

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFACVEST
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Isabela Mayra Fernandes

**IMPLEMENTAÇÃO DE NOVOS AGLOMERANTES E POLÍMEROS ÀS
CONSTRUÇÕES BRASILEIRAS COMO OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEIS (ODS)**

Lages,
2021.

Isabela Mayra Fernandes

**IMPLEMENTAÇÃO DE NOVOS AGLOMERANTES E POLÍMEROS ÀS
CONSTRUÇÕES BRASILEIRAS COMO OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEIS (ODS)**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Civil do Centro Universitário Unifacvest
como requisito para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Me. Aldori dos Anjos Batista

Lages,

2021.

Este trabalho apresenta através de uma revisão sobre o estado da arte de algumas medidas mitigatórias e métodos tecnológicos criados recentemente que, asseguram a diminuição dos impactos ambientais causados pela construção civil ao meio ambiente, que se enquadram em um dos preceitos propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) em sua agenda criado com Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Isabela Mayra Fernandes

**IMPLEMENTAÇÃO DE NOVOS AGLOMERANTES E POLÍMEROS ÀS
CONSTRUÇÕES BRASILEIRAS COMO OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEIS (ODS)**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de
“Graduada” e aprovada em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil

Lages, 30 de maio de 2021.

Prof. Me. Aldori dos Anjos Batista
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Me. Aldori do Anjos Batista
Orientador

Prof.(a) xxxx, Dr.(a)
Avaliador(a)
Instituição Centro Universitário Unifacvest

Prof.(a) xxxx, Dr.(a)
Avaliador(a)
Instituição Centro Universitário Unifacvest

Este trabalho é dedicado a todos os movimentos socioambientais voltados à preservação da saúde e bem-estar do planeta onde partilhamos nossa coexistência com as mais diversas espécies de seres vivos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Anderson Marcos Fernandes, por todo o suporte e confiança prestados a mim para que eu trilhasse com excelência o caminho rumo ao meu futuro.

À minha mãe, Gislaine de Cássia da Silva Fernandes, por realizar através de mim o seu sonho de concluir a graduação, por todo o amor e dedicação ao longo dos últimos cinco anos.

Aos meus irmãos, Gabriella Fernandes, Allan Fernandes, Giovanna Fernandes e Ana Beatriz Fernandes, por trilharem ao meu lado esse caminho tão distante de casa. Sou imensamente grata pela convivência e suporte.

À minha companheira, Geyce dos Santos, por acreditar em mim, em vezes, mais do que eu mesma.

Aos que se fazem presentes de alguma forma em meus dias, desejos, anseios e conquistas. Amigos e familiares de sangue ou não, por acreditarem em minha trajetória. Minha eterna gratidão a cada um de vocês.

Grata ao universo por trilhar o caminho ou por ter esbarrado com pessoas tão especiais. E o meu maior agradecimento, à vida, pela dádiva de existir!

Sustentabilidade pode ser definida com uma forma de atender as necessidades da geração presente e das futuras de tal forma que o capital natural seja mantido e enriquecido em sua capacidade de regeneração, de reprodução e de coevolução.

*Leonardo Boff, em seu livro
Sustentabilidade, 2012.*

RESUMO

No ano de 2015 a Organização das Nações Unidas (ONU) deu início a um projeto que propõe a elaboração de uma agenda mundial para o ano de 2030 nomeada como Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS). O projeto estabeleceu métricas para a construção e implementação de políticas públicas que visam guiar a humanidade até 2030. Ficou estabelecido um plano de ação internacional para o alcance dos 17 ODS que possuem cerca de 169 metas e abordam diversos temas fundamentais para o desenvolvimento humano, em cenários distintos como: seres vivos, planeta, prosperidade, companheirismo e paz. Assim, o objetivo deste estudo é propor diversas alternativas ecológicas como possíveis resoluções de um dos ODS no Brasil. Realizou-se pesquisa integrativa com base em dados da Green Building Council Brasil, estudo realizado através das palavras-chave: gás carbônico, meio ambiente e urbanização sustentável e compreende-se que a indústria cimentícia é responsável pela formação e emissão de cerca de 5 a 8% de gás carbônico (CO₂) depositados na atmosfera, sendo assim, um dos setores que mais poluem no planeta. Portanto, este trabalho apresenta através de uma revisão sobre o estado da arte de medidas mitigatórias e métodos tecnológicos emergentes criados no mundo que, asseguram a diminuição dos impactos ambientais causados pela construção civil ao meio ambiente, que se enquadra nos preceitos da ODS. Resumidamente os mecanismos de absorção de CO₂ e a cinética da carbonatação são identificados. E dessa forma, é possível trazer para o embate questões como a eficiência de captação de CO₂, viabilidade econômica no uso dos materiais à base de cimento, análise e comparação com materiais convencionais, produção de novos aglomerantes em grande escala país, desafios industriais, investigações a respeito dessas novas tecnologias, impactos ambientais e até mesmo a implementação de um ou mais materiais às construções brasileiras para que possam ser utilizados na elaboração e surgimento de cidades e comunidades ecológicas e sustentáveis, estabelecido como 11º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável e garantindo a preservação da biodiversidade do planeta onde nós, como seres humanos, compartilhamos a nossa existência com a das outras espécies.

Palavras-chave: Engenharia Civil; Ecologia; Gás Carbônico (CO₂); Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

ABSTRACT

In 2015, the United Nations (UN) started a project that proposes the elaboration of a global agenda for the year 2030, named as Sustainable Development Goals (SDGs). The project established metrics for the construction and implementation of public policies that aim to guide humanity until 2030. An international action plan was established to reach the 17 SDGs that have around 169 goals and address several fundamental themes for human development, in distinct scenarios such as: living beings, planet, prosperity, companionship and peace. Thus, the objective of this study is to propose several ecological alternatives as possible resolutions for one of the SDGs in Brazil. An integrative research was carried out based on data from the Green Building Council Brazil, a study carried out using the keywords: carbon dioxide, environment and sustainable urbanization and it is understood that the cement industry is responsible for the formation and emission of about 5 to 8% of carbon dioxide (CO₂) deposited in the atmosphere, making it one of the sectors that pollute the most on the planet. Therefore, this work presents through a review on the state of the art of mitigating measures and emerging technological methods created in the world, which ensure the reduction of the environmental impacts caused by civil construction to the environment, which fits in the ODSprecepts. Briefly, the CO₂ absorption mechanisms and the carbonation kinetics are identified. And in this way, it is possible to bring issues such as the efficiency of capturing CO₂, economicviability in the use of cement-based materials, analysis and comparison with conventional materials, production of new binders on a large scale in the country, industrial challenges, investigations regarding these new technologies, environmental impacts and even the implementation of one or more materials for Brazilian buildings so that they can be used in thedevelopment and emergence of ecological and sustainable cities and communities, establishedas the 11th Sustainable Development Goal and guaranteeing preservation of the biodiversity ofthe planet where we, as human beings, share our existence with that of other species.

Keywords: Civil Engineering; Ecology; Carbon Dioxide (CO₂); Sustainable Development Goals (SDGs).

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 – Cálculo de emissão e absorção dos materiais à base de cimento	23
Fluxograma 2 – Desempenho sustentável proposto por aglomerantes que sejam ricos em silicatos como substituinte ao aglomerante convencional ..	25
Fluxograma 3 – Ilustração do processo de carbonatação de $CA(OH)^2 + CO^2$ que resulta em $CACO^3 + H^2O$	28
Fluxograma 4 – Diagrama de fluxo simplificado do processo de cura por carbonatação de materiais à base de cimento	34

LISTA DE IMAGENS

Imagem 1 – Diagrama que descreve a reatividade do CO ² aquoso em minerais estudados em materiais à base de cimento	32
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos minerais no processo de Carbonatação Ativa	29
Tabela 2 – Resumo da capacidade de captação de CO ² por Carbonatação Mineral	31
Tabela 3 – Prós e contras dos métodos de sequestro de CO ² em termos de impacto ambiental	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ONU Organização das Nações Unidas
ODS Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
CO² Gás Carbônico
Ca(OH)₂ Hidróxido de Cálcio
CaCO₃ Carbonato de Cálcio
H²O Água
OH Hidróxido
SO₄ Sulfato
C²S Belita
C-S-H Silicato de Cálcio Hidratado
CH Hidrato-Silicato de Cálcio
MgO Óxido de Magnésio
UNESP Universidade Estadual Paulista
SNIC Sindicato Nacional da Indústria de Cimento
CEMBUREAU The European Cement Association
BCA British Cement Association

