

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CARATINGA

LEANDRO DE ASSIS RAMALHO

MAIARA PEDROSO RODRIGUES

**CIMENTO GEOPOLIMÉRICO COMO UMA ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL E
DE ELEVADA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO EM RELAÇÃO AO
CIMENTO PORTLAND**

BACHARELADO

EM

ENGENHARIA CIVIL

DOCTUM-MG

2014

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CARATINGA

LEANDRO DE ASSIS RAMALHO

MAIARA PEDROSO RODRIGUES

**CIMENTO GEOPOLIMÉRICO COMO UMA ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL E
DE ELEVADA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO EM RELAÇÃO AO
CIMENTO PORTLAND**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Instituto Tecnológico de Caratinga, como parte das exigências para conclusão do curso de Graduação de Engenharia Civil e como requisito parcial para à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. José de Arimatéia Lopes

Co-orientador: Filipe Augusto Pereira Lopes

DOCTUM-CARATINGA

2014

“Se as coisas não saíram como eu planejei, posso ficar feliz por ter hoje para recomeçar, O dia esta na minha frente esperando para ser o que eu quiser.

E aqui estou eu, o escultor que pode dar forma.

Tudo depende só de mim.”

Charles Chaplin

AGRADECIMENTO

Leandro de Assis Ramalho

Agradeço a Deus por sempre ter me iluminado e guiado durante todos estes anos, por estar presente em cada segundo da minha vida e por não ter me deixado desistir mediante as dificuldades.

Aos meus pais, Maria José e Antônio Carlos pelo apoio, incentivo, e carinho.

Aos meus avós Isabel e João Pedro (in memoria), que hoje não se encontram mais presentes em minha vida, mais que me abdicaram de um amor incomparável, e eu tenho certeza que ainda continuam a me abençoar por onde quer que estejam.

A tia Olinda, o meu mais sincero obrigado. Obrigado por ter acreditado em mim, pelos incentivos, pelas palavras que nunca faltaram, sem você este sonho hoje não poderia estar sendo realizado.

A toda minha família, tios, primos e irmãos pelo apoio e carinho.

Aos amigos pelos momentos de descontração, quando já estava cansado e desanimado.

A minha noiva pelo apoio incondicional, por estar sempre ao meu lado durante todo esse tempo e por acreditar em mim e nos meus sonhos.

Aos mestres e professores por todos os ensinamentos e experiências a nós dedicadas. Ao nosso orientador deste trabalho José de Arimatéia, pelo apoio e pelas sábias palavras. Ao coordenador João Moreira pelas orientações e dicas que nos foram oferecidas.

Enfim, agradeço a todos que de um modo especial fizeram parte da minha vida e deste trabalho. Muito obrigado!

AGRADECIMENTO

Maiara Pedroso Rodrigues

Em primeiro lugar eu me curvo e agradeço a Deus, pelo simples dom da vida, por não ter me deixado fraquejar, e por me carregar no colo naqueles momentos mais difíceis em que eu pensei que não seria capaz. Esta vitória não seria possível sem a presença constante de Deus e Maria em minha vida.

Aos meus pais José João e Martinha, não tenho palavras para agradecer tamanho amor e dedicação, vocês são meu alicerce, meu espelho de caráter e honestidade, estão presente em todos os momentos da vida, me incentivando e me fazendo acreditar que eu posso ir muito, mais muito mais longe. E eu sempre irei dedicar a minha vitória a vocês.

Aos meus queridos avós, que hoje estão presentes apenas em meu coração, eu agradeço pelo amor incondicional, e eu sei que onde quer que estejam estão olhando por mim e vibrando pela minha conquista.

A toda minha família, tios, primos, irmãs, sobrinhas e aos amigos, por estarem ao meu lado, me apoiando e me ofertando o melhor de vocês.

Ao meu noivo Leandro, pelo amor, companheirismo, dedicação, e por ter escolhido trilhar esta difícil caminhada da faculdade ao meu lado, o que foi fundamental para que juntos pudéssemos realizar este sonho.

Ao nosso orientador José de Arimatéia e engenheiro Filipe Augusto pelo apoio, e incentivo na escolha deste tema, por ter nos orientado e por não polparem esforços para a realização deste trabalho.

Ao coordenador do curso de Engenharia Civil, João Moreira pelos sábios conselhos e apoio, para a conclusão desta monografia.

Agradeço a todos os professores desta jornada por terem compartilhado conosco ensinamentos e experiências de toda uma vida profissional.

E jamais poderia deixar de agradecer aos meus amigos e colegas de curso, pelos momentos que vivemos juntos, que serão guardados e lembrados por toda minha vida.

Enfim agradeço a todos que fizeram e fazem parte desta história e que de um modo especial contribuíram para o meu crescimento e pela realização deste sonho.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Processo de Fabricação do Cimento Portland. Fonte: www.resdil.com.br	23
Figura 2: O Coliseu também conhecido como Anfiteatro Flaviano. Fonte: www.romaitalia.com.br	27
Figura 3: Espécies geopolimérica desenvolvidas com sucesso em aplicações. Fonte: Santa, Rozineide Aparecida Antunes Boca, 2012, p.67.....	31
Figura 4: Aplicações possíveis para produtos de geopolímeros na indústria da construção. Fonte: www.geopol.com.br	33
Figura 5: Embalagens de revenda do cimento Geopolimérico. Fonte: Geo-pol, 2014.....	36
Figura 6: Esquema de mistura. Fonte: Pinto, 2007, p.54.....	37
Figura 7: Emissões de gases de efeito estufa da indústria de cimento, 2000. Fonte: Maury, Maria Beatriz, et al (2012, p.79).....	41
Figura 8: Comparação entre os processos de obtenção de Cimento Portland convencional, do cimento geopolimérico e da zeólita sintética. Fonte: Sánchez, Miguel Genaro Peralta (2008, p.67).....	42

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Consumo aparente de cimento no Brasil.Fonte: Borges, Paulo Henrique Ribeiro, et al. (2014, p.2)	40
Gráfico 2- Emissões de CO2 na produção de Concreto Tradicional. Fonte: Borges, Paulo Henrique Ribeiro. Et al. (2014, p.11).....	44
Gráfico 3- Emissões de CO2 na produção de Concreto Geopolimérico. Fonte: Borges, Paulo Henrique Ribeiro. Et al. (2014, p.11).....	45
Gráfico 4- Demanda energética na produção de Concreto Tradicional. Fonte: Borges, Paulo Henrique Ribeiro. Et al. (2014, p.12).....	47
Gráfico 5- Demanda enérgita na produção de concreto Geopolimérico. Fonte: Borges, Paulo Henrique Ribeiro. Et al. (2014, p.12).....	47

ÍNDICES DE TABELAS

Tabela 1- Composição dos cimentos Portland. Fonte: www.ecivilnet.com	25
Tabela 2- Classificação dos geopolímeros. Fonte: Sánchez, Miguel Genaro Peralta (2008,p.63).....	29
Tabela 3- Tempo mínimo de cura do concreto conforme a relação a/c. Fonte: www.blogdopetcivil.com.br , 2012.	53

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1- Propriedades do Cimento Geopolímero. Fonte: www.geopolymer.com.br	50
---	----

ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABCP – Associação Brasileira do Cimento Portland

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al- Alumínio

Ca- Cálcio

CG- Cimento Geopolimérico

CO² - Gás Carbônico

CP- Cimento Portland

CP I – S – Cimento Portland Comum com adição

CP I- Cimento Portland Comum

CP II- Cimento Portland Composto

CP III- Cimento Portland de Alto Forno

CP IV- Cimento Portland Pozolânico

CP V – Cimento Portland de Alta resistência inicial

CP II- E- Cimento Portland Composto com Escória

CP II- F - Cimento Portland Composto com Filer

CP II- Z- Cimento Portland Composto com Pozolona

K- Potássio

Na- Sódio

O- Oxigênio

pH – Potencial Hidrogênico

PS- Polissialato

PSDS- Polissialato- disiloxo

PSS- Polissialato- siloxo

Si- Silício

LISTA DE UNIDADES

%- Por cento

°C- Graus Celsius

w/m. k - Watts Por Metro Por Kelvin

fck- Resistência Característica do Concreto a Compressão

RESUMO

Considerado um dos produtos mais utilizados no mundo, o cimento perde somente para água, no entanto é um dos responsáveis pelo efeito estufa. A produção do Cimento Portland gera uma quantidade significativa de CO₂ o que é prejudicial ao meio ambiente, pois é obtido através de extrações de matérias-primas não renováveis como argila e calcário, além de estudos mostrarem que sua durabilidade vem sendo variável, apresentando deteriorações em suas estruturas. A sustentabilidade vem caminhando lado a lado com todos os tipos de indústria, e com a indústria do cimento não é diferente. Nesse contexto, investimentos têm sido feitos para que haja um aumento da eficiência dos processos de fabricação, bem como no aproveitamento de resíduos de outras indústrias. Os geopolímeros surgem como uma nova classe de materiais, como produtos de fácil produção, utilizando matérias primas abundantes e mesmo resíduos ou dejetos sólidos inorgânicos industriais contendo aluminossilicatos. São obtidos através de uma simples polimerização, e possuem inúmeras aplicações, os cimentos Geopoliméricos são materiais de alto desempenho para aplicações estruturais, capazes de substituir total ou parcialmente o cimento Portland, além de serem materiais que apresentam bom nível de resistência à compressão.

Palavras chave: Cimento, Geopolímeros, sustentável, resistência.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE GRÁFICOS	8
ÍNDICES DE TABELAS	9
ÍNDICE DE QUADROS	10
ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	11
LISTA DE UNIDADES	12
RESUMO.....	13
INTRODUÇÃO	16
CONTEXTUALIZAÇÃO.....	16
OBJETIVOS.....	17
JUSTIFICATIVAS.....	18
ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
1- CIMENTO PORTLAND.....	20
1.1- DESCRIÇÃO.....	20
1.2- HISTÓRIA	20
1.3- COMPOSIÇÃO E FABRICAÇÃO	22
1.4-TIPOS.....	24
2- CIMENTO GEOPOLIMÉRICO	26
2.1- HISTÓRIA	26
2.2- GEOPOLÍMEROS.....	28
2.3- SOLUÇÕES ALCALINA ATIVADORA.....	34
2.4- COMPONENTES E PROPORÇÕES DO CIMENTO GEOPOLIMÉRICO.....	35
3.3- PROPRIEDADES DO CIMENTO GEOPOLÍMERICO:	37
3- ANÁLISES COMPARATIVA	39

3.1- AGRESSÕES AO MEIO AMBIENTE ATRAVÉS DA EMISSÃO DE GÁS CARBONICO (CO ₂) E EXTRAÇÃO DE MATÉRIAS PRIMAS	39
3.2- RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DOS CP E CG	49
3.2.1- CURA	522
CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

INTRODUÇÃO

CONTEXTUALIZAÇÃO

O cimento é definido como um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece ao entrar em contato com água, pois se torna uma pasta homogênea, capaz de endurecer e conservar sua estrutura mesmo que novamente entre em contato com a água.

Considerado um dos produtos mais utilizados no mundo, o cimento Portland tem apresentado algumas desvantagens em sua produção e utilização. A sua produção gera uma quantidade significativa de CO₂ o que é prejudicial ao meio ambiente, é obtido através de extrações de matérias-primas não renováveis como argila e calcário, além de estudos mostrarem que sua durabilidade vem sendo variável, apresentando deteriorações em suas estruturas. As indústrias da construção civil vêm aumentando a cada dia mais, e com isso crescem o número de pesquisas para a obtenção de novos materiais.

Devido às desvantagens ocorrentes na fabricação e utilização do cimento Portland, às propriedades físico-químicas do cimento tem evoluído constantemente e estudos comprovaram que o cimento geopolimérico pode ser favorável ao meio ambiente, pois é derivado de materiais geológicos naturais conhecidos como geopolímeros, necessitando somente de energia moderada para serem produzidos e considerado bastante eficaz em sua utilização, possuindo diversas vantagens, que o faz superior ao cimento Portland em várias propriedades.

