO<sub>2</sub>.

O crescimento descontrolado do efeito estufa vem provocando grandes mudanças climáticas na Terra, as quais ajudam a aumentar a incidência das catástrofes ambientais. Dessa forma, a emissão de gases que contribuem para potencializar o aquecimento global é responsável pela maior frequência desses desastres ecológicos. Dentre os gases que mais contribuem para esse fenômeno destaca-se o CO<sub>2</sub>, pelo volume que é gerado em diversas atividades, representando cerca de 60% do total de gases emitidos à atmosfera (TORGAL *et al.*, 2005).

Pouco mais da metade das emissões de CO<sub>2</sub> da indústria cimenteira ocorre durante a decarbonatação do calcário (CaCO<sub>3</sub>), que ao ser submetido a altas temperaturas (aproximadamente 1500°C) junto a argila nos fornos rotativos, produz o clínquer, principal componente do cimento Portland. A Equação 1 mostra esta reação; observa-se que para a produção de uma tonelada de clínquer são geradas 0,55 toneladas de CO<sub>2</sub> (TORGAL *et al.*, 2005). A outra parcela, de 0,39 toneladas de CO<sub>2</sub>, é resultante da queima de combustíveis fósseis no forno rotativo, onde a chama atinge uma temperatura de até 2.000 °C (SNIC, 2009). Desse modo, para a produção de 1 tonelada de clínquer é gerada aproximadamente 1 tonelada de CO<sub>2</sub>, fazendo com que as indústrias cimenteiras sejam responsáveis por cerca de 5% do total de gás carbônico proveniente de atividades antropogênicas (WORRELL *et al.*,2001).



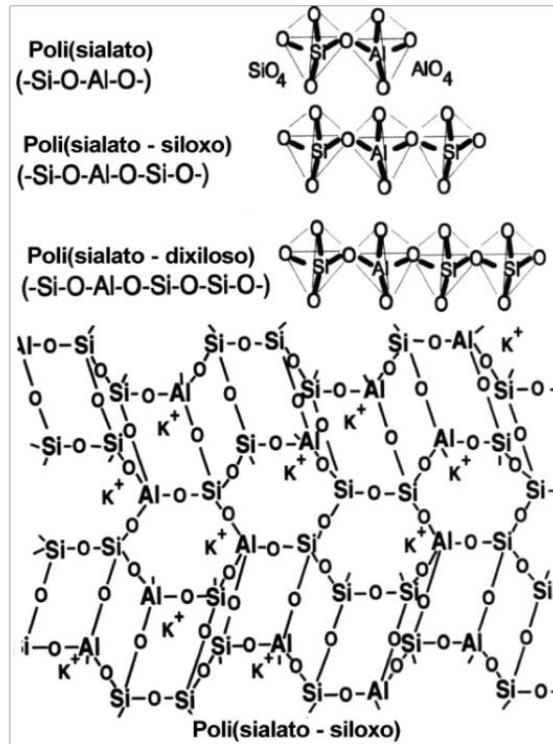
Existem algumas tecnologias amplamente difundidas que buscam a redução de emissões de CO<sub>2</sub> durante o processo produtivo do cimento. Dentre elas destaca-se o co-processamento de resíduos como plásticos, tintas e pneus, os utilizando como combustíveis alternativos, de acordo com a DN 154/2010, na queima nos fornos rotativos. As principais vantagens dessa alternativa são a correta destinação final dos resíduos e a redução da utilização dos combustíveis não renováveis (CEMENT TECHNOLOGY ROADMAP, 2009). Além disso, parte do clínquer pode ser substituído por materiais suplementares como, por exemplo, escórias de alto forno, cinzas volantes, pozolanas naturais e fíleres calcários, originando assim os chamados cimentos compostos, com efetiva redução da emissão de CO<sub>2</sub>. As cimenteiras, em nível mundial, conseguiram atingir em 2010 uma média de emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzida 20% menor comparada com suas produções em 1990, simplesmente utilizando-se dessa substituição do clínquer por materiais suplementares (SCHNEIDER *et al.*, 2011).

## 2.2 Geopolímeros como materiais alternativos ao cimento Portland

Os geopolímeros são aluminossilicatos álcalis-ativados, ou seja, um ou mais materiais constituídos por SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em proporções suficientes e forma reativa (como cinzas volantes, argilas, pozolana e escórias) ativados por uma solução alcalina aquosa contendo, por exemplo, hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) ou silicato de potássio (K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) (BUCHWALD, 2011). O processo de polimerização depende de meio altamente alcalino para que ocorra a ligação polimérica Si-O-Al-O, formando uma malha tridimensional em que os átomos de silício alternam com os de alumínio em coordenação tetraédrica, compartilhando os oxigênios. Esse processo é descrito na Equação 2, na qual: “M” é o elemento alcalino; o símbolo “-” representa as ligações; “z” pode ser 1, 2 ou 3 e “n” é o grau de polimerização (BUCHWALD; *et al.*, 2011). O produto formado pode ser considerado uma rocha sintética que difere em composição dependendo da relação molar Si/Al, podendo então ser denominado de polisialato, poli (sialato-siloxo) ou poli (sialato-dixiloso), como mostra a Figura 1.



**Figura 1 - Malha tridimensional de átomos de silício e de alumínio**



Fonte: DAVIDOVITS (1994)

O termo “geopolímero” foi idealizado no final da década de 70, pelo pesquisador francês Joseph Davidovits. Segundo Davidovits (1991), os geopolímeros são polímeros porque se transformam, polimerizam e endurecem a temperaturas relativamente baixas chegando a até 80°C. Além disso, são materiais naturais de origem inorgânica; daí a denominação “geopolímero”.

A partir das primeiras publicações dos resultados obtidos por Davidovits no início dos anos 90, os geopolímeros vêm sendo extensivamente estudados em diversas partes do mundo, hoje se destacando as pesquisas na Espanha, Austrália e Reino Unido (STRUBLE *et al.*, 2013).

As propriedades dos geopolímeros estão diretamente relacionadas à natureza dessas matérias primas iniciais. Entretanto, as características macroscópicas dos geopolímeros confeccionados com diferentes fontes de aluminossilicatos são semelhantes. A relação entre os materiais influencia nas propriedades do

geopolímero ainda no estado fresco, interferindo assim na viscosidade da mistura, o que afeta, conseqüentemente, as propriedades mecânicas do compósito (KOMNITSAS, 2007). Dependendo das condições de síntese e cura, os geopolímeros podem atingir valores de resistência à compressão da ordem de 70 a 100 MPa ao final de 28 dias, sendo que uma significativa resistência (em torno de 20 MPa) é adquirida nas primeiras quatro horas (DAVIDOVITS, 1994), (TEIXEIRA PINTO, 2004).

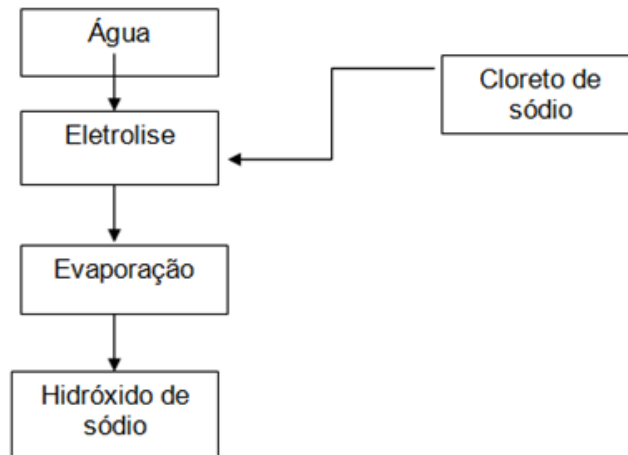
Além dessas características de resistência e temperatura de cura, os geopolímeros, se comparados com aos compostos a base de cimento ou cerâmicos, apresentam outras vantagens: (i) não são susceptíveis às reações expansivas do tipo álcali-agregados, comuns aos concretos confeccionados com cimento Portland (DAVIDOVITS, 1994); (ii) possuem baixos valores de permeabilidade que favorecem sua durabilidade e também aplicação na imobilização de resíduos tóxicos (TEIXEIRA PINTO, 2004) (iii) resistência às altas temperaturas, o que permite desenvolvimento de estruturas mais resistentes à ação do fogo (KONG; SANJAYAN, 2010) (iv) possui ótima durabilidade química e estabilidade a ambientes de baixo pH, devido a não presença de cálcio em sua composição química (BORGES *et al.*, 2013); (v) simples tecnologia de manufatura (BAKHAREV, 2005a, 2005b).

O processo de geopolimerização é iniciado pela etapa de dissolução, que ocorre quando a solução alcalina entra em contato com o aluminossilicato sólido (pó bastante fino). Esta etapa é caracterizada por alta alcalinidade proveniente da solução ativadora de silicato de sódio, que destrói as ligações dos aluminossilicatos e favorece a formação de compostos que, com o passar do tempo, endurecem ganham resistência mecânica assim como os cimentos tradicionais à base de cimento Portland. Ainda fazendo uma analogia aos materiais de construção à base de cimento Portland, agregados miúdos e graúdos naturais (areias e britas) também podem ser adicionados à matriz geopolimérica, para assim desenvolver o que são chamados de argamassas e concretos geopoliméricos.

## 2.2.1. Principais matérias primas utilizadas na produção de geopolímero

### 2.2.1.1. *Soluções ativadoras*

**Figura 2 - Produção do NaOH**



Fonte: Elaborado pela autora

O processo de geopolimerização inicia-se pela etapa de dissolução, que ocorre quando a solução alcalina ativadora entra em contato com o aluminossilicato sólido. Em muitas pesquisas o hidróxido de sódio (NaOH) tem sido utilizado como parte da dessa solução, ao invés do hidróxido de potássio (KOH) pelo fato de o hidróxido de sódio ter um custo de produção mais baixo, o que praticamente define sua escolha. O NaOH é preparado principalmente por métodos eletrolíticos, usando-se solução aquosa de cloreto de sódio, conhecida como salmoura (SILVA, 2012). O processo produtivo simplificado do NaOH pode ser observado na Figura 2.

A utilização de outro componente na solução ativadora é necessário para garantir a presença de  $\text{SiO}_2$  solúvel, o que contribui com a aceleração de reação e garante alta resistência mecânica nas primeiras horas. Para tal, têm-se utilizado soluções aquosas de silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Essa solução é obtida inicialmente pela dosagem e mistura mecânica de carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e sílica ( $\text{SiO}_2$ ). Em seguida, a mistura passa por uma fusão na faixa de temperatura entre 1.100 e 1.200 °C, produzindo um sólido amorfo (TURNER, 2014). Essa fase é caracterizada por elevada emissão de gases efeito estufa e alto consumo energético. O produto é então introduzido em autoclaves, submetido à alta pressão e, em contato com água,

resulta em uma solução aquosa de silicato de sódio (FAWER *et al.*, 1999). O silicato de sódio utilizado em grande parte das pesquisas de geopolímeros é uma solução aquosa com 37% de sólidos e com razão em massa de 3.3 ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ).

#### 2.2.1.2. *Precursores<sup>1</sup> sem cálcio – formação do gel N-A-S-H*

Diversos aluminossilicatos e resíduos ricos em sílica e alumina podem ser utilizados na produção de geopolímeros. Várias pesquisas, no entanto, têm utilizado como matérias primas as cinzas volantes, escórias de alto forno, e diversos tipos de argilas calcinadas, destacando-se os caulins calcinados, mais conhecidos como metacaulins. Nas últimas décadas, entretanto, o interesse pela reciclagem de resíduos tem crescido cada vez mais devido à ampla discussão em torno dos problemas ambientais. Com o objetivo de tornar o geopolímero um material mais sustentável, têm-se utilizado como fonte de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  resíduos provenientes de outras atividades, sejam como material ligante ou parte substituinte do mesmo (NUNES, 2015).

Conforme dito anteriormente, uma das matérias primas mais utilizada na confecção dos geopolímeros é a cinza volante, proveniente da combustão do carvão mineral pulverizado, utilizado em usinas termelétricas. Este sub produto é coletado por meio da precipitação eletrostática ou captação mecânica, gerado na combustão do carvão mineral nas centrais termoelétricas durante a produção de vapor e ou energia (ROCHA JUNIOR *et al.*, 2012). As cinzas volantes possuem sílica e alumina em forma amorfa na sua composição, sendo assim altamente reativas na produção de geopolímeros, resultando em materiais de excelente resistência mecânica e alta durabilidade em meio ácido (HARDJITO *et al.*, 2005). A maioria das pesquisas mundiais em geopolímeros ainda utilizam cinzas volantes como matéria prima, haja visto também a grande disponibilidade deste material em diversos países. De modo geral, geopolímeros confeccionados com cinzas volantes apresentam excelente resistência mecânica e alta resistência a sulfatos, bem como a reações expansivas do tipo álcali-agregado, tendo desempenho bastante superior àqueles confeccionados com cimento Portland (HARDJITO *et al.*, 2005), (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2007).

---

<sup>1</sup>Precursores é o nome dado aos materiais em pó (aluminossilicatos e / ou outros resíduos) que serão ativados pelas soluções alcalinas.

Em outros casos, a matéria prima empregada é a metacaulinita, também conhecida comercialmente por metacaulim. Este material é produzido a partir das argilas naturais caulínicas (caulins). A caulinita é um mineral cristalino de granulometria fina, geralmente de cor branca e de boa inércia química. A produção do metacaulim inicia-se com a avaliação de reservas e depósitos de argilas caulínicas, sendo esta etapa seguida da lavragem do material nas minas. Depois de ser lavrado, o caulim resultante do desmonte é coletado por gravidade, em uma cava e em seguida bombeado para a usina de beneficiamento, onde se deve garantir uma composição química favorável à sua aplicação. Após a secagem do material, parte-se para a etapa de calcinação. Neste processo, caracterizado pelo maior consumo energético, normalmente se emprega uma temperatura entre 600°C e 900°C durante 2 horas, dependendo da natureza do material (MOTA *et al.*, 2006 *apud* NETTO, 2006). Durante este processo ocorre a desidroxilação da caulinita (perda de íons OH<sup>-</sup> da estrutura cristalina original), o que dá origem a um silicato de alumina de estrutura amorfa (Equação 3) (MOTHÉ, 2004 *apud* NETTO, 2006). Durante a queima, o mineral perde aproximadamente 14% de sua massa inicial. Como pode ser observado ainda na Equação 3, um dos produtos da calcinação realizada para obtenção do metacaulim é a água, diferentemente da calcinação do clínquer na produção de cimento Portland, que tem como produto um gás de efeito estufa, o CO<sub>2</sub>. Isso torna o metacaulim, em termos ambientais, uma matéria prima de grande potencial. Além disso, o metacaulim típico é composto por 50-55% de SiO<sub>2</sub> e 40-45% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, o que favorece seu emprego como matéria prima de geopolímeros (RASHAD, 2013).



O metacaulim pode ser um aluminossilicato amplamente utilizado na confecção dos geopolímeros devido à relativa facilidade de obtenção, porém seu custo de beneficiamento varia consideravelmente, dependendo da qualidade da matéria prima. Além disso, caulins muito puros têm um mercado reservado para aplicações bastante nobres (indústria cerâmica, papelreira etc.), tornando-se assim inviáveis para a produção de geopolímeros devido ao alto custo. Em outras palavras, o emprego de metacaulinita na produção de geopolímeros está condicionada à

disponibilidade de um material de custo mais reduzido, o que está normalmente associado a uma matéria prima menos pura ou de menor qualidade.

Ainda assim, geopolímeros produzidos com metacaulinita podem desenvolver alta resistência mecânica; porém normalmente isto depende da concentração da solução ativadora (C.Y. HEAH *et al.*, 2013) e temperatura de cura inicial elevada nas primeiras 24 horas (ROVNANÍK, 2010). A cura térmica e necessidade de maior quantidade de ativadores podem comprometer o desempenho ambiental de geopolímeros, o que será visto com mais detalhe ao longo deste trabalho.

