

Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II)

Comparative study of the Life Cycle Assessment of geopolymer concrete and CP-II Portland cement concrete

Paulo Henrique Ribeiro Borges
Thuany Marra de Figueiredo Lourenço
Ana Flávia Souza Foureaux
Luiza Soares Pacheco

Resumo

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) é um método que inclui a compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos de um produto ao longo do seu ciclo de vida. Os resultados desta análise são utilizados para escolher alternativas favoráveis para uma aplicação específica. Este artigo utilizou as ferramentas de ACV, apoiada pelo software Umberto, para comparar o processo de obtenção de concretos de cimento Portland com o de concretos geopoliméricos, obtidos da ativação alcalina de aluminossilicatos. O impacto ambiental foi avaliado considerando 1 m³ de cada concreto, sendo (i) as emissões de CO₂ (kg CO₂/ m³) e (ii) a demanda energética (MJ/m³) as variáveis para determinar o potencial sustentável de ambos materiais. O objetivo principal foi avaliar se os concretos geopoliméricos são mais sustentáveis do que os concretos tradicionais. Os resultados obtidos mostraram que o consumo energético é reduzido em 45,8% na produção do concreto geopolimérico, quando comparado à produção do concreto de cimento Portland de desempenho mecânico equivalente. Com relação às emissões de CO₂, o concreto geopolimérico reduz as emissões em 72,4%, em comparação ao concreto tradicional de cimento Portland CPII. Assim, o primeiro se mostra uma alternativa a ser considerada, na produção de materiais de construção de menor impacto ambiental.

Paulo Henrique Ribeiro Borges
Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais
Belo Horizonte - MG - Brasil

Thuany Marra de Figueiredo
Lourenço
Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais
Belo Horizonte - MG - Brasil

Ana Flávia Souza Foureaux
Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais
Belo Horizonte - MG - Brasil

Luiza Soares Pacheco
Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais
Belo Horizonte - MG - Brasil

Recebido em 15/05/13
Aceito em 19/04/14

Palavras-chave: Geopolímeros. Concreto. Cimento Portland. Sustentabilidade. Análise de Ciclo de Vida.

Abstract

The Life Cycle Assessment (LCA) method comprises the compilation and evaluation of inputs, outputs and environmental impacts of a product during its life cycle. The results of this analysis are used to select alternative products or processes for a particular application. This paper compared the process of making Portland cement concrete and Geopolymer concrete, the latter obtained from the alkaline activation of aluminosilicates. The CO₂ emissions (kg CO₂/ m³) and energy demand (MJ/ m³) for the production of 1 m³ of both concretes were used to determine the sustainable potential of these materials. The main objective was to assess whether geopolymer concrete is more sustainable than traditional Portland cement concrete. The results showed that geopolymer concrete reduces energy consumption by 45.8%, compared with Portland cement-based concrete, and has a similar mechanical performance. In addition, the use of geopolymer concrete reduces CO₂ emissions by 72.4%, when compared with traditional CP-II Portland cement concrete. Hence, Geopolymer is an alternative material with lower environmental impact that should be considered in the production of sustainable building materials.

Keywords: Geopolymer. Concrete. Portland Cement. Sustainability. Life Cycle Assessment.

Introdução

Cimento Portland e a questão ambiental

O cimento Portland é o material de construção de maior utilização no mundo, utilizado na composição de concretos e argamassas, e confere a estes boa moldabilidade no estado fresco. No estado endurecido, o cimento Portland geralmente é responsável pelo desenvolvimento de resistência mecânica elevada e boa durabilidade de argamassas e concretos.

Em 2010 foram produzidos no mundo cerca de 3,3 bilhões de toneladas de cimento. No Brasil, em consequência do crescimento no setor da construção civil, o consumo aparente de cimento terminou o ano de 2011 com 65 milhões de toneladas e o consumo *per capita* alcançou 333 kg/hab.ano, a maior marca de toda a história (Figura 1) (SINDICATO..., 2011).

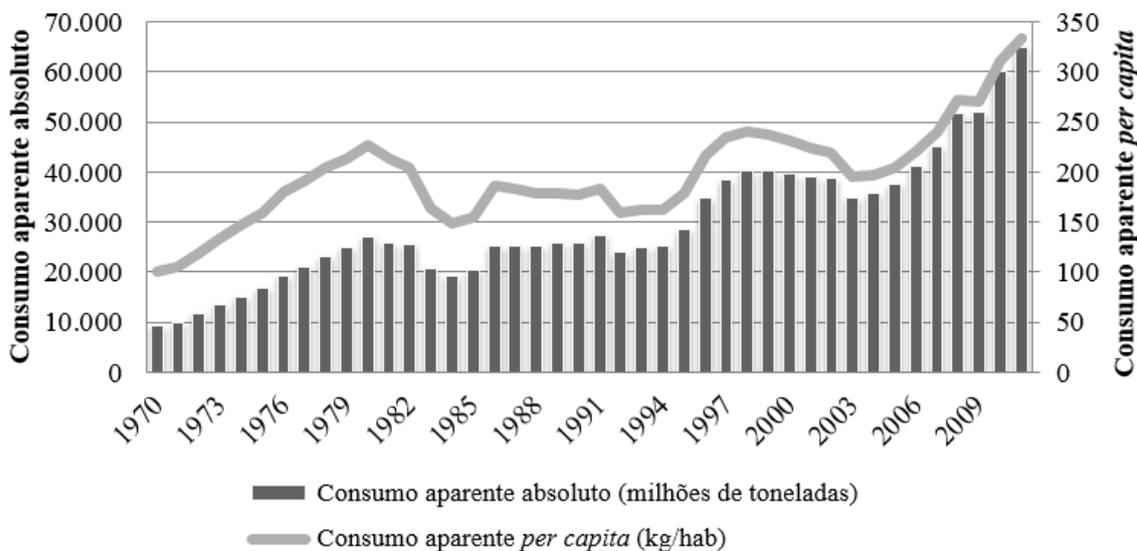
O grande consumo de cimento Portland tem gerado preocupações relacionadas a seu processo produtivo, dado que uma das etapas mais importantes, a clínquerização, requer a queima de matérias-primas (calcário e argilas) a uma temperatura de aproximadamente 1.500 °C, com alta liberação de CO₂. Pouco mais da metade das

emissões de CO₂ na indústria do cimento ocorre durante a transformação físico-química que dá origem ao clínquer. A outra parcela é resultante predominantemente da queima de combustíveis no forno de clínquerização, onde a chama atinge uma temperatura de até 2.000 °C (SINDICATO..., 2011).

A indústria cimenteira é caracterizada por um alto consumo energético, tanto de energia térmica demandada na fabricação do clínquer quanto de energia elétrica utilizada por outros equipamentos, como, por exemplo, os moinhos de cimento. O consumo de energia térmica pode chegar a 3.300 MJ/t de clínquer produzido (SANTI, 1997¹ *apud* PAULA, 2009), enquanto o consumo de energia elétrica é estimado entre 90 e 120 kWh/t de cimento produzido (CEMBUREAU, 1999² *apud* PAULA, 2009).

A crescente preocupação com o meio ambiente tem gerado a busca por processos produtivos mais sustentáveis e estimulado pesquisas mundiais para a redução de emissão por parte da indústria cimenteira (VAN OSS; PADOVANI, 2003; HABERT *et al.*, 2010; SCHNEIDER *et al.*, 2011; BENHELAL *et al.*, 2013).

Figura 1 - Consumo aparente de cimento no Brasil



Fonte: adaptado do relatório anual SNIC (SINDICATO..., 2011).

¹SANTI, A. M. M. O Emprego de Resíduos Como Combustíveis Complementares na Produção de Cimento na Perspectiva da Energia, da Sociedade e do Meio Ambiente: estudo de caso: Minas Gerais no período 1980-1997. Campinas, 1997. 157 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

²CEMBUREAU. The European Cement Association. *Best Available Techniques For The Cement Industry*. 1999 p. Disponível em: <<http://www.cembureau.be>>. Acesso em: 7 mar. 2013.