Esse novo produto contribui plenamente para a diminuição do impacto ambiental, através de uma queda considerável de emissão de gás carbônico para a atmosfera, sem contar que os cimentos a base de geopolímeros são cimentos com uma resistência á tração superiores aos convencionais e devido

a sua elevada resistência a compressão em tempo inicial, podem ser utilizados na produção de pavimentos que necessitam de rápida liberação, como em pistas de aeroportos, vias de tráfego intenso, reparo de estruturas, manutenção industrial, etc. Desenvolvido como tecnologia inovadora, é formado pela reação química de temperaturas ordinárias de resíduos e material virgem contendo componentes reativos de alumina e sílica. Contribui para o desenvolvimento ecológico, e além das altas resistências iniciais possui propriedades como: resistência às altas temperaturas, ao choque térmico, a corrosão química e à abrasão, que superam as propriedades dos concretos tradicionais.

OBJETIVOS

Realizar uma análise comparativa das agressões ambientais e das resistências à compressão do Cimento Geopolimérico e do Cimento Portland, demonstrando o melhor desempenho e aplicação de cada um de acordo com as suas limitações.

Em geral, iremos analisar a propriedade de maior influência de um concreto, composto pelos dois tipos de cimento, CP e CG, e a maior preocupação mundial que são as agressões ao meio ambiente, apresentando as características, e as vantagens da utilização e aplicação de ambos.

Especificamente nossos objetivos são:

- Descrever sobre a história, produção, fabricação, utilização e tipos do cimento Portland;
- Apresentar o Cimento Geopolimérico através de sua história desde a criação dos geopolímeros, até a sua utilização, composição e mistura do concreto, e expor de uma forma resumida as suas melhores propriedades;
- Realizar uma análise crítica das propriedades de resistência a compressão do concreto a base de cimento Portland e Cimento Geopolimérico,

demonstrando que realmente podemos obter uma estrutura de qualidade, durabilidade, e resistência sem agredir o meio ambiente.

JUSTIFICATIVAS

Este trabalho foi desenvolvido pela busca de inovações tecnológicas, por produtos que sejam mais ecológicos, desempenhe melhores resistências, garantindo melhores condições de trabalho, aplicação e desenvolvimento de toda uma estrutura.

O cimento Portland, atualmente o cimento mais utilizado em todo o mundo, vem apresentando desvantagens em sua fabricação e utilização, e é sobre estas desvantagens que realizamos uma análise comparativa, em que apresentamos um produto pouco conhecido mais de excelentes propriedades, que é o Cimento Geopolimérico.

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Composição da monografia: A monografia foi pensada tendo por base a redação de “três” capítulos, estruturados conforme descritos abaixo.

O Primeiro Capítulo intitulado “Cimento Portland”, serão abordados os seguintes temas: Descrição, história, composição e os tipos apresentados atualmente no mercado.

No segundo capítulo, que possui o título “Cimento Geopolimérico”, a versão da redação recairá sobre o estudo realizado durante o presente trabalho, onde será abordada a história do cimento, a descrição de Geopolímeros, componentes e proporções do concreto Geopolimérico, e sobre

as propriedades do cimento Geopolimérico. E por fim, no terceiro capítulo, cujo tema é “Análise Comparativa”, nos dedicamos aos elementos chave da monografia, sintetizando nossa tese na abordagem dos seguintes assuntos: agressão ao meio ambiente através da emissão de gás carbônico CO₂, e extração de matérias primas, e sobre resistência à compressão.

1- CIMENTO PORTLAND

1.1- DESCRIÇÃO

O cimento é um dos produtos mais utilizados em todo mundo. Estão presentes em todos os tipos de construção, das mais simples até as mais complexas, da infraestrutura até os acabamentos finais.

Segundo ABCP (2003)¹, o cimento pode ser definido como um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água. Na forma de concreto, torna-se uma pedra artificial, que pode ganhar formas e volumes, de acordo com as necessidades de cada obra.

É o componente base do concreto, 2º material mais utilizado em todo o planeta, perdendo somente para a água. O modo de fabricação e composição do cimento estão sempre em evolução, pois visam maior produtividade e redução de custos para as indústrias e consumidores.

1.2- HISTÓRIA

O cimento é um material cerâmico que ao entrar em contato com a água, produz reações exotérmicas de cristalização, ocorrendo assim à hidratação do material, que ganha resistência mecânica.

¹ ABCP. **Guia Básico de utilização de Cimento Portland**. 28p- 7.ed. São Paulo, SP, 2002, p.9. Disponível em: www.abcp.org.br. Acessado em 02/05/2014;

Para Battagin (2009)², a palavra CIMENTO é originada do latim CAEMENTU, que designava na velha Roma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada.

O cimento Portland se desenvolveu a partir do ano de 1756, através do inglês John Smeaton, que através de suas pesquisas conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1818, o engenheiro francês Louis Vicat obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, pela mistura de componentes argilosos e calcários, porém cimento romano é como o chamavam.

O ponto marcante, porém, para a história do cimento atual, se deu pelas mãos do construtor inglês Joseph Aspdin, com suas experiências envolvendo processos de mistura, queima e moagem de argila e pó de pedra calcária retirado das ruas. Neste desenvolvimento, Aspdin conseguiu um material pulverulento, no qual ele misturava uma certa quantidade de água, produzindo uma argamassa. Depois, deixava-a secar, conseguindo um material de dureza parecida com as pedras utilizadas nas edificações. Por fim, o construtor patenteou este pó em 1824, com o nome de cimento Portland, devido às semelhanças de seu produto final, com as rochas que eram extraídas nesta pequena península inglesa.³

A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada com o nome de cimento Portland por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland.

A sua descoberta desencadeou uma verdadeira revolução na construção civil, pelas suas diversas propriedades e no decorrer dos anos diversas indústrias cimenteiras começaram a surgir e a desenvolver pesquisas sobre o processo de fabricação do cimento Portland, tornando-o cada dia melhor.

² BATTAGIN, Arnaldo Forti. ABCP. **Uma breve história do Cimento Portland**. 1p. São Paulo, SP, 2009. Disponível em: www.abcp.org.br. Acessado em 31/10/2014;

³ Portal do concreto. **Cimento Portland**. P-1. Disponível em: www.portaldoconcreto.com.br. Acessado em:30/10/2014;

1.3- COMPOSIÇÃO E FABRICAÇÃO

O cimento Portland é composto de clínquer e adições. O clínquer é o principal componente do cimento Portland, presente em todos os tipos do cimento.

As principais matérias primas do clínquer são o calcário e a argila, extraídos de rochas de carbonato de cálcio, nestas rochas são implantadas cargas explosivas em furos abertos, para retirada da matéria prima que em determinadas proporções deve conter cálcio, sílica, alumina e ferro. Na maioria dos casos a matéria prima é obtida através de jazidas que ficam nas proximidades das fábricas de cimento.

Durante o seu processo de fabricação, essas duas matérias primas são levadas a fábrica, onde são moídas, formando um pó fino. Este último é armazenado em silos a fim de proporcionar uma mistura de consistência homogênea. A seguir, essa mistura é levada até a torre de preaquecimento, onde é submetida a temperaturas de até 900° C. Após a passagem por um forno rotativo (a temperatura de 1450°C), a mistura forma bolotas (conhecido como clínquer) que, ao sair do forno, será armazenado em depósito circular para resfriamento. Ao final, ocorrerá a moagem transformando-o em pó.⁴

⁴ SCHLOTTFELDT, Daniel Donida. **Os riscos associados ao uso do cimento na Construção Civil**. P-2. Disponível em: www.segurancanotrabalho.eng.br. Acessado em 06/05/2014;

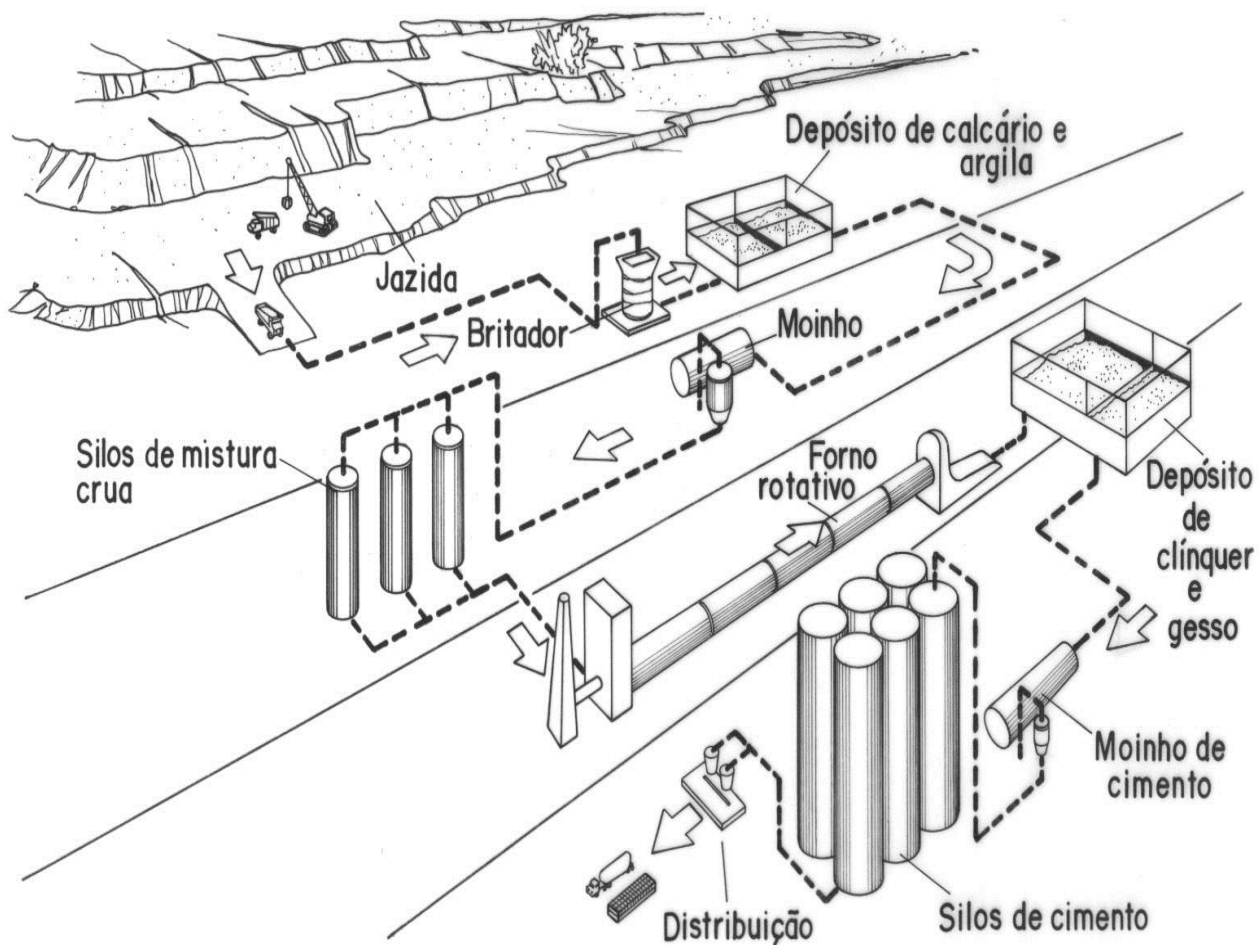


Figura 1: Processo de Fabricação do Cimento Portland.
 Fonte: www.resdil.com.br.

A figura acima nos representa o processo de fabricação do cimento Portland, em suas diversas etapas.

As adições são matérias-primas que quando misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland disponíveis no mercado atual. Estas matérias-primas podem ser o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos.

1.4-TIPOS

Atualmente o cimento mais utilizado é o cimento Portland, produto base dos concretos, apresentam várias composições que são as que definem as propriedades dos diversos tipos de cimento.

Existem no Brasil vários tipos de cimento Portland, diferentes entre si, principalmente em função de sua composição. Os principais tipos oferecidos no mercado, ou seja, os mais empregados nas diversas obras de construção civil são:

- Cimento Portland Comum;
- Cimento Portland Composto;
- Cimento Portland de Alto-forno;
- Cimento Portland Pozolânico.⁵

Na tabela a seguir, podemos visualizar os tipos de cimento e suas referidas composições, que é o que os tornam diferentes.

