

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ALESSANDRA EMY SAKURAMOTO FUZIOKA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE CIMENTO ÁLCALI ATIVADO A
PARTIR DE RESÍDUOS CERÂMICOS**

GUARAPUAVA

2021

ALESSANDRA EMY SAKURAMOTO FUZIOKA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE CIMENTO ÁLCALI ATIVADO A
PARTIR DE RESÍDUOS CERÂMICOS**

**FEASIBILITY STUDY OF THE PRODUCTION OF ALKALI CEMENT ACTIVATED
FROM CERAMIC WASTE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil, da Coordenação de
Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal
do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Me. Dyorgge Alves Silva
Coorientadora: Prof. Me. Andreza Frare.

GUARAPUAVA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ALESSANDRA EMY SAKURAMOTO FUZIOKA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE CIMENTO ÁLCALI ATIVADO A
PARTIR DE RESÍDUOS CERÂMICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil, da Coordenação de
Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal
do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 02 de dezembro de 2021

Dyorgge Alves Silva
Mestre em Estruturas e Construção Civil
Universidade Tecnológica Federal Do Paraná

Andreza Frare
Mestra em Engenharia Civil
Centro Universitário Campo Real

Géssica Katalyne Bilcati
Mestra em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal Do Paraná

Priscila Ongaratto Trentin
Mestra em Materiais e Componentes de Construção
Centro Universitário Mater Dei

GUARAPUAVA

2021

Dedico este trabalho aos meus pais, Leila e Paulo,
que sempre foram meu alicerce e porto seguro.

AGRADECIMENTOS

Com certeza, essa não é uma conquista somente pessoal, e sim, uma consequência de tudo que vivi e recebi até aqui. Este é o resultado material de muito esforço, mas também de muita luta e apoio recebido durante minha trajetória. Apoio este que devo a tantas pessoas, mas que serão representadas em algumas a seguir.

Primeiramente, quero agradecer a Deus por me permitir viver e concluir esse processo e tantos outros que me trouxeram até aqui. Sem Ele, eu nada seria.

Também quero agradecer a minha mãe, Leila Rumi, e ao meu pai, Paulo Noboru, por serem minha base e fortaleza, por terem me apoiado todos esses anos, entendendo minha ausência e se fazendo presentes de alguma forma. Por todo amor, suporte e sacrifício, sempre sem medir esforços por mim. Sem eles, eu nada seria.

Agradeço ao meu avô, Tokio Fuzioka, por sempre acreditar em mim e me incentivar, mesmo que isso significasse nossa distância. Por todo amor e apoio que nunca me faltaram. Sem ele, eu nada seria.

Agradeço a minha família, em especial, meus primos Lucas, Gislaine, Mathias e Manuela por serem minha família guarapuavana e sempre me fazerem sentir em casa. Também, as minhas primas e irmãs Carolinne, Jacqueline e Katherine por sempre estarem comigo, independente da distância. Sem eles, eu nada seria.

Agradeço a minha professora coorientadora Andreza Frare, por todo tempo, atenção, paciência e dedicação para comigo. Por me apoiar, confiar no meu potencial e me guiar da melhor forma. Também ao meu orientador Dyorgge Alves, por acreditar em mim e me incentivar a ir atrás dos meus sonhos. Sem eles, meu TCC nada seria.

Agradeço à técnica de laboratório de materiais de engenharia mecânica, Adriana e Silva da Costa, por toda atenção, cuidado e suporte dado para realização dos ensaios que precisei. Também aos campi de Guarapuava e Pato Branco da UTFPR pelo fornecimento de equipamentos. Sem eles, meus ensaios nada seriam.

Agradeço ao meu melhor amigo e parceiro Thiago Castro, por aguentar meus surtos, choros e desânimos durante esse período. Por me reerguer quando precisei, ser minha companhia nos tempos difíceis e felizes e por me incentivar todos os dias a ser alguém melhor. Também aos meus filhinhos de quatro patas, Penny e Veggie, por encherem nossa casa de amor. Sem eles, minha sanidade mental nada seria.

Agradeço a minha amiga e irmã de alma, Maria Fernanda, por ser presente todos os dias, mesmo fisicamente longe. Sem ela, minha sanidade mental nada seria.

Agradeço ao meu chefe e agora amigo, Fabiano Silva, por todo apoio prestado durante esses anos, por confiar em mim e me dar tantas oportunidades. Também a minha amiga e parceira de estágio, Gabriela Furtado, por me aguentar todos os dias e mesmo assim, nunca desistir de mim. Por sempre me incentivar, apoiar, ensinar e deixar os dias cansativos, mais felizes. Sem eles, meu estágio nada seria.

Agradeço aos meus (melhores) amigos de turma Márcio Filho, Maria Victória, Pedro Ferrer e Vanessa Gomes por estarem comigo desde o primeiro ao último dia da minha caminhada universitária e mais além. Sem eles, meu diploma nada seria.