Algumas cinzas volantes e metacaulins possuem um baixíssimo teor de cálcio em sua composição; por conseqüência estes materiais dão origem a matrizes geopoliméricas sem a presença de cálcio, que podem ter sua composição generalizada como sendo do tipo  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  ou simplesmente de N-A-S-(H). O sódio presente nesse gel pode ser substituído em 100% por potássio (K) caso a solução ativadora utilizada na confecção do geopolíméromo seja à base desse elemento químico (BERNAL, 2014). Além disso, esse gel é representado com o H (representando  $\text{H}_2\text{O}$ ) entre parênteses para enfatizar que dentre os seus componentes, a água não é um elemento estrutural representativo comparado aos demais, formando assim uma estrutura com poucos poros (BERNAL, 2014).

Os géis N-A-S-(H) são mais duráveis química e termicamente, haja visto que a ausência de cálcio torna os materiais menos solúveis em meios ácidos e mais resistentes à temperatura (BERNAL *et al.*, 2011)

. Outros benefícios provenientes desse gel é o tempo reduzido da reação de condensação e conseqüentemente, rápido desenvolvimento da resistência mecânica nas primeiras horas de cura térmica.

### 2.2.1.3. *Precursores contendo cálcio – formação do gel C-A-S-H*

Os aluminossilicatos contendo cálcio também podem ser álcali-ativados, sendo o mais comum deles a ativação alcalina de escórias de alto forno. Na verdade, a ativação de escórias já havia sido estudada há muitos anos na Ucrânia pelos pesquisadores Krivenko e Gluckowsky, antes mesmo que Davidovits criasse o termo “geopolíméromo”.



A escória de alto forno é um produto da produção do ferro gusa, que é a principal matéria prima do aço. Esse material é formado pela presença de impurezas no minério de ferro durante o processo de fusão desse material com a adição de fundentes, calcário e dolomita, bem como as cinzas do coque. A escória fundida é separada do ferro gusa por apresentarem diferentes densidades, sendo conduzida por canais até os granuladores onde será resfriada bruscamente por meio de jatos de água sob alta pressão (ARCELORMITTAL, 2010). Esse processo ocorre rapidamente evitando a formação de cristais, "vitrificando" a escória que adquire potencial cimentício, recebendo o nome de Escória Granulada de Alto Forno ou BFS (*blast furnace slag* em inglês).

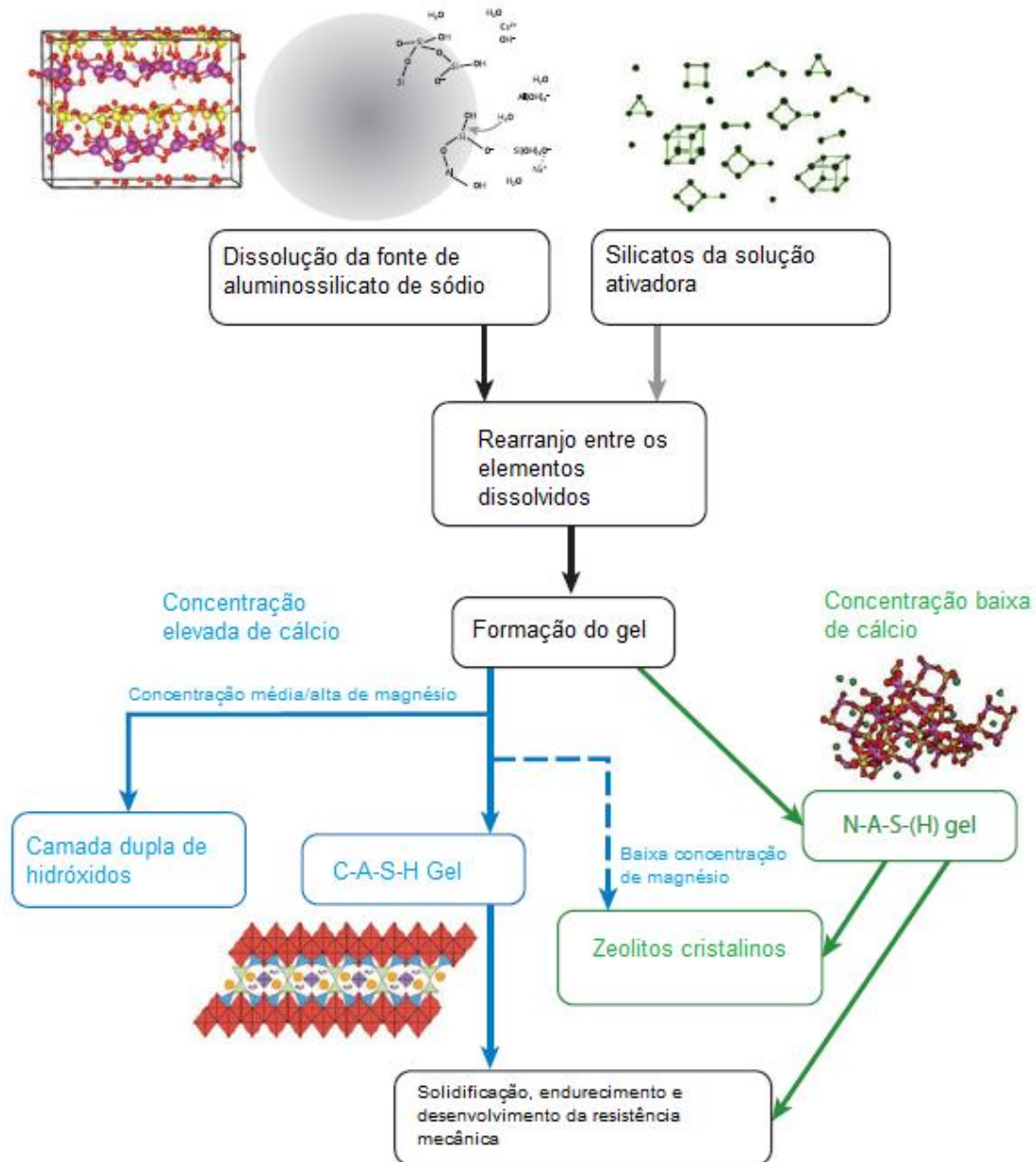
As pesquisas realizadas demonstram que ao confeccionar geopolímeros usando apenas a escória como fonte de aluminossilicato, os produtos da reação são bastante parecidos com aqueles do cimento Portland. Isso ocorre devido ao fato da escória granulada de alto forno possuir aproximadamente 45% de cálcio na sua composição, formando assim o gel C-A-S-H(CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O), que é semelhante aos silicatos de cálcio hidratados produzidos na hidratação do cimento Portland (BERNAL,2014).

Ao contrário do gel N-A-S-(H), a água presente no gel C-A-S-H se encontra em quantidade significativa, ou seja, representa um volume significativo na estrutura do material. Dessa forma, estes materiais possuem baixa resistência à temperatura, já que os hidratos se decompõem a temperaturas da ordem de 200 °C. Outro ponto negativo é a menor durabilidade química do composto, visto que o compostos à base de cálcio são mais solúveis e, quando exposto à ambientes ácidos, se decompõe facilmente(BERNAL,2014). A presença de cálcio, por sua vez, aumenta a resistência mecânica do geopolímero à temperatura ambiente, dispensando a cura térmica para desenvolvimento de resistência nas primeiras idades.

Logo, pode-se perceber que a ativação alcalina de materiais contendo cálcio, como, por exemplo, as escórias de alto forno, apresentam vantagens e desvantagens. No que diz respeito a questões ambientais, a ativação de aluminossilicatos com cálcio é de certa forma vantajosa, haja visto que (i) reduz a demanda por ativadores alcalinos e (ii) dispensa a cura térmica(MCLELLAN *et al.*2011). Sob o ponto de vista de durabilidade química e térmica, no entanto, a presença de hidratos de cálcio, com conseqüente formação dos géis C-A-S-H, não é

vantajosa. A distinção da formação entre os géis N-A-S-(H) e C-A-S-H pode ser observada na Figura 3 que se segue.

**Figura 3 - Distinção da formação entre os géis N-A-S-(H) e C-A-S-H**



#### 2.2.1.4. *Sistemas mistos: ativação de metacaulim com escórias de alto forno*

Com o objetivo de se obter geopolímeros com as vantagens físico-químicas dos géis N-A-S-(H) e C-A-S-H, comentados anteriormente, Bernal *et al.*, (2011), estudaram várias combinações de ativação do metacaulim com a escória de alto forno. As propriedades de engenharia e durabilidade dessa mistura, ainda que bastante satisfatórias, só foram abordadas para pequenas inclusões de MC (até 20%) em uma matriz predominantemente de escória ativada (BERNAL, 2012). Já Buchwald *et al.*, (2007), assim como esse trabalho de conclusão de curso, propuseram analisar compostos com maior quantidade de metacaulim em relação à escória de alto forno. Os resultados obtidos com a mistura proposta por Buchwald *et al.*, (2007) são interessantes quanto ao desempenho mecânico dos compósitos, conciliando boas propriedades de durabilidade química com alta resistência mecânica de geopolímeros (BUCHWALD *et al.*, 2007). Em outras palavras, a ativação de uma mistura de aluminossilicatos de diferente composição (com e sem cálcio) visa a obtenção de geopolímeros com propriedades intermediárias entre os dois sistemas vistos anteriormente (itens 2.2.1.2 e 2.2.1.3), ou seja, (i) menor demanda de ativadores para desenvolvimento de resistência mecânica; (ii) dispensa de cura térmica; (iii) aceitável resistência química e térmica. Isso se dá pela formação concomitante de géis N-A-S-(H) e C-A-S-H na estrutura, conforme já apresentado em outros estudos (PUERTAS & FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2003), (BUCHWALD *et al.*, 2007), (YIP *et al.*, 2005).

### 2.3 **Análise do ciclo de vida (ACV)**

Todo produto, independente de sua composição, gera um impacto negativo ao meio ambiente, seja em função de seu processo produtivo, das matérias primas que consome, ou devido ao seu uso e disposição final. A análise do ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta utilizada para avaliação dos aspectos ambientais e dos potenciais impactos associados ao produto, porque além de analisar toda a cadeia produtiva, incluindo a extração das matérias primas até a disposição final do produto, permite uma visão ampla do processo de produção destacando suas etapas mais críticas. Assim, a ACV permite a melhoria do processo de fabricação, principalmente considerando questões ambientais. De acordo com Valt (2004), a

ACV permite a identificação de oportunidades de melhorias relacionadas a aspectos ambientais analisando as diferentes fases do sistema de produção, contribuindo para a diminuição da exploração e consumo de recursos naturais e gerando menos resíduos. Para Chehebe (2002), o enfoque gerencial da ACV de produtos representa uma forte tentativa de integração da qualidade tecnológica do produto, da qualidade ambiental e do valor agregado para o consumidor e para a sociedade.

De acordo com o Ibict (2006) os resultados deste tipo de análise podem ser utilizados de diversas formas, a saber:

- Desenvolvimento de uma avaliação criteriosa das conseqüências ambientais relacionadas a um determinado produto;
- Análise das trocas ambientais associadas com um ou mais produtos ou processos específicos para obter dos tomadores de decisão (estado, comunidade e outros) aprovação para alguma ação planejada;
- Quantificação das emissões de poluentes para o ar, água e terra durante cada estágio do ciclo de vida ou ao processo que mais contribui para essas emissões;
- Avaliação dos efeitos do consumo de materiais e das emissões de poluentes sobre o meio ambiente e sobre o homem;
- Identificação de áreas de oportunidade para atingir uma maior eficiência econômica na concepção e desenvolvimento de produtos.

Para se obter melhor uso dessa ferramenta e melhoria dos resultados obtidos por ela, existem normas que orientam os empreendimentos a se adequarem ao contexto de melhoria dos aspectos ambientais relacionados às suas atividades. Exemplos são as normas ISO 14000–Gestão Ambiental, que determinam “o que a organização faz para minimizar os efeitos nocivos ao ambiente causados pelas suas atividades”. A série ISO 14040 também trata da ACV, especificando sua estrutura geral e orientando a elaboração de cada uma de suas fases assim como normas para a apresentação de dados. O propósito dessas normas é oferecer às empresas ferramentas para a tomada de decisão, assim como a avaliação de alternativas sobre métodos de manufatura. Segundo a norma ISO 14040 (2006) existem quatro fases comuns a todo estudo de ACV:

- Fase de definição do objetivo e escopo: o escopo, incluindo os limites do sistema e o nível de detalhamento de uma ACV depende do motivo e do uso pretendido para o

estudo. A profundidade e a amplitude da análise podem variar consideravelmente, dependendo do objetivo;

- Fase de análise de inventário: o inventário de ACV é um levantamento dos dados de entrada e saída no que diz respeito ao sistema a ser estudado;
- Fase de avaliação de impacto: o objetivo da avaliação de impacto é fornecer informações adicionais para ajudar a avaliar os resultados de modo a melhor compreender o seu significado ambiental;
- Fase de interpretação: trata-se da fase final do processo de ACV, quando os resultados são resumidos e discutidos como base para conclusões, recomendações e para tomada de decisões, de acordo com o objetivo e definição do escopo.

## 2.4 Técnicas de caracterização de argamassas geopoliméricas

A fim de se fazer uma caracterização precisa e correta de argamassas geopoliméricas, podem-se utilizar técnicas de caracterização de materiais cimentícios, para garantir a comparação de desempenho entre diferentes matrizes.

Os itens que se seguem trazem uma revisão bibliográfica das técnicas experimentais utilizadas neste trabalho.

### 2.4.1. Comportamento mecânico- Resistência à compressão

A resistência à compressão representa a tensão máxima desenvolvida na superfície de um corpo de prova de um material rígido quando submetido a uma carga axial (ISO 604, 2002). No ensaio de compressão, os corpos de prova cúbicos ou cilíndricos são colocados sobre um prato inferior plano e outro prato superior plano fazendo o carregamento de forma igualitária em toda a superfície do corpo de prova, e a sua tensão de compressão na ruptura é calculada pela Equação 4 (NBR 5739, 2007):

$$R = \frac{P}{A}(4)$$

Onde: R: tensão de ruptura (MPa);

P: força aplicada (KN);

A: área da superfície sob pressão (mm<sup>2</sup>).

#### 2.4.2. Absorção de água e porosidade aparente

A avaliação da absorção de água e porosidade visa a caracterização física de materiais cimentícios em seu estado endurecido. Esses dados são importantes para a estimativa das propriedades relacionadas a durabilidade do material, haja visto que quanto mais poroso, mais sujeito estará a agentes prejudiciais à sua integridade estrutural (NBR 9778, 2005). O ensaio de absorção de água em argamassas e concretos é comumente realizado a partir do método por imersão e saturação do material em água sob vácuo, descrito por Rilem, (1984) e NBR 9778 (2005). A absorção de água (a) calculada pela Equação 5, é obtida a partir da medida de duas massas: m<sub>1</sub>, a massa do corpo de prova seco em estufa, e m<sub>3</sub>, correspondente à massa do corpo de prova após completa saturação em água:

$$a = \frac{m_3 - m_1}{m_1} \quad (5)$$

A porosidade “p” do material estudado pode ser obtido pelo mesmo método, desde que seja determinado também a massa submersa da amostra saturada, m<sub>2</sub>. A Equação 6 mostra o cálculo da porosidade aparente (NBR 9778, 2005):

$$p = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \quad (6)$$

Onde p = porosidade (%);

m<sub>1</sub>: massa da amostra seca (g);

m<sub>2</sub>: massa da amostra submersa saturada (g);

m<sub>3</sub>: massa da amostra saturada com superfície seca (g).