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
XX	Século vinte
XIX	Século dezenove
Na	Cálcio
R\$	Reais
AFm	(Al ² O ³ -Fe ² O ³ -mono)
O	Oxigênio
Al	Alumínio
Fe	Ferro
Mg	Magnésio
K	Potássio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	OBJETIVOS	17
1.3.1	Objetivo Geral.....	17
1.3.2	Objetivos Específicos	17
2	O HISTÓRICO DO CIMENTO NO PAÍS E NO MUNDO	18
2.1	QUANTO A PRODUÇÃO DE CIMENTO NO BRASIL	19
2.2	POTENCIAL DE REDUÇÃO NAS EMISSÕES DE CO ² PELA INDÚSTRIA CIMENTEIRA BRASILEIRA	20
2.3	SILICATO DE MAGNÉSIO COMO ALTERNATIVA NA REDUÇÃO DOS GASES (CO ²).....	22
2.4	VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO SILICATO DE MAGNÉSIO NA PRODUÇÃO DE CIMENTO	23
3	SURGIMENTO DE NOVOS MÉTODOS DE CARBONATAÇÃO ATIVA QUE UTILIZAM E CAPTURAM CO².....	25
3.1	ENTENDENDO OS PROCESSOS DA CARBONATAÇÃO DO CIMENTO E SEUS PRINCIPAIS ASPECTOS.....	27
3.2	RESULTÂNCIA DA CARBONATAÇÃO EM MICROMOLÉCULAS DE CIMENTO	29
4	AVANÇOS RECENTES NA UTILIZAÇÃO E ABSORÇÃO DE CO² E SUAS TECNOLOGIAS EM MATERIAIS A BASE DE CIMENTO	30
4.1	MÉTODO DA CARBONATAÇÃO À BASE DE CÁLCIO.....	31
4.2	MÉTODO DA CARBONATAÇÃO DE HIDRATOS DE SILICATO DE CÁLCIO.....	32
4.3	MÉTODOS DE CARBONATAÇÃO DE HIDRATOS DE SILFOALUMINATO DE CÁLCIO	33
4.4	MÉTODOS DE CARBONATAÇÃO DE MATERIAIS DE CLÍNQUER E DE CIMENTO	33

4.5	MÉTODOS DE CARBONATAÇÃO DE HIDRATOS DERIVADOS DO MAGNÉSIO	34
4.6	MÉTODOS DE CARBONATAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS COMPLEMENTARES	35
5.	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

O conceito de sustentabilidade está relacionado, entre outros aspectos, às práticas que não ameaçam às formas de vida, de tal forma a possibilitar a manutenção da flora, da fauna e das demais diversas formas de vida no ecossistema, e, assim, garantir o equilíbrio da biosfera no planeta. Segundo Boff (2012), sustentabilidade pode ser definida com uma forma de atender as necessidades da geração presente e das futuras de tal forma que o capital natural seja mantido e enriquecido em sua capacidade de regeneração, de reprodução e de coevolução.

O meio ambiente tem sofrido agressões por conta da negligência do homem e do seu desejo desenfreado em gerar capital por intermédio da industrialização, a qual apresenta-se como um dos fenômenos decorrentes desse processo a urbanização. Nesse sentido, a construção civil caracteriza-se como ofensor, e dessa maneira torna-se contribuinte na poluição no Brasil e no mundo.

Dentro desse contexto enquadra-se o estudo da Green Building Concil Brasil (2010), no qual, afirma que “a construção civil é responsável por 1/3 dos gases lançados na atmosfera em todo o mundo. Em percentual significa algo em torno de 25% a 30%, sendo assim, um dos setores que mais poluem no planeta”. Além disso, o setor explora fontes não renováveis, causando ainda mais desarmonia na biosfera.

Considerando o fato de que os resíduos da construção civil são ofensores ao meio ambiente, a implementação de alternativas distintas às convencionais, exemplo, o cimento que absorve CO² (dióxido de carbono) que visa diminuir esses impactos causados pela construção civil e, de certa forma, compensar o meio ambiente por todo o malefício gerado através da produção do cimento convencionalmente utilizado. É fato que, a indústria do cimento causa sérios danos ao meio ambiente, nesse sentido pode-se dizer que essa proposta da utilização do cimento sustentável pode ser uma alternativa válida, se implementada às construções brasileiras. Portanto, o intuito do artigo é estudar a viabilidade dos protótipos de aglomerantes e polímeros e tais métodos tecnológicos emergentes criados no mundo que, asseguram a diminuição dos impactos ambientais causados pela construção civil ao meio ambiente, que se enquadra nos preceitos dos ODS.

Resumidamente os mecanismos de absorção de CO² e a cinética da carbonatação serão abordados e dessa forma, é possível trazer para o embate questões como a eficiência de captação de CO², viabilidade econômica no uso dos materiais à base de cimento, análise e comparação com materiais convencionais, produção de novos aglomerantes em grande escala no país,

desafios industriais, investigações a respeito dessas novas tecnologias, impactos ambientais e até mesmo a implementação de um ou mais materiais às construções brasileiras para que possam ser utilizados na elaboração e surgimento de cidades e comunidades ecológicas e sustentáveis. Serão pautados os principais pontos positivos e negativos dos temas, a fim de propiciar aos leitores uma nova perspectiva ambiental e que através disso, analisar e viabilizar alternativas como uma das mencionadas acima, verdadeiras opções de construção no Brasil.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente trabalho parte do pressuposto à explicação de alguns métodos de produção de cimento desenvolvidos recentemente, que asseguram a diminuição dos impactos ambientais causados pela construção civil ao meio ambiente. O primeiro material abordado no trabalho apresenta um cimento que absorve gás carbônico da atmosfera, revertendo o impacto causado pela sua produção ao meio ambiente, ao ser fonte de emissão de CO². Os materiais analisados em seguida foram desenvolvidos mundo afora a partir de um processo de carbonatação de em diversos compostos que possuem eficiência na captura de CO². Englobando pesquisas de artigos, textos jornalísticos e livros que tratam o assunto, este trabalho apresenta aspectos técnicos para fins de conhecimento e esclarecimento e busca trazer a alternativa dos aglomerantes sustentáveis às construções brasileiras como resolução do 11º ODS.

1.2 JUSTIFICATIVA

A ausência de aglomerantes que sejam menos danosos ao meio ambiente disponíveis para consumo pela construção civil é alarmante. O estudo visa expor ao país novos aglomerante como alternativas sustentáveis às construções no país, assim como já disponíveis em países ao redor do mundo com percentual em ascensão constantemente.

Como mencionado acima, segundo estimativas recentes a construção civil é responsável por 1/3 dos gases lançados na atmosfera em todo o mundo. Em percentual significa algo em torno de 25% a 30%, sendo assim, um dos setores que mais poluem no planeta. Tendo em vista o fato de que a produção de cimento no Brasil e no mundo é considerada um grave ofensor ao meio ambiente, as propostas estudadas no trabalho, serão certamente uma opção de preservação da biodiversidade do planeta onde nós, como seres humanos, compartilhamos a nossa existência com a das outras espécies.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho explica e apresenta métodos de produção de cimento criados recentemente, que asseguram a diminuição dos impactos ambientais causados pela construção civil ao meio ambiente. Um dos protótipos estudados promete a absorção de gás carbônico da atmosfera (CO_2), revertendo o impacto causado pela sua produção ao meio ambiente, ao ser fonte de emissão de CO_2 . Portanto, através de uma revisão sobre o estado da arte de diversas medidas mitigatórias e métodos tecnológicos emergentes criados no mundo que, asseguram a diminuição dos impactos ambientais causados pela construção civil ao meio ambiente, que se enquadra nos preceitos da ODS. Englobando pesquisas de artigos, pesquisas de extensão, em suma, internacionais e livros que tratam o assunto, este trabalho apresenta aspectos técnicos para fins de conhecimento e esclarecimento e busca disponibilizar alternativas de polímeros e aglomerantes como alternativas sustentáveis às construções brasileiras.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram classificados a partir de um plano de necessidades para entendimento e compreensão do assunto. Determinados como assuntos prioritizados na pesquisa foram:

- Informações sobre a produção de cimento no Brasil;
- Potencial de redução nas emissões de CO_2 pela indústria cimenteira brasileira;
- Silicato de magnésio como alternativa na redução dos gases CO_2 ;
- Viabilidade da utilização de silicato de magnésio na produção do cimento no país;
- Análise do surgimento de novos métodos de carbonatação ativa que utilizam e capturam o CO_2 ;
- Processos na carbonatação do cimento e seus principais aspectos;

- Resultância da carbonatação em micromoléculas de cimento;
- Os avanços mais recentes na utilização e absorção de CO² e suas tecnologias em materiais a base de cimento.
- Método de carbonatação a base de Cálcio;
- Carbonatação a base de hidratos e sulfoaluminato de cálcio;
- Carbonatação de materiais de clínquer e cimento;
- Carbonatação de hidratos derivados do magnésio;
- Métodos de carbonatação de materiais cimentícios complementares.

2 O HISTÓRICO DO CIMENTO NO PAÍS E NO MUNDO

A história do cimento tem início na pré-história com a construção dos primeiros abrigos criados pelo homem. Como isolamento para o vento e frio, homens nesse período utilizavam lama e gesso com a finalidade de preencher os espaços entre pedras.