Existem tecnologias amplamente difundidas que buscam a redução do consumo de energia e emissões durante o processo produtivo do cimento. A primeira delas é a utilização de equipamentos que demandam menos energia elétrica, tais como os moinhos verticais de cimento. Essa busca pela eficiência térmica e elétrica é comandada pela própria indústria de cimento, a partir da instalação das mais recentes tecnologias, que garantem vantagens de custo energético a novas fábricas, e do processo de modernização das antigas (IEA, 2009). No entanto, essa alternativa tecnológica possui limitações: a busca por eficiência térmica e elétrica, por exemplo, esbarra na necessidade da produção de cimentos de alto desempenho, os quais requerem uma moagem muito fina e, por isso, demandam mais energia do que os cimentos de menor desempenho. Além disso, a adição de alguns dos substitutos do clínquer (como as escórias de alto forno) reduz a emissão de CO₂, mas isso necessita de mais energia para atingir a finura adequada para reatividade (INTERNATIONAL..., 2009).

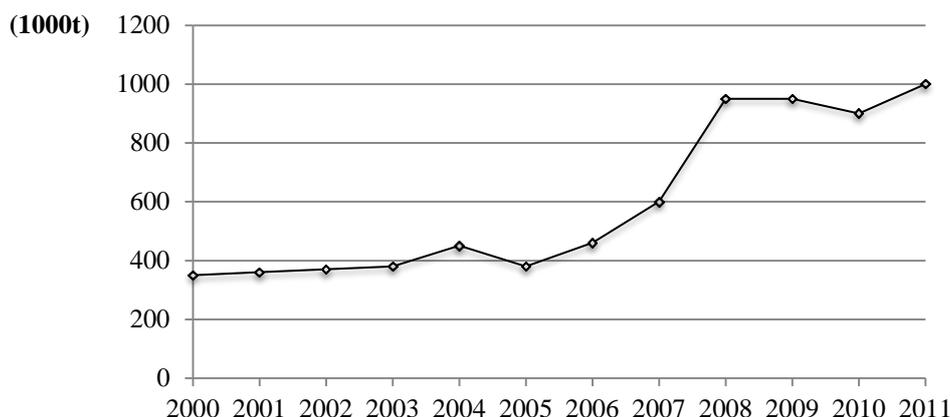
A segunda alternativa, talvez a mais antiga, conhecida e difundida, é justamente o emprego de adições minerais na produção dos cimentos compostos. As diferentes matérias-primas adicionadas ao clínquer permitem a fabricação dos variados tipos de cimento Portland disponíveis no mercado, alguns contendo materiais reativos (pozolanas) e outros inertes (fíleres). Os mais comuns são os fíleres carbonáticos (CaCO₃ pulverizado), materiais argilosos naturais ou calcinadas, bem como as escórias de alto forno. Adições reativas tais como a escória possuem maior possibilidade de emprego em substituição ao clínquer por suas vantagens técnicas, tais como elevação da resistência mecânica em longo prazo, redução do calor de hidratação e boa durabilidade em meios agressivos (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011). De modo geral, a substituição de parte do clínquer por adições ao cimento tem como consequências diretas:

- (a) diminuição no consumo de recursos naturais – no caso do uso de resíduos industriais como adições minerais;
- (b) menor emissão de CO₂;
- (c) menor quantidade de matéria-prima calcinada para a produção de uma tonelada de cimento Portland, diminuindo as emissões provenientes da calcinação e da queima de combustíveis fósseis, que ocorrerá em menor quantidade; e
- (d) menor demanda de energia, caso haja reduções na moagem, processo de maior demanda energética na produção de cimento Portland.

Uma terceira tecnologia, denominada de coprocessamento em fornos de clínquer, utiliza resíduos para alimentar a chama do forno, substituindo uma parcela dos combustíveis convencionais (ASSOCIAÇÃO..., 2013). Dessa forma, os fornos de cimento possuem capacidade de incineração adequada para grandes volumes de resíduos, que de outra forma seriam destruídos sem a recuperação da energia, além de contribuir para a redução das emissões de CO₂ devido ao menor consumo de combustíveis fósseis. Entre os resíduos mais comuns no coprocessamento encontram-se borrachas, solventes, tintas e óleos usados, pneus e borras de petróleo, bem como solos contaminados e lodos de centrais de tratamento de esgoto. Segundo a ABCP (ASSOCIAÇÃO..., 2013), um único forno com capacidade de produção diária de mil toneladas de clínquer pode consumir até cinco mil pneus por dia. Em 2011, cerca de 45 milhões de pneus foram coprocessados em fornos de cimento brasileiros (Figura 2). Esses materiais combustíveis são selecionados conforme sua disponibilidade no mercado, preço e propriedades, tais como poder calorífico e composição química. De acordo com a legislação brasileira, resíduos domiciliares brutos, hospitalares, radioativos, agrotóxicos e explosivos não podem ser queimados nos fornos de cimento (CONSELHO..., 2000).

Cabe ainda citar a tecnologia de *Carbon Capture and Storage* (CCS). Trata-se de uma nova tecnologia bastante promissora na redução da emissão de CO₂, ainda que não tenha sido utilizada em escala de produção de cimentos. A CCS é, basicamente, a captura do CO₂ antes que ele seja liberado para a atmosfera, comprimindo-o a um líquido e, em seguida, transportando-o por tubos subterrâneos, para permanecer armazenados (VATOPOULOS; TZIMAS, 2012). As três etapas principais desse processo compreendem a captura, o transporte e o armazenamento do carbono. O transporte pode ser realizado através de dutos, caminhões ou navios, sendo o realizado por dutos (por meio de compressão) o mais econômico, carregando CO₂ de alta pressão. Já o armazenamento pode ocorrer no subsolo ou em reservatórios degradados de gás e petróleo (FUNDAÇÃO..., 2009). Pode-se estimar que, se a implementação dessa tecnologia ocorrer com sucesso, as emissões de carbono a partir da fabricação de cimento podem reduzir-se em até 70%. No entanto, esta ainda é uma área pouco estudada e de alto custo de instalação, podendo não ser viável para uma grande quantidade de indústrias de cimento (STAVRINIDES, 2010).

Figura 2 - Evolução do coprocessamento no Brasil



Fonte: adaptado de Coprocessamento (2012).

Geopolímero como aglomerante alternativo ao cimento Portland

Estudos iniciados nas décadas de 1940-50 pelos pesquisadores ucranianos Glukhovsky e Krivenko deram início a pesquisas que seguem até hoje em torno da substituição do cimento Portland por materiais obtidos a partir da ativação alcalina de aluminossilicatos (por exemplo, escórias de alto forno) (KRIVENKO, 2008). Já na década de 90, o pesquisador francês Joseph Davidovits começou a publicar seus primeiros resultados com ativação de diferentes tipos aluminossilicatos em uma série de produtos que denominou de geopolímeros (DAVIDOVITS, 1994). Os cimentos geopoliméricos são aluminossilicatos alcalis-ativados, ou seja, consistem de um ou mais materiais constituídos por SiO_2 e Al_2O_3 em proporções suficientes e em forma reativa (como cinzas, argilas ativas, pozolana e escórias), misturados a uma solução alcalina aquosa ativadora, contendo, por exemplo, hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de sódio (NaOH), silicato de sódio ou potássio (BUCHWALD; ZELLMANN; KAPS, 2011).