⁵ ABCP. **Guia Básico de utilização de Cimento Portland**. 28p- 7.ed. São Paulo, SP, 2002, p.9. Disponível em: www.abcp.org.br. Acessado em 02/05/2014;

Cimento Portland (ABNT)	Tipo	Clínquer + Gesso (%)	Escória siderúrgica (%)	Material pozolânico (%)	Calcário (%)
CP I	Comum	100	-	-	-
CP I - S	Comum	95-99	1-5	1-5	1-5
CP II - E	Composto	56-94	6-34	-	0-10
CP II - Z	Composto	76-94	-	6-14	0-10
CP II - F	Composto	90-94	-	-	6-10
CP III	Alto-forno	25-65	35-70	-	0-5
CP IV	Pozolânico	45-85	-	15-50	0-5
CP V - ARI	Alta resistência inicial	95-100	-	-	0-5

Tabela 1- Composição dos cimentos Portland.
Fonte: www.ecivilnet.com.

Para fins arquitetônicos, às vezes é necessário cimentos brancos ou com pigmentos que, aliados a agregados apropriados, fornecem o efeito desejado.

Todos os tipos de cimento são adequados para qualquer tipo de construção, a todos os tipos de estruturas e aplicações, porém existem tipos de cimentos que possuem mais vantagens para determinadas aplicações, o que o torna mais recomendado e conseqüentemente conhecido.

2- CIMENTO GEOPOLIMÉRICO

2.1- HISTÓRIA

O cimento geopolimérico vem de estudos de antigos monumentos estruturais erguidos em Roma e Egito, que resistem até os dias atuais, demonstrando uma durabilidade e resistência incomparáveis.

Durante a década de 70, muitos incêndios ocorridos na França levaram o governo a incentivar pesquisas nas áreas de química e materiais. Na maioria desses incêndios, foi observado que as vítimas fatais não sofriam apenas queimaduras, como também se intoxicavam pelos gases emitidos durante a combustão dos materiais. Além disso, algumas estruturas antigas permaneciam intactas após os incêndios, enquanto outras modernas eram bastante atingidas.⁶

Na figura 2, podemos observar o Coliseu, antigo monumento romano construído há quase 20.000 anos, onde foram encontrados materiais pétreos artificialmente aglomerados, com propriedades semelhantes as dos geopolímeros.

⁶ DIAS, Aline de Azevedo. **Estudo da degradação de argamassa geopolimérica por ácido acético e sulfúrico**. 99p- Mestrado em Engenharia Civil, Monografia, Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, RJ, 2008, p.16.



Figura 2: O Coliseu também conhecido como Anfiteatro Flaviano. Fonte: www.romaitalia.com.br.

Em 1979 o pesquisador francês Joseph Davidovits, apresentou a criação de um novo polímero mineral, polissialato, denominado geopolímeros, patenteado em 1985 nos Estados Unidos.

Dentre estes novos materiais destaca-se o geopolímero, material desenvolvido por Joseph Davidovits, na década de 70. O geopolímero que, artificialmente reproduz uma rocha, possui características de dureza, durabilidade e estabilidade térmica coexistindo com as principais vantagens que um material polimérico apresenta. Este produto pode da origem a uma resina, a um ligante a um cimento. O cimento geopolimérico (“Pyrament”) foi patenteado nos Estados Unidos em 1985 por Joseph Davidovits.⁷

De acordo com Bigno (2005, p.1)⁸, os cimentos Geopoliméricos constituem uma opção alternativa de cimento de alto desempenho produzido a partir de matérias primas de baixo custo, empregando inclusive resíduos

⁷ SKAF, Tatiana Borges. **Influência de Matérias-primas na microestrutura e resistência de compósitos geopoliméricos**. Mestrado em Ciências dos Materiais, Monografia, Instituto Militar de Engenharia-IME, RJ, 2008, p.21.

⁸ BIGNO, I.C, et all. **Calor de Hidratação de Cimentos Geopoliméricos**. Programa de Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia- IME, Urca, RJ, 2005, p.1.

industriais e processamento sem emissão de CO₂, com forte contribuição para a diminuição do efeito estufa.

Considerado uma nova classe de cimento, o cimento geopolimérico em sua função de aglomerante natural, vem sendo aprimorado e desempenhado para aplicações estruturais, portanto pronto para substituir parcialmente ou totalmente o cimento Portland.

2.2- GEOPOLÍMEROS

Através de uma polimerização de matérias primas naturais de origem geológica que contenha aluminossilicatos são obtidos os geopolímeros, polímeros inorgânicos sílico-aluminosos que apresentam vantagens econômicas e ambientais, pois eliminam uma etapa do processo de fabricação que é a queima de materiais cerâmicos, esta família de ligantes é comparável com a composição química da zeólita, porém com uma microestrutura mista, amorfa á semicristalina.

“O processo de geopolimerização envolve uma reação química que se produz num meio altamente alcalino onde certos minerais como a sílica e a alumina irão reagir criando polímeros com ligações do tipo Si- O- Al- O.” (Sepúlveda, 2007)⁹.

⁹ SEPÚVEDA, Jacinto. **Geopolímeros**. Tudo sobre Engenharia Civil. 2007. Disponível em: www.engenhariacivil.wordpress.com. Acessado em 01/05/2014;

O processo de polimerização envolve a reação química sob condições altamente alcalinas dos minerais Al-Si, produzindo a ligação polimérica Si-O-Al-O. Por este motivo, a relação Si/Al é a principal variável no processo de geopolimerização. O controle deve ser feito por variações de temperatura, pressão e composição (razões molares) do geopolímero.

O termo polissialato foi introduzido para caracterizar a rede de tetraedros de SiO_4 e AlO_4 que, ligados alternadamente e compartilhando todos os oxigênios dos vértices, constituem a matriz química dos geopolímeros.¹⁰

Através da relação Si/Al é possível obter produtos com diferentes características. Podemos verificar melhor através da tabela 2 que demonstra a classificação dos geopolímeros.

z	Tipo de geopolímero	Estrutura	Cátion alcalino
1	Polissialato (PS)	$\begin{array}{c} \quad \\ \text{M}_n(\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O})_n, w\text{H}_2\text{O} \\ \quad \\ \text{O} \quad \text{O} \end{array}$	K ou Na
2	Polissialato-siloxo (PSS)	$\begin{array}{c} \quad \quad \\ \text{M}_n(\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si})_n, w\text{H}_2\text{O} \\ \quad \quad \\ \text{O} \quad \text{O} \quad \text{O} \end{array}$	K Na K,Ca
3	Polissialato-disiloxo (PSDS)	$\begin{array}{c} \quad \quad \quad \\ \text{M}_n(\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si})_n, w\text{H}_2\text{O} \\ \quad \quad \quad \\ \text{O} \quad \text{O} \quad \text{O} \quad \text{O} \end{array}$	K K,Ca

Tabela 2- Classificação dos geopolímeros.

Fonte: Sánchez, Miguel Genaro Peralta (2008,p.63).

¹⁰ DIAS, Aline de Azevedo. Estudo da degradação de argamassa geopolimérica por ácido acético e sulfúrico. Mestrado em Engenharia Civil, Monografia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro-UENF, RJ, 2008, p.18.

Os Geopolímeros também denominados como Polissialato, podem receber o nome de polímeros naturais ou inorgânicos, ou de acordo com a sua utilização ou métodos de fabricação recebem o nome de: Cimentos Geopoliméricos, geocimentos, concreto polímero inorgânico, cimento alcalino ativado, entre outros.

2.2.1- Aplicações de Geopolímeros

Nas estruturas das razões atômicas entre o Silício e Alumínio (Si/ Al), é que são determinados os campos de aplicação dos produtos resultantes da geosíntese, e principalmente as suas propriedades. Os geopolímeros têm uma vasta aplicação, em diversos produtos e materiais do mercado atual, na figura abaixo podemos observar estas aplicações.

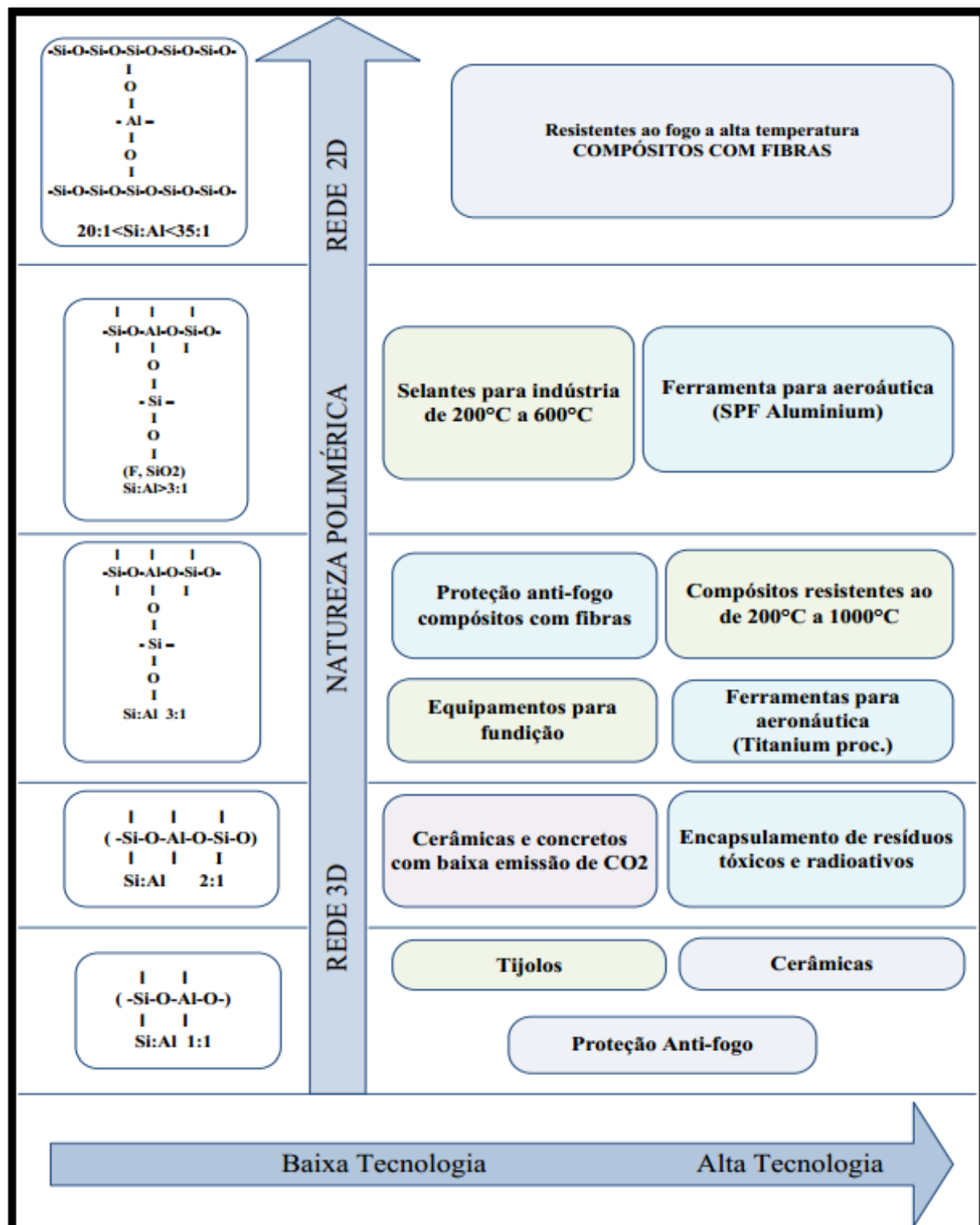


Figura 3: Espécies geopolimérica desenvolvidas com sucesso em aplicações.
 Fonte: Santa, Rozineide Aparecida Antunes Boca, 2012, p.67.