Posteriormente, surgiram indícios de que assírios e babilônios utilizaram argila misturada com palha para que se pudesse moldar o material. Em seguida, Egípcios usavam calcário e gipsita para obtenção de um material ainda mais plástico (CAMBOU, Dom e MOHR, Mark, 2000).

A palavra Cimento vem do latim *Caementum*, termo que identifica um material com propriedades hidráulicas, pois o cimento é um aglutinante que, em contato com a água, torna-se rígido. Os primeiros a realizarem misturas para construções de edifícios e pavimentos utilizando materiais como cal, pedras e areia foram os romanos. Com a exploração dessas práticas, os Romanos descobriram na região de Pozzuoli (Itália) o material denominado “pozolana”, ainda hoje, indispensável às propriedades cimentícias. Através de misturas criadas por eles, foram construídos monumentos (o Coliseu, por exemplo) que, apesar dos séculos e todas as condições climáticas, ainda são marcos para o início das civilizações. Comparando obras da idade média com algumas das construções feitas pelos romanos, nota-se uma durabilidade e qualidade inferiores das primeiras (VARELA E VIEIRA, 2005).

Pode-se dizer que construtores no período da Idade Média utilizaram materiais disponíveis como rochas e grandes blocos na época de forma esplendorosa refletidos em construções belíssimas como Igrejas góticas, templos e outros.

O produto descoberto em meados do século XIX, conhecido como Portland, é denominado atualmente o material estrutural mais importante para a construção civil e vem sendo aperfeiçoado e utilizado em construções desde então. Mesmo sendo um material recente em meio aos materiais de construção de estruturas, passou a ser o principal aglomerante utilizado em construções ao redor do mundo. Desde pequenas construções, às maiores delas existentes em todo o planeta. Sua grande demanda se deu no início do século XX e revolucionou civilizações ao longo dos anos. Desde esse momento foi considerado o material mais consumido em todo o mundo depois da água.

Dessa forma, assim como em muitos outros países do mundo, no Brasil o concreto possui destaque em seu papel do setor da construção civil. No que diz respeito às experiências e vivências do homem, obras de arquitetura e engenharia são responsáveis pelas principais e mais interessantes mudanças no modo de construir, novos materiais estruturais disponíveis para consumo e isso foi um grande marco para o desenvolvimento do país e à população.

2.1 QUANTO A PRODUÇÃO DE CIMENTO NO BRASIL

A indústria cimenteira se expande por grande parte do mundo, operando tanto em pequenas empresas como nas maiores franquias nacionais e internacionais e sendo de extrema importância ao desempenho e crescimento econômico mundial.

Em análise e estudo SANTOS. Bruno, doutorando do programa de pós-graduação da Universidade Estadual Paulista (UNESP) concluiu que, o fortalecimento da indústria de cimento brasileira a partir dos anos 1930 pode ser analisado a partir de quatro pontos principais, quais sejam:

- 1) urbanização e crescimento do mercado interno;
- 2) entrada de capital e tecnologia estrangeiros;
- 3) investimentos carreados de outros ramos econômicos presentes no país;
- 4) apoio incondicional do Estado (SANTOS, 2005).

Desde então, o número de grandes empresas de renome internacional que se instalaram no Brasil é incontável. Em sua maioria, com a finalidade de lucrar e disponibilizar produtos como principal aspecto de crescimento populacional e econômico para o Brasil. Como pontuado acima, o processo de urbanização nas maiores cidades do país foi dado a partir da grande demanda por materiais indispensáveis à construção civil, como o cimento, por exemplo.

Através de uma reação em cadeia à essa grande demanda e produção de cimento no país, um grande salto econômico foi dado no Brasil.

Pesquisas realizadas no ano de 2013 apontam o crescimento na produção mundial de cimento, ou seja, um crescimento de aproximadamente 8,1% em relação à produção no ano anterior, 2012.

Com base em dados do SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento) e CEMBUREAU (The European Cement Association), fica fácil observar as diferenças entre os diversos países do mundo em relação à produção de cimento no mundo, apenas a China, Índia e EUA mantiveram posições no ranking comparado ao ano de 2005. Mesmo os Estados Unidos mantendo sua posição de terceiro, perdeu produção de 22% de sua produção em relação ao ano de 2005, tendo, na outra ponta e sempre na primeira posição a CHINA que cresceu 131% no período e países como o Vietnã que figurava na 17ª posição em 2005, de lá até 2013 sua produção de cimento cresceu surpreendentes 110%, levando o país, em 2013 a se posicionar como o oitavo maior produtor de cimento do mundo. Bem colocado em relação a outras grandes economias, o Brasil cresceu mais que a média mundial no período, cresceu 78,6% em sua produção de cimento de 2005 para 2013 e a produção mundial cresceu “apenas” 71% (CIMENTO.ORG, 2013).

No entanto, através de informações obtidas acima, observa-se que o Brasil é responsável pelo imenso insumo na produção de concreto no mundo. A produção de cimento no Brasil cresceu consideravelmente em relação ao restante do mundo. Conseqüentemente, se há maior demanda de edifícios e construções, haverá produção equivalente de cimento, que resultará em maior percentual de poluição pela quantidade de CO² liberado na atmosfera, assim como de resíduos sólidos gerados por empresas e construtoras que são diariamente descartados de forma incorreta no meio ambiente.

Com esse salto no desenvolvimento dos grandes centros urbanos, a produção de cimento torna-se ainda maior e as emissões de gases do efeito estufa cada vez mais intensas. De acordo com o SNIC (2019), “a indústria cimenteira responde, globalmente, por cerca de 7% de todo o gás carbônico emitido pelo homem. Apesar disso, no Brasil, muito em função de uma série de ações que o setor vem implementando há anos, esta participação é cerca de 2%”.

2.2 POTENCIAL DE REDUÇÃO NAS EMISSÕES DE CO² PELA INDÚSTRIA CIMENTEIRA NO BRASIL

O cimento é insumo fundamental na construção civil, componente básico de concretos e argamassas. É elemento indispensável no desenvolvimento da infraestrutura do Brasil. Com ele, torna-se possível a construção de casas, escolas, hospitais, estradas, ferrovias, portos, aeroportos, obras de saneamento e energia, entre muitas outras que proporcionam saúde e bem-estar à população e atendem às exigências da vida moderna, pois o crescimento da população exige cada vez mais o suporte do mercado da construção civil.

Segundo o Prof. Dr. John, com a intensa industrialização, advento de novas tecnologias, crescimento populacional e aumento de pessoas em centros urbanos e diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos se transformaram em graves problemas urbanos com um gerenciamento oneroso e complexo considerando-se volume e massa acumulados, principalmente após 1980. Os problemas se caracterizavam por escassez de área de deposição de resíduos causadas pela ocupação e valorização de área urbanas, altos custos sociais no gerenciamento de resíduos, problemas de saneamento público e contaminação ambiental (JOHN, 1999; JOHN, 2000; BRITO, 1999; GÜNTHER, 2000; PINTO, 1999).

Informações divulgadas há alguns anos pela empresa Votorantim é que, atualmente no país, a indústria é reconhecida como uma das maiores empresas no ramo de mineração e produção de insumos para construções por todo o país e afora. Afirmam também que, “presente no negócio de materiais de construção (cimento, concreto, agregados e argamassas) desde 1933, a Votorantim Cimentos está entre as 10 maiores empresas do mundo neste setor, com capacidade produtiva de cimento de 54.5 milhões de toneladas/ano e receita de R\$ 12.9 bilhões em 2014.”

Tendo em mente as informações fornecidas pela empresa, surgem questões que, para eficácia e implementação dos materiais que serão abordados devem ser esclarecidas e ou respondidas. Como tornar viável economicamente o uso dos materiais à base de cimento? Atualmente, no mercado, todos os insumos necessários às construções se dão por meio de composto que tem como base o cimento, aglomerante indispensável em obras. Uma vez viável e comumente utilizado, introduzir novos aglomerantes à base de cimento é um caminho a ser percorrido e uma história a ser construída. Segunda questão: análise e comparação das novas alternativas com materiais convencionais. O aglomerante mais utilizado e vendido atualmente no país é o cimento Portland. Primeiro cimento a ser comercializado no mundo com base em estudos, protótipos, análises, produção em grande escala que assegurou a diminuição do valor do produto fornecido, investimentos, entre outros. Terceira questão: quanto a produção de novos aglomerantes em grande escala no país. Para que um material seja consumido no

mercado, o protótipo criado precisa ser financiado e dessa forma a quarta questão surge, quais os desafios industriais e investigações a respeito dessas novas tecnologias? Países mais desenvolvidos no mundo buscam novas alternativas dadas as reais circunstâncias nas quais vivemos. O planeta está sofrendo demasiadamente com os impactos gerados por indústrias de inúmeras vertentes. Os resíduos gerados através dessas indústrias, como pautado acima, são descartados diária e constantemente nas superfícies terrestres com pouquíssimas chances de descartes adequados e ou reaproveitamento. Dentre todos os materiais e protótipos que serão listados e estudados, há alternativas criadas ao redor do mundo que, se devidamente abordadas e executadas, assegurariam a diminuição desses impactos gerados ao longo dos anos de construção civil.