Também chamados de polímeros inorgânicos, esses materiais possuem vantagens ecológicas e físico-químicas quando comparados ao cimento Portland. As vantagens ecológicas se tornaram evidentes com a possibilidade de ser produzidos à temperatura ambiente (ou até 80 °C) sem aparente liberação de CO_2 na atmosfera. As características físico-químicas garantem propriedades especiais, tais como rápido desenvolvimento de resistência mecânica e excelente durabilidade química. Segundo Davidovits (1994), o cimento geopolimérico com cura à temperatura ambiente pode adquirir resistência à compressão de 20 MPa em 4 h a 20 °C. Dependendo ainda das condições

de síntese e cura, esses materiais podem atingir valores de resistência à compressão de 70 a 100 MPa (TEIXEIRA PINTO, 2004). Ainda entre as propriedades dos geopolímeros destacam-se:

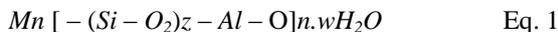
- (a) a inércia química em relação a algumas patologias comuns aos produtos à base de cimento Portland, em outras palavras, não gera reação expansiva do tipo álcali-agregado, comum a concretos de cimento Portland confeccionados com agregados miúdos potencialmente reativos (DAVIDOVITS, 1994);
- (b) baixos valores de permeabilidade, que favorecem sua aplicação na imobilização de resíduos tóxicos e radioativos (GIANNOPOULOU; PANIAS, 2007);
- (c) resistência às altas temperaturas, o que permite desenvolvimento de estruturas mais resistentes à ação do fogo (KONG; SANJAYAN, 2010), e materiais refratários de baixo custo (SOUZA *et al.*, 2011); e
- (d) alta durabilidade química (BAKHAREV, 2005a, 2005b).

Portanto, é natural que uma de suas aplicações mais promissoras seja na substituição de cimentos em argamassas e concretos na construção civil, devido a seu grande potencial ecológico e alto desempenho físico-químico.

Processo Produtivo do concreto geopolimérico

O processo de geopolimerização inicia-se pela etapa de dissolução, que ocorre quando a solução alcalina entra em contato com o aluminossilicato sólido. Essa etapa é caracterizada por alta alcalinidade. Com o decorrer da reação de dissolução, as concentrações de alumínio e silicato

umentam até o ponto em que se inicia a condensação (BUCHWALD; ZELLMANN; KAPS, 2011). O processo pode ser descrito pela Equação 1, na qual “M” é o elemento alcalino; “-” representa as ligações; “z” pode ser 1, 2 ou 3; e “n” é o grau de polimerização.



O produto formado pode ser considerado uma rocha sintética cuja estrutura contém uma rede tridimensional amorfa de átomos de silício e alumínio, cujas propriedades são bastante influenciadas pela proporção Si/Al na microestrutura.

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 (CRIADO; POLOMO; FERNÁNDEZ-JOMENEZ, 2005) e diversos tipos de argilas calcinadas (BONDAR *et al.*, 2011; RUIZ-SANTAQUITERIA *et al.*, 2013), destacando-se os caulins calcinados, mais conhecidos como metacaulins. A metacaulinita é resultante do processo de calcinação da caulinita, um mineral cristalino de origem natural de granulometria fina, geralmente de cor branca e boa inércia química. A produção do metacaulim inicia-se com a avaliação de reservas e depósitos de argilas caulínicas, etapa seguida da lavragem do material nas minas. Depois de ser lavrado, o caulim resultante do desmonte é coletado por gravidade e bombeado para a usina de beneficiamento, onde se deve garantir uma composição química favorável a sua aplicação (NETTO, 2006).

Após a secagem do material, parte-se para a etapa de calcinação. Nesse processo, caracterizado por maior consumo energético, normalmente se emprega uma temperatura entre 600 °C e 900 °C, dependendo da natureza do material (MOTA *et al.*, 2006⁴ *apud* NETTO, 2006). Durante esse processo ocorre a desidroxilação da caulinita (perda de íons OH⁻ da estrutura cristalina original), o que dá origem a uma estrutura amorfa (Equação 2) (MOTHÉ, 2004 *apud* NETTO, 2006). Como pode ser observado na equação 2, um dos produtos da calcinação realizada para obtenção de metacaulim é a água, diferentemente da calcinação

do clínquer, que tem como produto o CO₂. Isso torna a metacaulim, em termos ambientais, uma matéria-prima de grande potencial.



Solução alcalina ativadora

Na maioria das pesquisas, o hidróxido de sódio (NaOH) tem sido utilizado como parte da solução ativadora, em vez do hidróxido de potássio (KOH). De fato, o primeiro tem um custo de produção bem mais baixo, o que praticamente define sua escolha. O NaOH é preparado principalmente por métodos eletrolíticos, usando-se solução aquosa de cloreto de sódio (SILVA, 2012).

A utilização de outro componente na solução ativadora é interessante para garantir a presença de SiO₂ solúvel, para aumentar a velocidade de reação e garantir alta resistência mecânica nas primeiras horas. Para tal, têm-se utilizado soluções aquosas de silicato de sódio (Na₂SiO₃). Essa solução é obtida inicialmente pela dosagem e mistura mecânica de carbonato de sódio (Na₂CO₃) e sílica (SiO₂). 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 emissão de gases efeito estufa e alto consumo energético. O produto é então introduzido em autoclaves, submetido a alta pressão e, em contato com água, resulta em uma solução aquosa de silicato de sódio (FAWER; CONCANNON; RIEBER, 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 (SiO₂/Na₂O).

Impactos ambientais gerados na confecção do concreto geopolimérico

O geopolímero estudado neste trabalho é obtido a partir da mistura do metacaulim, hidróxido de sódio e silicato de sódio. Nesta etapa ocorre uma reação exotérmica, que resulta em um material aglomerante. A esta matriz podem ser misturados os mesmos tipos de agregados utilizados na produção de argamassas e concretos de cimento Portland. O produto resultante será uma argamassa geopolimérica ou concreto geopolimérico.

As emissões de CO₂ no processo produtivo do concreto geopolimérico estão relacionadas à obtenção de suas matérias-primas: ocorrem emissões no processo produtivo do metacaulim e do silicato de sódio; em ambos o CO₂ é proveniente da queima de combustíveis fósseis para fornecimento de calor.

O consumo energético na produção de concreto geopolimérico também está relacionado à obtenção

³ MOTHÉ, L. P. Avaliação das Condições Ideais Para a Produção de Metacaulinita Através da Análise da Sua Atividade Pozolânica. Campos dos Goytacazes, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2004.

⁴ MOTA, L. M. F. *et al.* Análise das Propriedades do Estado Endurecido de Concretos Empregando Metacaulim e Aditivo Superplastificante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48., Rio de Janeiro, 2006. Anais... Rio de Janeiro: IBRACON, 2006.

de suas matérias-primas, principalmente o silicato de sódio. Isso será discutido adiante, durante a ACV realizada neste trabalho.

Análise de Ciclo de Vida (ACV)

Todo produto, independentemente de sua composição, provoca impacto no meio ambiente, seja em função de seu processo produtivo, das matérias-primas consumidas ou devido à utilização e disposição final. A ACV é uma técnica para avaliação dos aspectos ambientais e dos potenciais impactos associados ao produto, compreendendo etapas que vão desde as retiradas das matérias-primas da natureza até a disposição final. Desse modo, a ACV é de suma importância, pois permite uma visão mais ampla do processo de produção (CHEHEBE, 1997). Os resultados desse tipo de análise podem ser utilizados de diversas formas, a saber:

- (a) fornece uma ampla base de informações sobre necessidades totais de recursos, emissões e consumo energético;
- (b) identifica pontos de possíveis reduções nas necessidades de recursos e emissões;
- (c) compara entradas e saídas do sistema associadas com produtos alternativos; e
- (d) auxilia no desenvolvimento de novos produtos, processos ou atividades, visando a uma redução das necessidades de recursos e emissões.

Existem normas que orientam as organizações no sentido de adequações ao contexto de melhoria dos aspectos ambientais relacionados a suas atividades. As normas ISO 14000 – Gestão Ambiental (INTERNATIONAL..., 2006) – tratam sobre o que a organização deve realizar para minimizar os efeitos nocivos ao ambiente causados por suas atividades. A série ISO 14040 (INTERNATIONAL..., 2006) trata da ACV, especificando sua estrutura geral e orientando a elaboração das quatro fases comuns a todo estudo dessa natureza:

- (a) fase de definição do objetivo e escopo: inclui os limites do sistema e o nível de detalhamento da ACV, que dependem do motivo e da utilização do estudo;
- (b) fase de análise de inventário: levantamento dos dados de entrada e saída no que diz respeito ao sistema a ser estudado;
- (c) fase de avaliação de impacto: fornece informações adicionais para ajudar a avaliar os resultados de modo a melhor compreender o seu significado ambiental; e

(d) fase de interpretação: os resultados são resumidos e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisões, de acordo com o objetivo estabelecido.