De acordo com Dias (2008,p.27)¹¹ além destas, como aplicações principais podem ser citadas: concretos de fundação (estacas, sapatas e todas as obras subterrâneas), bases de pavimentos, estruturas em contato com meios agressivos (em particular os marinhos), revestimentos de estruturas degradadas, muros de arrimo e, ainda, confinamento de materiais perigosos (metais pesados, produtos tóxicos etc.) que podem associar-se a essas intervenções.

Podemos de uma forma resumida, orientada por duas linhas de atuação demonstrar o desenvolvimento deste novo tipo de material:

1. Uma dirigida à obtenção de materiais de baixo custo, para a utilização em grandes quantidades, como materiais de construção. Neste tipo de materiais as matérias primas de base podem ser, além dos metacaulinos, as escórias granuladas, as cinzas volantes e, em termos gerais, todos os alumino-silicatos em que a razão atômica Si/Al varie de 1 a 3 (escombros de pedreira, de demolição, cinzas de queima ou de mineração, restos de Betão corrente de cimento Portland, etc.).

2. Uma segunda linha é dirigida à obtenção de materiais mais sofisticados, ainda que mais caros, em que a razão atômica referida pode alcançar valores até 35, podendo inclusivamente admitir-se a incorporação de fibras de vários tipos (amianto, carbono, vidro, etc.). Estes materiais poderão, de acordo com Daividovits, substituir com vantagem os plásticos, certos metais e mesmo os produtos cerâmicos. Nesta linha de atuação, o material básico é o metacaulino, que sofrerá as correções do teor em sílica que cada tipo de material pode implicar.¹²

A Geo-pol (2008)¹³ através da figura 4, afirma que os geopolímeros têm potencial para constituir a base do desenvolvimento sustentável de materiais e produtos com propriedades químicas e mecânicas superiores ao cimento Portland (CP).

¹¹ DIAS, Aline de Azevedo. Estudo da degradação de argamassa geopolimérica por ácido acético e sulfúrico. Mestrado em Engenharia Civil, Monografia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro-UENF, RJ, 2008, p.27.

¹² PINTO, Amândio Teixeira. **Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina do Metacaulino**. Disponível em: www.repositorium.uminho.br. Acessado em: 30/09/2014.

¹³ GEO-POL. **Cimento Geopolimérico**. Disponível em: www.geopol.com.br. Acessado em 10/11/2014

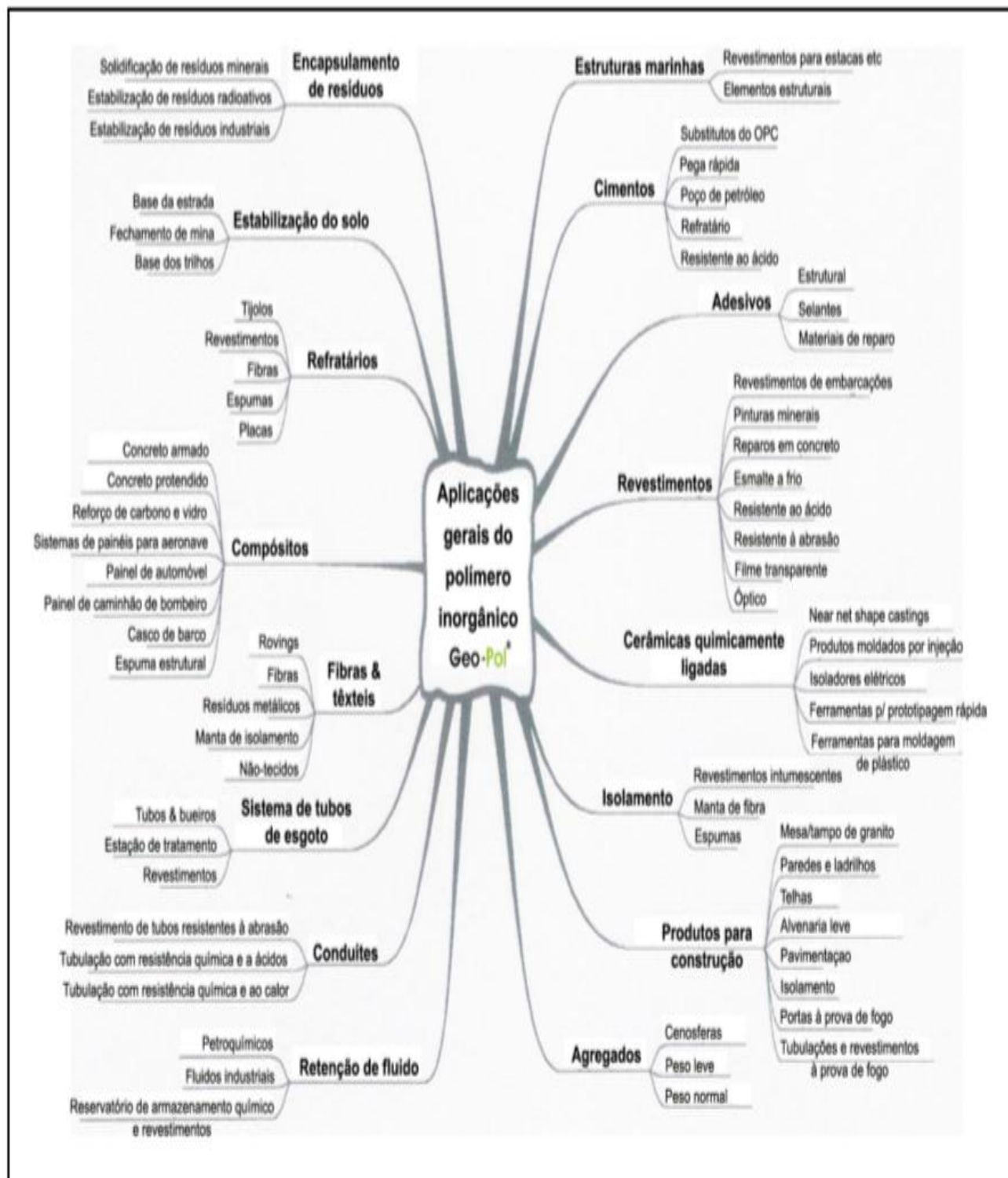


Figura 4: Aplicações possíveis para produtos de geopolímeros na indústria da construção.
Fonte: www.geopol.com.br.

Alguns resíduos derivados de indústrias e de atividades de mineração vêm sendo estudados e aplicados de forma gradativa na produção de geopolímeros, visando à produção de materiais cimentícios mais baratos e ambientalmente mais corretos.

Materiais residuais como cinzas volantes, escórias de alto forno e resíduos de minerais, contêm quantidades suficientes de alumina e sílica reativas que podem ser usados como materiais de partida para reações de geopolimerização. Alguns trabalhos tem mostrado sínteses usando cinzas volantes, escórias de forno, pozolonas, minerais contendo Al e Si e argilas (caulim e metacaulim). Deve-se considerar, entretanto, que dependendo do tipo e da natureza do material de partida usado, as propriedades físicas e químicas do geopolímero formado serão diretamente afetadas.¹⁴

Cinzas volantes, escórias de alto forno e resíduos de minerais contendo uma quantidade suficiente de Si/Al , podem ser utilizadas como materiais para reações de geopolimerização, no entanto o material mais utilizado são as argilas cauliniticas.

A geopolimerização entre os ligantes de base alcalina possuem características semelhantes a rochas da crosta terrestre, o que faz com que os produtos a base de geopolímeros sejam mais resistentes.

2.3- SOLUÇÕES ALCALINA ATIVADORA

O ativador, substância alcalina, pode ser simples constituído por uma única substância podendo ser hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH), ou composto constituído por duas ou mais substâncias, ou seja incluindo uma solução de 1 ou 2 hidróxidos , ou por sua vez combinados com um silicato, sendo uma fonte de SiO₂ ao sistema.

¹⁴ FREITAS, Sania Maria Belísio de Andrade. Cimentos de Base Alcalina e Cimentos Geopoliméricos. 2007. Disponível em: www.repositorium.com.br. Acessado em: 02/11/2014.

Para a formação e estabilização de uma nova estrutura é necessário um meio fortemente alcalino para que seja possível dissolver certa quantidade de sílica e alumina (SiO_2 e Al_2O_3), assim como hidrolisar a superfície das partículas das matérias primas, necessitando também da presença de um cátion na solução através dos chamados ativadores para o balanceamento de carga.¹⁵

Segundo Santa (2012,p.49)¹⁶, a ativação alcalina nada mais é do que um processo químico que permite transformar estruturas vitreas (amorfos, parcialmente amorfos ou metaestáveis) em um compacto material cimentício.

Os ativadores alcalinos mais comumente empregados na geossíntese são: hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH), silicato de sódio (Na_4SiO_4), metasilicato de sódio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), e silicato de potássio ($n\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$).¹⁷

Na geopolimerização as propriedades mecânicas dos produtos originados estão ligados a natureza e a concentração dos ativadores, contudo a escolha do ativador deve estar relacionado as características dos precursores de origem.

2.4- COMPONENTES E PROPORÇÕES DO CIMENTO GEOPOLIMÉRICO

O cimento geopolimérico é bi componente, sua embalagem de revenda possui o pó e o líquido ativador. Um pouco diferente das embalagens tradicionais do cimento Portland, os componentes solúveis são fornecidos em sacos de acordo com a quantidade requerida pelo cliente, chegando até 20 Kg

¹⁵ SEVERO, C.G.S, et al. **Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente**. Disponível em: www.dema.ufcg.edu.br. Acessado em: 30/10/2014.

¹⁶ SANTA, Rozineide Aparecida Antunes Boca. **Desenvolvimento de Geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel**. Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 2012, p.49.

¹⁷ SÁNCHEZ, Miguel Genaro Peralta. **Caracterização mineralógica e tecnológica dos lutitos diatomáceos da península de Santa Elena, Equador**. Dissertação de Mestrado em Ciências Naturais, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 2008, p.44.

por embalagem e os componentes insolúveis em baldes com quantidade necessária para dissolver o pó da solução.



Figura 5: Embalagens de revenda do cimento Geopolimérico.
Fonte: Geo-pol, 2014.

Através da figura abaixo podemos verificar melhor como funciona o esquema de manuseio do cimento geopolimérico.

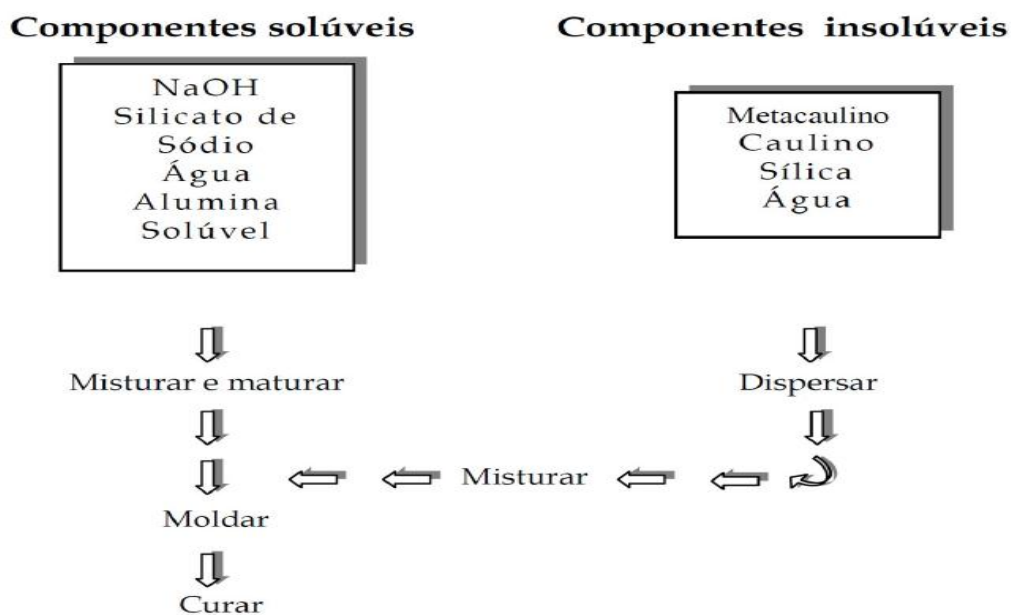


Figura 6: Esquema de mistura.
Fonte: Pinto, 2007, p.54.