Agradeço aos amigos que colecionei durante o percurso, que fizeram tudo ser mais leve e feliz: Jean Mazur, Victória Assumpção, Nathália Sakata, Jéssica Luza, Luana Tiemi, Guilherme Bonifácio, Giovanna Ramos, Ana Sfeir, os Toppers, entre tantos outros que guardo com carinho. Sem eles, Guarapuava nada seria.

Agradeço aos grupos acadêmicos que fiz parte, bem como os novos amigos que ganhei dentro deles, e que foram tão importantes para o meu desenvolvimento: Atlético (Lobo), Empresa Júnior (Brick), Comissão de Animais e DCE. Sem eles, minhas experiências extracurriculares, nada seriam.

Agradeço a Leda Alencar, por todo carinho cultivado durante os anos e por ter me auxiliado com excelência no dom que tem. Sem ela, meu Abstract nada seria.

Agradeço também aos professores que me ensinaram tanto durante esses anos, seja dentro ou fora de sala de aula. Em especial, a Géssica Bilcati por ter sido a primeira professora a me ver com olhar mais empático e acreditado no meu potencial quando mais pensei em desistir. Ao Carlos Francisco Pecapedra, por ter me ajudado e apoiado quando eu era apenas mais uma aluna chorando pelos corredores da Universidade. A Mariane Kempka, por ter corrigido com tanto cuidado a criação desta monografia e sendo sempre solícita. Sem eles, minha graduação nada seria.

Poder encerrar esse ciclo diante do atual cenário pandêmico no qual nos encontramos, é também um privilégio. Privilégio este, que mais de 600 mil brasileiros não poderão presenciar. Portanto e por fim, mas não menos importante, essa vitória também será dedicada especialmente às vítimas da Covid-19. Que eu possa honrá-los, dando continuidade aos meus estudos e incentivando a busca pelo conhecimento: esta será a minha forma de dizer que a luta de vocês jamais será esquecida.

“Every now and then, a man’s mind is stretched by
a new idea or sensation, and never shrinks back
to its former dimensions.”
(HOLMES, 1858).

RESUMO

A construção civil é um dos maiores causadores de impactos ambientais devido aos altos níveis de liberação de gases nocivos para a atmosfera, as suas descontroladas extrações de matérias primas não renováveis do meio ambiente e ao descarte de resíduos de forma incorreta. Um dos grandes responsáveis por esses impactos é o cimento Portland, pois elimina uma grande demanda de gás carbônico na produção do clínquer e cuja problemática, alinhada com o desperdício de argila pela quebra no transporte e cozimento do material, resultou na motivação deste trabalho. Assim, foi verificada a viabilidade dos cimentos álcali ativados com adição de resíduos cerâmicos como alternativa de menor impacto ambiental, que além de substituir a argila pura por resíduos que seriam, inicialmente, descartados sem uma destinação correta, é um material que não necessita de calcinação. Dessa forma, foram analisadas amostras com percentuais distintos de ativador (2%, 5% e 8%), comparados também em idades diferentes (7, 14 e 28 dias) por meio de análises microestruturais (DRX e MEV) e de resistência à compressão. Devido aos baixos valores de resistência mecânica obtidos, pôde-se concluir que o resíduo cerâmico utilizado nessa pesquisa e sob as condições de moagem empregadas, não foi possível obter o cimento álcali ativado. Entretanto, é possível notar um aumento proporcional com o aumento da dosagem de ativador, ainda que sem uma análise estatística mais precisa das amostras, associada também ao aparecimento da calcita em detrimento ao teor de quartzo, que por sua vez reagiu com o óxido de cálcio presente no cimento.

Palavras-chave: cimento Portland; cerâmica vermelha; construção civil; sustentabilidade.

ABSTRACT

Civil Construction is one of the biggest environment impact causer due to the high levels of noxious gases released into the atmosphere, the uncontrolled extractions of non-renewable raw materials from the environment, and the waste disposed incorrectly. One of the greatest products responsible for these impacts is Portland cement because it eliminates a considerable demand on carbon dioxide during the production of clinker, which is problematic, along with the waste of clay caused by its break during transportation as well as the cookery of the material which motivated this work where the viability of the alkali-activated cements added with ceramic residues was seen as a less environmental impact alternative not only to replace pure clay by residues which, initially, would be disposed without a correct destination, but also it does not require calcination. Therefore, samples with distinctive activating percentages (2%, 5% and 8%) were analyzed, compared to different ages (7, 14 and 28 days) through microstructural analysis (XRD and SEM), and compression resistance. Although the research was unsuccessful to get an alkali-activated cement, it was possible to conclude that the mechanical resistance of the material increased proportionally with the activating dosage even not satisfactory and without a more accurate statistical analysis, it was associated to the appearance at the expense of quartz content which in turn reacted with the calcium oxide present in the cement.