### 2.4.3. Porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP)

Outra técnica de avaliação da estrutura porosa dos materiais cerâmicos (e também cimentícios) é a porosimetria por intrusão de mercúrio (em inglês, *Mercury Intrusion Porosimetry* ou MIP). Essa técnica permite analisar a distribuição, tamanhos, diâmetro médio e volume total dos poros, através da determinação do volume de mercúrio introduzido em uma amostra sob pressão (WEBB, 2001). O ângulo de contato entre o mercúrio e as paredes dos poros e a tensão superficial desse elemento químico são os que mais influenciam na determinação do tamanho dos poros. Essa afirmação se deve ao fato de Washburn assumir em sua equação de equilíbrio de forças (Equação 7) que os poros possuem forma cilíndrica (MA, 2014).

$$D = \frac{-4\gamma\cos\theta}{P} \quad (7)$$

Onde D =diâmetro dos poros;

$\gamma$ = tensão superficial do mercúrio;

$\Theta$  = ângulo de contato;

P = pressão aplicada.

De acordo com a equação de Washburn, o tamanho do poro que será preenchido pelo mercúrio é inversamente proporcional a pressão aplicada. Dessa forma, quando o mercúrio estiver sob uma pressão externa P o mesmo irá não entrará em poros com diâmetro menores que D, porém, não resistirá a entrar em poros maiores que D. Assim, é possível obter os tamanhos dos poros preenchidos por mercúrio aumentando controladamente a pressão de intrusão do mercúrio (WEBB, 2001).

O ensaio inicia-se colocando a amostra do material em um porta amostra e retirando o ar do compartimento até criar vácuo. Desta forma, a pressão interna vai crescendo durante o período de tempo pré-estabelecido antes do início do ensaio. O volume de mercúrio introduzido na amostra é medido ao longo das trocas de pressões durante o ensaio e os valores são plotados na curva de intrusão, e a partir

do ponto quando a pressão começa a reduzir, o mercúrio é estrugido dos poros (WEBB, 2001).

#### 2.4.4. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade é descrito pela norma brasileira NBR 9779 (2012), que é similar ao procedimento da norma norte americana ASTM C1585, (2013). Em ambas as normas, corpos de prova inicialmente secos são colocados em contato com uma lâmina d'água em sua extremidade inferior, e seu ganho de massa monitorado em função do tempo, à medida que os mesmos absorvem água por capilaridade ou sucção.

O ensaio de absorção por capilaridade dá uma ideia da permeabilidade do material estudado, já que avalia poros que estão conectados, permitindo assim a penetração de água por capilaridade; seu cálculo se dá pela Equação 8 (NBR 9779) que se segue:

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (8)$$

Onde C é a absorção de água por capilaridade, em g/cm<sup>2</sup>;

A é a massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, em g;

B é a massa do corpo de prova seco, em g;

S é a área da seção transversal, em contato com a água, em cm<sup>2</sup>

#### 2.4.5. Caracterização microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é um ensaio que permite caracterizar a microestrutura do material por análise de sua morfologia. O princípio básico do ensaio consiste em um feixe de elétrons gerado por um filamento de tungstênio ou um canhão de emissão de feixes elétricos, o qual é acelerado por uma alta voltagem (15 kV – 20 kV) passando por um sistema de aberturas e lentes eletromagnéticas, varrendo assim, a superfície da amostra (WINTER *et al.*, 2012).



A qualidade da imagem gerada depende do equipamento utilizado no ensaio. Existe a possibilidade de geração de duas imagens distintas (i) a imagem de elétrons secundários e (ii) a imagem de elétrons retro espalhados. A primeira é mais utilizada em casos de superfícies fraturadas e produz imagens com maior resolução. Já a segunda é indicada para casos de superfícies polidas, onde o brilho da imagem resultante está diretamente relacionado ao número atômico da amostra. Vale ressaltar que todas as imagens geradas pelo MEV são em preto e branco (WINTER *et al.*, 2012).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Materiais utilizados

As fontes de aluminossilicato utilizadas para a confecção das argamassas geopoliméricas foram a metacaulinita (MC) e a escória granulada de alto forno (EAF). A composição química destes dois aluminossilicatos se encontra na Tabela 1. Como agregados finos foram utilizados sílica natural (quartzo) utilizada em argamassas e concretos na região metropolitana de Belo Horizonte.

A solução alcalina ativadora foi composta pela solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). O NaOH com concentração de 14M foi misturado ao silicato de sódio, cuja composição química também se encontra na Tabela 1.

**Tabela 1 - Composição química das matérias primas da matriz geopolimérica.**

<b>Materiais</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>CaO</b>	<b>H<sub>2</sub>O</b>
<b>Metacaulim (MC) (%)</b>	54,54	44,16	-	0,09	0,08	-
<b>Escória (EAF) (%)</b>	34,95	12,63	0,22	1,24	45,10	-
<b>Silicatode Sódio (%)</b>	28,5	-	8,7	-	-	62,80

Fonte: Acervo da autora

#### 3.2 Formulações estudadas

A Tabela 2 mostra um resumo das informações sobre as argamassas estudadas. Foram preparadas e analisadas 6 argamassas com formulações diferentes. Primeiramente utilizou-se uma argamassa geopolimérica de referência confeccionada com 100% de metacaulim (REF); esta argamassa foi produzida com uma solução alcalina contendo uma razão em massa entre  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  e NaOH igual a 2,0, que garante uma boa resistência mecânica e propriedades de durabilidade observada pela autora em pesquisas anteriores. Para uma boa trabalhabilidade,

chegou-se a razão entre solução ativadora e MC utilizada foi 1.3 (aqui denominada de razão solução / aglomerante).

As demais cinco argamassas estudadas são compostas por uma mistura de 60% de metacaulim e 40% de escória granulada de alto forno (chamadas neste trabalho de 60/40 MC/EAF). Elas diferem entre si pela composição da solução ativadora, que possuem razão  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ , igual a 1.0, 1.3, 1.5, 1.75 e 2.0. A variação nessa composição da solução ativadora deu origem às argamassas G1, G2, G3, G4 e G5, respectivamente (Tabela 2). A introdução da EAF nos geopolímeros melhora a trabalhabilidade do material. Por consequência, as argamassas G1 a G5 foram produzidas com uma relação solução / aglomerante igual a 0,86, bastante inferior, portanto, àquela utilizada para produção da argamassa de referência (REF).

**Tabela 2 - Formulações estudadas**

<b>Formulação</b>	<b>Solução/ aglomerante</b>	<b>Metacaulim (%)</b>	<b>Escória (%)</b>	<b><math>\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}</math></b>	<b><math>\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>
<b>REF</b>	1,30	100	0	2.0	3.17
<b>G1</b>	0,86	60	40	1.0	3.26
<b>G2</b>	0,86	60	40	1.3	3.30
<b>G3</b>	0,86	60	40	1.5	3.35
<b>G4</b>	0,86	60	40	1.75	3.39
<b>G5</b>	0,86	60	40	2.0	3.05

Fonte: Acervo da autora

### 3.3 Produção dos geopolímeros

Os geopolímeros foram confeccionados no laboratório de pesquisa de materiais de construção sustentáveis do departamento de Engenharia de Produção Civil localizado no Campus II do CEFET-MG.

Não foi preciso realizar a calcinação do caulim visto que esse processo foi realizado antes do fornecimento do material para a pesquisa. Após a pesagem da metaculinita, foram pesados a escória e os agregados finos de quartzo. Os agregados foram pesados e separados de acordo com a sua granulometria, que variava entre 4,8 e 0,075 mm.

Os componentes da solução ativadora, NaOH e Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, foram pesados em balança analítica e em béqueres distintos, de acordo com cada formulação. Após pesagem, as soluções foram misturadas em um recipiente plástico e a solução ativadora resultante permaneceu em repouso por 40 minutos. Durante o repouso, a solução permaneceu tampada, para que ao se resfriar não perdesse água para o meio, haja visto que a mistura é exotérmica.

Após a preparação das matérias primas, essas foram adicionadas em um recipiente plástico e misturadas com o auxílio de um misturador automático de rotações variáveis para facilitar a homogeneização dos materiais. Primeiramente, colocou-se no recipiente toda a solução ativadora já resfriada, seguindo-se da adição do metacaulim (para a matriz geopolimérica de 100% desse material) ou metacaulim e escória, para as formulações matriz de 60/40 MC/EAF. Por fim, os agregados finos foram adicionados à mistura gradualmente, até se obter uma argamassa homogeneizada, como pode-se observar na Figura 4.

**Figura 4 - Mistura homogeneizada da argamassa geopolimérica.**



Fonte: Acervo da autora

Seis corpos de prova cúbicos (50 x 50 x 50 mm) foram moldados para avaliação da resistência à compressão (Figura 5), e 5 cilindros de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura moldados para absorção por capilaridade. Outros 5 cilindros de menor dimensão (25 mm de diâmetro; 50 mm de altura) foram moldados

para avaliar a absorção de água e porosidade por absorção de água, bem como para retirar amostras para MIP e MEV.

**Figura 5 - Moldagem do corpo de prova na fôrma cúbica.**



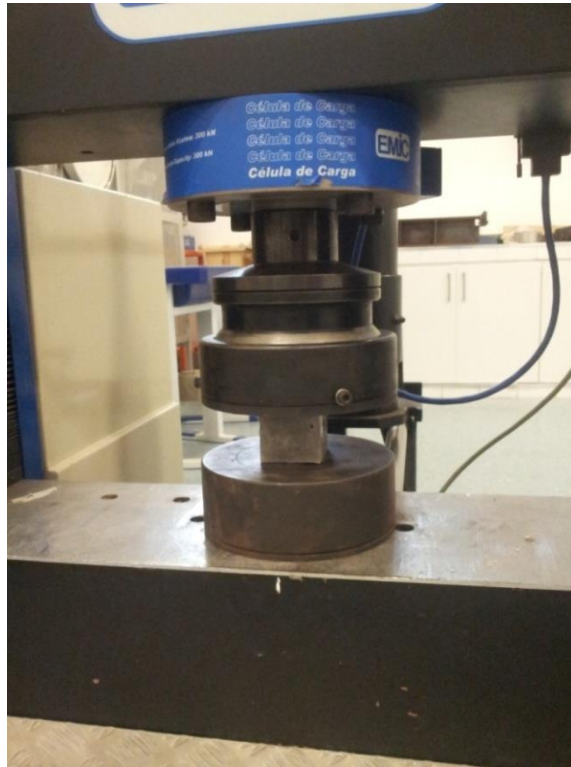
Fonte: Acervo da autora.

Logo após a moldagem, todos os corpos de prova foram curados à 40°C por 24 horas, com subsequente cura ambiente a 25 °C em laboratório. Com exceção da resistência à compressão, medida à idade de 7 e 28 dias (3 corpos de prova por idade), todos os demais ensaios foram realizados após 28 dias de moldagem.

### 3.4 Caracterização física e mecânica

Para a realização do ensaio de resistência à compressão foi utilizado a prensa universal Emic modelo D30000, presente no laboratório de comportamento mecânico no Departamento de Engenharia de Produção Civil do CEFET-MG. O ensaio de compressão foi realizado a uma velocidade constante de carregamento de 0,25 +/- 0,05 MPa/s. A Figura 6 mostra o corpo de prova sendo submetido ao carregamento durante o ensaio.

**Figura 6 - Ensaio de resistência à compressão.**



**Fonte: Acervo da autora**

Os cilindros moldados para absorção de água e porosidade aparente foram secos em uma estufa a 60°C durante 48 horas. Após essa secagem, os corpos de prova foram resfriados à temperatura de 23 °C e em seguida mediram-se as massas secas ( $m_1$ ) de cada amostra e iniciaram-se os procedimentos de saturação em água, com duração de 24 horas sob vácuo. Após a saturação dos corpos de prova foram medidas as massas submersas saturadas ( $m_2$ ). Em seguida, foi retirado o excesso superficial de água das amostras utilizando um papel toalha e mediram-se as massas saturadas com superfície seca ( $m_3$ ).

Os cilindros para o ensaio de absorção por capilaridade também foram inicialmente secos obedecendo ao mesmo regime dos demais descritos anteriormente, para absorção de água e porosidade aparente. No entanto, para o caso da absorção por capilaridade, as faces laterais do cilindro foram vedadas, de modo que a absorção de água ocorra por sucção somente na parte inferior do corpo de prova, submerso em um lâmina d'água constante e igual a 1 cm da sua face inferior. Ganhos sucessivos de massa por absorção por capilaridade foram registrados nos intervalos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72 horas a partir da colocação das

amostras em contato com a água, utilizando uma balança analítica de alta precisão. O ensaio de capilaridade por absorção foi realizado utilizando três corpos de prova de cada formulação proposta neste trabalho, e a absorção por capilaridade expresso pela média nas idades correspondentes.

### 3.5 Caracterização microestrutural

#### 3.5.1 Porosometria por intrusão de mercúrio (MIP)

Para a realização do ensaio de porosometria por intrusão de mercúrio, foi utilizado o equipamento Pore Master da Quantachrome Instruments, presente nos laboratórios do curso de mestrado em Engenharia Civil do CEFET-MG. Antes da execução dos ensaios, pequenos monolitos foram colocados em uma estufa para secagem à temperatura de 45°C durante 24 horas. Foram medidas quatro valores de massa para fornecimento ao programa do equipamento, sendo elas: a massa do porta amostra (penetrômetro) vazio, a massa do penetrômetro com a amostra, a massa do penetrômetro preenchido somente com mercúrio e a massa do penetrômetro com a amostra e preenchido por mercúrio.

O ensaio é dividido em quatro principais etapas, sendo que as duas primeiras se referem às pesagens das massas do porta amostra preenchido com mercúrio e em seguida do penetrômetro preenchido pelo mercúrio e com a amostra. A etapa seguinte é o ensaio de intrusão de mercúrio a baixa pressão, para que esse fluido químico penetre nos macroporos. E por fim, a última etapa é a intrusão de mercúrio a alta pressão permitindo que essa substância penetre nos poros de menor dimensão da amostra.

Os ensaios de porosimetria forneceram a porosidade aparente bem como a distribuição dos tamanhos dos poros nas argamassas. Um parâmetro importante obtido na curva de intrusão de mercúrio foi o diâmetro limiar (DL, ou *the shold diameter*, em inglês), que corresponde ao ponto da curva de intrusão onde ocorre uma grande inflexão e aumento repentino da intrusão de mercúrio na amostra. O diâmetro limiar indica o ponto em que se atinge os poros conectados da amostra, ou seja, a porosidade dentro da microestrutura do gel. Portanto, neste trabalho, definiu-se como sendo “macroporos” aqueles poros com diâmetro acima de DL, mas abaixo

de 10  $\mu\text{m}$ . Poros acima de 10 $\mu\text{m}$  foram considerados como ar incorporado durante a mistura e, portanto, excluídos da análise. Poros abaixo de 10 nm (até o limite de detecção do equipamento, igual a 3,6 nm) foram considerados mesoporos.

### 3.5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por energia de dispersão

O ensaio de MEV foi realizado no departamento de Engenharia Civil da Universidade de British Columbia, Canadá. Os corpos de prova utilizados para microscopia foram embutidos em resina epóxi, seguida de lixamento em discos abrasivos de papel de carbetto de silício e polimento com pasta de diamante com dimensões de partículas de 6 $\mu\text{m}$  e 1 $\mu\text{m}$ .

Durante a análise, imagens de elétrons secundários e retro espalhados foram geradas, bem como mapas de elementos (*elemento mapping*) para identificação dos géis N-A-S-(H) e C-A-S-H, e de partículas de MC e EAF que não reagiram na geopolimerização.

## 3.6 **Análise do Ciclo de Vida das Argamassas Geopoliméricas**

### 3.6.1 Unidade funcional

A unidade funcional, a qual é a base para comparação entre as formulações que foram analisadas, é uma unidade de volume de argamassa geopolimérica produzida no Sistema Internacional de Unidades (um metro cúbico de argamassa). O parâmetro estudado neste trabalho para avaliação ambiental é a emissão de CO<sub>2</sub> (kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de argamassa).