Este artigo avaliou o impacto ambiental de dois tipos distintos de concreto estrutural: um tradicional à base de cimento Portland e outro geopolimérico. As emissões de CO₂ e demanda de energia foram computadas, a fim de determinar o potencial sustentável desses dois tipos distintos de ligantes. Para tal avaliação foram utilizadas ferramentas de Análise do Ciclo de Vida apoiadas pelo 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 Umberto possui uma grande flexibilidade, possibilitando o desenvolvimento de cálculos específicos definidos pelo usuário para que o sistema seja fiel ao ambiente a que pertence (DELGADO *et al.*, 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 quanto de aspectos financeiros de todas as atividades componentes do sistema.

Metodologia

Definição do objetivo e escopo

O objetivo da ACV apresentada neste trabalho foi avaliar o impacto ambiental dos dois tipos de concreto, considerando as emissões de CO₂ e demanda energética, esperando concluir se os concretos geopoliméricos são mesmo mais atrativos em termos ambientais do que os concretos confeccionados com o cimento Portland.

Determinação da unidade funcional e fronteiras

A unidade funcional, base para comparação, é uma unidade de volume de concreto produzido no Sistema Internacional de Unidades (1 m³ de concreto). Essa unidade funcional foi adotada já que os concretos analisados têm a mesma resistência à compressão axial e a mesma idade de controle. Para os dois principais parâmetros analisados, as unidades são demanda de energia (KJ/m³ de concreto) e emissão de CO₂ (kg/m³ de concreto).

Esta análise do ciclo de vida ignora o transporte e a extração de matérias-primas comum, bem como as etapas de aplicação do concreto (transporte, lançamento, compactação e cura), uma vez que

elas ocorrem para ambos os tipos de concreto, não sendo, portanto, relevantes para a comparação. Esse tipo de limitação na fronteira da ACV é bastante comum, chamado internacionalmente de análise *cradle-to-gate* (análise das matérias-primas até a produção do material, ignorando sua vida útil e reciclabilidade). No caso de concretos diferentes como os estudados neste trabalho, a análise também assume que ambos os concretos possuem a durabilidade ao longo dos anos, o que também não é necessariamente verdadeiro. Em outras palavras, em uma análise de ciclo de vida completa, conhecida por *cradle-to-tomb*, considera-se que a microestrutura dos dois concretos não será mais a mesma, e seu desempenho em longo prazo poderá variar de acordo com os microclimas aos quais estarão submetidos durante sua vida útil. Devido à dificuldade de realização dessa análise, muitas pesquisas (HABERT; D'ESPINOSE DE LACAILLERIE; ROUSSEL, 2011) têm realizado o ciclo simplificado *cradle-to-gate*, o que também foi adotado neste trabalho. Os limites considerados para a análise do ciclo *cradle-to-gate* são, portanto, a produção de cimento, a operação da fábrica, a moagem da escória de alto forno para produção de um cimento composto com escória, a produção de agregados e sua mistura para a produção de concreto de cimento Portland. Por outro lado, é necessária a produção de metacaulim, silicato de sódio e hidróxido de sódio, e beneficiamento de agregados, para a obtenção de 1 m³ de concreto de cimento geopolimérico.

Escolhas dos concretos comparados

Decidiu-se estudar um concreto à base de cimento Portland do tipo CII-E, que contém até 34% de escória de alto forno em sua composição. Esse tipo de cimento foi escolhido como referência, pois é amplamente utilizado em concretos na região metropolitana de Belo Horizonte (MG), área para a qual o estudo foi realizado. Assumiu-se que o cimento é produzido com o limite máximo de escória permitida por norma, ou seja, 34%. O concreto com cimento CII E-40 foi idealizado

contendo agregados naturais (areia natural e brita calcária). A formulação para os traços 1 m³ de concreto, representada na Tabela 1, mostra a formulação fornecida por uma concreteira da região metropolitana de Belo Horizonte, para a produção de um concreto de 40 MPa a 28 dias.

O concreto geopolimérico escolhido para análise é constituído por metacaulim com agregados naturais (os mesmos utilizados no concreto com CII). A solução ativadora é composta de silicato de sódio (Na₂SiO₃) e hidróxido de sódio (NaOH). Esse tipo de concreto foi escolhido devido aos bons resultados obtidos em laboratório com matrizes geopoliméricas em outros projetos. Para a formulação do concreto geopolimérico, a relação entre os materiais secos foi mantida idêntica ao traço do concreto tradicional. Em outras palavras, a relação cimento Portland:areia:brita é idêntica à relação metacaulim:areia:brita. Porém, a quantidade de solução empregada no concreto geopolimérico é igual a 1,3 vez a quantidade de metacaulim. Essa relação de 1,3 entre solução e metacaulim foi obtida também em ensaios laboratoriais, visando garantir boa trabalhabilidade e resistência mecânica adequada. A quantidade de material necessária para a produção de 1 m³ de concreto geopolimérico foi calculada a partir da densidade desse tipo de concreto quando fresco, ou seja, 2.300 kg/m³ (Tabela 2).

Análise do inventário de dados

A montagem das redes é uma etapa trabalhosa e demorada, haja vista que é necessário conhecer todos os processos de obtenção das matérias-primas e fabricação tanto do concreto de cimento Portland quanto de concretos geopoliméricos. 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 e gerar um balanço coerente. Os dados de consumo de matéria-prima, emissões de CO₂ e demanda de energia para produção de 1 m³ de concreto, obtidos na literatura, estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 1 - traço do concreto tradicional

Constituintes	Concreto com cimento Portland (densidade de 2.400 Kg/m ³)					Total
	Cimento CP II E40	Areia	Brita	Água	Aditivo plastificante	
kg/m ³ de concreto	422	730	1.048	193	3,1	2.396
Traço unitário	1	1,73	2,48	0,46	0,00734	

Tabela 2 - Traço do concreto geopolimérico (resistência mecânica de 40 MPa)

Concreto geopolimérico (densidade de 2.300 kg/m ³)					
Constituintes	Metacaulim	Areia	Brita	Solução	Total
Traço mantido*	1	1,73	2,48	1,3	
kg/m ³ de concreto	353	611	877	459	2.300

Nota: *exceto relação solução-sólido (metacaulim).

Tabela 3 - Inventário da análise de ciclo de vida de concreto

Produção de agregados em geral			
	Quantidade	Referência Bibliográfica	
Energia na produção de agregado	83.000 (kJ/ton. de agregado)	Hammond e Jones (2008)	
Emissão de CO ₂ na produção de agregado	5 (kg/ton. de agregado)		
Moagem da escória			
Consumo energético - moinho vertical	210.312 (kJ/ton. de escória)		
Produção de aditivos plastificantes			
Consumo energético – produção de aditivos	6,4 MJ/kg de aditivo	EFCA (EUROPEAN..., 2002)	
Emissão de CO ₂ – produção de aditivos	0,38 kg de CO ₂ /kg de aditivo		
Produção de cimento Portland (34% Escória)			
Matéria-prima	Quantidade (kg/ton. de cimento)		
Calcário	1.650	BGS (BRITISH GEOLOGIAL SURVEY, 2005)	
Argila	400		
Gesso	40	Signoretti (2008)	
Escória	340	Adição 34%	
Carvão	132	Signoretti (2008)	
Pneu	21,085		
Emissão de CO ₂ *	639,389	*Calculado separadamente	
Energia elétrica	Quantidade (kJ/ton. de cimento)		
Britagem do calcário	9.309,672	Paula (2009)	
Moagem da argila	2276,64		
Moagem do cru	74.959,488		
Homogeneização	10.713,6		
Alimentação e exaustão do forno rotativo	39.506,4		
Acionamento do forno	6.696		
Acionamento do soprador de ar primário	2.151,648		
Resfriador de clínquer	14.508		
Transporte de clínquer	5.624,64		
Moagem de clínquer	99.819,504		
Precipitador eletrostático	1.450,8		
Produção dos constituintes do geopolímero (metacaulim + solução ativadora)			
Produção de Metacaulim	Quantidade (kg/ton. de metacaulim)		
Caulim	1.500	Pacheco (2012)	
Carvão Vegetal	100		
Produção de Silicato de Sódio	Quantidade (kg/ton. de silicato WR 3.3 37%)		
Carbonato de sódio	149	Fawer, Concannon e Rieber (1999)	
Areia (lavada e seca)	287		
Água (elevada temp. e pressão)	630		
Emissão de CO ₂	424,668		
Silicato WR 3.3 (100%)	370		
Energia (fusão)	4.183 MJ/ton. de Silicato WR 3.3 37%		
Energia (dissolução)	467 MJ/ton. de Silicato WR 3.3 37%		
Produção de Hidróxido de Sódio	Quantidade (kg/ton. de hidróxido)		
Água	450	Reação estequiométrica	
Cloreto de sódio	1.462,5	Pacheco (2012)	
Energia eletrólise	10800 kJ/ ton. de hidróxido		