A ordem de mistura dos reagentes quando inadequada pode afetar significativamente o desenvolvimento final do produto. Portanto o ideal é que se misturasse e deixasse maturar os componentes solúveis e só depois adicionasse os produtos insolúveis, quando estes já não vêm misturados e embalados direto de fábrica, como ilustra a figura 5, fornecida pela atual fabricante do cimento no Brasil, Geo-Pol.

3.3- PROPRIEDADES DO CIMENTO GEOPOLÍMÉRICO:

As propriedades do cimento geopolimérico são inúmeras, e outras até mesmo não exploradas e estudadas profundamente, devido ser um material pouco popular e com custos mais elevados que o cimento Portland.

De acordo com Sepúlveda (2007)¹⁸, os geopolímeros apresentam importantes propriedades como: Resistência ao fogo, resistência química,

¹⁸ SEPÚVEDA, Jacinto. **Geopolímeros**. Tudo sobre Engenharia Civil. 2007. Disponível em: www.engenhariacivil.wordpress.com. Acessado em 01/05/2014;

excelente adesão, rápido endurecimento, acabamentos duráveis, e durabilidade. Devido a suas vastas propriedades os geopolímeros podem ser utilizados em diversos campos, como produtos compósitos de resistência ao calor e ao fogo, produtos cerâmicos, confinamentos de estruturas, entre outros. Em sua aplicação o cimento, é considerado bastante importante para ambientes agressivos, reparos estruturais, pavimentação, vias de tráfego intenso que necessitam de rápida liberação, aeroportos, cimentação de poços de petróleo, entre outros.

Além das vantagens citadas acima, o cimento geopolimérico se destaca por:

- Excelentes propriedades de Durabilidade: possuem uma resistência a ataques de ácidos significativamente superiores à resistência de betões convencionais.
- Elevada resistência ao fogo: conseguem resistir a temperaturas de 1000° C a 1200° C sem perder características funcionais.
- Baixa condutividade térmica: A sua condutividade térmica varia entre valores de 0,24 a 0,3 w/m. k.
- Não dá origem à formação de reações álcali-agregado.
- Não dá origem à formação de fenômenos de carbonização. Os geopolímeros não possuem hidróxidos de cálcio livres
- Possuem excelente comportamento a ataques de sulfatos.
- Os geopolímeros têm um campo de aplicação bastante vasto que vai desde reforço estrutural, geotecnia, reabilitação, utilização em estruturas que estejam sujeitas a ataques de ácidos.
- Processo de produção simples: basta realizar uma mistura da pozolana com o fluido alcalino. O processo de mistura assemelha-se à produção do vulgar betão que utiliza como ligante o cimento Portland.
- Boa estabilidade volumétrica do geopolímero: geopolímeros possuem um coeficiente de retracção 4/5 inferior ao do cimento Portland
- Ganhos rápidos de resistência: estudos indicam que os geopolímeros adquirem cerca de 70% da resistência à compressão em 4 horas.¹⁹

¹⁹ SEPÚVEDA, Jacinto. **Geopolímeros**. Tudo sobre Engenharia Civil. 2007. Disponível em: www.engenhariacivil.wordpress.com. Acessado em 01/05/2014;

3- ANÁLISES COMPARATIVA

3.1- AGRESSÕES AO MEIO AMBIENTE ATRAVÉS DA EMISSÃO DE GÁS CARBÔNICO (CO₂) E EXTRAÇÃO DE MATÉRIAS PRIMAS

Agressão ao meio ambiente são todas e qualquer tipo de ações humanas que prejudicam o meio ambiente.

Com o crescimento das preocupações com o aquecimento global, produtos que sejam ambientalmente corretos estão ganhando cada vez mais espaço no mercado, e as indústrias tem como objetivo pesquisar, criar, fabricar materiais com melhores propriedades, seja elas químicas, físicas ou mecânicas, contudo sem agredir o meio ambiente.

De acordo com Torgal (2009)²⁰, no início do século XX a produção de cimento Portland era de 1.200 milhões de toneladas por ano, mas que em 2009 já chegava a 2.600 milhões por ano, podendo duplicar pelos próximos 40 anos, o que agravará de modo substancial os efeitos negativos das referidas emissões.

Borges, et al (2014, p.2)²¹, afirma que em 2010 foram produzidos no mundo cerca de 3,3 bilhões de toneladas de cimento, e que no Brasil em razão do crescimento no setor da construção civil, o consumo aparente do cimento terminou o ano de 2011 com 65 milhões de toneladas e o consumo per capita alcançou 333 kg.hab/ano, sendo considerada a maior marca de todos os anos.

²⁰ TORGAL, Fernando Pacheco. **Ligantes Geopoliméricos. Uma alternativa ao Cimento Portland?**. 2009, p.1. Disponível em: www.repositorium.uminho.br. Acessado em 10/04/2014.

²¹ BORGES, Paulo Henrique Ribeiro. Et al. **Estudo Comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II)**. Ambiente Construído, revista on-line. Disponível em: www.seer.ufg.br. Acessado em: 20/09/2014.

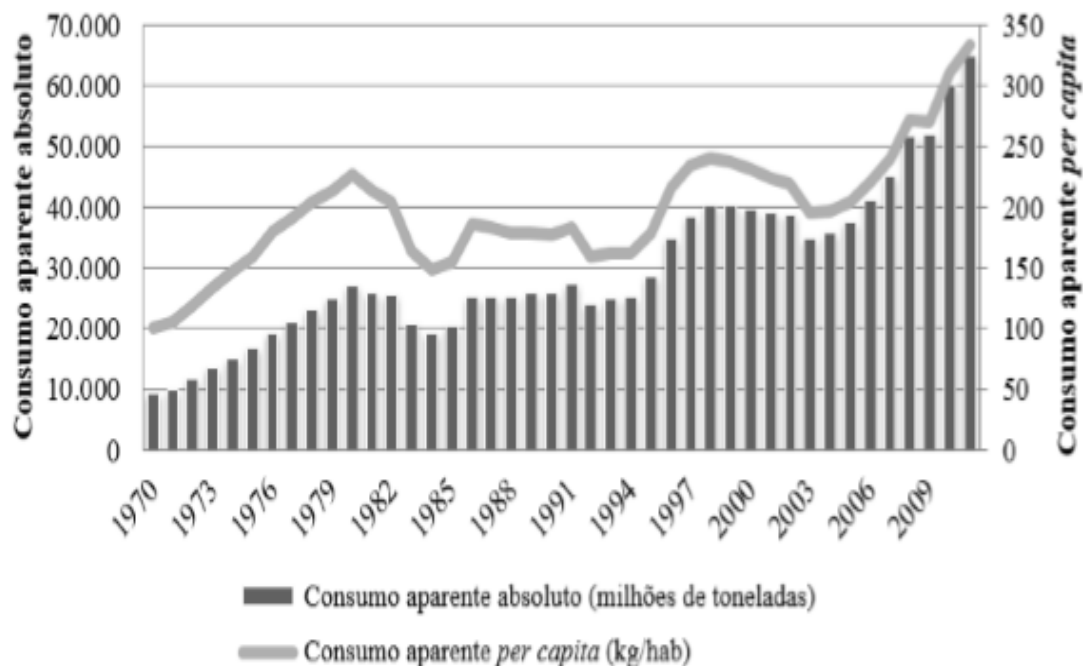


Gráfico 1- Consumo aparente de cimento no Brasil.
 Fonte: Borges, Paulo Henrique Ribeiro, et al. (2014, p.2)

De acordo com uma pesquisa realizada em 2013 pelo Centro Tyndall de Pesquisa de Mudanças Climáticas, da Universidade de East Ânglia (Reino Unido) foram liberados na atmosfera 36 bilhões de toneladas de CO₂, 2,1% a mais que no ano de 2012 e 61% a mais do que no ano de 1990 o ano base do Protocolo de Kyoto, tratado internacional realizado a fim de reduzir a emissão de gases que agravam o efeito estufa, uma das maiores causas do aquecimento global.

Maury (2012)²² nos apresenta que a indústria do cimento é responsável por aproximadamente 3% das emissões mundiais de gases de efeito estufa e por aproximadamente 5% das emissões de CO₂.

²² MAURY, Maria Beatriz. Et al. **Produção de cimento: Impactos a saúde e ao meio ambiente**. Revista Sustentabilidade em debate, v.3, Brasília, 2012, p.79.

Emissão Global de Gases de Efeito Estufa: 44 Gt
de CO₂ – equivalentes

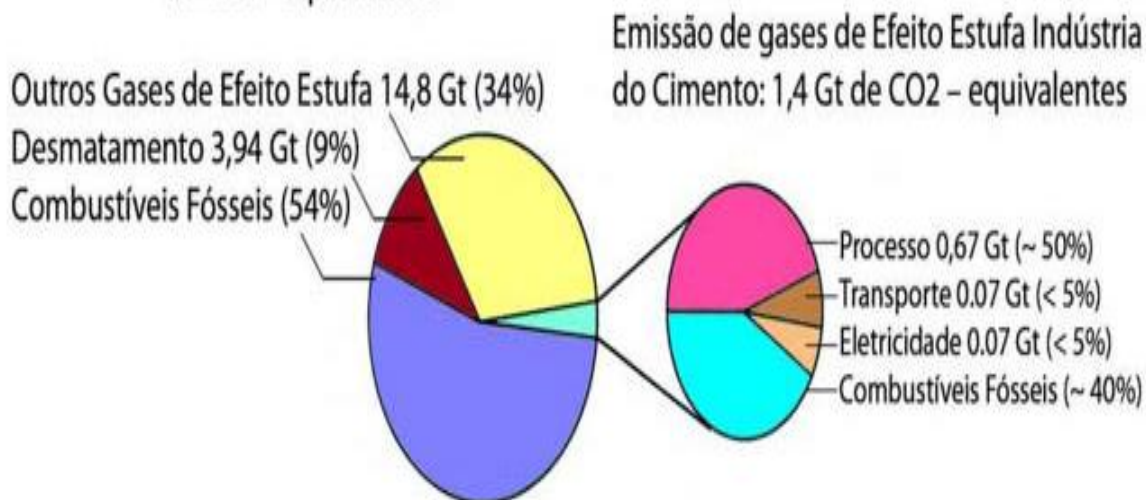


Figura 7: Emissões de gases de efeito estufa da indústria de cimento, 2000.
Fonte: Maury, Maria Beatriz, et al (2012, p.79).

As emissões de gás carbônico são preocupação não só pelo fato de ser a principal responsável pelas alterações climáticas do nosso planeta, como também poderem vir a gerar penalizações financeiras para os países onde emitem uma grande quantidade de CO₂.

Apesar de sua vasta utilização, e aplicação o Cimento Portland, em sua fabricação vem agredindo o meio ambiente de uma forma bastante extensa.

Durante o processo de fabricação das grandes indústrias de cimento, há uma grande emissão de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, consequência das altas temperaturas nos fornos na fase de produção do clínquer. O processo de produção requer aproximadamente 1,7 toneladas de material bruto por tonelada de clínquer fabricado, o que produz aproximadamente uma tonelada de emissão de dióxido de carbono (CO₂), da qual a calcinação da pedra calcária e queima de combustíveis contribuem com a metade das emissões.²³

²³ D'AGUIAR, Savana Cristina Medeiros. **Proposta de estudo sobre composição de cimento geopolimérico utilizando resíduos sólidos**. 57p- Curso de Ciência e Tecnologia, Monografia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, 2012, p.16.

Simplificadamente podemos observar que na produção de 01 tonelada de clínquer, é gerada uma quantidade significativa de gás carbônico de aproximadamente 0,7 toneladas.

De acordo com Osório (2006, p.27)²⁴, um “geopolímero” é basicamente um polímero inorgânico, obtido através da ativação alcalina de um aluminossilicato em determinadas condições de temperatura e de pressão.