### 3.6.2 Premissas e limites da ACV

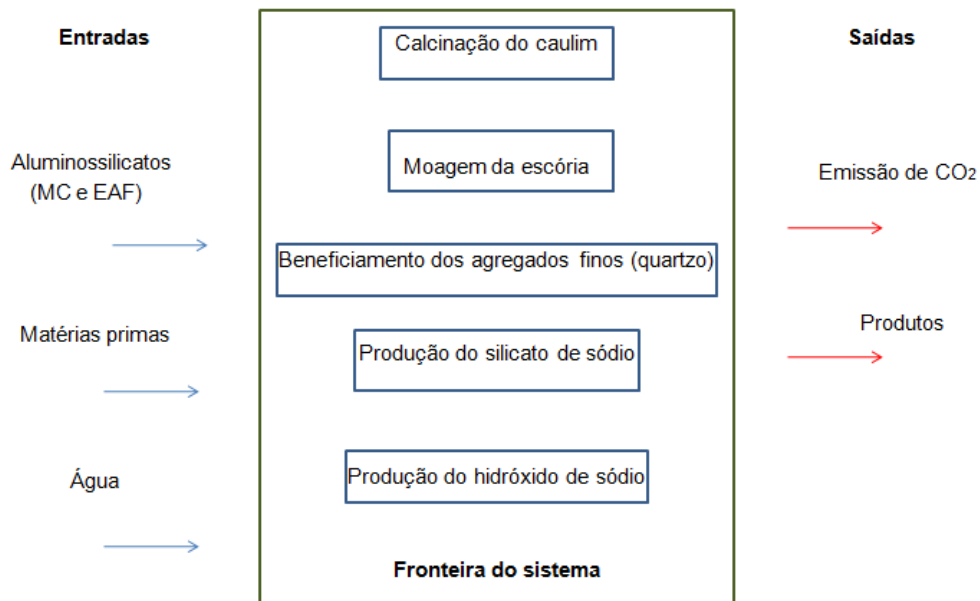
A ACV neste trabalho não contempla o transporte e a extração de matérias primas comuns, uma vez que ela ocorre de modo bem semelhante para todas as matérias primas das formulações de argamassas.

Os limites que foram considerados na produção de 1m<sup>3</sup> de argamassa geopolimérica são, portanto: (i) o beneficiamento de agregados finos; (ii) a moagem



da escória de alto forno; (iii) a calcinação do caulim (iv) produção dos ativadores, silicato de sódio e hidróxido de sódio. O limite e os processos que serão considerados na ACV desse trabalho podem ser observados melhor na Figura 7.

**Figura 7 - Fronteira do sistema e processos considerados para a ACV nesse trabalho.**



**Fonte: Elaborado pela autora**

Em todas as formulações de argamassa estudadas foram considerados como entradas as matérias primas e como saídas as emissões de CO<sub>2</sub> e os produtos gerados em cada etapa dos processos envolvidos na fabricação das argamassas geopoliméricas.

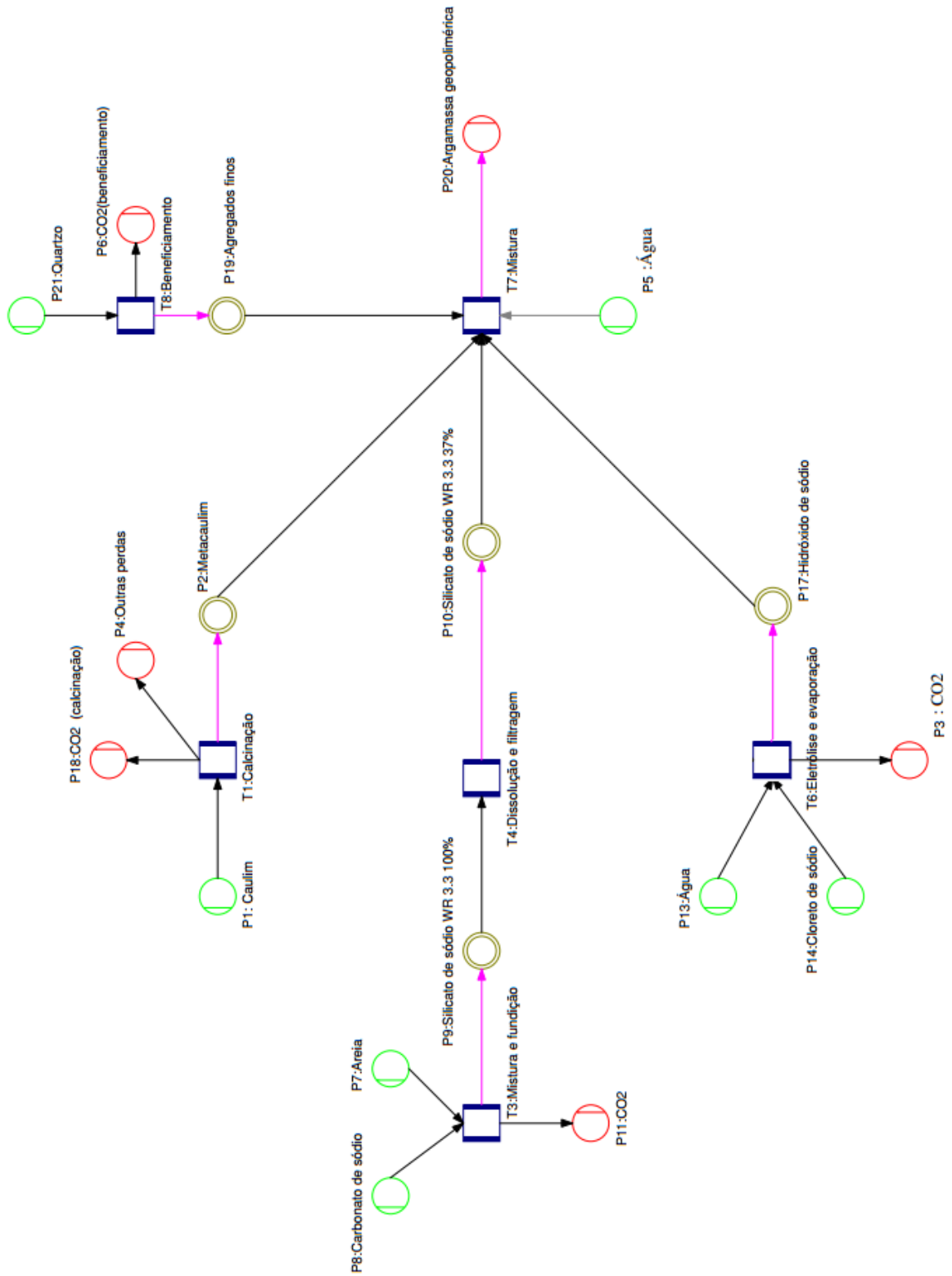
### 3.6.3 Montagem dos fluxogramas

A montagem das redes demanda uma grande quantidade de tempo, haja visto que é necessário conhecer todos os processos de obtenção das matérias primas e fabricação da argamassa geopolimérica. A montagem correta da rede é também fundamental para o sucesso da ACV. Todo o levantamento de dados foi realizado para alimentar as necessidades do software Umberto e gerar um balanço de massa coerente.

Foram confeccionados dois fluxogramas, um para a formulação de 100% de metacaulim e outro para a formulação das argamassas de 60/40 MC/EAF, representados respectivamente nas Figuras 8 e 9. Para a formulação utilizando as duas fontes de aluminossilicato, contemplou-se, portanto, a etapa de moagem da escoria, visto que esta matéria prima foi também utilizada nas argamassas, ao contrário da formulação de REF, com 100% de metacaulim.

Cada etapa da produção do geopolímero pode ser observada nos fluxogramas e identificada de acordo com os símbolos utilizados para a montagem do mesmo. Observa-se nas Figuras 8 e 9 que as transições dos diagramas indicam a presença de um processo e estão representadas por retângulos azuis. Estas transições foram alimentadas com os dados de entrada e saída, representados por círculos verdes e vermelhos respectivamente. Entre as transições existe um material intermediário que é resultado do processo anterior e matéria prima para etapa seguinte, sendo representado pelas conexões simbolizadas por círculos duplos amarronzados. Por fim, as setas são responsáveis pela indicação do sentido do fluxo de materiais; a seta que fecha o processo produtivo recebe cor destacada (rosa), pois é o local onde está definido o produto final, que conforme a unidade funcional adotada neste estudo será de  $1\text{m}^3$  de argamassa geopolimérica. O software então avalia o fluxo de materiais para esta quantidade de produto final. Neste estudo, o ajuste da rede para  $1\text{m}^3$  de concreto (produto final), nos permite realizar um comparativo entre a argamassa com 100% de MC (REF) e as demais de 60/40 MC/EAF (G1 a G5).

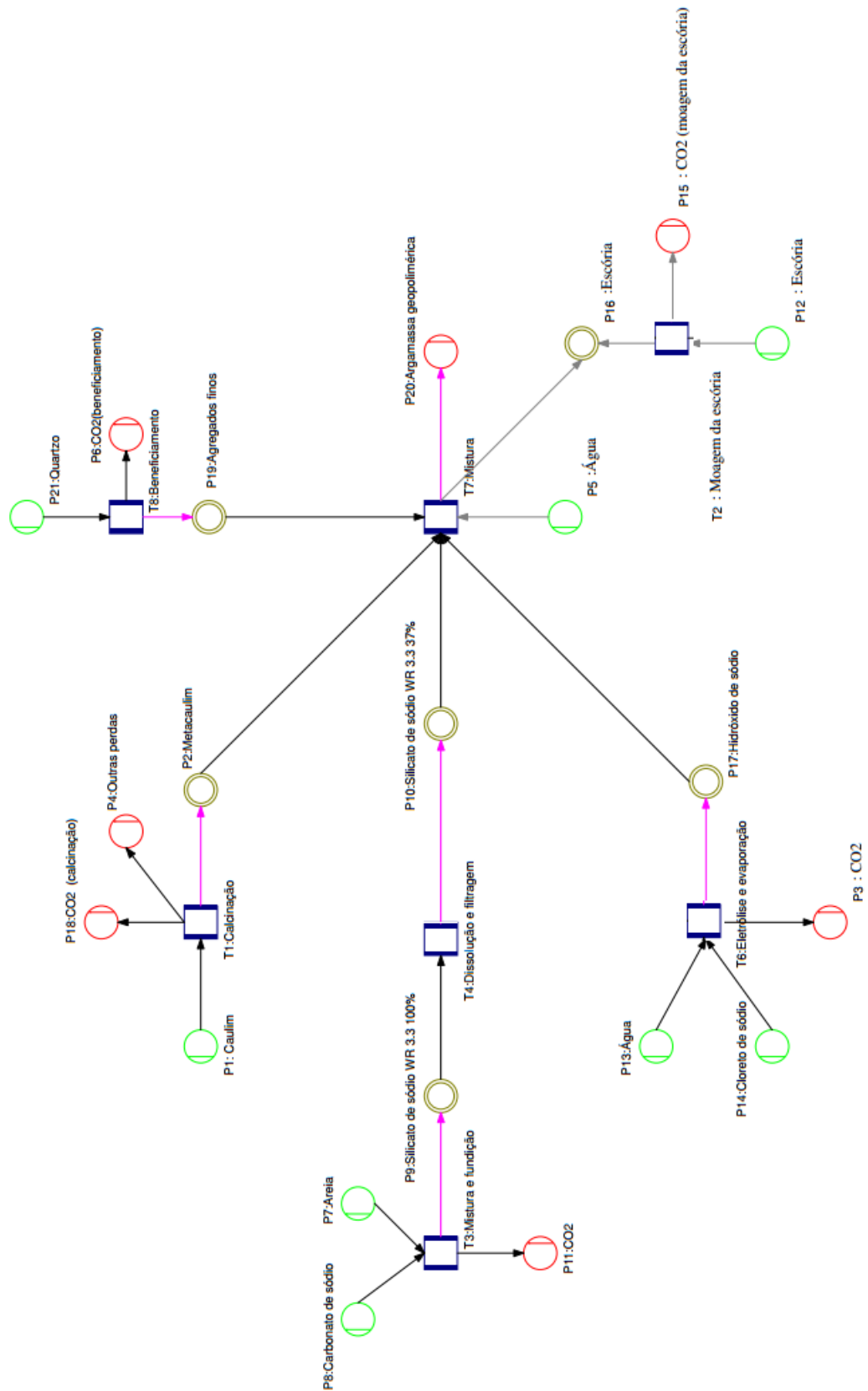
Figura 8 - Fluxograma para 100% MC (REF)



Fonte: Elaborado pela autora utilizando o Software Umberto 5.5

Não foi necessário montar um fluxograma para cada formulação (G1 a G5), haja visto que as mesmas possuem o mesmo fluxograma, variando somente a proporção entre  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  e  $\text{NaOH}$ . Essa diferente proporção foi considerada ao preencher a quantidade de matéria prima para a produção de  $1\text{m}^3$  de argamassa no software Umberto. Dessa forma, ao se realizar o balanço de massa das matérias primas, essa distinção foi considerada.

Figura 9 - Fluxograma 60/40 (MC/EAF).



Fonte: Elaborado pela autora utilizando o Software Umberto 5.5

#### 3.6.4 Software utilizado para a ACV

Este estudo busca realizar um estudo de ACV a fim de avaliar o impacto ambiental de dois diferentes tipos de argamassa geopolimérica. Para tal avaliação serão utilizadas ferramentas de ACV apoiadas pela utilização do software Umberto 5.5. Este software foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa Ambiental e Energética da Universidade de Heidelberg (IfEU) em parceria com o Instituto de Informática Ambiental da Universidade de Hamburgo (IfU). Além de seu caráter científico, o software Umberto possui uma grande flexibilidade, possibilitando o desenvolvimento de qualquer tipo de sistema, além de permitir o desenvolvimento de cálculos específicos definidos pelo usuário para que o sistema seja fiel ao ambiente a que pertence (DELGADO,2007). O software permite, ainda, uma análise de fluxo de materiais e energia, através de suas redes de fluxo, tornando possível uma análise tanto de aspectos ambientais como de aspectos financeiros de todas as atividades componentes do sistema.

#### 3.6.5 Dados de emissão de CO<sub>2</sub> utilizados nas entradas do software Umberto 5.5 para a ACV das argamassas REF e G1 a G5

##### 3.6.5.1 *Emissão de CO<sub>2</sub> para os agregados finos*

Rossi & Sales (2014) publicaram recentemente um estudo abrangente sobre a ACV dos agregados para construção civil no Brasil, onde concluiu-se que a emissão global de CO<sub>2</sub> para o beneficiamento do agregado graúdo foi igual a 1,5 kg CO<sub>2</sub> / ton. Aqui neste trabalho considerou-se o mesmo valor para as emissões referentes a agregados miúdos (areias), visto que a produção e processo de ambos tipos de agregados são bastante semelhantes (lavagem, secagem peneiramento seqüencial, classificação, etc.) e nenhum outro dado local de emissão de CO<sub>2</sub> de agregado miúdo foi encontrado para utilização.

### 3.6.5.2 *Emissão de CO<sub>2</sub> para as fontes de aluminossilicato MC e EAF*

Foram consideradas as emissões de CO<sub>2</sub> dos seguintes processos de obtenção da EAF: granulação, secagem e moagem, dada a alta demanda de energia nessas operações. Foi encontrada apenas uma publicação com a estratificação da energia utilizada no processamento de EAF. Segundo Chen *et al.* (2010), a granulação e desidratação de EAF consomem 2,15 kWh / ton. (eletricidade) e a secagem, moagem e estocagem, exige um total 70 kWh / ton de eletricidade, 3,16 MJ / ton. de gás e  $1,14 \times 10^3$  m<sup>3</sup> de combustível. Os mesmos números de energia foram usados para os cálculos desde trabalho, totalizando 45,94 kg CO<sub>2</sub> / tonelada de EAF para o Brasil. Este valor é menor do que a apresentada por Csma & Mpa (2010) para o Reino Unido (67 kg de CO<sub>2</sub> / ton EAF) ou por Heidrichet *al.*, (2005) para Austrália (68,9 kg CO<sub>2</sub> / ton EAF), no entanto, ele reflete o fator de menor impacto de emissão de CO<sub>2</sub> na produção de energia elétrica no Brasil (0,2713 kg CO<sub>2</sub> / kWh), como consequência do uso hidrelétrica como principal fonte de energia.