Após as devidas conversões, os dados foram inseridos no software Umberto, obedecendo a fatores lineares, responsáveis pelo balanço de massa e energia ao longo do ciclo de vida de cada concreto. Assim, o software disponibiliza

resultados para a avaliação de todo o processo produtivo, o que permite avaliar os impactos gerados e identificar pontos passíveis de otimização, além de comparar os processos

produtivos de ambos os concretos quanto às emissões e demanda de energia.

Os cálculos das emissões de CO₂ na produção de cimento Portland foram realizados separadamente, conforme o seguinte método: as emissões provenientes da calcinação foram calculadas a partir do fator de emissão de CO₂ na produção de clínquer. Segundo o IPCC (INTERGOVERNMENTAL..., 2006), esse fator é $FE_{(clínquer)} = 0,5071 \text{ t CO}_2/\text{t clínquer}$. Já as emissões de CO₂ oriundas da combustão foram calculadas a partir da equação 3 (UNITED..., 2008):

$$Emissões = \sum_{i=1}^n Comb. \times PC \times C_1 \times FO \times \frac{CO_2}{C} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

Comb.= massa ou volume de combustível;

PC = poder calorífico;

C₁ = quantidade de carbono contido no combustível (massa C/energia);

FO = fração oxidada do combustível; e

$CO_2/C = \text{peso molecular CO}_2/\text{peso molecular C}$.

As redes elaboradas no software Umberto para os dois tipos de concreto estão representadas pelas Figuras 3 e 4. As transições dos diagramas indicam a presença de um processo e estão representadas por retângulos azuis. Essas transições foram alimentadas com os dados de entrada e saída, representados por círculos verdes e vermelhos, respectivamente. Entre as transições existe uma etapa intermediária que é resultado do processo anterior e matéria-prima para etapa seguinte. Esta etapa é então representada pelas conexões simbolizadas por círculos duplos de cor marrom. 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 1m³ de concreto. O software então avalia o fluxo de materiais e energia para esta quantidade de produto final. Neste estudo, o ajuste da rede para 1m³ de concreto, nos permite realizar um comparativo entre o concreto geopolimérico e o concreto tradicional com cimento Portland.

Figura 3 - Fluxograma obtido através do software Umberto para ACV do concreto com cimento Portland

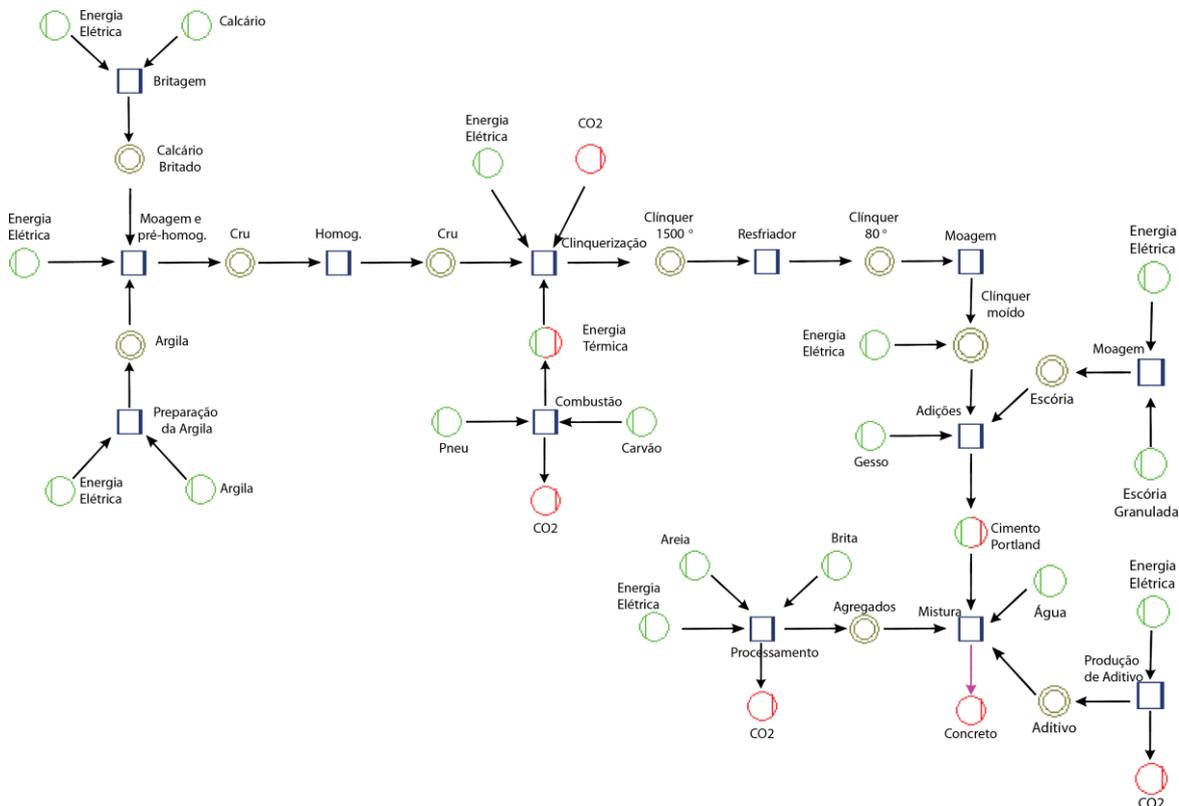
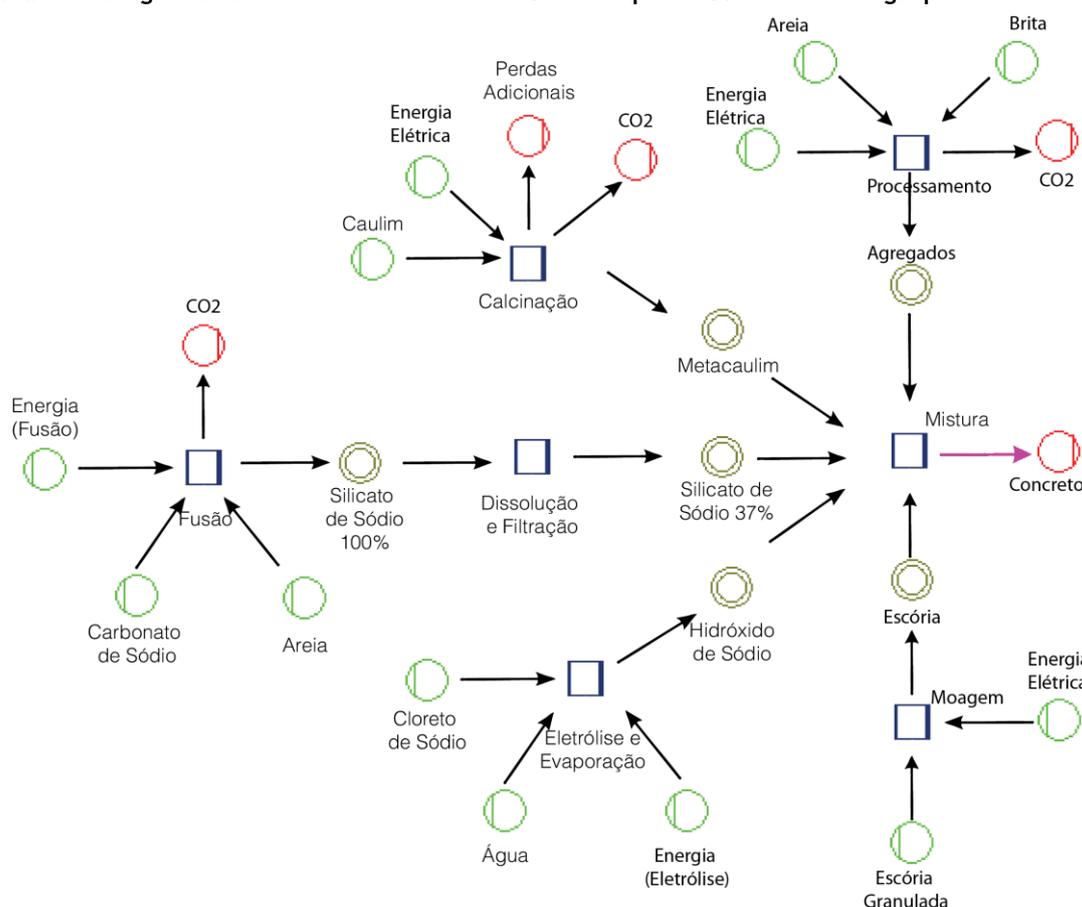