2.3 SILICATO DE MAGNÉSIO COMO ALTERNATIVA NA REDUÇÃO DOS GASES (CO²)

Uma das propostas ecologicamente corretas é a do cimento que absorve o gás carbônico. Conforme o artigo publicado pelo jornal britânico *The Guardian* (2008), de autoria do colunista Alok Jha,

“o novo cimento, que usa uma matéria prima diferente, certamente tem um vasto mercado potencial. A produção anual de 2 bilhões de toneladas de cimento em todo o mundo gera 5% das emissões de CO₂ do mundo. Estima-se ainda, que até o ano de 2020 a demanda por cimento aumentará em 50% em relação a hoje”. (JHA,2008)¹

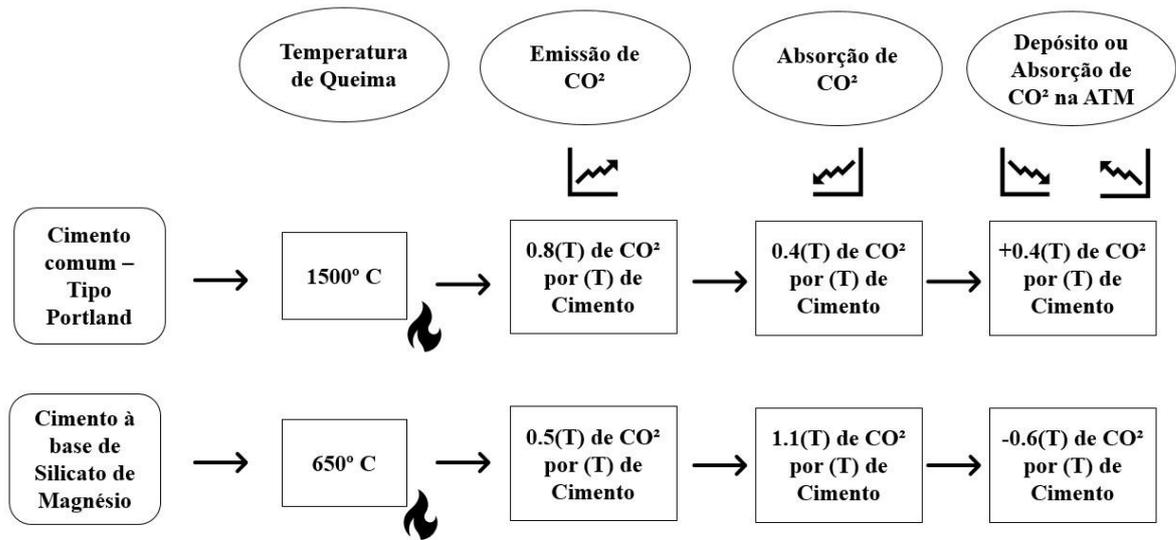
O cimento que tem como base silicatos de magnésio exige menor temperatura na queima, cerca de 650° C. Enquanto que o cimento comum exige uma temperatura de aproximadamente 1500° C, ou seja, a disparidade entre as queimas é imensa. É vantagem também no novo cimento, a grande absorção de gás carbônico à medida que endurece, o que torna o cimento negativo em carbono. Significa que, além de emitir menor quantidade de CO₂, o mesmo ainda absorve parte do gás que já se encontrava na atmosfera. O protótipo foi criado

¹ Texto traduzido do original, Inglês.

“the new cement, which uses a different raw material, certainly has a vast potential market. The annual production of 2 billion tons of cement around the world generates 5% of the world's CO₂ emissions. It is also estimated that by 2020 the demand for cement will increase by 50% compared to today”.

por Nikolaos Vlasopoulos, cientista chefe da empresa Novacem e colegas do Imperial College London. A empresa Novacem afirma que, “esse produto deve absorver ao longo de sua vida útil, cerca de 0,6 toneladas de gás carbônico por tonelada de cimento. Isso se compara às emissões de carbono de aproximadamente 0,4 toneladas por cimento padrão”²(JHA, 2008).

Fluxograma 1 – Cálculo de emissão e absorção dos materiais à base de cimento.



Fonte: Fluxograma criado pela autora do Trabalho.

2.4 VIABILIDADE NA UTILIZAÇÃO DE SILICATO DE MAGNÉSIO NA PRODUÇÃO DE CIMENTO

Após a exposição do novo cimento ao público, a *British Cement Association* pronunciou sua descrença em relação à proposta. Declarou que embora a proposta pareça interessante como algumas outras pesquisas realizadas em laboratório, a mesma apresenta problemas também. Em nota foi publicado:

² Texto traduzido do original, Inglês.

“this product should absorb, over its useful life, around 0.6 tons of carbon dioxide per ton of cement. This compares to the carbon emissions of approximately 0.4 tonnes per standard cement”

“A realidade é que a disponibilidade geológica e a distribuição global de recursos naturais adequados, juntamente com a ampla validação necessária para confirmar a adequação ao objetivo, tornam altamente improvável que esses cimentos sejam uma alternativa realista para a construção de volumes” (JHA, 2008).³

No entanto, Vlasopoulos manifestou-se afirmando que os silicatos de magnésio existem em grande quantidade no mundo, cerca de 10.000 bilhões de toneladas à disposição (JHA, 2008). Disse em respaldo que “o processo de produção do nosso cimento é de natureza química, o que significa que também pode utilizar vários subprodutos industriais que contêm magnésio em sua composição” (JHA, 2008).⁴

Em outra oportunidade, Vlasopoulos também comentou em entrevista: “quando começamos, alguns anos atrás, o que fizeram foi desenvolver um cimento que será uma alternativa de baixo carbono comparado ao cimento Portland, um material usado que é produzido em mais de meio milhão de toneladas e é responsável por mais de cinco por cento das emissões de carbono, o processo de produção é baseado na transformação de materiais que são chamados de silicatos de magnésio em óxido de magnésio e esses materiais existem em grandes quantidades e a principal vantagem que eles têm é que eles não contêm carbono e, portanto, quando você os processa, eles não liberam carbono além daquele contido na energia que diz que você está usando para fazer a transformação”⁵ (VLASOPOULOS, 2009).

³ Texto traduzido do original, Inglês.

“The reality is that the geological availability and global distribution of adequate natural resources, along with the extensive validation required to confirm fitness for purpose, make it highly unlikely that these cements will be a realistic alternative to building volumes”.

⁴ Texto traduzido do original, Inglês.

“the production process of our cement is chemical in nature, which means that it can also use various industrial by-products that contain magnesium in their composition”.

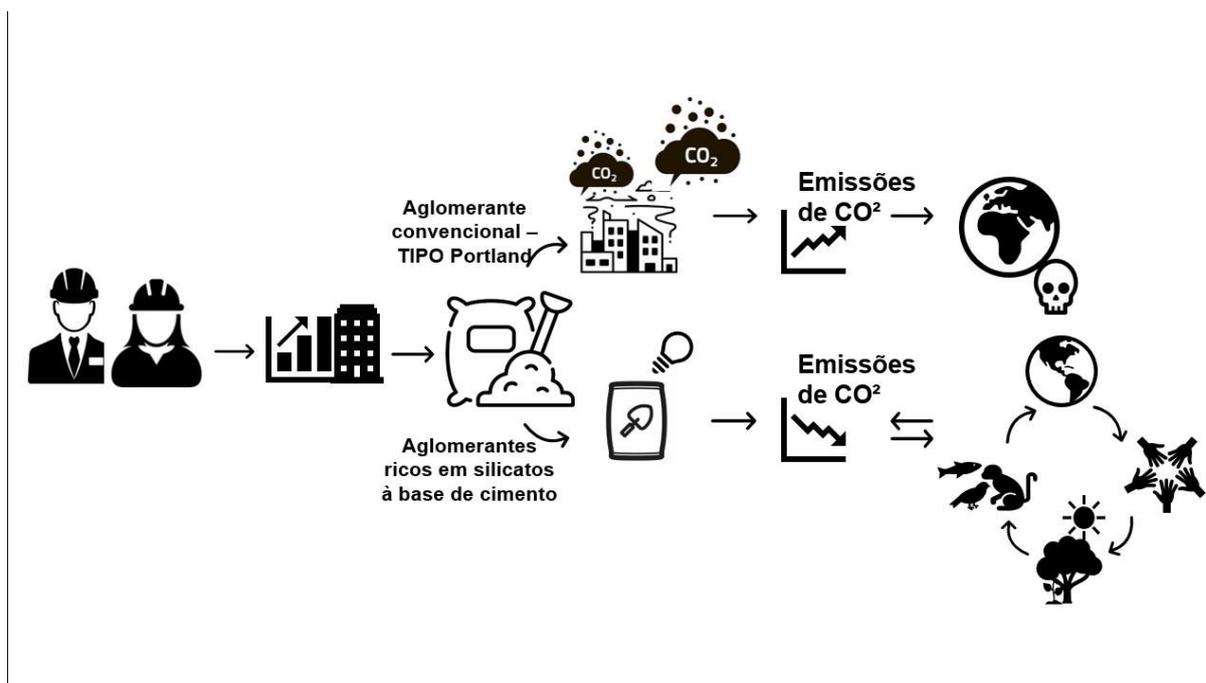
⁵ Texto traduzido do original, Inglês.