Já a emissão do CO<sub>2</sub> proveniente da produção de MC foi estimada com base em informações de um fabricante no Brasil: foi adotado que a extração de caulim, transporte do material, secagem, moagem e calcinação emitem cerca de 150 kg CO<sub>2</sub>/ tonelada de MC. Esse dado parece razoável, dado que a calcinação do caulim exige 400 mil kcal / tonelada (464 kWh / ton) e que se for usado gás natural (0,254 kg CO<sub>2</sub> por tonelada), o processo de calcinação geraria 118 kg CO<sub>2</sub> / tonelada de MC. Assim sendo, a diferença, (150-118 = 32 kg de CO<sub>2</sub>/ ton de MC) deve contabilizar as outras partes do processo.

### 3.6.5.3 *Emissão de CO<sub>2</sub> para a solução ativadora*

Thannimalayet *al.*, (2013) publicaram recentemente um estudo de ACV para a produção de NaOH sólido, e obtiveram que a demanda energética total é de 3,5 MJ / kg de NaOH, 89% provenientes de eletricidade e de 11% a partir de gás natural. Estes valores foram adotados para o Brasil neste trabalho, ou seja, a mesma demanda de energia e também assumindo uma divisão entre 90% e 10%, respectivamente, de eletricidade e gás natural. Assim sendo, adotou-se uma emissão total de NaOH igual a 262,1 kg CO<sub>2</sub>/ ton. Este valor é muito mais baixo do

que o apresentado por Thannimalay *et al.*,(2013) para a Malásia (632,9 kg CO<sub>2</sub> / ton. NaOH) ou Heith *et al.*,(2014) para o Reino Unido. (852 kg CO<sub>2</sub> / ton. NaOH sólido). No entanto, ambos os países têm fatores de emissão de CO<sub>2</sub> muito mais elevados da eletricidade do que o Brasil. Nesse trabalho, foi utilizado o NaOH em solução aquosa com concentração de 40% vol. (14,6 molar); por isso as emissões de CO<sub>2</sub> são de 40% do NaOH sólido, totalizando 104,83 CO<sub>2</sub> / tonelada de NaOH com concentração de 40% vol.

A solução de silicato usada neste trabalho, com razão em massa de 3,3, tem a demanda energética para a sua produção bem documentada por FAWER *et al.*, (1999). No entanto, fatores brasileiros de emissão foram usados para energia elétrica, carvão, petróleo e gás, o que totalizou assim uma emissão estimada de 401,36 CO<sub>2</sub> / tonelada de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (com razão SiO<sub>2</sub> / Na<sub>2</sub>O em massa de 3,3). Este valor é muito semelhante ao utilizado por Heith *et al.* (2014) para o Reino Unido (423,64 CO<sub>2</sub> / ton. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> com 3,3 de massa), a razão para tal similaridade nos valores deve-se ao fato da eletricidade (principal diferença em fatores de emissão entre o Brasil e muitos outros países) só representar 4,3% da energia utilizada na produção de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> com razão de massa de 3,3).



## 4 RESULTADOSE DISCUSSÃO

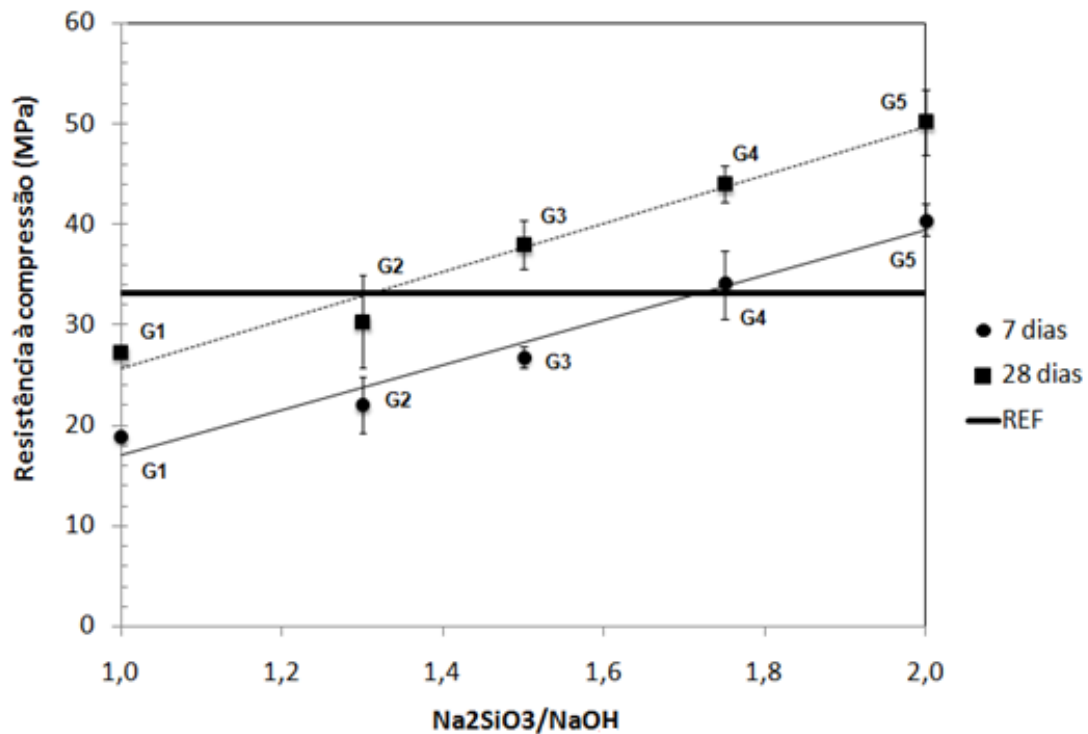
### 4.1 Propriedades mecânicas e relacionadas a durabilidade das argamassas geopoliméricas estudadas

#### 4.1.1 Resistência à compressão

A Figura 10 mostra os resultados da resistência à compressão para REF com o tempo de cura de 28 dias e para as formulações G1 a G5 com tempo de cura de 7 e 28 dias. A resistência à compressão da formulação REF com o tempo de cura de 7 dias foi de 31,6 MPa e não foi considerada na confecção do gráfico pelo fato dessa resistência ser muito similar ao resultado obtido com o tempo de cura de 28 dias: 33,07 MPa. Comparando a formulação REF com as demais, nota-se que o geopolímero constituído com 100% de metacaulium desenvolve resistência mecânica similar ao G2, ambos com 28 dias de cura. Diferente da formulação REF, as formulações G1 a G5 tiveram um crescimento significativo nas resistências à compressão de 7 para 28 dias. Esse fato deve-se à ativação da escória granulada de alto forno formando o gel C-A-S-H, o qual continua reagindo e desenvolvendo a resistência mecânica ao longo do tempo de cura. Dessa forma, as argamassas geopoliméricas da formulação 60/40 MC/EAF, ou seja, de G1 a G5, apresentaram resistência à compressão maior do que a REF por possuir em sua constituição a escória, material rico em cálcio.

Em relação à razão  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  da solução ativadora, o melhor resultado de resistência mecânica foi obtido para a formulação 60/40 MC/EAF com maior quantidade de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (G5), com resistência à compressão por volta de 40 de MPa a 28 dias, bastante superior a G1 com 27,27 MPa na mesma idade. Nessa formulação foi utilizado a maior proporção de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  (2.0); assim, percebe-se que a combinação da alta concentração silicato de sódio com a formação do gel C-A-S-H contribui significativamente para o desenvolvimento da resistência mecânica à compressão de argamassas geopoliméricas.

Figura 10 - Resistência mecânica à compressão X  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

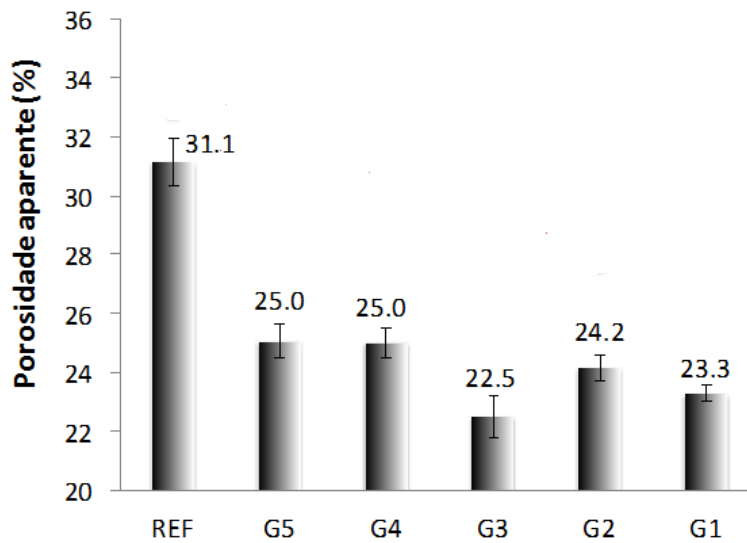


Fonte: Elaborado pela autora

#### 4.1.2 Absorção de água e Porosidade aparente

A Figura 11 mostra os resultados da porosidade aparente para as argamassas calculados a partir do método da saturação com água. A formulação de referência (REF), com a maior quantidade de silicato (relação  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH} = 2.0$ ) apresentou a maior porosidade. Além disso, a maior viscosidade da argamassa geopolimérica REF fresca, somada a maior quantidade de solução utilizada, pode ter afetado negativamente a porosidade aparente. A substituição de parte do MC com EAF reduziu a porosidade aparente para todas as formulações 60/40 MC/EAF (G1 a G5), sendo que a REF apresentou média de 31,1% de porosidade, enquanto que esta propriedade variou entre 22,5 e 25% para G1-G5. Pode-se ver que não há entre a resistência mecânica (Figura 10) e porosidade aparente (Figura 11) para as argamassas G1 a G5.

**Figura 11 - Porosidade aparente**

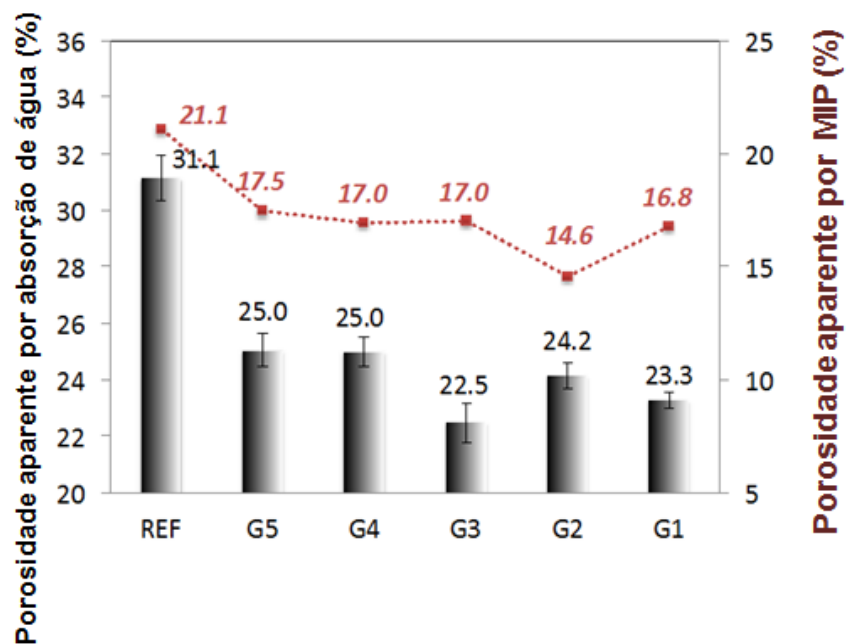


Fonte: Elaborado pela autora

#### 4.1.3 Porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP)

Os resultados obtidos pelo ensaio MIP são similares aos obtidos com o teste de porosidade aparente como pode ser visto na Figura 12.

**Figura 12–Porosidade aparente por absorção de água e MIP**



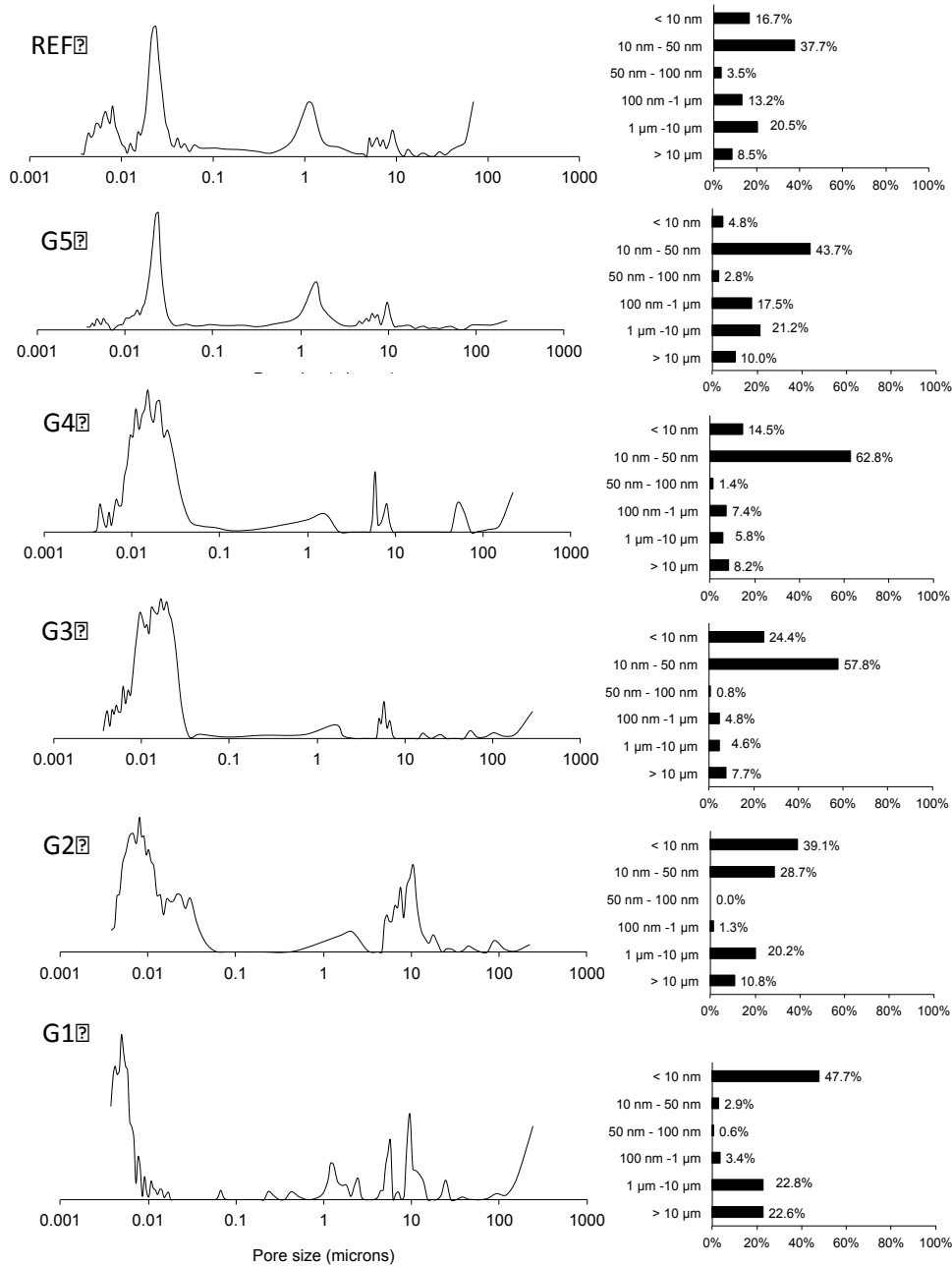
Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 12 mostra também que a variação nas porosidades aparentes e MIP não foram significativa entre G1-G5, quando comparado com a variação no seu comportamento mecânico aos 28 dias (27,27 MPa para G1 a 50,14 MPa para G5). Como consequência, não foi encontrado qualquer correlação entre os resultados de resistência à compressão (Figura. 10) e porosidade aparente a partir do método da saturação com água ou MIP (Figura. 12). Pode-se concluir, assim, que as alterações na concentração da solução ativadora afetam mais a resistência à compressão, do que a porosidade do geopolímero.