Figura 4 - Fluxograma obtido através do software Umberto para ACV do concreto geopolimérico



Resultados e discussão

As Figuras 5 e 6 representam, respectivamente, a demanda de energia para a produção de 1 m³ de concreto com cimento Portland e concreto geopolimérico, a partir da ACV realizada. Pode-se observar que, na produção do concreto tradicional, o maior consumo de energia ocorre durante a produção de cimento Portland; cerca de 1.550 MJ de um total de 1.794 MJ são consumidos nesse processo, sendo grande parte dessa energia destinada à demanda térmica no processo de clínquerização. No caso da produção do concreto geopolimérico, o maior responsável pelo consumo energético é a produção de silicato de sódio, que representa 616 MJ dos 971 MJ totais. Neste processo a maior demanda energética está relacionada às etapas de fusão e dissolução (FAWER; CONCANNON; RIEBER, 1999).

As emissões de CO₂ também foram avaliadas para 1 m³ de concreto produzido (Figuras 7 e 8). No concreto tradicional, mesmo utilizando técnicas de coprocessamento e substituição parcial do clínquer por escória, há altas taxas de emissão de CO₂ durante a produção do ligante, e as emissões

oriundas da calcinação e da queima de combustíveis fósseis nos fornos têm contribuição similar nas emissões.

Para a produção do concreto geopolimérico, o ligante em si não emite CO₂, mas suas matérias-primas o fazem, sendo a matéria-prima de maior significância nas emissões novamente o silicato de sódio. Para a avaliação de 1 m³ de concreto, verificou-se que o concreto de cimento Portland do tipo CPII, mesmo com técnicas para redução de emissões, ainda é responsável por 271,9 kg de CO₂/m³ de concreto, enquanto o concreto geopolimérico emite 3,6 vezes menos CO₂, sendo um total de 75,1 kg de CO₂/m³ de concreto.

Diante desses resultados, pode-se especular que os concretos geopoliméricos seriam possíveis candidatos a substitutos dos concretos convencionais de cimento Portland. Da mesma forma, pode-se ainda perguntar por que esses materiais, ainda que pesquisados há quase 30 anos, não estão presentes no mercado de construção no planeta. No entanto, há alguns obstáculos para a produção e comercialização dos concretos geopoliméricos.

Figura 5 - Demanda energética na produção de concreto Tradicional

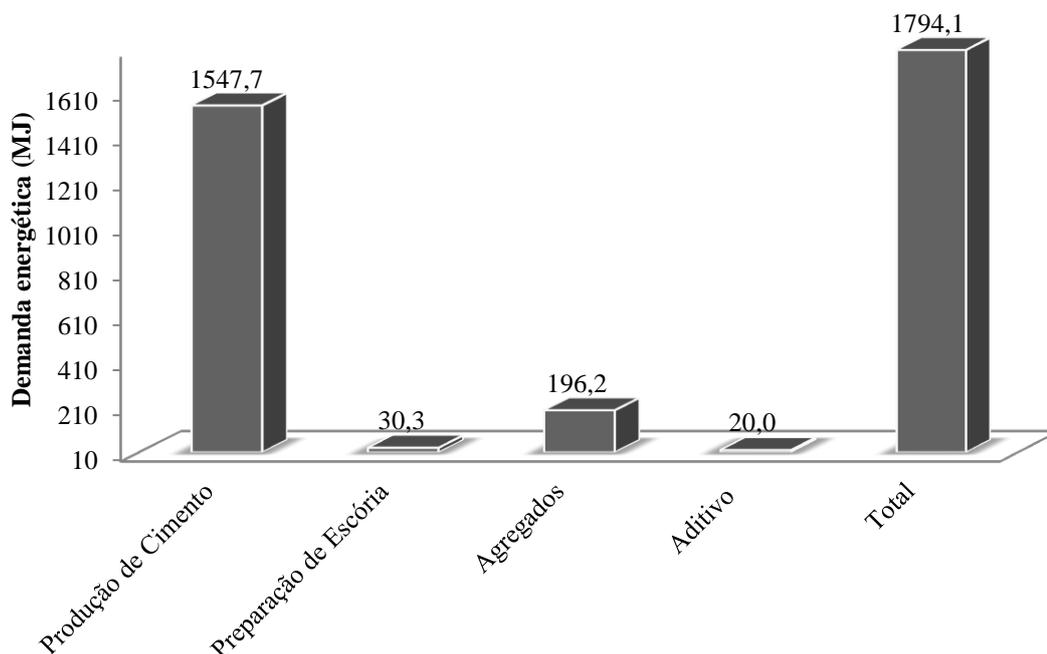
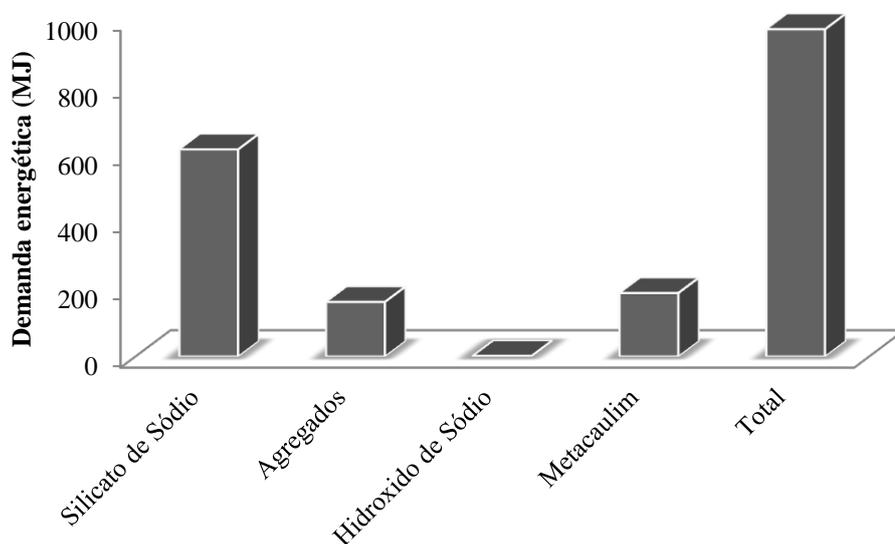


Figura 6 - Demanda energética na produção de concreto Geopolimérico



Primeiramente, por se tratar de um processo de ativação alcalina de aluminossilicatos, várias matérias-primas podem ser utilizadas no processo de fabricação (tanto como fonte de SiO_2 e Al_2O_3 quanto como ativadores). Diversos centros de pesquisa têm desenvolvido produtos geopoliméricos, mas cada um deles trabalha com matérias-primas locais. Isso limita o intercâmbio

de informações e, portanto, a consolidação da ciência de ativação alcalina. Cabe ressaltar que o cimento Portland possui matérias-primas que estão disponíveis mundialmente (calcário e argila). Portanto, espera-se que qualquer alteração de processo de produção do cimento Portland que ocorra poderá ser seguida por qualquer fábrica mundial.