Keywords: Portland cement; red ceramic; civil construction; sustainability.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tipos de cimento Portland no Brasil.....	22
Tabela 2- Forças de compressão das escórias em MPa	33
Tabela 3- Diversos cimentos álcali ativados e seus ativadores.....	34
Tabela 4 - Dados do Setor Cerâmico no Brasil	35
Tabela 5- Classificação dos principais segmentos do setor cerâmico no Brasil quanto ao valor de produção.....	36
Tabela 6- FRX de resíduos com telha cerâmica vermelha.....	40
Tabela 7- Resultados dos ensaios de compressão de Sales e Alferes Filho	41
Tabela 8- Projeção dos resultados da pesquisa para o cenário do Estado de Pernambuco.....	45
Tabela 9 - Caracterização física do resíduo cerâmico	49
Tabela 10 - Composição química por FRX de pó cerâmico	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Curvas de evolução de calor de hidratação e calor total liberados pela pasta de CP	25
Figura 2- Influência do teor de Al_2O_3 da cinética de hidratação da escória com NaOH (a) em idades precoces (b) até 5 dias, usando WG, (c) em idades precoces e (d) até 5 dias.....	28
Figura 3- Padrão DRX das escórias anidras A7 e A17 em comparação com o DRX das escórias ativadas com NaOH e WG aos 180 dias.....	29
Figura 4 Análises termogravimétricas realizadas aos 28 dias (TG e DTG) de sistemas álcali ativados com ambas escórias: (a) Escória HA (12% de Al_2O_3) e (b) Escória LA (7% de Al_2O_3).....	30
Figura 5- Influência dos tipos de componentes alcalinos nas taxas de expansão do RAA em argamassas de cimento álcali ativado a 180 dias.....	32
Figura 6 - Localização da produção de alguns segmentos do Setor Cerâmico no Brasil	37
Figura 7 - Produção nacional de cerâmica vermelha por região brasileira.....	39
Figura 8 - Evolução da emissão de CO_2 em toneladas por tonelada de cimento por fonte de emissão	44
Figura 9 - Diagrama dos métodos de pesquisa.....	46
Figura 10 - Representação gráfica do ensaio de DRX do resíduo cerâmico.....	50
Figura 11 - Difração de raios-x de escórias ácidas	51
Figura 12 - Análise MEV das amostras com 2% de ativador (a) ampliação de 120x, (b) ampliação de 500x	58
Figura 13 - Análise MEV das amostras com 5% de ativador (a) ampliação de 120x, (b) ampliação de 500x	58
Figura 14 - Análise MEV das amostras com 8% de ativador (a) ampliação de 120x, (b) ampliação de 500x e (c) ampliação de 800x	59
Figura 15 - Difratogramas dos ensaios de DRX do cimento.....	60

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 - Adições do cimento Portland.....	26
Quadro 2 - Diversos cimentos álcali ativados e seus processos de cura.....	31
Gráfico 1 - Resultados do ensaio de resistência à compressão das amostras	56

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Amostra do resíduo cerâmico moído	47
Fotografia 2 - Moinho de bolas.....	48
Fotografia 3 - Pasta de cimento adensada em molde	52
Fotografia 4 - Aparelho EMIC DL30000	53
Fotografia 5 - Resíduos de cimento pós secagem em estufa.....	54
Fotografia 6 - Corpos de prova, pós ensaio de compressão, com (a) 5% de ativador e (b) 8% de ativador	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/C	Relação água e cimento
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
ARI	Alta Resistência Inicial
BC	Baixo Calor
C-A-H	Cálcio aluminato hidratado
CaCO ₃	Calcita
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CAT	Cimento Álcali Ativado
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CO ₂	Gás carbônico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Cimento Portland
CPB	Cimento Portland Branco
DRX	Difrações Por Raio-X
GEE	Gás do Efeito Estufa
IS	Indian Standard
KOH	Hidróxido de potássio
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MgO	Óxido de magnésio
MME	Ministério das Minas e Energia
MPa	Mega Pascal
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sódio
Na ₂ SO ₄	Sulfato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NBR	Normas Brasileiras
PIB	Produto Interno Bruto
RAA	Reação álcali-agregado

RCC	Resíduos de Construção Civil
RCV	Resíduo de Cerâmica Vermelha
RS	Resistente a Sulfato
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SEEG	Sistema De Estimativa De Emissões De Gases De Efeito Estufa
SNIC	Sindicato Nacional da Indústrias do Cimento
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
WG	<i>Waterglass</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo principal	20
2.2 Objetivos secundários	20
3 CIMENTO	21
3.1 CIMENTO PORTLAND	21
3.2 CIMENTO ÁLCALI ATIVADO	26
3.2.1 Cinética de hidratação	28
3.2.2 Microestrutura e desenvolvimento da resistência mecânica	29
3.2.3 Durabilidade.....	30
3.2.4 Ativadores	32
4 RESÍDUO CERÂMICO	35
4.1 Atividades pozolânicas	37
4.2 Cerâmica vermelha	38
5 IMPACTOS AMBIENTAIS	43
6 MATERIAIS E MÉTODOS	46
6.1 Resíduos de cerâmica vermelha	47
6.1.1 Preparação do resíduo moído.....	47
6.1.2 Caracterização do resíduo de cerâmica vermelha	48
6.1.3 Fluorescência de raios-x (FRX)	49
6.1.4 Difração por raios-x (DRX) do resíduo cerâmico	50
6.2 Ativador	51
6.3 Preparo das pastas	52
6.3.1 Definição dos teores de ativador.....	52
6.3.2 Definição do traço água-cimento	52
6.3.3 Cura do cimento.....	53
6.3.4 Resistência à compressão do cimento	53