As Figuras 13 e 14 apresentam, respectivamente, a distribuição do tamanho dos poros das argamassas geopoliméricas e as curvas de volume de intrusão acumulada resultantes do ensaio de porosimetria. A Tabela 3 mostra o diâmetro limiar (DL) e a porcentagem de macroporos (entre DL e 10  $\mu\text{m}$ ), ambos calculados a partir dos resultados do MIP. Conforme dito no item 3.5.1, os poros superiores a 10  $\mu\text{m}$  foram excluídos da análise, assumindo que correspondiam a ar incorporado durante a mistura dos geopolímeros.

A Figura 13 mostra a distribuição do tamanho dos poros para todas as argamassas, independentemente da fonte de aluminossilicato utilizada (MC ou MC / EAF). Na verdade, a maioria das curvas apresentam uma distribuição de poros com porosidade significativa entre 10-100 nm e entre 1-10  $\mu\text{m}$ . Esta distribuição de tamanho dos poros é típico para argamassas e concretos (COOK & PASSE, 1993). Como mencionado anteriormente, os poros maiores (> 10  $\mu\text{m}$ ) também são vistos na Figura 13 e caracterizam ar incorporado.

**Figura 13 - Distribuição do tamanho dos poros das argamassas geopoliméricas obtidos com o ensaio MIP**

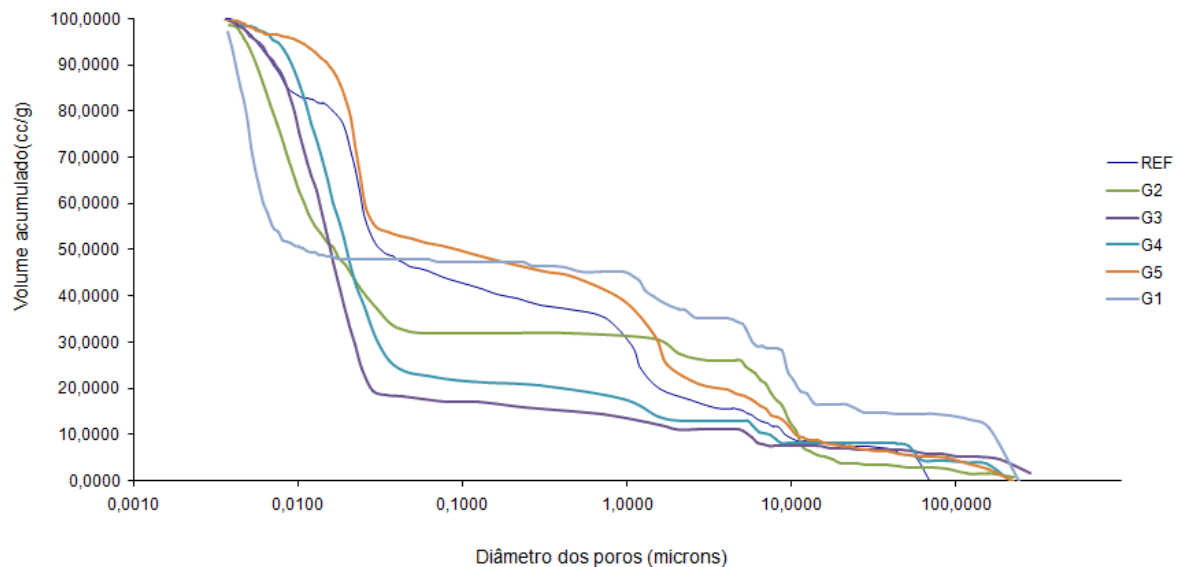


Fonte : Elaborado pela autora

Apesar da aparente semelhança entre as curvas, os dados obtidos pelo ensaio MIP revelou algumas informações importantes. Em primeiro lugar, a substituição de MC com 40% de EAF não promoveu um refinamento de poros quando utilizado proporções maiores de silicato de sódio. A argamassa REF tem 16,7% de poros abaixo de 10 nm, enquanto que G5 tem apenas 4,8% de poros na

mesma faixa de dimensão (Figura 13). Além disso, tanto REF e G5 têm curvas de intrusão de mercúrio acumuladas semelhantes que diferem das outras argamassas (Figura 14) e o percentual de poros entre o diâmetro limiar e 10  $\mu\text{m}$  é mais elevado para estas duas argamassas (Tabela 3). É provável que a alta viscosidade do ativador de silicato de sódio seja responsável pelo um maior volume de poros de maior dimensão, aumentando também a sua porosidade total. Desse modo, é possível concluir que a resistência à compressão mais elevada de G5 comparado com REF (Fig. 10) não pode ser explicada em termos da porosidade usando os métodos de saturação ou distribuição de tamanho de poros utilizando MIP.

**Figura 14 - Volume acumulado MIP**



Fonte: Elaborado pela autora

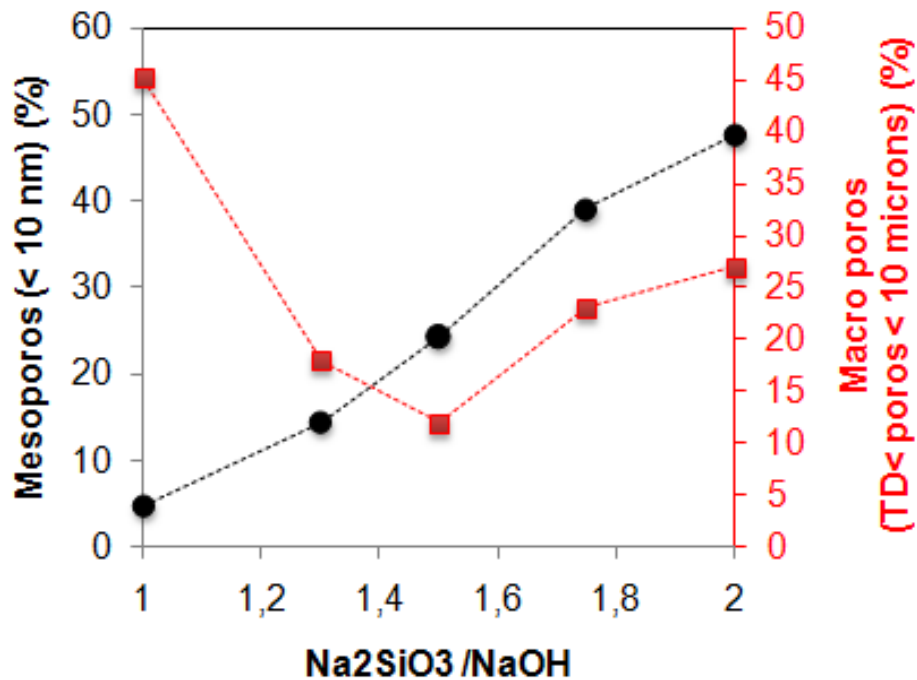
**Tabela 3 - Resultados MIP**

<b>Formulação</b>	<b>Diâmetro Limiar(D.L. (nm)</b>	<b>Macroporos (DL &lt; Poros &lt; 10 µm)</b>
<b>REF</b>	32.4	39.6
<b>G5</b>	29.9	45.2
<b>G4</b>	22.6	17.9
<b>G3</b>	28.6	11.9
<b>G2</b>	36.4	23.1
<b>G1</b>	6.9	33.6

**Fonte: Elaborado pela autora**

A diminuição do percentual de macroporos acontece com a redução da razão  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  na solução de ativação, reduzida de 2,0 para 1,0 entre as G5 e G1. A porcentagem de mesoporos (<10 nm) aumentou linearmente a partir de 4,8% a 47,7% de G5 para G1 como pode ser visto nas Figuras 13 e 15. A porcentagem de macroporos, no entanto, é menor para a formulação G3 (curva vermelha na Figura 15), sugerindo que a formação desses poros é regida, simultaneamente, por dois fatores: (i) a concentração de silicato na solução ativadora nas argamassas frescas e (ii) a composição das matrizes, dada pela composição da matriz das argamassas, em termos da proporção de aluminossilicato e solução ativadora.

**Figura 15 - Porcentagem de macro e mesoporos de acordo com a relação  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  da solução ativadora.**



Fonte:Elaborado pela autora

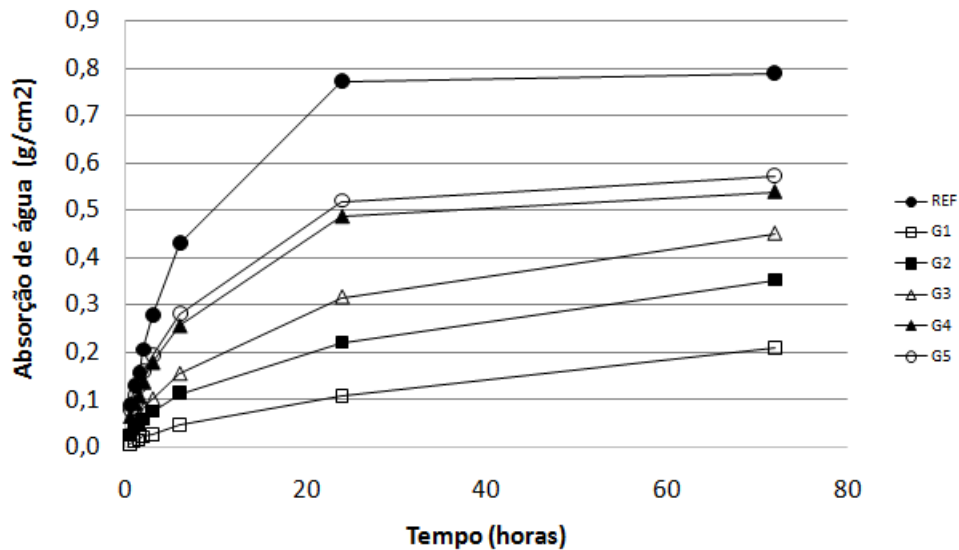
#### 4.1.4. Absorção por capilaridade

A Figura 16 mostra os resultados de absorção de água por capilaridade para as argamassas calculados a partir do método determinado pela NBR 9779 (2012). Como pode se observar, a argamassa de referência (REF) apresentou maior capilaridade que as demais formulações compostas também por escória de alto forno. Já dentre as formulações G1 a G5 a capilaridade variou de acordo com a relação  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ , sendo que uma maior utilização do silicato de sódio correspondeu a uma maior a absorção de água. Vale ressaltar que quanto maior a capilaridade, mais susceptível o material está aos ataques químicos, sendo assim menos durável. Pode-se perceber que as propriedades relacionadas a durabilidade das argamassas 60/40 MC/EAF não é proporcional a seu desempenho mecânico, haja visto que G5 possui a mais alta resistência à compressão (Figura 10) mas também maior porosidade aparente (Figura 12), maior quantidade de macroporos (Tabela 4) e maior absorção por capilaridade (Figura 16). Em outras palavras,



argamassas com menores quantidades de silicato, tais como G1 e G2 possuem resistência mecânica aceitável, e ainda apresentam melhores propriedades de durabilidade. Isso deve ser levando em consideração em uma análise ambiental das argamassas estudadas.

**Figura 16 - Resultado da absorção de água nas argamassas geopoliméricas**



Fonte: Elaborado pela autora

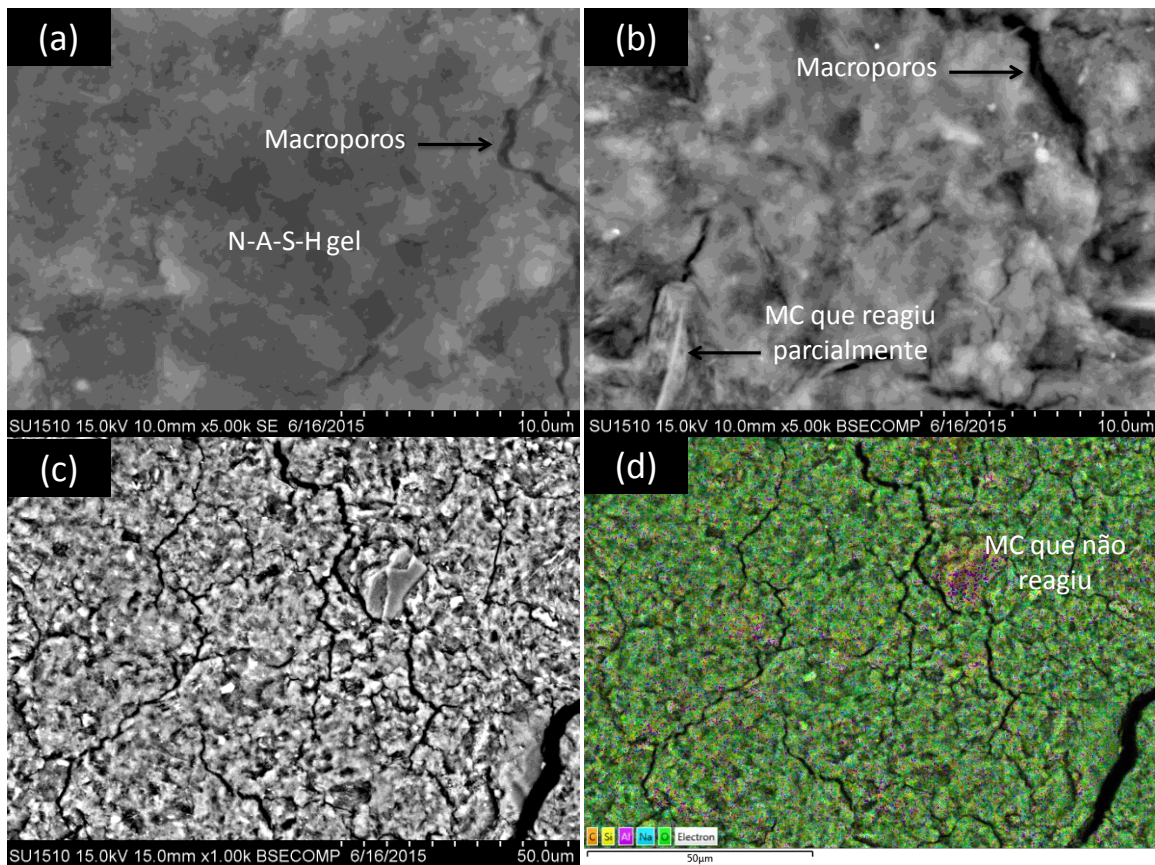
#### 4.1.5 Caracterização microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS)

As Figuras 17, 18 e 19 mostram, respectivamente, as imagens de MEV para REF, G5 e G3. As duas primeiras figuras apresentam o efeito da adição de 40% de EAF na microestrutura das argamassas quando a relação  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH} = 2,0$  é mantida constante. A Figura 19, por sua vez, mostra a matriz 60/40 MC/EAF com  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH} = 1,5$  (argamassa G3), a qual apresentou a menor porosidade e, porcentagem de macroporos, bem como menor absorção por capilaridade que as duas primeiras argamassas.

A Figura 17 (a) mostra a imagem de elétrons secundários (SEI) para REF a ampliação de 5000X, enquanto que 17 (b) mostra uma imagem de elétrons retro-espalhados (BSE), com a mesma ampliação. Ambas as figuras mostram a presença de macroporos na microestrutura, o que pode ser uma consequência de problemas de compactação para um sistema com alta concentração de silicato na solução

ativadora. A imagem da BSE (Fig. 17 (b)) tem melhor resolução permitindo analisar a microestrutura e a presença de MC que reagiu parcialmente em REF. Grandes poros interligados e MC não reagidos também são vistos para REF em uma imagem de menor magnificação (isto é, 1000x, Fig. 17 (c)). A Figura 17 (d) corresponde à mesma área mostrada na área 17 (c), mas com o mapeamento de elementos destacando a matriz N-A-S-(H) composta principalmente de oxigênio (verde), silício (amarelo), alumínio (rosa) e sódio (em menor quantidade, em cor azul clara).