Figura 7 - Emissões de CO₂ na Produção de concreto Tradicional

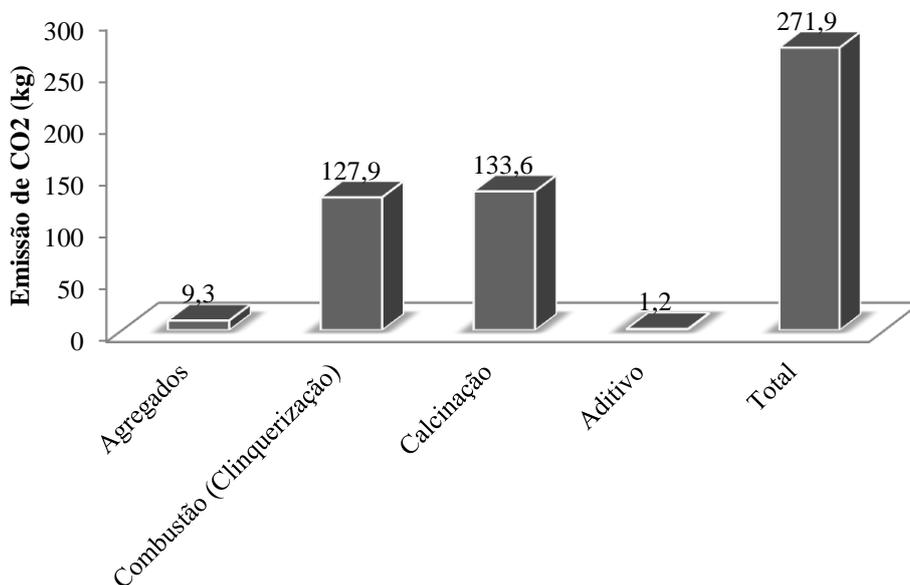
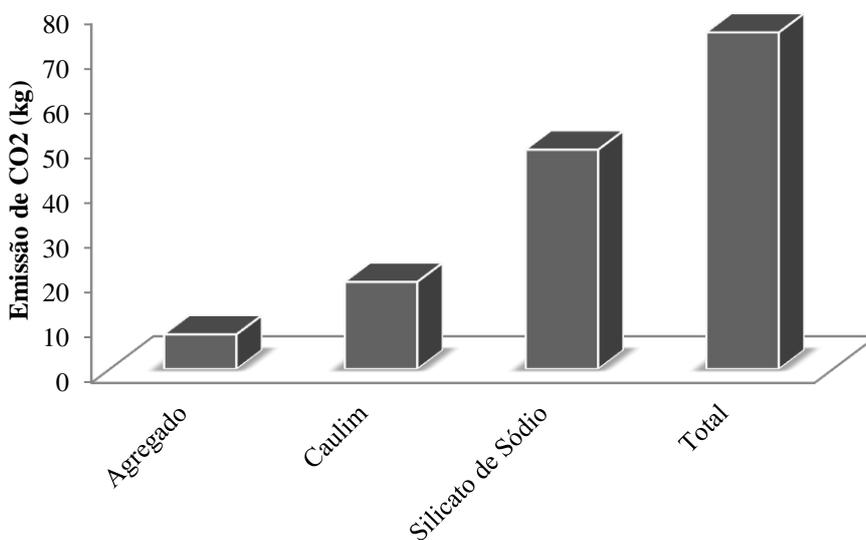


Figura 8 - Emissões de CO₂ na Produção de concreto Geopolimérico



Outro fator que não deve ser ignorado é a aparente falta de pesquisa em geopolímeros pela indústria cimenteira. É perceptível que essa indústria não vê o geopolímero como ameaça eminente, mas assiste ao desenvolvimento de perto, sem tomar a frente e sem investir em pesquisas, ainda percebendo que o cimento Portland é a melhor opção de ligante para a construção civil no futuro (GARTNER; MACPHEE, 2011).

Talvez o que limite consideravelmente sua utilização seja também a falta de normalização, que garante a aplicação correta para garantia da resistência mecânica e durabilidade dos geopolímeros. Isso é importante até mesmo para garantir a segurança dos envolvidos no processo, haja vista que as soluções empregadas na produção do geopolímero são alcalinas e, portanto, podem provocar queimaduras na pele dos operários, enquanto o concreto se encontra no estado fresco

(mistura, lançamento do concreto). Portanto, luvas e óculos de segurança são equipamentos de proteção essenciais na produção do concreto. Por isso, é de se esperar que o maior controle na produção de geopolímeros limitará seu uso à pré-fabricação (BORGES *et al.*, 2012), já que no ambiente fabril podem-se tomar mais cuidados no preparo e moldagem dos elementos de concreto, o que, às vezes, foge do controle nos canteiros de obra.

Além disso, enquanto não houver normas de utilização, o mercado se negará a utilizar o produto, ainda que as pesquisas demonstrem que ele é tecnicamente viável. Portanto, ainda há muito caminho a ser percorrido para que estes novos ligantes possam substituir, em parte, o cimento Portland na produção de concretos, ainda que os estudos de análise de ciclo de vida indiquem o grande potencial deles para a redução do impacto ambiental como materiais de construção civil.

Conclusões

A utilização de técnicas de ACV auxiliada pelo software Umberto, realizada nesta pesquisa, permitiu a comparação do consumo total de energia e emissões de CO₂ na produção de 1 m³ de concreto (tradicional e geopolimérico). Os dados obtidos permitem inferir que o consumo energético é reduzido em 45,8% (971,4 contra 1.794,1 MJ/m³) quando se produz um concreto geopolimérico. Ao comparar as emissões de CO₂, pode-se concluir que o concreto geopolimérico reduz a emissão de CO₂ em 72,4% (271,9 contra 75,1 kg/CO₂/m³) quando comparado ao concreto tradicional de cimento Portland. Cabe lembrar que a análise termina na produção do material e não leva em consideração as etapas após a mistura do material. Da mesma forma, a análise não leva em consideração a questão do custo dos dois concretos (a chamada CCV, ou custo do ciclo de vida), que é também crucial para uma definição do potencial ambiental de produtos e processos. Ainda assim, esse estudo parcial comparativo mostra que os concretos geopoliméricos são mais atrativos que os concretos confeccionados com o cimento Portland, tanto em termos de consumo energético quanto em emissões de CO₂.

Ao realizar o estudo de impacto ambiental do concreto geopolimérico, identificou-se que o maior contribuinte para as emissões de CO₂ e consumo energético durante o processo produtivo é a produção do silicato de sódio, o que já havia sido mostrado por Habert; D'Espinose de Lacaillerie e Roussel (2011). A utilização de materiais alternativos nesse tipo de concreto pode reduzir os impactos ambientais do concreto geopolimérico.