6.3.5 Interrupção da hidratação do cimento.....	54
6.3.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	54
6.3.7 Difração por raios-x (DRX) do cimento	55
7 RESULTADOS	56
7.1 Resistência à compressão	56
7.2 Análise microestrutural.....	57
7.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	57
7.2.2 Difração por raios-x (DRX) do cimento	59
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos grandes setores responsáveis pelos movimentos econômicos e sociais do Brasil e do mundo, desde a geração de empregos até a comercialização de imóveis. De acordo com o Banco de Dados da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2019), a construção civil representa 22% do PIB da indústria nacional e abrange quase sete milhões de pessoas no mercado de trabalho. Em contrapartida, os impactos negativos da indústria cimenteira podem ser evidenciados desde a etapa de extração e mineração das matérias primas, pois envolvem retiradas das matas e animais nativos, prejuízo da qualidade ambiental local, poluição e até incômodo à população vizinha (LARUCCIA, 2014).

Segundo John (2000), o setor da construção civil é o maior consumidor de recursos naturais. Isso ocasiona muitos impactos ambientais, com destaque para o alto consumo de energia para extração de matérias-primas e os elevados níveis de emissão de gás carbônico na produção, correspondente a cerca de 7% de todo CO₂ produzido e emitido pelo homem, de acordo com o Sindicato Nacional Da Indústrias Do Cimento (SNIC, 2019). Lima, Fernandes e Dantas (2018) apontam que desses 7%, 90% ocorrem na produção do clínquer¹ e Caldas (2016) ainda complementa que, como subproduto, tem-se os resíduos de construção civil (RCC), que, quando mal geridos, poluem o solo e a água.

A partir das necessidades de diminuir os impactos supracitados, pesquisadores como Ben Haha *et al.* (2012) e Juenger *et al.* (2011), têm encontrado no cimento álcali ativado (CAT) uma alternativa, já que é produzido a partir de escórias de alto forno, diferentes materiais pozolânicos, cinzas volantes ou metacaulim (PROVIS, PALOMO, SHI, 2015). Assim, de acordo com a Associação Brasileira De Cimento Portland (ABCP, 2014), com a reutilização de materiais, diminui-se o consumo energético, as emissões de CO₂ e, também, recicla-se um material que poderia tornar-se resíduo de descarte na natureza.

Esse trabalho propõe a utilização do resíduo de cerâmica vermelha (RCV) em substituição ao cimento Portland (CP) na produção de cimentos álcali ativados. Esta cerâmica possui propriedades similares à argila calcinada, uma das adições minerais

¹ O cimento Portland é feito, basicamente, de calcário e argila triturados e, quando aquecidos formam o clínquer (*World Business Council for Sustainable Development*, 2009).

mais comuns no mercado brasileiro (GARCIA et al., 2014), além da grande disponibilidade do material já em uso pela indústria de cerâmica nacional (MACEDO et al., 2008), sendo o Sul uma das regiões que mais se destacam na área, de acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM, 2020a).

Assim, com a substituição, uma grande parte dos resíduos de cerâmica vermelha deixará de ir para aterros de RCC, conferindo maior sustentabilidade do produto final, além de diminuir os gastos energéticos e de recursos naturais não renováveis (GARCIA et al., 2014).

Dessa forma, este trabalho visa incorporar resíduos advindos de olarias (cerâmica vermelha), como fonte alternativa de material pozolânico, em cimentos álcali ativados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é analisar a viabilidade técnica de um cimento de baixo impacto ambiental utilizando resíduos de cerâmica vermelha.

2.2 Objetivos secundários

- Verificar a porcentagem ideal de resíduo de cerâmica vermelha para o desenvolvimento do cimento álcali ativado;
- Verificar a porcentagem ideal de ativador alcalino para o desenvolvimento de cimento álcali ativado;
- Analisar as propriedades mecânicas e microestruturais do CAT produzido a partir de resíduo de cerâmica vermelha.

3 CIMENTO

Define-se cimento como sendo um pó fino com propriedades ligantes que endurece sob ação da água e que não se decompõe mais, uma vez que já tenha endurecido. Alguns exemplos conhecidos desse material são o cimento Portland e suas variações, o supersulfatado e o álcali ativado, sendo o mais utilizado no Brasil e no mundo, o Portland (ABCP, 2018).

3.1 Cimento Portland

Segundo a Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT, 2018) na NBR 16697/2018, o cimento Portland é um ligante hidráulico resultante da mistura da moagem do clínquer Portland com adições de sulfato de cálcio e outros aditivos minerais.