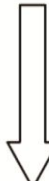
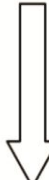
Cimento Portland	Cimento geopolimérico	Zeólita cristalina
$\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  1450 °C - 1500 °C Clínquer  Hidratação $\text{C} - \text{S} - \text{H} + \text{Ca}(\text{OH})_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$  20 - 90 °C + solução silico-alcalina $-\text{Si} - \text{O} - \text{Al} - \text{O} -$  Geosíntese Estrutura 3D – Aluminossilicato	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$  80 - 120 °C + solução alcalina Sílica coloidal Aquecimento em 2 estágios: 80 - 100 °C 25 - 150 °C  Cristalização da zeólita

Figura 8: Comparação entre os processos de obtenção de Cimento Portland convencional, do cimento geopolimérico e da zeólita sintética.
 Fonte: Sánchez, Miguel Genaro Peralta (2008, p.67).

Através da Figura acima, podemos observar que para obtenção de Cimento Portland, é necessária a etapa de produção do clínquer, que ocorre a altas temperaturas, entre 1450 e 1500° C, o que provoca muitas emissões de CO₂ através da calcinação do calcário e também pela queima de combustíveis empregado. Já na geosíntese que é semelhante ao processo de zeólitas

²⁴ OSORIO, Paulo Dias Lopes. **Concepção de um saferoom anti-tornado em betão Geopolimérico**. 228p- Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, 2006, p.27.

cristalinas as reações são realizadas a temperaturas bem amenas, emitindo quantidades bem menores de poluentes na atmosfera.

Segundo Sánchez (2008, p.68)²⁵, no caso de serem utilizadas matérias primas naturais, antes da geosíntese e da fabricação de zeólita cristalina, deve ser feita a calcinação destas matérias visando a sua desoxidrilação, que ocorre entre 500 e 900°C.

Comparando processo químico de produção dos Cimentos Portland e Geopolimérico também podemos observar a temperatura em que as matérias primas são elevadas:

Cimento Portland: CaO (cal virgem – CO₂ é liberado durante a sua produção) + SiO₂ (sílica ou dióxido de silício) são calcinados a 1450° resultando no clínquer que após a hidratação gera o C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado) e o hidróxido de cálcio.

Cimento Geopolimérico: Al₂ O₃ (alumina), SiO₂ são submetidos à temperatura entre 20 e 90°C e ativados por uma solução alcalina de silicato resultando na cadeia –Si-O-Al-O- que após a policondensação forma como produto uma cadeia polimérica tridimensional de aluminossilicato com baixa mobilidade.²⁶

De acordo com Skaf (2008, p.28)²⁷ além de propriedades excepcionais, a produção de cimento Geopolimérico reduz o consumo de energia (já que não existe a clínquerização a 1450°C) e evita a emissão de CO₂ na atmosfera até 90% comparado ao cimento Portland.

²⁵ SÁNCHEZ, Miguel Genaro Peralta. **Caracterização mineralógica e tecnológica dos lutitos diatomáceos da península de Santa Elena, Equador**. Dissertação de Mestrado em Ciências Naturais, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 2008, p.67.

²⁶⁻²⁷ SKAF, Tatiana Borges. **Influência de matérias-primas na microestrutura e resistência de compósitos Geopoliméricos**. 118p- Dissertação de Mestrado em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, RJ, 2008, p. 28.

Através de resultados de uma discussão de Borges, et al (2014) ²⁸, para uma produção de 1m³ de concreto Geopolimérico o ligante em si não emite CO₂, mas sim suas matérias primas, sendo o silicato de sódio o de maior significância.

Para a avaliação de 1m³ de concreto, verificou-se que o concreto de cimento Portland do Tipo CP II, mesmo com técnicas para a redução de emissões, ainda é responsável por 271,9 kg de CO₂/m³ de concreto, enquanto o concreto Geopolimérico 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. ²⁹

Estes resultados podem ser observados através dos gráficos abaixo:

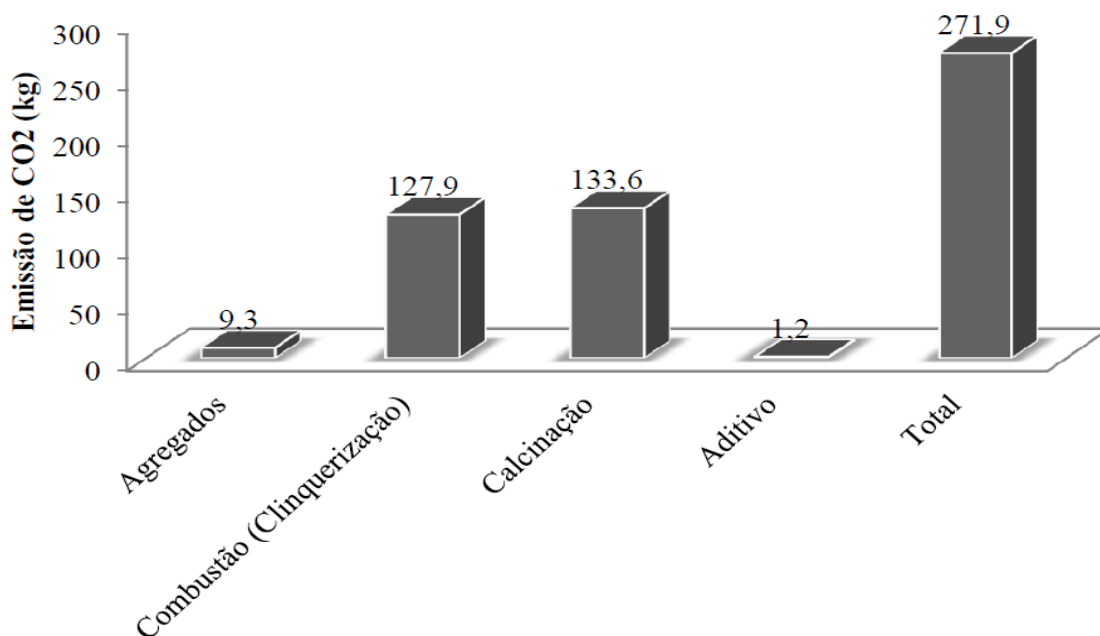


Gráfico 2- Emissões de CO₂ na produção de Concreto Tradicional.
Fonte: Borges, Paulo Henrique Ribeiro. Et al. (2014, p.11)

²⁸⁻²⁹ BORGES, Paulo Henrique Ribeiro. Et al. **Estudo Comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II)**. Ambiente Construído, revista on-line. Disponível em: www.seer.ufrgs.br. Acessado em: 20/09/2014.

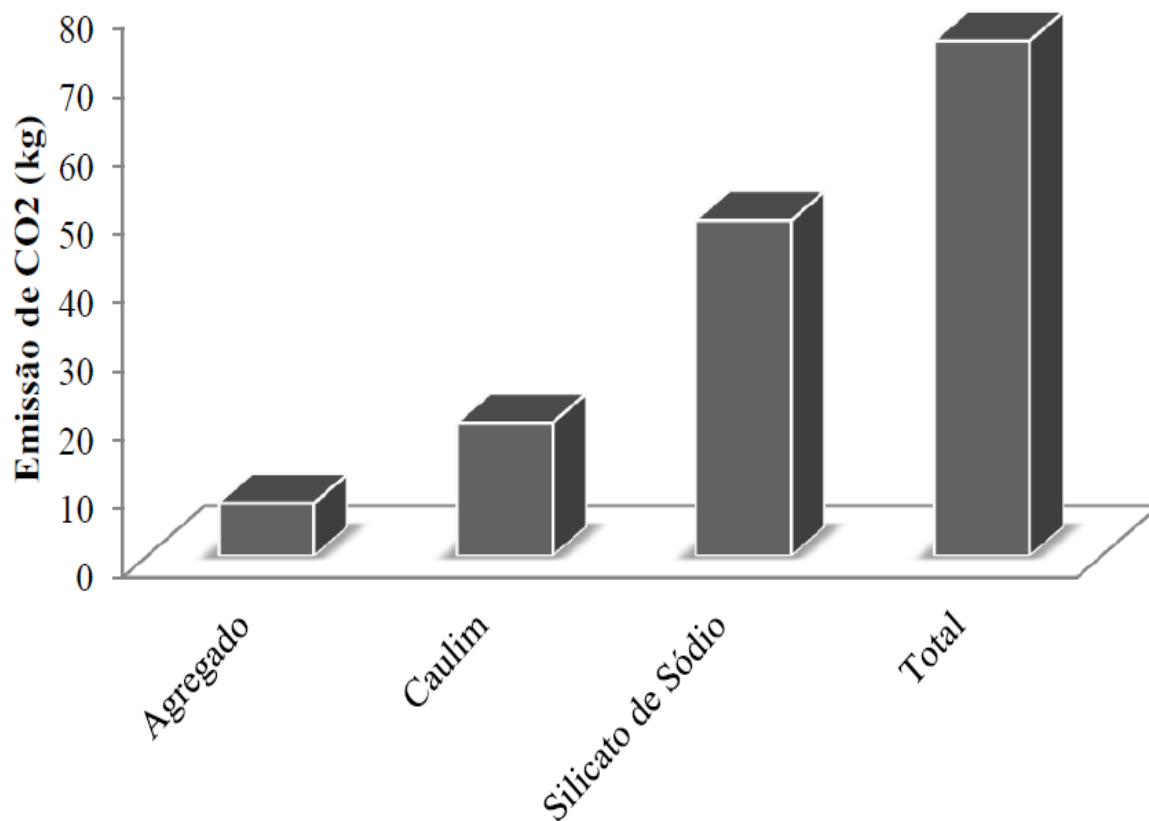


Gráfico 3- Emissões de CO2 na produção de Concreto Geopolimérico.

Fonte: Borges, Paulo Henrique Ribeiro. Et al. (2014, p.11).

Atualmente as indústrias de CP produzem cimentos substituindo parte do material, por filler de calcário cru (pó de calcário) que é uma matéria prima que dispensa tratamento térmico (calcinação) que no processo de fabricação é o responsável por 80% do consumo energético e 90% de emissão dos gases, e também por subprodutos de características cimentícias como as escórias de alto forno (resíduo de siderurgia) e pozolônicas como as cinzas volantes (resíduo de termelétricas a carvão).

Estas matérias primas como cinzas volantes, escórias de alto forno e resíduos de minerais também podem ser constituintes do CG como forma de reaproveitamento destes materiais, porém o material mais utilizado são as argilas cauliniticas.

A nível mundial, a investigação nas áreas dos ligantes geopoliméricos, centra-se hoje quase exclusivamente sobre as cinzas volantes, devido à elevada quantidade que é produzida anualmente (600 milhões de toneladas), estimando-se que apenas 14% desse volume seja reaproveitado. Havendo inclusive resultados muito promissores em termos de desenvolvimento de dormentes pré-fabricados para linhas ferroviárias.³⁰

Também devemos considerar as seguintes situações para a produção do CG:

- Uso de matéria prima abundante: é possível criar um gopolímero através do uso de uma vulgar pozolana ou através de produtos cuja composição contenha quantidades de sílica e alumina.
- Economia de energia e sustentabilidade ambiental: a produção de geopolímeros não requer grandes quantidades de energia para a sua produção. A energia que é necessária resume-se à energia necessária para obter temperaturas de cerca de 600° C para a obtenção de certas pozolanas. As emissões de CO₂ para a atmosfera são igualmente insignificantes, comparando com a produção de cimento Portland.³¹

Através dos gráficos abaixo podemos observar a demanda de energia gasta para a obtenção das matérias primas para produção de 1m³ de concreto dos tipos de cimento CP e CG.