“ when we started a few years ago they did was to develop a cement that is going to be a low-carbon alternative to Portland cement a material that is used in that is produced in more than two and half million tones and it accounts for more than five percent of the carbon emissions the production process is based on actually transforming materials which are called magnesium silicates to magnesium oxide and those materials exist in huge quantities and the major advantage they have is that they do not contain carbon and therefore when you process them they do not release carbon apart from the one contained into the energy that say you're using to do the transformation”.

Outro fator muito importante que deve ser levado em consideração é o custo do cimento que dispõe do silicato de magnésio na composição. O cimento Portland, comumente utilizado em obras pelo mundo todo, encontra-se em valor mais acessível e a aceitação do produto é imensa no mercado. Já o cimento que absorve CO_2 , ainda não é visto e tampouco procurado no mercado. Considerando também circunstância de que será um produto com um outro padrão de valor. A grande vantagem da descoberta é o custo-benefício do produto, como forma de amenização dos impactos gigantescos causados pela indústria que mais cresce no país e no mundo.

O aglomerante tem como propósito fazer com que a indústria de cimento deixe de ser um ofensor em emissão de CO_2 e seja contribuinte para absorção e redução desses gases na atmosfera como em imagem disponibilizada a seguir.

Fluxograma 2 – Desempenho sustentável proposto por aglomerantes que sejam ricos em silicato como substituinte ao aglomerante convencional.



Fonte: Fluxograma criado pela autora do Trabalho.

3 SURGIMENTO DE NOVOS MÉTODOS DE CARBONATAÇÃO ATIVA QUE UTILIZAM E CAPTURAM CO_2

O cimento quando pastoso é conhecido por reagir naturalmente com o dióxido de carbono atmosférico. Esse processo na carbonatação da pasta de cimento há muito tempo foi reconhecido como uma das causas da corrosão das armaduras. Neste caso, o processo de carbonatação causa numerosas mudanças químico mecânicas na pasta de cimento, mais notavelmente mudanças na resistência, porosidade, distribuição do tamanho dos poros e química. Além de que, o fenômeno químico pode causar encolhimento e rachaduras do cimento matriz.

Com o avanço e investimento tecnológico em países de primeiro mundo, no ano de 2016 através de um estudo com formato em revisão sistemática sobre carbonatação de ativos, fornece um ponto de partida às pesquisas sobre carbonatação em novos materiais cimentícios. A proposta feita pelo estudo reúne esforços recentes em relação ao uso ativo de carbonatação como uma ferramenta para manipular certas propriedades de materiais à base de cimento e dessa forma, possíveis campos de aplicação que incluem cura acelerada, melhoria de compósitos cimentícios reforçados com fibra, concreto reciclagem e imobilização de resíduos.

Segundo A.M. Neville, o dióxido de carbono da atmosfera pode reagir como cimento hidratado na presença da umidade. Isso significa que o cimento sofre determinada alteração, no entanto, sua microestrutura e durabilidade, no caso do concreto armado não é afetada.

Já no caso de uma investigação experimental e modelagem matemática do problema de carbonatação do concreto, obtida em estudos por V.G. Papadakis, C.G. Vayenas, M.N. Fardis, a reação de dióxido de carbono com fases contendo cálcio na pasta de cimento também pode causar alterações químico-mecânicas na microestrutura do cimento. Logo, entende-se que o dióxido de carbono se difunde através da cobertura de concreto seguindo uma raiz quadrada de tempo relação, resultando em uma frente de carbonatação.

No caso dos estudos citados acima, alterando ou não a microestrutura, desempenho e durabilidade do cimento, atualmente há uma série de avanços com o objetivo de utilizar a capacidade da pasta do cimento de reagir com o dióxido de carbono que em suma, busca alcançar certos benefícios econômicos e ambientais. E esses estudos podem ser considerados decisões ativas para que seja possível tirar certa vantagem dessa reatividade.

Cientificamente entende-se como processo de carbonatação passiva, quando a carbonatação causa mudanças indesejadas e não planejadas na camada superficial de uma estrutura de concreto ou um elemento quando exposto ao ambiente.

Em estudos recentes, Branko Šavija a, *, Mladena Lukovic', ¹ concluíram que “mesmo que a carbonatação passiva às vezes possa resultar na melhoria de certas propriedades, é

geralmente considerado como um mecanismo de envelhecimento. A maioria dos estudos levando a uma compreensão fundamental da química dos mecanismos de carbonatação em materiais cimentícios são baseados no estudo da carbonatação passiva, por exemplo, usando carbonatação acelerada em experimentos com concentrações elevadas de CO₂. Por outro lado, um ativo. O processo de carbonatação resulta de um procedimento projetado para intencionalmente tirar proveito da capacidade das fases de suporte de cálcio de pasta de cimento para reagir com CO₂ para diferentes aplicações”.⁶

No caso do ativo da carbonatação pressupõe exposição controlada de materiais cimentícios a concentrações elevadas de CO₂ por certos períodos de tempo, resultando em benefícios em termos de desempenho mecânico ou ambiental impacto do material. Procedimentos diferentes como o de usar carbonatação ativa são revisados pelos autores citados acima e são classificados em passivo e ativo sob os efeitos da carbonatação.

Uma vez que o objetivo foi definido e tem como finalidade de compreender os efeitos passivos e possíveis efeitos ativos da carbonatação no cimento pastoso, é importante entender a forma como o CO₂ reage às fases principais da pasta de cimento e os fatores que influenciam este processo.

3.1 ENTENDENDO OS PROCESSOS PRESENTES NA CARBONATAÇÃO DO CIMENTO E SEUS PRINCIPAIS ASPECTOS

No caso da carbonatação da Portlandita, que é entendida e definida como um mineral óxido. É conhecida como a forma que ocorre naturalmente do hidróxido de cálcio e o análogo do cálcio da brucita, “é constatado que o hidróxido de cálcio (Ca (OH)₂), ou seja, portlandita é o produto de hidratação que reage mais facilmente com gás carbônico (CO₂). O dióxido de carbono pode reagir com o hidróxido de cálcio dissolvido, resultando na precipitação de cálcio moderadamente solúvel entre os poros carbonatados.

⁶ Texto traduzido do original, Inglês.

“even though passive carbonation can sometimes result in the improvement of certain properties, it is generally considered to be an aging mechanism. Most studies leading to a fundamental understanding of the chemistry of carbonation mechanisms in cementitious materials are based on the study of passive carbonation, for example, using accelerated carbonation in experiments with high concentrations of CO₂. On the other hand, an asset. The carbonation process results from a procedure designed to intentionally take advantage of the ability of the cement paste calcium support phases to react with CO₂ for different applications”.

No mesmo estudo conclui-se que “eventualmente, a superfície fica coberta com os locais de nucleação crescer, coalescer e que ainda é facilitado relativamente pelas pequenas áreas de superfície de cristais de portlandita em comparação com hidrato-silicato de cálcio”.⁸

Resultante da análise feita pelos autores do trabalho, o tipo de polimorfo de carbonato de cálcio que resultará das equações desenvolvidas dependerá única e exclusivamente de qual dos dois tipos de fatores se tornarão predominantes: fatores cinéticos ou termodinâmicos. No caso de os fatores cinéticos predominarem, CaCO_3 precipitará como aragonita ou como vaterita. Ambos polimorfos se converterão finalmente em calcita, o polimorfo mais estável. Caso seja termodinâmico o fator predominante, CaCO_3 irá precipitar como calcita.

3.2 RESULTÂNCIA DA CARBONATAÇÃO EM MICROMOLÉCULAS DO CIMENTO

Como consequência pode ocorrer mudança na porosidade da pasta de cimento. “Essa mudança pode ser uma diminuição, no caso de pasta de cimento Portland, ou um aumento, no caso de mistura pasta de cimento. Descobertas semelhantes foram relatadas para concreto”.⁹

Tais mudanças de porosidade são causadas pela dissolução das fases do cimento. A carbonatação de portlandita, calcita, aragonita e vaterita resultam em um aumento ou diminuição do líquido de volume e precipitação ou não de carbonato de cálcio na rede de poros. De acordo com tabela disponibilizada para estudos é possível notar tamanha discrepância.