Joseph Aspdin, construtor inglês, foi o responsável pela descoberta do CP em 1824 e pela sua posterior patente, após queimar argila e pedras calcárias até virarem pó e notar a obtenção de uma mistura com dureza semelhante às pedras usadas nas construções e que não se dissolvia em água. Assim, o cimento recebeu esse nome pois possuía algumas propriedades parecidas com às rochas da ilha de Portland, na Inglaterra (ABCP, 2002).

Como o concreto de CP é o material mais importante da área (HELENE e ANDRADE, 2010), sua alta demanda fez com que o Cimento Portland conhecido hoje fosse muito diferente do descoberto inicialmente por Joseph, resultado de pesquisas técnicas mais aprofundadas feitas a partir deste (LIMA, 2011). Além disso, cimenteiras, pesquisadores e demais interessados, buscam constantemente novas alternativas sustentáveis para sua produção, para que haja o prolongamento da vida útil das jazidas de matérias primas utilizadas na sua fabricação e resultados mais econômicos (CABRAL e AZEVEDO, 2016).

Segundo ABCP (2002), o mercado brasileiro dispõe de 8 tipos diferentes de CP que variam de acordo com suas propriedades específicas. São eles: Cimento Portland Comum (CP I e CP I-S); Cimento Portland Composto (CP II –E, CP II-Z e CP II-F), cujas adições pozolânicas são um pouco maiores que as primeiras; Cimento

Portland de Alto-Forno (CP III); Cimento Portland Pozolânico (CP IV); Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI); Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS); Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC) e Cimento Portland Branco (CPB).

Os tipos de Cimento Portland disponíveis no Brasil estão apresentados na Tabela 1, onde a sigla RS significa “resistente a sulfato” e BC, “baixo calor de hidratação”.

Tabela 1- Tipos de cimento Portland no Brasil

Designação normalizada (tipo)		Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento comum	Portland	Sem adição	CP I		
		Com adição	CP I-S		
Cimento composto	Portland	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
		Com material carbonático	CP II-F	25, 32 ou 40 ^c	
		Com material pozolânico	CP II-Z		Rs ^a ou BC ^b
Cimento Portland de alto-forno			CP III		
Cimento Portland pozolânico			CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial			CP V	ARI ^d	
Cimento branco	Portland	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 ^c	
		Não estrutural	CPB	-	-

Fonte: Adaptado da NBR 16697/2018

A cada tonelada de cimento, utiliza-se cerca de 1,4 toneladas de calcário, 100 a 300 kg de argila e de 30 a 40kg de gipsita, de acordo com o Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos do (MME, 2019), sendo a maioria proveniente do clínquer, seu componente principal, responsável por cerca de 97% do CP comum, junto de 3% de gesso (PAULA, 2009).

O clínquer pode ser produzido por via úmida ou seca, sendo este o único produzido no Brasil atualmente (SNIC, 2019). Ele é produzido basicamente a partir da mistura, cru ou farinha, de constituintes extraídos geralmente de pedreiras de calcário: 80% de carbonato de cálcio (CaCO₃), 15% de dióxido de silício (SiO₂) e 3% de trióxido de alumínio (Al₂O₃), além de outros elementos em menores quantidades, todos em forno rotativo (PAULA, 2009).

De maneira geral, a (ABNT, 2018) na NBR 16697/2018, define o clínquer Portland como um produto intermediário da produção de CP, formado principalmente

por silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas e pela queima de calcários e argilosos moídos e dosados a altas temperaturas.

Para produzir o clínquer, o cru precisa ser aquecido a temperaturas elevadas dentro do forno, passando pelas etapas de secagem, aquecimento, calcinação, clínquerização e por fim, resfriamento (SILVA, 1994).

Depois que as principais matérias primas são misturadas e moídas, são aquecidas até que a água e demais materiais voláteis sejam evaporados, seguidos da calcinação, onde há a descarbonatação do material calcário. Essas matérias primas, então, após submetidas a temperaturas mais elevadas (entre 850°C a 1450°C), formam os quatro componentes básicos do clínquer (PAULA, 2009):

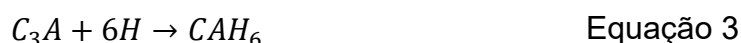
- Silicato dicálcico (2CaOSiO_2), cuja abreviação é C_2S : belita;
- Silicato tricálcico (3CaOSiO_2), cuja abreviação é C_3S : alita;
- Aluminato tricálcico ($3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$), cuja abreviação é C_3A ;
- Ferro Aluminato tetracálcico ($4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$), cuja abreviação é C_4AF .

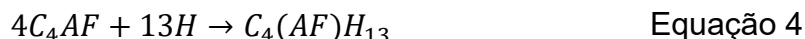
Como visto, formam-se silicatos e aluminatos na etapa denominada clínquerização. Ambos minerais são, então, hidratados e sofrem diferentes reações. As dos silicatos podem ser observadas nas Equações 1 e 2 (NEVILLE *et al.*, 2013):



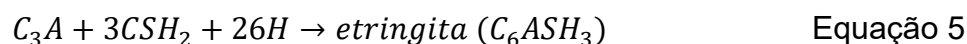
Esse processo libera, além do C_3S nas idades iniciais e C_2S nas mais avançadas, o C-S-H (silicato de cálcio hidratado), que confere resistência mecânica ao material (NEVILLE *et al.*, 2013).