³⁰ GEO-POL. **Cimento Geopolimérico**. Disponível em: www.geopol.com.br. Acessado em 06/04/2014;

³¹ SEPÚVEDA, Jacinto. **Geopolímeros**. Tudo sobre Engenharia Civil. 2007. Disponível em: www.engenhariacivil.wordpress.com. Acessado em 01/05/2014;

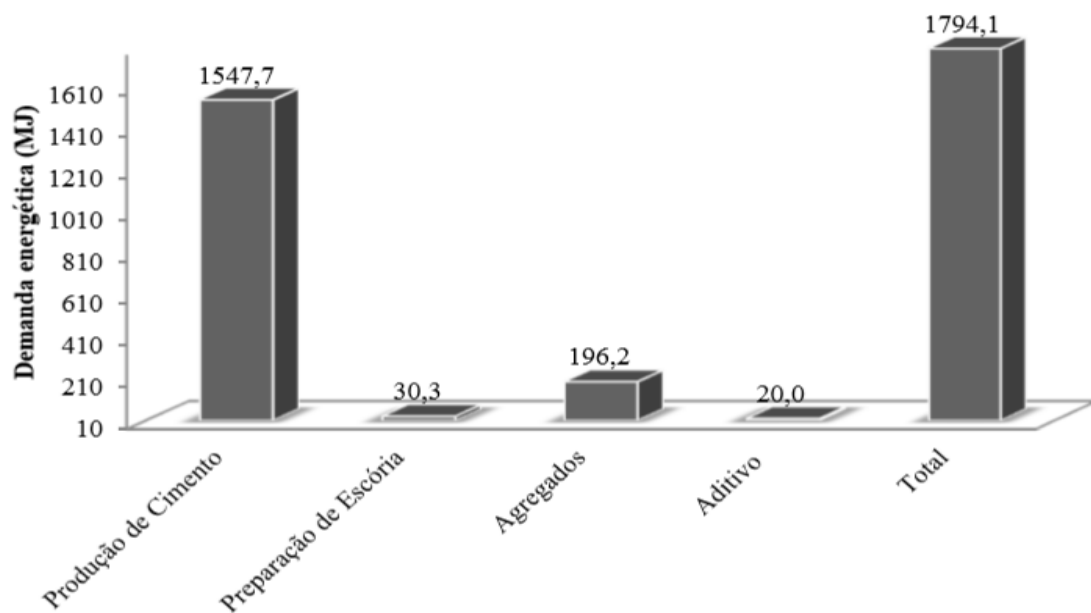


Gráfico 4- Demanda energética na produção de Concreto Tradicional.
 Fonte: Borges, Paulo Henrique Ribeiro. Et al. (2014, p.12).

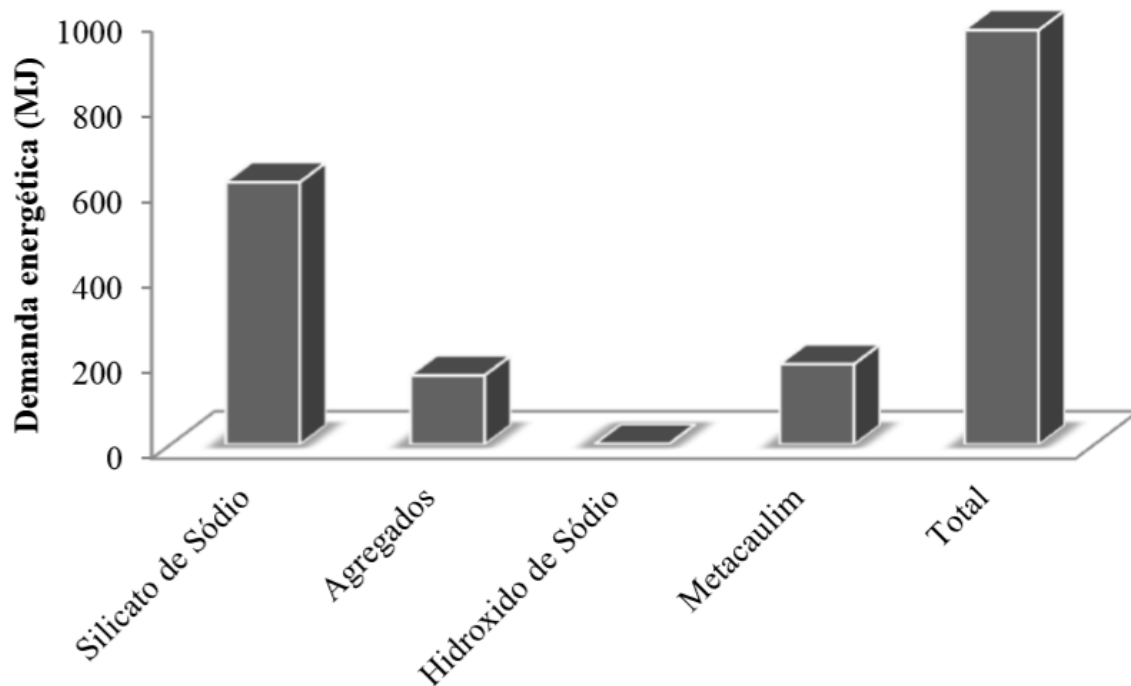


Gráfico 5- Demanda energética na produção de concreto Geopolimérico.
 Fonte: Borges, Paulo Henrique Ribeiro. Et al. (2014, p.12).

Através dos gráficos acima podemos observar que na produção do concreto a base de cimento Portland é consumida um valor de energia muito grande, diretamente relacionado ao processo de clínquerização. Já a produção do Concreto Geopolimérico o maior valor de energia consumido é na obtenção da solução ativadora Silicato de Sódio, relacionado às etapas de fusão e dissolução. E com isso estudos já demonstraram uma alternativa para essa diminuição de energia no concreto Geopolimérico.

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 ajudar a garantir resistência mecânica nos primeiros idades do cimento geopolimérico e reduzir o consumo da 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.³²

De acordo com Osório (2006, p.27)³³ a matéria prima de criação dos geopolímeros é praticamente inesgotável, pois os alumino-silicatos representam mais de 75% da parte sólida inorgânica da crosta terrestre, estando presentes na maioria das rochas e solos que resultam da desagregação física e química das rochas.

Portanto conclui-se que através da utilização dos cimentos geopolimérico pode ser reduzido cerca de 80 a 90% das emissões de CO₂, que é uma das preocupações mundiais devido ao aquecimento global, além das matérias primas que são abundantes em toda a crosta terrestre, e os resíduos industriais que assim como são utilizados para as adições do cimento Portland podem ser reaproveitados para a criação dos geopolímeros, diminuindo também a demanda energética gasta na produção dos seus componentes.

³² BORGES, Paulo Henrique Ribeiro. Et al. **Estudo Comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II)**. Ambiente Construído, revista on-line. Disponível em: www.seer.ufrgs.br. Acessado em: 20/09/2014.

³³ OSÓRIO, Paulo Dias Lopes. **Concepção de um saferoom anti-tornado em betão Geopolimérico**. 228p-Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, 2006, p.27.

3.2- RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DOS CP E CG

As peças de concreto estão sujeitas a todo tipo de solicitação como: tração, flexão ou torção, compressão, entre outros. Mas as características deste material o levam a colocar a resistência à compressão como sua principal propriedade mecânica, e quando comparada as outras se destaca por ser bem mais elevada. No entanto somente as propriedades do concreto armado, combinação entre o concreto e o aço, é que possibilita a superação da estrutura a incompatibilidades da aplicação destes materiais, o aço responde as solicitações onde o concreto é menos indicado, e o concreto responde as solicitações onde o aço é menos indicado.

Dentre as pesquisas realizadas ao Cimento Geopolimérico podemos constatar que a resistência à compressão dos CGP varia de acordo com:

- Natureza dos constituintes utilizados: Precursor (es); Agregados; Ativador;
- Aumenta com o grau de finura ou superfície específica do precursor geopolimérico, ou seja, para o mesmo precursor, quanto maior for a superfície específica, maior será a resistência;
- Aumenta com a redução da quantidade de fase líquida usada na mistura;
- No caso de ativadores compostos, a razão (silicato de sódio) / (hidróxido de sódio) também tem influência no resultado final: para uma maior razão, mais elevada a resistência.
- Varia com a temperatura de cura. Vários estudos apontam para que a temperatura de cura de 60-65 °C proporciona bons resultados;
- A variação da resistência mecânica com o tempo de cura, não segue o padrão habitual nos produtos de CPN. Trata-se de um processo de endurecimento mais rápido, ou mesmo muito rápido, que em regras estabiliza entre os 7 e os 10 dias (em condições de temperatura ambiente). No entanto, se a cura for feita a uma temperatura adequada, a reação geopolimérica poderá ficar praticamente completa em poucas horas.³⁴

³⁴ OSORIO, Paulo Dias Lopes. **Concepção de um saferoom anti-tornado em betão Geopolimérico**. 228p- Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, 2006, p.19.

De acordo com Freitas (2007, p.26) ³⁵, produtos formulados através de cimentos Geopoliméricos, apresentam resistências à compressão de até 20 MPa duas horas depois de aplicado. Aos 28 dias, chegam a ultrapassar 100 MPa, contudo uma das propriedades do cimento geopolimérico, por exemplo, é a possibilidade de trafegar automóveis pesados em menos de 4 horas.

Através do Quadro 1 abaixo, divulgado pela empresa de fabricação do Cimento Geopolimérico no Brasil, Geo-Pol, podemos analisar as propriedades mecânicas do Cimento Geopolimérico em diferentes horas e dias, para um concreto de fck 35 MPa.

Resistência à compressão (NBR 5739/07)	4 horas	11,60 MPa	25°C
		19,20 MPa	30°C
		28,30 MPa	35°C
	24 horas	32,20 MPa	
	3 dias	44,10 MPa	
	28 dias	> 50,20 MPa	
Resistência à tração na flexão (NBR 12142/91)	4 horas	3,92 MPa	
Resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222/94)	4 horas	1,19 MPa	
	14 dias	4,41 MPa	
Módulo de deformação (NBR 8522/03)	24 horas	11,31 GPa	
	28 dias	15,14 GPa	
Retração (ASTM C 157/C)	3 dias	-0,0110%	
	28 dias	-0,0200%	

Quadro 1- Propriedades do Cimento Geopolimérico.
Fonte: www.geopolymer.com.br.

³⁵ FREITAS, Sania Maria Belísio de Andrade. Cimentos de Base Alcalina e Cimentos Geopoliméricos. 2007. Disponível em: www.repositorium.com.br. Acessado em: 03/11/2014.

Segundo dados fornecidos pela Geo-pol (2008) ³⁶, a resistência a compressão dos cimentos geopolimérico podem variar de 30 a 100 MPa, em argamassa normal, de acordo com a composição da pasta, da temperatura e do tempo de cura, apresentando à compressão de 15 Mpa a 20° C e 22,5/24 Mpa a 23/25° C em 4 horas após a sua aplicação. O calor radiante acelera a pega e o endurecimento fazendo com que a uma temperatura de 65° C em 1 hora apresente 6,89 Mpa e em 4 horas 41,34 Mpa.

O CPV ARI é o cimento Portland de alta resistência inicial, citado na NBR 5733, e através de uma publicação da ABCP (2009) ³⁷ consta que os seus valores de resistência a compressão a 1 dia de idade é de 26 Mpa e de 53 MPa aos 28 dias, superando as suas expectativas que são valores normativos de 14 MPa, 24 Mpa, e 34 MPa para 1, 3, e 7 dias.

Para um fck esperado de 25 Mpa, podemos observar que o seu desempenho superou as expectativas. O desenvolvimento desta propriedade no Cimento Portland se dá pela utilização de calcário e argila na produção do clínquer, e pela espessura mais fina do cimento, assim ao reagir com a água o CP V ARI em uma maior velocidade adquire elevadas resistências.

Entre diversos estudos desenvolvidos sobre os ligantes geopolimérico, podemos constatar que os concretos obtidos apresentam resistência à compressão bastante elevada quando são comparados a concretos a base de cimento Portland.

³⁶ GEO-POL. **Cimento Geopolimérico**. Disponível em: www.geopol.com.br. Acessado em 06/04/2014;

³⁷ ABCP. **Guia Básico de utilização de Cimento Portland**. 28p- 7.ed. São Paulo, SP, 2002, p.9. Disponível em: www.abcp.org.br. Acessado em 02/05/2014;

3.2.1- Cura

A cura do concreto nada mais é do que o conjunto de medidas que devem ser tomadas para que seja evitada a evaporação da água de emassamento utilizada durante a produção do concreto.