**Figura 17 - Microestrutura REF: (a) SEI a 5000x; (b) BSE a 5000x; (c) BSE a 1000x; (d) mapeamento de elementos a 1000x**

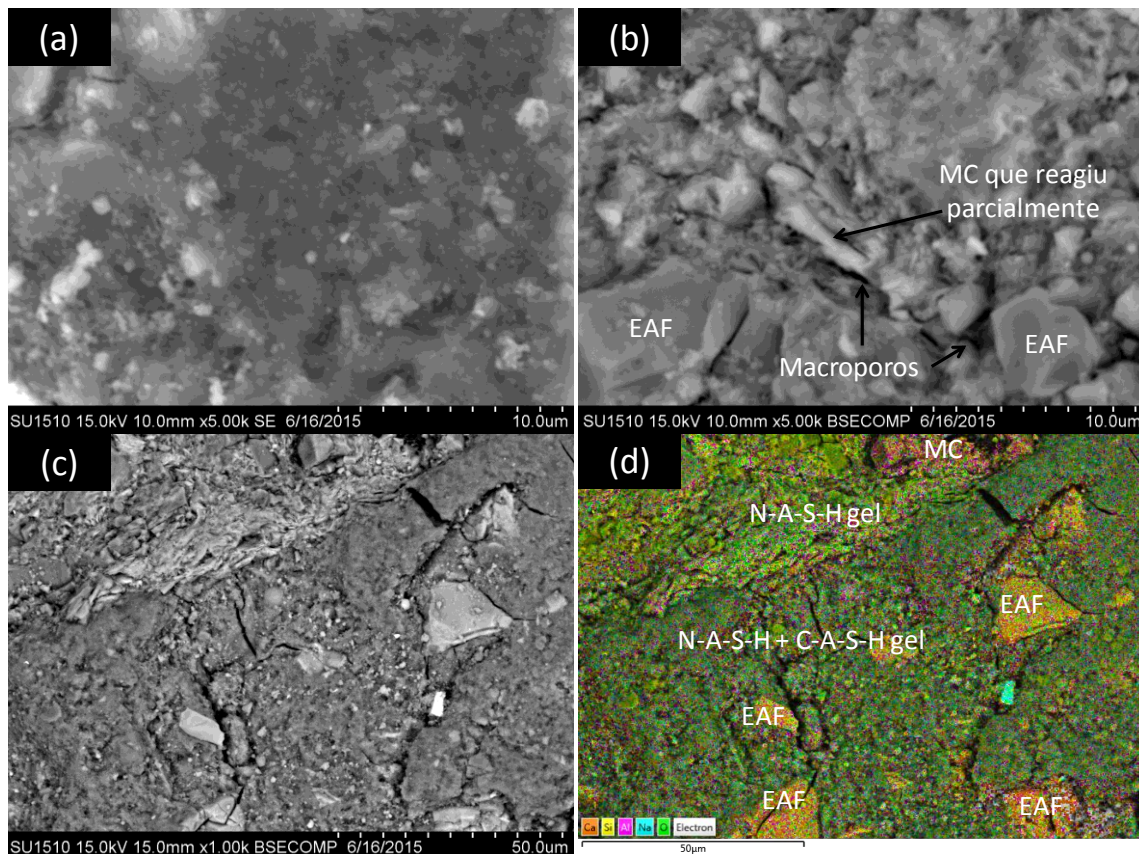


Fonte: Acervo da autora

A Figura 18 (c) mostra que os macroporos da formulação G5 tendem a concentrar-se na interface entre o gel e as partículas que não reagiram. O mapeamento de elementos na Fig. 18 (d) confirma a coexistência de dois géis distintos: o gel N-A-S-(H) aparece em uma cor verde-claro formado nas proximidades das partículas MC, já o gel C-A-S-H (verde escuro), que está mais próximo das partículas de EAF que não reagiram.

As Figuras 18 (a) e 18 (b) mostram que a adição de 40% de EAF (G5) reduziu a conectividade de poros, o que está de acordo com resultados mais baixos de absorção por capilaridade e porosidade quando comparados com REF. A Figura. 18 (b) mostra algumas partículas de MC e EAF que não reagiram totalmente. É provável que o elevado teor de silicato tenha acelerado a reação do MC e EAF, mas não o suficiente para permitir uma reação completa das duas fontes de aluminossilicato. Isso poderia comprometer as propriedades de durabilidade, indicados por uma alta porcentagem de macroporos, bem como alta absorção por capilaridade em G5 comparação com argamassas com menor relação  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  (principalmente G2, G3 e G4).

**Figura 18 - Microestrutura G5: (a) SEI a 5000x; (b) BSE a 5000x; (c) BSE a 1000x; (d) mapeamento de elementos a 1000x**

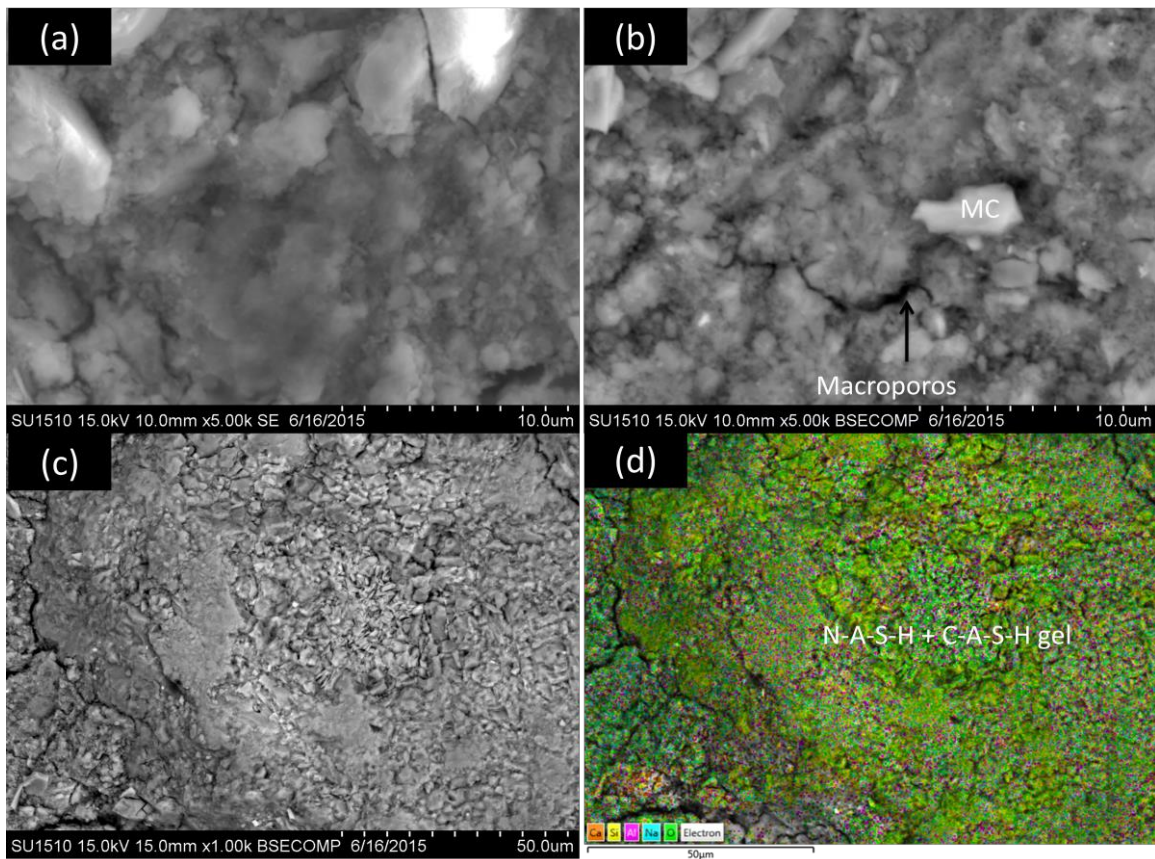


Fonte: Acervo pessoal da autora

As Figuras 19 (a) a 19 (d) mostram a microestrutura de G3, que aparece muito menos porosa do que REF e G5. Algumas partículas não reagidas de MC também são vistas (Fig. 19 (b)), mas, em geral, a matriz é muito mais homogênea,

com menos partículas que não reagiram. É provável que a menor relação  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  (1,50) tenha promovido a ativação alcalina, apesar da menor resistência mecânica em comparação com REF e G5. Os resultados de MEV estão em consonância com outros resultados e indica que existe um teor ótimo de silicato (I) em sistemas de MC / EAF proporcionando melhor propriedades relacionadas a durabilidade, o que não corresponder às argamassas com maior resistência mecânica.

**Figura 19 - Microestrutura G3: (a) SEI a 5000x; (b) BSE a 5000x; (c) BSE a 1000x; (d) mapeado de elementos a 1000x**



Fonte: Arquivo pessoal da autora

#### 4.2 Impacto ambiental das argamassasgeopoliméricas

A Tabela 4 apresenta a quantidade de cada matéria prima, em kg, utilizada de acordo com cada formulação para a produção de  $1 \text{ m}^3$  de argamassa geopolimérica.

A Tabela 5, por sua vez, mostra a quantidade de CO<sub>2</sub> emitido, em kg, para cada uma dessas matérias primas de acordo com a quantidade informada na Tabela 4.

**Tabela 4 - Quantidade de cada matéria prima (kg) para REF e G1 a G5**

Matérias - primas	REF	G5	G4	G3	G2	G1
	kg / m <sup>3</sup>	kg / m <sup>3</sup>	kg / m <sup>3</sup>	kg / m <sup>3</sup>	kg / m <sup>3</sup>	kg / m <sup>3</sup>
<b>MC</b>	518	373	373	373	373	373
<b>EAF</b>	0	249	249	249	249	249
<b>Agregado fino</b>	858	1031	1031	1031	1031	1031
<b>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></b>	445	357	340	321	302	268
<b>NaOH</b>	223	178	195	214	233	268
<b>Total</b>	2043	2188	2188	2188	2189	2189

Fonte: Elaborado pela autora

**Tabela 5 - Emissão de CO<sub>2</sub> para cada quantidade determinada previamente de matéria prima**

Matérias- primas	REF	G5	G4	G3	G2	G1
	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
<b>MC</b>	78	56	56	56	56	56
<b>EAF</b>	0	11	11	11	11	11
<b>Agregado fino</b>	1	2	2	2	2	2
<b>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></b>	179	143	137	129	121	107
<b>NaOH</b>	23	19	20	22	24	28
<b>Total</b>	281	231	226	220	215	204

Fonte: Elaborado pela autora

Cabe ressaltar que os valores da Tabela 4 são provenientes dos cálculos realizados pelo software Umberto 5.5 de acordo com os dados colocados como entrada neste programa durante a análise do ciclo de vida. Ao realizar a ACV, quando a rede do fluxograma é finalizada, é gerado um bando de dados com todos

os cálculos realizados pelo Umberto 5.5. A Tabela 5 é apenas uma representação simplificada dos resultados obtidos com a utilização desse software.

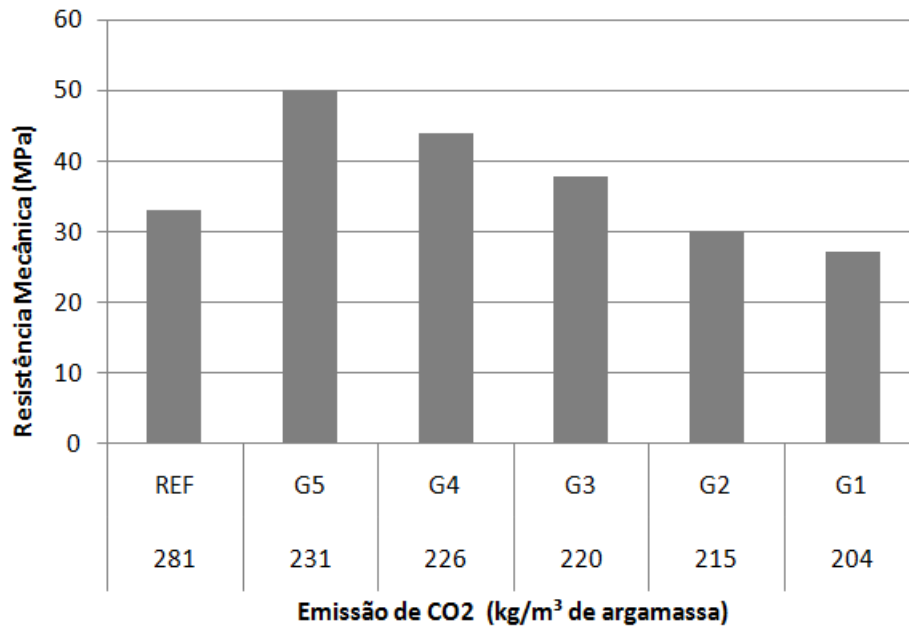
Como pode ser observado na Tabela 5, o MC e  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  são as matérias primas que mais contribuem para as emissões de  $\text{CO}_2$ . É importante notar que simplesmente a adição de 40% de EAF (comparação entre REF e G5) reduziu a emissão de  $\text{CO}_2$  em 17,9% (281 contra 231  $\text{kg CO}_2 / \text{m}^3$ ). As principais razões para isso são (i) o menor teor de MC nas argamassas MC / EAF e (ii) a menor relação solução ativadora / fonte de aluminossilicato (1,3 em REF contra 0,86 em todas as argamassas MC / EAF), que reduz a necessidade de solução ativadora.

Maiores reduções na emissão de  $\text{CO}_2$  acontecem a partir do G5 ao G1, ou seja, uma queda de 231 para 214  $\text{kg CO}_2 / \text{m}^3$  para uma relação fixa entre MC e EAF (60/40) e entre solução/ aglomerante (0,86). Devido a isso, a redução não tão expressiva como considerando a adição de escória na constituição da argamassa. Em outras palavras, as reduções do  $\text{CO}_2$  no caso das argamassas 60/40MC/EAF representam apenas a menor quantidade de silicato nas argamassas. Comparado ao REF, as argamassas G4, G3, G2 e G1 apresentaram, respectivamente, 19,6%, 21,6%, 23,6% e 27,2% de redução nas emissões em  $\text{CO}_2\text{kg} / \text{m}^3$ .

#### **4.3 Emissões de $\text{CO}_2$ relacionadas com a resistência à compressão**

A metodologia ACV é válida para facilitar a comparação entre produtos e serviços; no entanto, é importante que seja fixado uma unidade funcional, que neste trabalho é a resistência a compressão a 28 dias.

A relação entre a resistência mecânica, de cada formulação proposta neste estudo e emissão de  $\text{CO}_2$  para cada  $\text{m}^3$  de argamassa produzida pode ser observada na Figura 20.

**Figura 20 - Resistência à compressão X Emissão de CO<sub>2</sub>**

**Fonte: Elaborado pela autora**

Diante dos resultados, as formulações REF e G2 são argamassas que apresentaram mesma trabalhabilidade, bem como resistência à compressão semelhante aos 28 dias. A Tabela 6 apresenta um resumo relacionando a quantidade de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, bem como propriedades físicas e de durabilidade para ambas as argamassas. Além disso, também foi incluída na Tabela 6 a formulação G3, uma vez que apresentou as melhores propriedades de durabilidade entre todas as argamassas estudadas.

Os resultados obtidos durante toda a análise das formulações estudadas neste trabalho mostram que G2 é uma opção melhor do que REF, uma vez que apresentou 23,6% a menos de emissão de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> comparado com a formulação composta de 100% de metacaulim.

Além da vantagem ambiental de menor emissão de CO<sub>2</sub>, a argamassa G2 apresenta outras vantagens de propriedades físicas e propriedades relacionadas a durabilidade em comparação com REF (menor porosidade e absorção por capilaridade, bem como menor porcentagem de macroporos). Para uma ACV criteriosa, acredita-se que essas propriedades relacionadas à durabilidade do produto são tão importantes quanto a emissão de CO<sub>2</sub>, uma vez que garantem maior

vida útil do material, reduzindo ainda os gastos e recursos com manutenção a longo prazo.