Ainda segundo a autora, os aluminatos são os minerais que reagem primeiro, mas que conferem baixos teores de resistência ao cimento. Suas reações de hidratação podem ser observadas nas Equações 3 e 4:





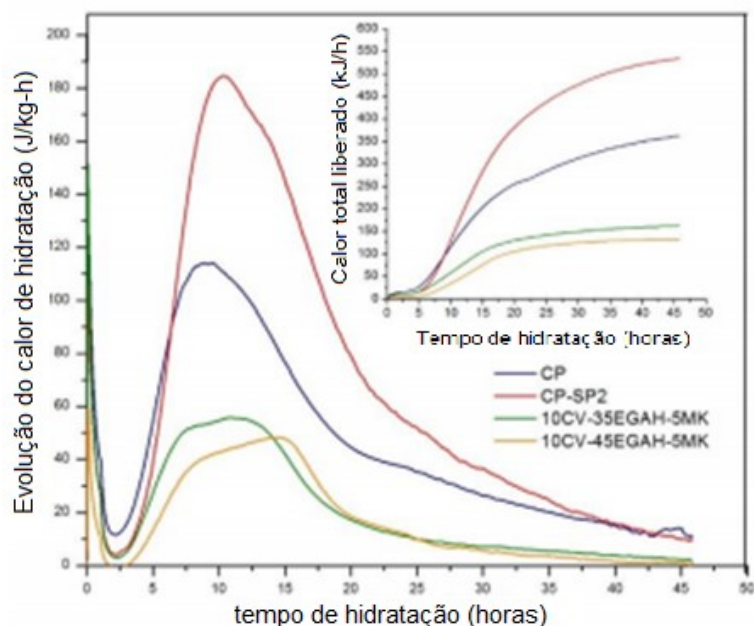
Então, adiciona-se os sulfatos de cálcio como gipsita para que haja o controle das reações e da pega, ou seja, para que o clínquer não endureça no instante em que entra em contato com a água (SEFFF, FOLGUERAS, HOTZA, 2005). Suas representações podem ser analisadas nas Equações 5 e 6 (FRARE, 2016):



Depois do período de pega, a pasta começa a endurecer a temperatura ambiente devido, principalmente, aos silicatos de cálcio hidratados formados (SEFFF, FOLGUERAS, HOTZA, 2005). Ainda segundo os autores, a hidratação do cimento Portland se dá a relação água/cimento (*a/c*), presença de aditivos, sua porosidade capilar e o teor de água empregado.

Na Figura 1, é possível observar o primeiro pico logo no início, dada pela alta evolução de calor da taxa de dissolução do clínquer e do sulfato de cálcio, que vai sendo controlada enquanto o cimento é hidratado, devido a taxa de difusão da água e íons dissolvidos, de nucleação e desenvolvimento dos cristais do hidrato formado (HEWLETT, 2004). Já o segundo pico, que ocorre após 8 horas, representa a segunda fase de evolução de calor em que suas reações proporcionam a formação de etringita e tobermorita (silicato de cálcio hidratado), além de ocuparem os espaços vazios deixados pela água no material (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Figura 1- Curvas de evolução de calor de hidratação e calor total liberados pela pasta de CP



Fonte: Adaptado de Gómez-Zamorano, García-Guillén, Acevedo-Dávila (2015)

Conforme já abordado, os principais componentes ativos do cimento são os silicatos de cálcio. A partir dessa base, ao se utilizar adições no cimento, obtém-se novos tipos de material, com diferentes características. Por exemplo, acrescentar escória de alto-forno resulta em Cimento Alto-Forno, assim como adicionar carvão ou argila calcinada resulta no tipo Pozolânico (SILVA, 1994).

Segundo a ABCP (2002), são consideradas adições, as matérias primas que formam diferentes tipos de Cimento Portland ao serem misturadas ao clínquer na moagem. São elas: as escórias de alto forno, o gesso, materiais pozolânicos e os carbonáticos. No Quadro 1, é possível observá-las com suas respectivas descrições, onde conclui-se que, de todas, o gesso é o único que deve sempre ser misturado ao cimento, enquanto as demais são substituintes compatíveis do clínquer e com mais qualidade em alguma característica.

Quadro 1 - Adições do cimento Portland

Adições	Descrição
Gesso	Responsável por controlar o tempo de pega para que o cimento não endureça em contato imediato com a água. É adicionado em pequenas quantidades, em geral, 3% em massa.
Escórias de alto-forno	Resíduos da produção de ferro-gusa com resistentes propriedades de ligantes hidráulicos e características aglomerantes semelhantes ao clínquer. São adicionados à moagem do clínquer com gesso e resultam em cimentos com maior durabilidade e resistência final.
Materiais pozolânicos	Podem ser rochas vulcânicas, matérias orgânicas fossilizadas, algumas argilas queimadas entre 500°C e 900°C, derivados da queima do carvão de usinas termelétricas e outros. Moídos finamente, possuem propriedades aglomerantes semelhantes às escórias de alto-forno, mas somente em presença de água e outro material, como o clínquer, devido a liberação de hidróxido de cálcio que reage com a pozolana.
Materiais carbonáticos	São rochas moídas que possuem carbonato de cálcio em sua composição. Auxiliam na trabalhabilidade dos concretos e argamassas e funcionam como lubrificantes. São chamados de filler calcário quando presentes no concreto.