Tabela 1 – Propriedades dos minerais no processo de Carbonatação Ativa.

Mineral	Densidade (g/cm³)	Volume Molar (cm³)	Forma de Cristal	Variação do Volume (%)
Portlandita	2.23	33.20	Laminar	/
Calcita	2.71	36.93	Prismática	11.2
Aragonita	2.93	34.16	Fibrosa	2.9
Vaterita	2.54	39.40	Esférica	18.7

Fonte: ELSEVIER (TRADUZIDOS DO INGLÊS).

⁸ Texto traduzido do original, Inglês.

“eventually, the surface becomes covered with the nucleation sites to grow, coalesce and which is still relatively facilitated by the small surface areas of portlandite crystals compared to calcium silicate hydrate”.

⁹ Texto traduzido do original, Inglês.

“This change can be a decrease, in the case of Portland cement paste, or an increase, in the case of cement paste mixture. Similar findings have been reported for concrete”.

Nota-se que entre todas as variantes que ocorrem em cada um dos minerais, o cimento em pasta misturado contém quantidades significativamente menores de portlandita, como consequência de reações pozolânicas de cinzas volantes ou reações hidráulicas obtidas pela escória de alto-forno que resulta no engrossamento de sua estrutura de poros.

Além disso, os autores supõem que, “a pasta de cimento Portland reage de forma semelhante, embora retardada pela carbonatação da portlandita”.¹⁰

4 AVANÇOS RECENTES NA UTILIZAÇÃO E ABSORÇÃO DE CO² E SEUS TECNOLOGIAS EM MATERIAIS A BASE DE CIMENTO

Considera-se o cimento e concreto os mais amplamente materiais de construção usados no mundo devido a fatores como sua alta resistência, durabilidade notável e benefícios econômicos. O cimento, que é o componente mais importante do concreto, é produzido pela combustão de grandes quantidades de calcário (CaCO³) em fábricas de cimento, com grandes quantidades de CO² gerado durante o processo de fabricação.

Como os ODS visam novos meios renováveis e sustentáveis para redução dos danos ao planeta, é de extrema importância que os maiores ofensores se responsabilizem pelos prejuízos causados e invistam em mudanças significativas com a finalidade de reduzirmos a ponto de zerarmos as emissões de gás carbônico na atmosfera.

Pelo imenso desperdício de produtos à base de cimento como o cimento bruto, pasta de cimento endurecido, argamassa e concreto, foi recentemente sugerida a carbonatação como um meio mais ativo de absorção de CO², e muitos estudos foram desenvolvidos a partir disso.

Segundo o Departamento de Engenharia Civil e Ambiental juntamente com o Instituto Avançado de Ciência e Tecnologia da Coreia e Coreia do Sul, “a reação de carbonatação, que ocorre entre o dióxido de carbono e o reativo correspondente compostos de materiais à base de cimento, podem fixar dióxido de carbono na forma de carbonatos termodinamicamente estáveis”.¹¹

¹⁰ Texto traduzido do original, Inglês.

“Portland cement slurry reacts similarly, albeit retarded by the carbonation of portlandite”.

¹¹ Texto traduzido do original, Inglês.

“the carbonation reaction, which occurs between carbon dioxide and the corresponding reactive compound of cement-based materials, can fix carbon dioxide in the form of thermodynamically stable carbonates”.

Logo, os materiais à base de cimento podem ser considerados uma opção atrativa como fonte de material para captura e utilização de carbono e sequestro CO².

A carbonatação e seus efeitos, portanto, são entendidos como um fator negativo que afeta a durabilidade do concreto. Contudo, estudos recentes mostraram que a carbonatação de materiais à base de cimento nem sempre leva à deterioração do material, mas pode contribuir para o aprimoramento as propriedades mecânicas e durabilidade. Inclusive, seu potencial uso como fonte de material para captação de CO² foi sugerido por vários pesquisadores.

Contudo, conhecimento sobre o mecanismo de carbonatação inerente ainda precisa ser resumido para abordar sua singularidade e diferença em comparação outros métodos em termos de captação de CO².

Tabela 2 - Resumo da capacidade de captação de CO² por Carbonatação Mineral

	Composition (%)		Theoretical CO ₂ uptake capacity	CO ₂ uptake	Experimental condition			
	MgO	CaO			Temperature (°C)	Pressure (bar)	Particle size	Time
Steel making slags	6.0	31.7	0.31	0.19	100	19	<38 μm	30 min
	6.2	58.1	0.52	0.24	Ambient	Ambient	38–106 μm	40 h
	9.4	32.1	0.35	0.06	Ambient	Ambient	45–75 μm	20 min
	3.7	45.9	0.40	0.09	30	Ambient	125–250 μm	2 h
Cement kiln dust	7.6	44.5	0.43	0.16	80	Ambient	<63 μm	2 h
	2.0	34.5	0.29	0.11	Ambient	Ambient	–	72 h
	1.5	46.2	0.38	0.26	Ambient	2	–	79.2 h
Waste cement	0.3	25.2	0.20	0.16	Ambient	4	80 μm	0.8 h
MSWI bottom ash	2.6	16.3	0.16	0.24	Ambient	17	<4 mm	3.5 h
	–	–	–	0.03	Ambient	3	–	2.5 h
MSWI fly ash	–	36.26	0.28	0.07–0.10	21	3	–	3 h
	–	–	–	0.07	Ambient	3	–	2 h
Coal fly ash	–	5	0.04	0.02	30	10	40 μm	18 h
	1.91	15.72	0.14	0.07	Ambient	10	–	24 h
Oil shale ash	6.49	49.69	0.46	0.17–0.20	Ambient	Ambient	–	–
Serpentine	40	0	0.55	0.43	450–500	>20	–	–

Fonte: J.G. Jang et al. / Construction and Building Materials (2016) pg. 762–773

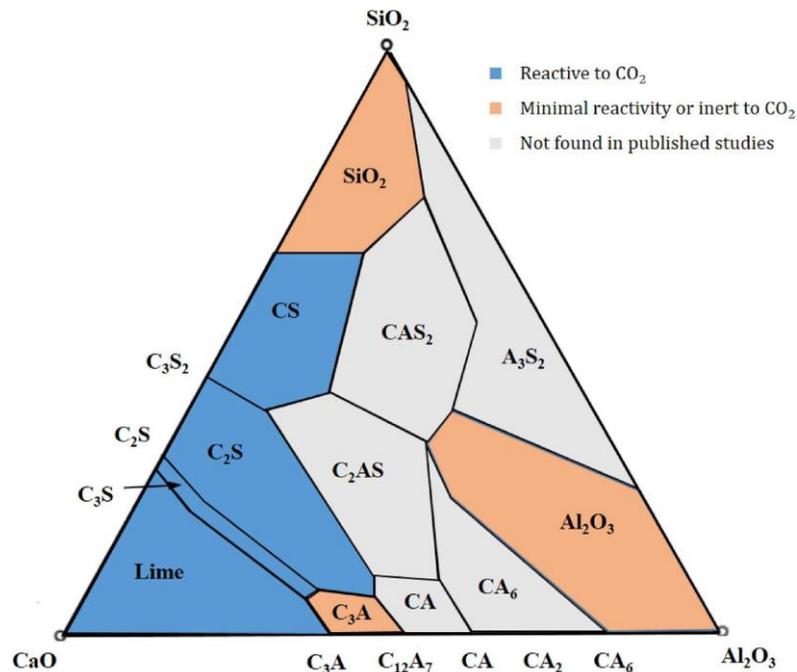
4.1 MÉTODO DA CARBONATAÇÃO A BASE DE CÁLCIO

O método de reação ocorre porque o cálcio é o mais comum elemento entre os hidratos de cimento Portland e cálcio hidróxido tem a maior solubilidade em água em comparação com os outros compostos de cálcio. Assim, a reação com CO² prontamente continua. De acordo com a equação expressa na Figura 1, a carbonatação de hidróxido de cálcio é uma reação entre um gás e um sólido, embora a presença de a água é necessária para esta reação. Ou seja, a dissociação de íons de hidróxido de cálcio e CO² dissolvido na água dos poros é necessário para que a carbonatação prossiga.

Conseqüentemente, o alto pH da solução de poros na pasta de cimento é altamente dependente de a concentração de Na⁺ e K⁺ que estão em equilíbrio com OH.

No entanto, o hidróxido de cálcio dissolvido na solução de poro pode reagir com ácido carbônico para produzir um precipitado de carbonato de cálcio com baixa solubilidade, “e tal irreversível reação contribui para diminuir a concentração de Ca²⁺ na solução. Além disso, esta reação promove a decomposição do hidróxido de cálcio em estado sólido para manter a concentração de equilíbrio entre os íons de metal alcalino e OH no poro da solução”.¹²

Imagem 1 – Diagrama que descreve a reatividade do CO₂ aquoso de minerais estudados em materiais à base de cimento.