Segundo Silva, et al (2011)³⁸ a cura é uma das principais etapas na execução do concreto e tem participação direta no desenvolvimento do processo de hidratação da pasta de cimento vedando o concreto, mantendo a água de amassamento no seu interior, evitando a retração e o transporte de substâncias que poderão interferir na hidratação.

O termo cura do concreto trata dos procedimentos destinados a promover a hidratação do cimento, controlando tempo, temperatura e umidade. A cura é iniciada no momento em que o concreto é lançado e adensado nas formas. O objetivo da cura é manter o concreto saturado ou mais próximo possível do saturado, até que os espaços da pasta fresca, inicialmente preenchidos com água tenham sido preenchidos com os produtos da hidratação do cimento até uma condição necessária.³⁹

As reações químicas de hidratação dos compostos das pastas de cimento são resultados da cura do concreto, estas reações são de fundamental importância para o ganho da resistência mecânica por parte do concreto e para a garantia da sua vida útil. Além disso, a manutenção da umidade do concreto por este método evita a formação de fissuras na superfície do material provocadas pelos efeitos de retração, o que ajuda a garantir a durabilidade da estrutura. Em condições de temperatura normais, alguns componentes do cimento Portland, se hidratam a partir do momento em que é adicionado água.

A cura do cimento Portland se dá pelo fator A/C (água/cimento), e isto pode ser analisado através da tabela abaixo.

³⁸ SILVA, Andressa Varela da Rocha. Et al. **Influência do processo de cura em concreto convencional em seis idades**. VII CONNEPI, 2012, p.1.

³⁹ GALVÃO, José Carlos Alves. **Estudos das propriedades dos concretos confeccionados com cimento CP V-ARI e CPII- F32, sob diferentes temperaturas de mistura e métodos de cura**. 96p- Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos, Universidade Federal do Paraná, PR, 2003, p.25.

Tipo de Cimento	Fator Água/Cimento			
	0,35	0,55	0,65	0,70
CP I e II-32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CP IV-32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CP III-32	2 dias	5 dias	7 dias	10 dias
CP I e II-40	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias
CP V-ARI	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias

Tabela 3- Tempo mínimo de cura do concreto conforme a relação a/c.
Fonte: www.blogdopetcivil.com.br, 2012.

No caso do Cimento Portland Comum, a cura deve ser no mínimo de 7 dias, pois é nesse período que o concreto começa a obter 60% da sua resistência final, no entanto quanto maior for o período de cura melhor será para o concreto.

Através de uma afirmação Pinto (2006)⁴⁰ diz que a cura do cimento geopolimérico e o ganho de resistência estão relacionados com o aumento da temperatura, que alcança facilmente resistências superiores a 40 MPa ao fim de 1 hora quando elevado a uma temperatura de 85° C.

Segundo dados da Geo-Pol (2008)⁴¹, em baixas temperaturas o tempo requerido para se contemplar à cura será mais longos nas primeiras 4 horas, chegando a variar para cada 5°C em +/- 10 Mpa.

E ainda de acordo com Pinto (2006)⁴², os resultados da cura evoluem, quer em compressão, quer em tração, através do aumento da temperatura de cura e o tempo em que é exposto a cura, e com isso é possível reduzir o tempo de cura dos geopolímeros a um prazo muito curto, obtendo-se níveis de resistência aparente mais elevados que os obtidos a uma temperatura ambiente.

⁴⁰⁻⁴² PINTO, Amândio Teixeira. **Sistemas Ligantes Obtidos por Ativação Alcalina do Metacaulino**. Disponível em: www.repositorium.uminho.br. Acessado em: 02/11/2014.

⁴¹ GEO-POL. **Cimento Geopolimérico**. Disponível em: www.geopol.com.br. Acessado em 06/04/2014;

A cura do concreto é uma etapa muito importante, e se não for realizada corretamente pode acarretar em danos futuros da estrutura, pois não são alcançadas a resistência e a durabilidade desejada. Ao contrário que muitos pensam uma boa cura não consiste em apenas deixar o concreto secar ao tempo, mas sim manter um teor de umidade que satisfaça o processo, evitando que ocorra a evaporação de água da mistura, e permitindo a hidratação dos aglomerantes para que ocorra o desenvolvimento de todas as propriedades esperadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como um dos produtos mais utilizados no mundo, e de valor relativamente “barato” o cimento é insubstituível em obras civis e está presente em todos os tipos de construção, pois tem a capacidade de unir firmemente diversos tipos de materiais, permitindo fazer edificações resistentes e duráveis.

A indústria cimenteira é uma das maiores poluentes de gás carbônico em todo o planeta, além disso, o cimento vem apresentando grandes deficiências em termos de resistências e durabilidade. Sendo assim materiais que apresentem menos poluentes e uma maior resistência pode ser uma alternativa para estes problemas.

Através deste trabalho podemos concluir que os cimentos Geopoliméricos constituem-se como um produto inovador, com capacidades para ser um material alternativo ao cimento Portland, quer em termos ambientais quanto de resistências à compressão, que é a maior propriedade de resistência mecânica que um concreto pode assumir.

Atualmente a indústria de cimento é responsável por cerca de 3% das emissões mundiais de gases de efeito estufa e aproximadamente 5% de emissão de CO₂. O cimento Portland emite +/- 01 tonelada de CO₂ a cada 01 tonelada de clínquer produzido, sem contar a energia consumida para o processo da clinquerização. O cimento Geopolimérico reduz o consumo de energia já que em seu processo de fabricação não existe a etapa de clinquerização e emitem 80 a 90% menos CO₂ do que os CP. Os ligantes geopoliméricos em si não emitem CO₂, mais sim a obtenção de matérias primas como o silicato de sódio, que apresentam valores de maior significância. No entanto o silicato de sódio pode ser substituído pela escória de alto forno, matéria prima produzida pelas indústrias de fabricação de ferro, e que produzem uma quantidade bem acima do que são aproveitados, reduzindo assim os impactos ambientais dos CG.

As agressões ao meio ambiente não são feitas somente pela emissão de CO₂, mais também pela extração de matérias primas, onde o cimento Geopolimérico mais uma vez se destaca, pois sua composição é de materiais totalmente renováveis e presentes em 75% da crosta terrestre, ao contrário do cimento Portland que é produzido através de calcário e argila extraídos de rochas de carbonato.

Comparando os dois tipos de Cimentos, obtivemos que o Cimento Geopolimérico apresenta uma resistência indiscutivelmente maior do que o cimento Portland, inclusive quando em seu tempo de cura são elevados a uma alta temperatura, podendo ultrapassar 100 MPa após os 28 dias. O cimento Portland comparado foi o CPV ARI, cimento de alta resistência inicial, que através das pesquisas demonstrou uma resistência de 26 MPa a 01 dia e 53 MPa aos 28 dias.

Atualmente a maior desvantagem dos concretos à base de ligantes obtidos por álcali-ativação, esta no fato de apresentarem um custo bem superior ao Cimento Portland e pelo fato de ainda não serem conhecidos mundialmente, fazendo com que suas técnicas e fabricação sejam limitadas. Mas, contudo os elevados níveis de emissão de CO₂, gerados na produção do cimento e o fato de as elevadas emissões de carbono gerar penalizações para as empresas e países, farão em médio prazo com que este material venha a englobar também o custo ambiental, reduzindo assim consideravelmente a competitividade de custos entre o cimento Portland e o Cimento Geopolimérico.

Diante da análise realizada, concluímos que os cimentos Geopoliméricos podem ser uma alternativa sustentável e de alta resistência à compressão quando comparados ao cimento Portland. Sendo considerada uma alternativa inovadora para obtenção de concretos de alto desempenho e não agressivos ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARTIGOS:

ABCP. **Guia Básico de utilização de Cimento Portland**. 28p- 7.ed. São Paulo, SP, 2002, Editora ABCP. www.abcp.org.br. Acessado em 02/05/2014;

BATTAGIN, Arnaldo Forti. ABCP. **Uma breve história do Cimento Portland**. 1p. São Paulo, SP, 2009. Disponível em: www.abcp.org.br. Acessado em 31/10/2014;

BIGNO, I.C, et all. **Calor de Hidratação de Cimentos Geopoliméricos**. 12p- Programa de Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia- IME, Urca, RJ, 2005.

BORGES, Paulo Henrique Ribeiro. Et al. **Estudo Comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II)**. Ambiente Construído, revista on-line. Disponível em: www.seer.ufrgs.br. Acessado em: 20/09/2014.

D'AGUIAR, Savana Cristina Medeiros. **Proposta de estudo sobre composição de cimento geopolimérico utilizando resíduos sólidos**. 57p- Monografia (Bacharelado em Ciência e Tecnologia). Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, 2012.

DIAS, Aline de Azevedo. **Estudo da degradação de argamassa geopolimérica por ácido acético e sulfúrico**. 99p- Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, RJ, 2008.

FREITAS, Sania Maria Belísio de Andrade. **Cimentos de Base Alcalina e Cimentos Geopoliméricos**. 2007. Disponível em: www.repositorium.com.br. Acessado em: 03/11/2014.

GALVÃO, José Carlos Alves. **Estudos das propriedades dos concretos confeccionados com cimento CP V- ARI e CII- F32, sob diferentes temperaturas de mistura e métodos de cura.** 96p- Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos, Universidade Federal do Paraná, PR, 2003.

MAURY, Maria Beatriz, et all. **Produção de cimento: Impactos á saúde e ao meio ambiente.** 95p- Sustentabilidade em debate, Brasília, 2012.

OSORIO, Paulo Dias Lopes. **Concepção de um saferoom anti-tornado em betão Geopolimérico.** 228p- Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, 2006.

PAIVA, Maria das Dores Macedo. **Otimização e análise mecânica de pastas geopoliméricas para uso em poços sujeitos à injeção cíclica de vapor.** 89p- Tese de doutorado Universidade Federeral do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

PINTO, Amândio Teixeira. **Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina do Metacaulino.** Disponível em: www.repositorium.uminho.br. Acessado em: 02/11/2014.

SÁNCHEZ, Miguel Genaro Peralta. **Caracterização mineralógica e tecnológica dos lutitos diatomáceos da península de Santa Elena, Equador.** 111p- Dissertação de Mestrado em Ciências Naturais, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 2008.

SANTA, Rozineide Aparecida Antunes Boca. **Desenvolvimento de Geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel.** 135p- Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 2012.

SCHLOTTFELDT, Daniel Donida. **Os riscos associados ao uso do cimento na Construção Civil.** P-2. Disponível em: www.segurancanotrabalho.eng.br. Acessado em 06/05/2014;

SILVA, Andressa Varela da Rocha. Et al. **Influência do processo de cura em concreto convencional em seis idades**. VII CONNEPI, 2012.

SKAF, Tatiana Borges. **Influência de Matérias-primas na microestrutura e resistência de compósitos geopoliméricos**. 120p- Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia-IME, RJ, 2008.

SITES:

ABCP. **Básico sobre cimento**. Disponível em: www.abcp.org.br. Acessado em 10/05/2014;

C.ITAMBÉ. **Origem do Cimento**. Disponível em: www.cimentoitambe.com.br. Acessado em: 05/04/2014;

E- CIVIL. **O cimento Portland**. Disponível em: www.ecivilnet.com/artigos. Acessado em: 05/04/2014;

FAPESP. **Geopolímeros obtidos a partir de caulins e metacaulins**. Disponível em: www.bv.fapesp.br. Acessado em: 01/05/2014;

GEO-POL. **Cimento Geopolimérico**. Disponível em: www.geopol.com.br. Acessado em 06/04/2014;

Portal do concreto. **Cimento Portland**. P-1. Disponível em: www.portaldoconcreto.com.br. Acessado em: 30/10/2014;

SEPÚVEDA, Jacinto. **Geopolímeros**. Disponível em: www.engenhariacivil.wordpress.com. Acessado em 01/05/2014;

TORGAL, F. Pacheco. **Ligantes geopoliméricos**. Disponível em: www.repositorium.sdum.uminho.pt. Acessado em: 06/04/2014;