Fonte: Adaptado de ABCP, (2002)

A produção de Cimento Portland implica na calcinação do calcário ou dolomito, os quais liberam grandes quantidades de CO₂ (JOHN, 2000). Como visto anteriormente, o clínquer é o maior responsável por essas emissões e por isso a importância de sua substituição parcial ou não, por outras adições. Em 1996, sua substituição por cinzas volantes e escória reduziu o consumo de combustível em 28% na indústria cimenteira nacional (YAMAMOTO *et al.*, 1997 *apud* JOHN, 2000).

3.2 Cimento álcali ativado

Em 1957, na Ucrânia, o pesquisador Victor Glukhovsky apresentou a primeira possibilidade de criar um material ligante usando aluminossilicatos de baixo ou nenhum nível de cálcio e soluções de metais alcalinos. Ele chamou esses aglutinantes de “solo cimentos” e “solo silicatos” pela semelhança com os minerais naturais, e os classificou em dois grupos de acordo com sua composição: os alcalinos (Me₂O-Me₂O₃-SiO₂-H₂O) e os alcalinos-terrosos (Me₂O-MeO-Me₂O₃-SiO₂-H₂O) (KRIVENKO, 2017).

Em sua descoberta, Glukhovsky assumiu que os compostos de metais alcalinos (Li, Na, K, Rb, Cs) possuíam semelhantes propriedades de ligante hidráulico dos metais alcalino-terrosos (Mg, Ca, Sr, Ba). A partir de dados geológicos coletados de que os compostos de aluminossilicatos de sódio-potássio e cálcio, cujas resistências e estabilidade são maiores aos reagentes térmicos, estão presentes nos alcalinos-terrosos, surgiu-lhe a ideia de implementar os compostos no cimento (KRIVENKO, 2017).

Ainda segundo Krivenko (2017), em seus experimentos, Glukhovsky observou que hidróxidos e sais de metais alcalinos interagiram com minerais de argila, vidros de aluminossilicatos e substâncias cristalinas naturais e artificiais e formaram substâncias alcalinas resistentes à água e produtos de hidratação de aluminossilicato alcalino-terroso análogos de minerais naturais do tipo zeólita e mica.

Desde então, muitas pesquisas são realizadas a respeito do material encontrado e uma variedade de cimentos álcali ativados são desenvolvidas ao longo das décadas, além de sua vasta comercialização (SHI *et al.*, 2012). Em geral, a ativação alcalina envolve um campo de atividades altamente ativos, cujo desenvolvimento está em rápido crescimento nas áreas de pesquisas globais (PROVIS, PALOMO, SHI, 2015).

Em muitos casos, os CAT's envolvem somente o reaproveitamento de subprodutos da indústria cimenteira que não teriam destinação correta, sem a necessidade de calcinação de sua matéria prima, diferente do CP comum e do de Alto Forno, o que resulta em cimentos de menor impacto ambiental e propriedades mecânicas aplicáveis (LANGARO *et al.*, 2016).

Além disso, se projetados de forma adequada, os cimentos e concretos álcali ativados apresentam melhor desempenho do que os de Portland, principalmente em ambientes corrosivos (SHI *et al.*, 2012).

Basicamente, os CAT's são aglomerantes obtidos da ativação da matéria prima por, por exemplo, hidróxidos e silicatos, ou seja, soluções alcalinas (LANGARO, 2016). A partir disso, eles podem ser classificados em cinco categorias diferentes de acordo com sua composição específica: os cimentos alcalinos à base de escória, os cimentos Portland misturados com álcali ativado, os álcali ativados pozolânicos, os álcali ativados com cal-pozolana/escória e os misturados com aluminato de cálcio alcalino (SHI *et al.*, 2012).

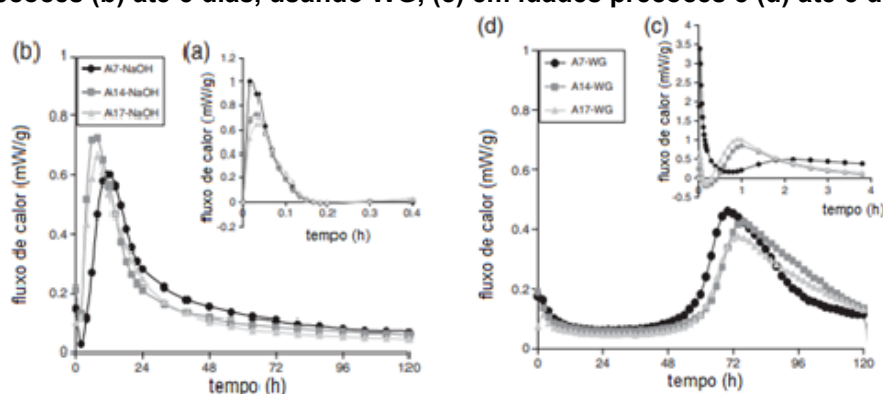
Por fim, de acordo com Pinto (2006), a reação de ativação do material se deve ao tipo, dosagem e concentração do ativador, bem como sua composição química e grau de finura.