Fonte: ELSEVIER, Journal of CO₂ Utilization.

4.2 MÉTODO DE CARBONATAÇÃO DE HIDRATOS DE SILICATO DE CÁLCIO

O cimento Portland produz hidrato de silicato de cálcio (C-S-H), Ca (OH)² e hidratos de sulfoaluminato de cálcio, como etringita e monossulfato através do processo de reação de hidratação. Inúmeros estudos realizados na segunda metade do século XX revelaram que não

¹² Texto traduzido do original, Inglês.

“And such an irreversible reaction contributes to decrease the concentration of Ca²⁺ in the solution. In addition, this reaction promotes the decomposition of calcium hydroxide in a solid state to maintain the equilibrium concentration between the alkali metal and OH ions in the solution pore”.

apenas $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mas também C-S-H gel pode ser submetido a carbonatação. Em geral, “a carbonatação de C-S-H é relatada para ser iniciado quando um grau suficiente de carbonatação é alcançado, ocorrendo assim apenas após a maior parte do hidróxido de cálcio é consumido”.¹³

Além disso, o volume molar de o gel de silicato do produto da reação é menor do que o do C-S-H antes da carbonatação, que pode potencialmente induzir o encolhimento. Embora, a produção de precipitados de CaCO_3 compensa esta perda de volume e, como resultado, o volume geral do a pasta de cimento permanece constante.

4.3 MÉTODO DE CARBONATAÇÃO DE HIDRATOS DE SILFOALUMINATO DE CÁLCIO

O conteúdo das fases Etringita e outros minerais variam com a duração da hidratação, enquanto a concentração de SO_4 é a mais influente fator. “As fases AFm (Al_2O_3 - Fe_2O_3 -mono) na pasta de cimento Portland maturada geralmente consistem em monossulfato. A estequiometria das fases AFm são expressas como uma nomenclatura que denota uma carga única ou metade de um ânion com carga dupla. As fases AFm são formadas por uma estrutura em camadas que consiste de uma camada primária carregada positivamente”.¹⁴

E pode ocorrer carbonatação da etringita, que se decompõe etringita e produz gesso, calcita, gel de alumina e amorfo gel incluindo CO_2 como novos produtos de reação.

4.4 MÉTODO DE CARBONATAÇÃO NOS MINERAIS DE CLÍNQUER DE CIMENTO

A reação de hidratação de minerais de clínquer de cimento constantemente ocorre com o passar do tempo.

Um estudo experimental sobre a “hidratação taxa de cimento Portland conduzida por Brunauer e Copeland e os resultados da modelagem sugeridos por Papadakis et al. revelou que

¹³ Texto traduzido do original, Inglês.

“carbonation of C-S-H is reported to be initiated when a sufficient degree of carbonation is reached, thus occurring only after most of the calcium hydroxide is consumed”.

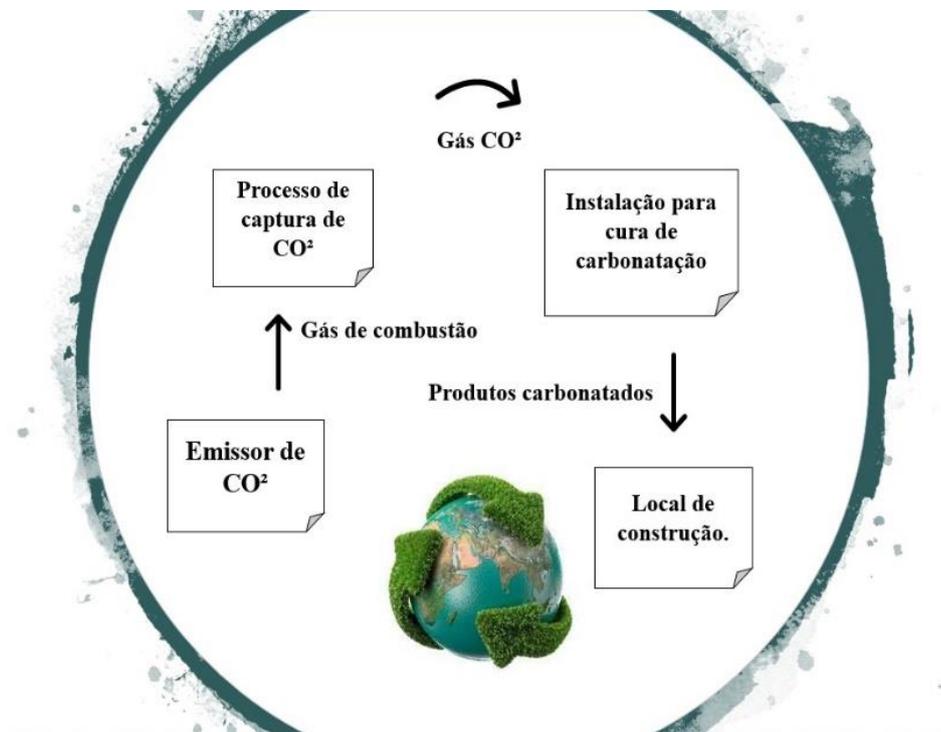
¹⁴ Traduzido do texto original, Inglês.

“The AFm phases (Al_2O_3 - Fe_2O_3 -mono) in the matured Portland cement paste generally consist of monosulfate. The stoichiometry of the AFm phases are expressed as a nomenclature that denotes a single charge or half a double charged anion. The AFm phases are formed by a layered structure that consists of a positively charged primary layer”.

o grau de hidratação de C3S, C2S, C3A e C4AF em uma cura de 28 dias é 91%, 67%, 96% e 79%, respectivamente”.¹⁵

Como resultado, a carbonatação é iniciada muito mais cedo do que quando a reação de hidratação termina. Entre os minerais de clínquer de cimento, a carbonatação de uma Belita fase recebeu atenção significativa.

Fluxograma 4 - Diagrama de fluxo simplificado do processo de cura por carbonatação de materiais à base de cimento.



Fonte: Fluxograma criado pela autora do Trabalho.

4.5 MÉTODO DE CARBONATAÇÃO DE HIDRATOS DERIVADOS DE MAGNÉSIO

O conceito inicial de incorporação de MgO reativo em Portland cimento foi introduzido pela primeira vez como um desenvolvimento de expansivo cimento. Esta é uma

¹⁵ Texto traduzido do original, Inglês.

“The AFm phases (Al²O³-Fe²O³-mono) in the matured Portland cement paste generally consist of monosulfate. The stoichiometry of the AFm phases are expressed as a nomenclature that denotes a single charge or half a double charged anion. The AFm phases are formed by a layered structure that consists of a positively charged primary layer”.

aplicação de hidratação de MgO que sofre uma expansão volumétrica, o que por sua vez reduz o encolhimento do cimento Portland.

No entanto, mais recentes estudos têm se concentrado em aplicações potenciais usando este material para absorver CO².

Supõem-se que a reação está envolvida na produção de carbonatos derivados de Mg e pode não apenas absorver uma grande quantidade de CO₂, mas também densificar a microestrutura, resultando em propriedades potencialmente aprimoradas, como a resistência à compressão, rigidez e módulo de elasticidade.

“Além do efeito de carbonatação, os mesmos mostraram que a capacidade de captação de CO² foi de 25,2% para pasta endurecida que teve cimento Portland substituído por 10% de MgO reativo em termos de seu peso em uma idade de cura de 56 dias”.¹⁶

4.6 MÉTODO DE CARBONATAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS COMPLEMENTARES

São considerados materiais cimentícios complementares SCMs, como cinzas de carvão, escória de alto forno, sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz, que possuem reatividade pozolânica e propriedades hidráulicas latentes, são amplamente utilizados como aditivos.

“A adição de SCMs pode significativamente influenciar a produção e transformação de hidratos que afetam a porosidade, permeabilidade, propriedade mecânica e durabilidade do concreto. Além disso, a carbonatação do concreto incorporar SCMs difere de acordo com os materiais usados e as condições ambientais, apresentando comportamento dissimilar na carbonatação”.¹⁷

Um desses fenômenos é a reação pozolânica que consome hidróxido de cálcio, baixando o pH e acelerando a taxa de carbonatação, e outro fenômeno é que a taxa da

¹⁶ Texto traduzido do original, Inglês.

“In addition to the carbonation effect, they showed that the CO² uptake capacity was 25.2% for a hardened paste that had Portland cement replaced by 10% reactive MgO in terms of its weight at a curing age of 56 days”.

¹⁷ Texto traduzido do original, Inglês.

“The addition of SCMs can significantly influence the production and transformation of hydrates that affect the porosity, permeability, mechanical properties and durability of the concrete. In addition, the carbonation of concrete incorporating SCMs differs according to the materials used and the environmental conditions, presenting a dissimilar behavior in carbonation”.

carbonatação é atrasada à medida que hidratos adicionais são produzidos por meio de reações pozolânicas ou de hidratação de SCMs para ocupar os poros.