**Tabela 6 - Relação da emissão de CO<sub>2</sub> com as propriedades de durabilidade das formulações: REF, G2 e G3.**

	REF	G2	G3*
CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> (kg)	281	215	220
Resistência à compressão (MPa)	33.01 ± 1.70	30.33 ± 2.40	37.95 ± 1.77
R (SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O)	1.22	0.9	1.0
Porosidade aparente (%)	31.1	24.1	22.5
Porosidade MIP (%)	21.1	14.6	17.0
% Macroporos	39.6	23.1	11.9

\* Formulação que apresentou as melhores propriedades de durabilidade

Fonte: Elaborado pela autora

A Tabela 6 mostra ainda que G3 é a melhor escolha em termos de propriedades de durabilidade entre as argamassas estudada se possui ainda resistência à compressão maior do que REF e G2. O fato da emissão de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> do G3 ser ligeiramente superior comparado a emissão do G2 (220 kg contra 215 kg) é, provavelmente, compensada por suas propriedades relacionadas à durabilidade: menor porosidade, menor porcentagem de macroporos e absorção por capilaridade. Portanto, G3 pode ser considerada a formulação que mais se destaca e adequa aos objetivos desse estudo.



## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho destaca a importância da combinação entre ACV com estudos experimentais para guiar a escolha de argamassas geopoliméricas com melhor desempenho e menor impacto ambiental relacionado a emissão de CO<sub>2</sub>. Assim sendo, foi considerado que o impacto ambiental só pode ser criteriosamente estimado se as propriedades relacionadas à durabilidade de argamassas geopoliméricas forem avaliadas para permitir a estimativa de uma maior durabilidade a longo prazo desses materiais.

Dessa forma, foram apresentadas as propriedades mecânicas, físicas e propriedades de durabilidade de argamassas com 100% de MC e 60/40 MC/ EAF; as formulações contendo as duas fontes de aluminossilicato foram confeccionadas com diferentes proporções entre silicato de sódio e hidróxido de sódio na solução ativadora. O impacto ambiental considerado nesse estudo foi a emissão de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de argamassa produzida (kg CO<sub>2</sub> / m<sup>3</sup>), calculado usando dados nacionais e internacionais adaptados para o Brasil, o país para o qual o estudo foi realizado.

Os resultados deste estudo demonstraram que a substituição de 40% de MC por EAF já reduz significativamente a quantidade e solução utilizada, o que por consequência pode significar em uma redução do impacto ambiental. Uma redução ainda maior na quantidade de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, tende a ser ainda mais favorável ambientalmente, haja visto que este ativador é o que gera maior emissão de CO<sub>2</sub> em sua produção. Assim sendo, espera-se que G1 seja mais interessante que as demais argamassas sob o ponto de vista ambiental. Além disso, a redução da solução ativadora contribuiu para manter a trabalhabilidade, bem como aumentou significativamente a resistência mecânica, e reduziu a percentagem de macroporos, porosidade aparente e absorção por capilaridade. Essa melhoria nas propriedades foi confirmada com os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS).

A argamassa com as melhores propriedades relacionadas a durabilidade foi a 60/40 MC / EAF com Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> / NaOH = 1,5 (argamassa G3). Ela apresentou resistência à compressão intermediária indicando que a porosidade e absorção por capilaridade não estavam diretamente correlacionados com a resistência à compressão. Na verdade, os resultados de absorção por capilaridade apresentaram uma boa correlação com a quantidade de macroporos nas matrizes. Os resultados

sugerem que a proporção de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH} = 1,5$  na solução ativadora é (i) alta suficiente para promover a reação de MC e EAF e (ii) suficiente baixa para reduzir a viscosidade e evitar a formação de macroporos. Valores mais elevados e mais baixos para  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  são prejudiciais para as propriedades de durabilidade nas argamassas de G1 a G5.

Comparando o impacto ambiental da formulação de referência (REF) com as emissões de  $\text{CO}_2$  das formulações G1 a G5, constata-se uma redução entre 17,9 % e 27,2% de emissão de gás carbônico por  $\text{m}^3$  de argamassa produzida. Essa vantagem ecológica é uma consequência direta da diminuição do teor de MC e de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  nas argamassas.

A combinação da ACV e os dados experimentais mostram que a melhor argamassa em termos de durabilidade e impacto ambiental é G3, a qual não apresenta a resistência à compressão mais elevada, nem a menor emissão de  $\text{CO}_2 / \text{m}^3$ . No entanto, reconhece-se que outros fatores desempenham um papel importante no estudo de ACV de argamassas geopoliméricas, tais como o custo e disponibilidade de matérias-primas.

Esta pesquisa é importante para o Brasil, dada a grande disponibilidade de ambas fontes de aluminossilicato (MC e EAF) no país. Porém, a utilização do metacaulim em estudos realizados em outros países, diferentemente do Brasil, podem ser comprometidos devido ao elevado custo do material..

O custo da EAF, no entanto, é uma consequência da alta demanda na produção de cimentos compostos (contendo até 70% de EAF), que também diminui a sua disponibilidade para outras aplicações. Esta situação do mercado é fundamental para o desenvolvimento das argamassas geopoliméricas no Brasil, mas vai além do escopo deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14040 – Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida – **Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2001.

ARCELORMITTALTUBARÃO;2010.Disponívelem:<<http://www.cst.com.br/index.asp>> Acessado em 27 abr 2015

ASTM C1585 - Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes 2013 **Active Standard ASTM C1585** | Developed by Subcommittee: C09.66Book of Standards Volume: 04.02

BAKHAREV, T. (2005a) Resistance of geopolymer materials to acid attack.**Cem Con Res** (35), p. 658-670.

BAKHAREV, T. (2005b) Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions.**Cem. Con. Res.** (35) (6), p. 1233-1246.

BERNAL, S. A.; RODRÍGUEZ, E. D.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; GORDILLO, M. PROVIS, J. L. (2011) Mechanical and Thermal Characterisation of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends. **J. Mat. Sci.** (46) (16), p. 5477-5486.

BERNAL SUSAN A, DE GUTIERREZ RUBY MEJIA, PROVIS JOHN L. Engineering anddurability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends. **Constr Build Mater** 2012;33: 99–108.

BERNAL, S. A.; BILEK, V.; CRIADO, M.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; KAVALEROVA, E.; KRIVENKO, P. V.; PALACIOS, M. ; PALOMO, A.; PROVIS, J. L.; PUERTAS, F.; SAN NICOLAS, R.; SHI, C.; WINNEFELD, F. (2014) Durability and Testing – Degradation via Mass Transport (Chapter 9) In Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, **RILEM TC 224-AAM, Ed. Provis& van Deventer, RILEM**, 388 p

BORGES, P. H. et al. Andreasen Particle Packing Method on the Development of Geopolymer Concrete for Civil Engineering. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2013

BUCHWALD A, HOHMANN M, POSERN K, BRENDLER E. 2009. The suitability of thermally activated illite/smectite clay as raw material for geopolymerbinders. **Appl. Clay Sci.** 46:p.300–304

BUCHWALD, A.; ZELLMANN, H.D.; KAPS, C. Condensation of aluminosilicate gels – model system for geopolymer binders, **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 357, n. 5, p. 1376-1382, 2011.

CEMENT TECHNOLOGY ROADMAP, Carbon emissions reductions up to 2050, **International Energy Agency**, 2009.

CIMENTO.ORG. **Cimento no Mundo** Disponível em <<http://cimento.org/cimento-nomundo/>>Acessado em 20 de junho de 2015.

CHEHEBE, José Ribamar. Análise do Ciclo de Vida de Produtos. Rio de Janeiro, **Qualitymark Editora**, 2002.

CHEN, C.; HABERT, G.; BOUZIDI, Y.; JULLIEN, A.; VENTURA, A. (2010) LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete. **Res. Con. Rec.** (54) (12), p. 1231-1240.

CSMA & MPA (2010) Technical Datasheet 8.3 Embodied CO<sub>2</sub> of UK cement, additions and cementitious material. 8 p.

C.Y. HEAH, H. KAMARUDIN, A.M. MUSTAFA AL BAKRI, M. LUQMAN, I. KHAIRUL NIZAR, and Y.M. LIEW. Kaolin-based geopolymers with various NaOH concentrations. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v.20, p.313, 2013.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. **Journal of Thermal Analysis**. (37) (1991) p.1633 –1656.

DAVIDOVITS, J. Properties of geopolymer cements. **First international conference on alkaline cements and concretes**, 1994. p.131-149.

DELGADO, G.; SARAIVA, I.; LIMA JR, J. A. T.; PEIXOTO, J. A. A. A metodologia de Análise do Ciclo de Vida, apoiada pelo Software Umberto, como ferramenta de gestão na perspectiva da sustentabilidade: um estudo de caso. **SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, 2007.

DN 154/2010. Deliberação Normativa COPAM nº 154, de 25 de agosto de 2010. Publicação – **Diário do Executivo – “Minas Gerais”** –04/09/2010.

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

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; GARCIA-LODEIRO, I; PALOMO, A. Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. **Journal of materials science**, v. 42, n. 9, p. 3055-3065, 2007.

FREITAS, S.M.B. Adição de geomanta e tecido não tecido de polipropileno em cimentos geopoliméricos de pega rápida. **Dissertação de mestrado**, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. UFRN, Brasil, 2007

HARDJITO, D. et al. Fly ash-based geopolymer concrete. **Australian Journal of Structural Engineering**, v. 6, n. 1, p. 77, 2005.

HEATH, A.; PAINE, K. MCMANUS, M. (2014) Minimising the global warming potential of clay based geopolymers, **J. Cleaner Prod.** (78), p. 75-83.

IBICT – Instituto Brasileiro de Informação, Ciência e Tecnologia. Avaliação do ciclo de vida. Disponível em: <[http:// www.acv.ibict.br](http://www.acv.ibict.br)> Acessado em ago de 2015.

ISO - International Organization for Standardization. Disponível em: <<http://www.iso.org>>. Acessado em 26 de ago de 2015

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

ISO 604 International Organization for Standardization (2002). Plastics -- Determination of compressive properties.

KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D.; Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry; **ScienceDirect. Minerals Engineering** v. 20, p. 17, Grécia, 2007.

KONG, D.L.Y.; SANJAYAN, J. G. (2010) Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete, **Cem. Con. Res.** (40) (2), p. 334-339.

LOTTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary Cementitious Materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1244-1256, 2011.

MA, H. Mercury intrusion porosimetry in concrete technology: tips in measurement, pore structure parameter acquisition and application. **Journal of porous materials**, v. 21, n. 2, p. 207-215, 2014.

MCLELLAN, B. C.; WILLIAMS, R. P.; LAY, J.; VAN RIESSEN, A.; CORDER, G. D. (2011) Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement, **J. Cleaner Prod.** (19) (9–10) p. 1080-1090.

NBR 5739, - Argamassa Concreto Endurecidos - Determinação da Absorção de Água Por Capilaridades. Rio de Janeiro, 2012.

NBR 9778- Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação da Absorção de Água Por Imersão - Índice de Vazios e Massa Específica. Rio de Janeiro, 2005.

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

NUNES, V. A Utilização de Vidro Reciclado Como Agregado em Argamassas Geopoliméricas. **Trabalho de Conclusão de Curso** – Centro Federal de Ensino Tecnológico de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015..

PALOMO, A., BLANCO-VARELA, M. T., GRANIZO, M. L., PUERTAS, F. VAZQUEZ, T., GRUTZECK, M. W. (1999). Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. **Cem. Concr. Res.** (29), p. 997–1004.

PUERTAS F, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A. 2003. Mineralogical and microstructural characterisation of alkali-activated fly ash/slag pastes. **Cem. Concr. Compos.** 25:287–92.

RASHAD, A. M. Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition 2013– A comprehensive overview. **Construction and Building Materials**, v. 41, n. 0, p. 303-318, 4//.

RILEM (1984) CPC 11.3 Absorption of Water by Concrete by Immersion Under Vacuum. In: RILEM Recommendations for the testing and Use of Constructions Materials, **E & FN Spon**, p. 36-37.

ROCHA JUNIOR, C.A.F.; SANTOS, S.C.A.; SOUZA, C.A.G.; ANGÉLICA, R.S.; Neves, R.F. Síntese de zeólitas a partir de cinza volante de caldeiras: caracterização física, química e mineralógica. 2012, **Cerâmica**, v. 58, p. 43-52.

ROSSI, EFIGÊNIA.; SALES, ALMIR.; 2008. Carbon footprint of coarse aggregate in Brazilian construction, 2014.São Carlos,.**Construction and Building Materials** 72 p. 333–339.

ROVANANIK,P.Effect of curing temperature on the development of hardstructureofmetakaolin-based geopolymer, 2010,.**Journal ofConstruction and Building Materials**, v.24, p.117624uction an.

SCHNEIDER, M. *et al.* Sustainable cement production—present and future. **Cement and Concrete Research**, 2011,v. 41, n. 7, p. 642-650.

SILVA, F. J.; THAUMATURGO, C. Fibre reinforcement and fracture response in geopolymferic mortars. **Fatigue Fract Eng Mater Struct**, v. 26, p. 167-172, 2002.

Silva, I. M. C. B.; Métodos de Preparação Industrial de Solventes e Reagentes Químicos; **Revista Virtual de Química** ISSN 1984-6835; 2012.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO.(SNIC). **Relatório Sobre ProduçãoanualdecimentoPortland2009**.Disponívelem:<<http://www.snic.org.br/pdf/relat2009-10web.pdf>. Acessado em 04 jun 2015.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO.(SNIC). **Relatório Sobre Produção anual de cimento Portland2013**.Disponívelem:<<http://www.snic.org.br/pdf/RelatórioAnual2013final.pdf>>. Acessado em 20 ago 2015.

STRUBLE, L. *et al.* Overview of Geopolymer Cement.**Geopolymer Binder Systems, STP** 1566, p 1-10, 2013.

THANNIMALAY, L.; YUSOFF, S.; ZAWAWI, N. Z. (2013) Life Cycle Assessment of Sodium Hydroxide. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, 7(2), p. 421-431.

TEIXEIRA PINTO, A.; Sistemas ligantes obtidos por ativação Alcalina do Metacaulino; **Dissertação apresentada na Universidade do Minho do Grau de Doutor em Engenharia Civil**; 2004.

TORGAL, F. P.; GOMES, J.; JALALI, S. Ligantes geopoliméricos: uma alternativa ambiental ao cimento Portland no contexto da economia do carbono. 2005. **Revista da APEB – Portugal**, 10 p

TURNER, C. Soluble Sodium Silicate Manufacture. Disponível em: <<http://nzic.org.nz/ChemProcesses/production/1G.pdf>>. Acesso em: 28 maio 2015.

VALT, RENATA BACHMANN GUIMARÃES. Análise do ciclo de vida de embalagens de PET, de alumínio e de vidro para refrigerantes no Brasil variando a taxa de reciclagem dos materiais. 2004. **Dissertação (Mestrado em Engenharia)**, UFPR, Curitiba, 208 pg.

WEBB, P. A. An introduction to the physical characterization of materials by mercury intrusion porosimetry with emphasis on reduction and presentation of experimental data. **Micromeritics Instrument Corp, Norcross**, Georgia, 2001.

WINTER, N. B.; CONSULTANTS, W. M. Scanning Electron Microscopy of Cement and Concrete. **WHD Microanalysis**, 2012. ISBN 0957104510.

WORRELL, E. *et al.* Carbon Dioxide Emissions From the Global Cement Industry. **Annual Review of Energy and the Environment**, v. 26, n. 1, p. 303-329, nov. 2001.

YIP CK, LUKEY GC, VAN DEVENTER JSJ. 2005. The coexistence of geopolymetric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. **Cem. Concr. Res.** 35:1688–97.