Uma possibilidade é o emprego de escória de alto forno em substituição ao metacaulim na produção de concretos geopoliméricos. A escória de alto forno pode (i) ajudar a garantir resistência mecânica nas primeiras idades dos concretos geopoliméricos e (ii) reduzir o consumo de solução ativadora (e, conseqüentemente, de silicato de sódio), haja vista que é menos fina que o metacaulim e, portanto, requer menos solução para a mesma trabalhabilidade. Trabalhos futuros poderão avaliar o efeito da escória de alto forno nas propriedades mecânicas do concreto geopolimérico, bem como a diminuição de silicato para a manutenção da resistência mecânica e trabalhabilidade, garantindo, assim, redução ainda maior de impactos ambientais.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Coprocessamento, Uma Solução Definitiva Para o Resíduo**. Disponível em: <<http://coprocessamento.org.br/>>. Acesso em: 19 jan. 2013.
- BAKHAREV, T. Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1233-1246, 2005a.
- BAKHAREV, T. Resistance of Geopolymer Materials to Acid Attack. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 658-670, 2005b.
- BENHALAL, E. *et al.* Global Strategies and Potentials to Curb CO₂ Emissions in Cement Industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 51, p. 142-161, jul. 2013.
- BONDAR, D. *et al.* Effect of Type, Form, and Dosage of Activators on Strength of Alkali-Activated Natural Pozzolans. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 2, p. 251-260, 2011.
- BORGES, P. H. R. *et al.* Geopolymer Concrete With Recycled glass: an alternative material for prefabricated elements. In: IAHS WORLD CONGRESS ON HOUSING SCIENCE, 38., Istanbul, 2012. **Proceedings...** Istanbul: Istanbul Technical University, 2012.
- BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Profile; Cement Raw Materials**. 2005. Disponível em: <www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=1408>; Acesso em: 20 jan. 2013

- 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.
- CHEHEBE, J. R. B. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos**: ferramenta gerencial da ISO 14000. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997. 104 p.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA Nº 264**: licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos. Diário Oficial da União, 20 de março de 2000.
- COPROCESSAMENTO. **Panorama do Coprocessamento de Resíduos em Fornos de Cimento**. 2012. Disponível em: <<http://coprocessamento.org.br/estatisticas>>. Acesso em: 23 jan. 2014.
- CRÍADO, M.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JOMENEZ, A. Alkali Activation of Fly Ashes: part 1: effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. **Fuel**, v. 84, n. 16, p. 2048-2054, 2005.
- DAVIDOVITS, J. **Properties of Geopolymer Cements**. Geopolymer Institute, Alkaline Cements and Concretes, KIEV Ukraine, 1994.
- DELGADO, G. *et al.* A Metodologia de Análise do Ciclo de Vida, Apoiada Pelo Software Umberto, Como Ferramenta de Gestão na Perspectiva da Sustentabilidade: um estudo de caso. In: Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 4., Resende, 2007. **Anais...** Resende, RJ, 2007.
- EUROPEAN FEDERATION OF CONCRETE ADMIXTURE ASSOCIATIONS. **Normal Plasticizing Admixtures**, EFCA doc.124ETG; 2002.
- 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.
- FUNDAÇÃO BRASILEIRA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. In: **1o Seminário Brasileiro sobre CCS Carbon Dioxide Capture and Storage**: um debate sobre os desafios dessa nova tecnologia. 2009. Disponível em: <<http://fbds.org.br/fbds/IMG/pdf/doc-506.pdf>>. Acesso em: 28 maio 2014.
- GARTNER, E.; MACPHEE, D. E. A Physico-Chemical Basis For Novel Cementitious Binders. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 736-749, jul. 2011.
- GIANNOPOULOU, I.; PANIAS, D. Structure, Design and Applications of Geopolymeric Materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE. DEFORMATIO IN PROCESSING AND STRUCTURE OF MATERIALS, 3., Serbia, 2007. **Proceedings...** Serbia, 2007.
- HABERT, G. *et al.* Cement Production Technology Improvement Compared to Factor 4 Objectives. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 5, p. 820-826, 2010.
- HABERT, G.; D'ESPINOSE DE LACAILLERIE, J. B.; ROUSSEL, N. An Environmental Evaluation of Geopolymer Based Concrete Production: reviewing current research trends. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 11, p. 1229-1238, 2011.
- HAMMOND, G. P.; JONES C. I. **Embodied Energy and Carbon in Construction Materials**. 2008. Disponível em: <www.bath.ac.uk/mech/eng/sert/embodied/>. Acesso em: 10 jan. 2013.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Emission Factor Database**. 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>> Acesso em: 20 fev. 2013.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Cement Technology Roadmap**: carbon emissions reductions up to 2050. Paris: IEA, 2009.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040**: environmental management: life cycle assessment: principles and framework. Geneva, 2006.
- KONG, D. L. Y.; SANJAYAN, J. G. Effect of Elevated Temperatures on Geopolymer Paste, Mortar and Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 2, p. 334-339, 2010.
- KRIVENKO, P. Alkali-Activated Aluminosilicates: past, present and future. **Chemické Listy**, v. 102, p. s265-s277, 2008.
- LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary Cementitious Materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1244-1256, 2011.
- NETTO, R. M. **Materiais Pozolânicos**. Belo Horizonte, 2006. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

- PACHECO, L. S. **Comparativo da Emissão de Gás Carbônico e Consumo Energético na Produção dos Concretos Convencional e Geopolimérico**. Belo Horizonte, 2012. Monografia (Curso de Engenharia de Produção Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- PAULA, L. G. **Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland Com Co-Processamento de Misturas de Resíduos**. 158 f. Itajubá, 2009. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.
- RUIZ-SANTAQUITERIA, C. *et al.* Clay Reactivity: production of alkali activated cements. **Applied Clay Science**, v. 73, p. 11-16, mar. 2013.
- SCHNEIDER, M. *et al.* Sustainable Cement Production: present and future. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 642-650, 2011.
- SIGNORETTI, V. T. **Controle das Emissões de NO_x, SO_x e Metais Pesados Quando se Utilizam Combustíveis Alternativos e de Alto Teor de Enxofre na Indústria de Cimento**. 272 f. Itajubá, 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Itajubá, 2008.
- SILVA, I. M. C. B. Métodos de Preparação Industrial de Solventes e Reagentes Químicos. **Revista Virtual de Química**, v. 4, n. 1, p. 73-82, 2012.
- SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2010**. 2011. Disponível em: <http://www.snac.org.br/pdf/snac-relatorio2010-11_web.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2013.
- SOUZA T. C. R. *et al.* Refractory Properties of alkali-Activated Metakaolin. In: BRAZILIAN MRS MEETING, 10., Gramado, 2011. **Proceedings...** Gramado, 2011.
- STAVRINIDES, G. **Alternative Cements in Concrete Construction: assessment, prospects & commercialisation strategies**. London: University College London, 2010. Final Year Dissertation.
- TEIXEIRA PINTO, A. **Sistemas Ligantes Obtidos Por Ativação Alcalina do Metacaulino**. Minho, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2004.
- TURNER, C. **Soluble Sodium Silicate Manufacture**. Disponível em: <<http://nzic.org.nz/ChemProcesses/production/1G.pdf>>. Acesso em: 28 maio 2014.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Direct Emissions from Stationary Combustion Sources**. 2008. Disponível em: <<http://www.epa.gov/climateleadership/documents/resources/stationarycombustionguidance.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2013.
- VAN OSS, H. G.; PADOVANI, A. C. Cement Manufacture and the Environment: part II: environmental challenges and opportunities. **Journal of industrial Ecology**, v. 3, n. 1, p. 93–126, 2003.
- VATOPOULOS, K.; TZIMAS, E. Assessment of CO₂ Capture Technologies in Cement Manufacturing Process. **Journal of Cleaner Production**, v. 32, p. 251-261. Sep. 2012.

Paulo Henrique Ribeiro Borges

Departamento de Engenharia Civil | Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça | Belo Horizonte - MG - Brasil | CEP: 30421-169 | Tel.: (31) 3319-6826 | E-mail: pborges@civil.cefetmg.br

Thuany Marra de Figueiredo Lourenço

Departamento de Engenharia Civil | Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Tel.: (31) 3047-1709 | E-mail: thuany_marra@hotmail.com

Ana Flávia Souza Foureaux

Departamento de Engenharia Civil | Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Tel.: (31) 3444-9492 | E-mail: anaflavia_foureaux@hotmail.com

Luiza Soares Pacheco

Departamento de Engenharia Civil | Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Tel.: (31) 8863-2460 | E-mail: luizasoarespacheco@yahoo.com.br

Revista Ambiente Construído

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

Fax: +55 (51) 3308-4054

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br