No entanto, “uma diminuição no pH pode ser causada por carbonatação, ou pozolânica ou hidráulica latente reação e podem se sobrepor. Assim, avaliando a extensa taxa de carbonatação ocorrendo em concreto incorporando SCMs com esta metodologia de teste requer que se tomem precauções”.¹⁸

O estudo conclui que, os íons metálicos presentes nos SCMs, que não estão envolvidos na reação de hidratação, podem reagir com o CO₂ penetrou no material e precipitou como um carbonato, fornece outra fonte de fechamento de poro retardando a carbonatação.

Tabela 3 - Prós e contras dos métodos de sequestro de CO₂ em termos de impacto ambiental.

Métodos	Prós	Contras
Sequestro Geológico	Grande capacidade de sequestro.	Alto custo de transporte de CO ₂ ; Limitação na seleção do local; Poluição do Solo devido ao vazamento de CO ₂ .
Carbonatação Mineral	Baixa capacidade de captação de CO ₂ .	Uso de subprodutos industriais; Poluição ambiental devido ao uso de produtos químicos; Consumo alto de energia;
Carbonatação de Materiais à base de Cimento	Sequestro permanente de CO ₂ ; Sem uso adicional de produtos químicos; Consumo de energia relativamente baixo com o material carbonatado como material na construção.	Problema de durabilidade quando o material carbonatado é usado com reforço de aço; Desempenho a longo prazo.

Fonte: Tabela criada pela autora do Trabalho.

¹⁸ Texto traduzido do original, Inglês.

“A decrease in pH can be caused by carbonation, or a latent pozzolanic or hydraulic reaction and can overlap. Thus, evaluating the extensive carbonation rate occurring in concrete incorporating SCMs with this test methodology requires that precautions be taken”.

5 CONCLUSÃO

Tendo em vista o fato de que a produção de cimento no Brasil e no mundo é considerada um grave ofensor ao meio ambiente, a proposta do novo cimento, que além de ser menos danoso à atmosfera, absorve parte do que há de gás carbônico depositado é certamente uma opção de preservação da biodiversidade do planeta onde nós, como seres humanos, compartilhamos a nossa existência com a das outras espécies. Implementar a proposta no Brasil pode ser vantajoso em diversos aspectos, não só ético e consciente, mas também como forma de geração de emprego e lucro ao país.

Entende-se através do presente estudo que a carbonatação na pasta de cimento como um processo complexo influenciado por inúmeros fatores, como o tipo e composição do ligante, alterações nas microestruturas, porosidade, condições do meio externo e etc. Antigamente, alguns estudos direcionaram suas respectivas pesquisas no que diz respeito à corrosão induzida pela carbonatação do aço de reforço. No entanto, nesses últimos anos, a atenção mudou para a compreensão das mudanças microestruturais relacionadas à carbonatação sob incontáveis condições. Por inúmeros motivos, o estudo pode garantir que, com o uso para armazenar CO₂ dos poços de óleo à base de cimento Portland esgotados, como proposta inovadora de carbonatação a cura a vapor pode ser adotada pelas indústrias cimentícias.

Nota-se através do estudo que no processo de carbonatação, o hidróxido de cálcio não é o somente produto de hidratação reagindo com CO₂. Em outras fases, como na pasta de cimento, o cimento e outros minerais não hidratados reagem com o dióxido de carbono. Acredita-se que a cinética do processo de carbonatação é governada tanto pela exposição quanto pelas condições microestruturais. A carbonatação da pasta de cimento hidratada causa uma mudança na porosidade e distribuição do tamanho dos poros. Logo, a carbonatação não pode ser vista como um processo contínuo que obstrui a porosidade, mesmo na pasta de cimento Portland: em estágios posteriores, a porosidade aumenta, provavelmente devido à carbonatação de minerais e sua descalcificação.

O trabalho proporciona informações obtidas através de um aspecto científico e técnico sobre a utilização de CO₂ e tecnologias de sequestro usando materiais à base de cimento. As seguintes observações finais e as perspectivas são tiradas do presente estudo.

Compreende-se também que a absorção de CO₂ em materiais à base de cimento ocorre principalmente em produtos de hidratação, minerais não reagidos de clínquer e suplementos materiais cimentícios. Para cimentos Portland, CO₂ principalmente reage com o Ca(OH).

Conclui-se que, há opções variadas para a substituição a curto ou longo prazo de aglomerantes utilizados em obras pelo país e pelo mundo. A partir disso, os métodos convencionais devem ser repensados e as novas possibilidades apresentadas poderão ser introduzidas ao mercado, para que seja possível conscientizar o público alvo, que em suma denomina-se construção civil e todos os profissionais inseridos no ramo, fazendo o possível e trabalhando ativamente para que o plano apresentado na Cúpula do Clima no ano de 2021, em razão da resolução do 11º ODS, tenha verdadeira eficácia. Com a pura finalidade que a construção civil deixe de uma vez por todas de ser um dos maiores ofensores ao meio ambiente e seja dessa maneira, contribuinte para a construção de sonhos e de um mundo melhor.

REFERÊNCIAS

BOFF, Leonardo, 2012. **Sustentabilidade**. Petrópolis: Vozes, 2012. Acesso em 02 de maio 2020.

CAMBOU, Dom e MOHR, Mark, 2000. **Modern Marvels: Concrete**. Disponível em <<https://youtu.be/MtHUATGVBzI>>. Acesso em 02 maio 2020.

CIMENTO no Mundo. CIMENTO.ORG Disponível em: <<https://cimento.org/cimento-no-mundo-2013/>>. Acesso em 29 de abril 2020.

CONSTRUÇÃO Civil Consome até 75% da Matéria-prima do Planeta. **Globo**, 2014. Disponível em: <<http://redeglobo.globo.com/globociencia/noticia/2013/07/construcao-civil-consome-ate-75-da-materia-prima-do-planeta.html>>. Acesso em 30 de abril 2020.

DIAS, Ricardo Henrique Almeida. **A física nas revistas Ciência Hoje e Pesquisa Fapesp: leituras de licenciandos**. Dissertação (Mestrado em Educação) – Faculdade de Educação, Unicamp, 2020.

_____. **Processos da ciência na formação do jornalista: o funcionamento de uma unidade de ensino**. Tese (Doutorado em Educação) – Faculdade de Educação, Unicamp, 2015.

ECO DEBATE, 2009. **Geração dos Resíduos de Construção Civil: desafios e soluções**. Disponível em: <- <https://www.ecodebate.com.br/2009/05/18/geracao-de-residuos-de-construcao-civil-desafios-e-solucoes-artigo-de-carol-salsa/>>. Acesso em 29 de abril 2020.

VIVEIROS, Mariana. **81% do entulho é jogado em local irregular. Folha de S. Paulo**, 2012. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff1701200208.htm>>. Acesso em 29 de abril 2020.

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL, 2010. **Cadeia Produtiva da Construção Civil: sustentabilidade é o caminho**. Disponível em: <<http://www.flexeventos.com.br/pdfs/publicacoes/office-152pdf>>. Acesso em 02 de maio 2020.

JHA, Alok. **Revealed: The Cement that eats carbon dioxide**. The Guardian, 2008. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/environment/2008/dec/31/cement-carbon-emissions>>. Acesso em 20 de abril 2020.

SNIC, 2019. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Roadmap Tecnológico do Cimento**. Disponível em: <<http://snic.org.br/noticias-ver.php?id=28>>. Acesso em 09 abril 2020.

VARELA, Noel e VIEIRA, Fernando Sales, APFAC, 2005. **Cimento: Uma matéria-prima essencial no fabrico de argamassas.** Disponível em: <<https://www.apfac.pt/congresso2005/comunicacoes/Paper%2037.pdf>>. Acesso em 03 de maio 2020.

J.G. Jang, G.M. Kim, H.J. Kim, H.K. Lee, 2016. **Review on recent advances in CO2 utilization and sequestration technologies in cement-based materials.** Disponível em: <www.elsevier.com/locate/conbuildmat>. Acesso em 23 de maio de 2021.

Duo Zhang, Zaid Ghoulah, Yixin Shao, 2016. **Review on carbonation curing of cement-based materials.** Disponível em: <www.elsevier.com/locate/jcou>. Acesso em 23 de maio de 2021.

Branko Šavija, Mladena Lukovic', 2016. **Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities.** Disponível em: <www.elsevier.com/locate/conbuildmat>. Acesso em 23 de maio de 2021.

Vlasopoulos, Nikolaos, 2009, 1 Vídeo (49seg). **Energy/Environment ACES Award Winner: Novacem.** Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=uOGuOPCvZ8o&ab_channel=Science%7CBusiness>. Acesso em 6 de junho de 2021.