De modo geral, quanto às melhorias de desempenho do material e suas propriedades, Puertas *et al.* (2003) constatou em seus estudos que o CAT possui menor taxa de calor de hidratação e melhor resistência a ambientes agressivos e à compressão, em relação aos cimentos tradicionais. Ainda, Leite (2001) observou que o material cerâmico moído finamente poderia melhorar o desempenho mecânico de concretos em idades mais avançadas, contribuindo com a reatividade pozolânica.

3.2.1 Cinética de hidratação

Três amostras diferentes de escórias foram ativadas nos estudos de Ben Haha *et al.* (2012), com porcentagens de, aproximadamente, 7%, 14% e 17% de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio hidratado (WG) ($\text{Na}_2\text{Si} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), ambos ativadores alcalinos, afim de analisar suas cinéticas de hidratação com auxílio de um calorímetro a 20°C. As proporções dos ativadores foram de 3,77g e 10g para cada 100g de escória, respectivamente.

Figura 2- Influência do teor de Al_2O_3 da cinética de hidratação da escória com NaOH (a) em idades precoces (b) até 5 dias, usando WG, (c) em idades precoces e (d) até 5 dias



Fonte: Adaptado de BEN HAHA *et al.*, (2012)

É possível observar, na Figura 2, um grande período de dormência nas escórias ativadas com WG, enquanto há uma reação mais acelerada nas ativadas com NaOH na presença de mais Al_2O_3 . Já os picos representam a molhagem e dissolução das escórias, e a formação de C-S-H, respectivamente.

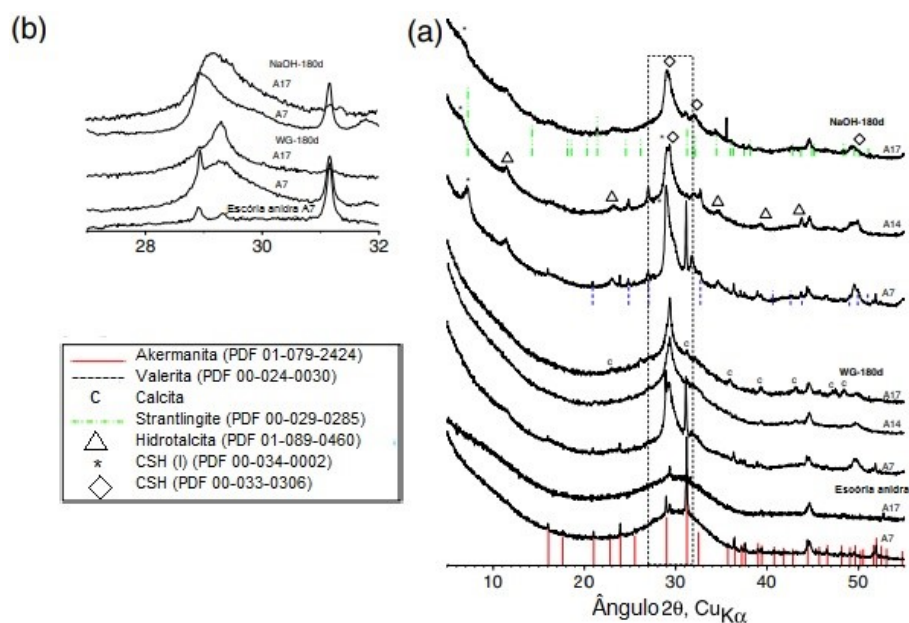
Assim, Ben Haha *et al.* (2012) chegaram à conclusão de que as escórias ativadas com NaOH têm maior resistência nas idades iniciais, enquanto as com WG apresentam maior resistência após 28 dias.

3.2.2 Microestrutura e desenvolvimento da resistência mecânica

As Difrações Por Raio-X (DRX) também foram analisadas por Ben Haha *et al.* (2012), a partir do estudo de desempenho de três escórias com diferentes quantidades de Al_2O_3 , além dos ativadores alcalinos metassilicato de sódio ($Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$) e NaOH.

Na Figura 3, é possível observar os difratogramas obtidos e a presença de vestígios de anidrito em todas as amostras e akermanita em algumas. Também é possível observar que houveram poucos teores de fases cristalinas nas escórias estudadas, strantlingite na escória com mais Al_2O_3 ativada com NaOH e diminuição da taxa de hidratação da mesma para os dois ativadores, sem afetar na resistência final da argamassa, ao contrário da presença de MgO, que diminui sua porosidade e aumenta sua resistência à compressão (BEN HAHA *et al.*, 2012).

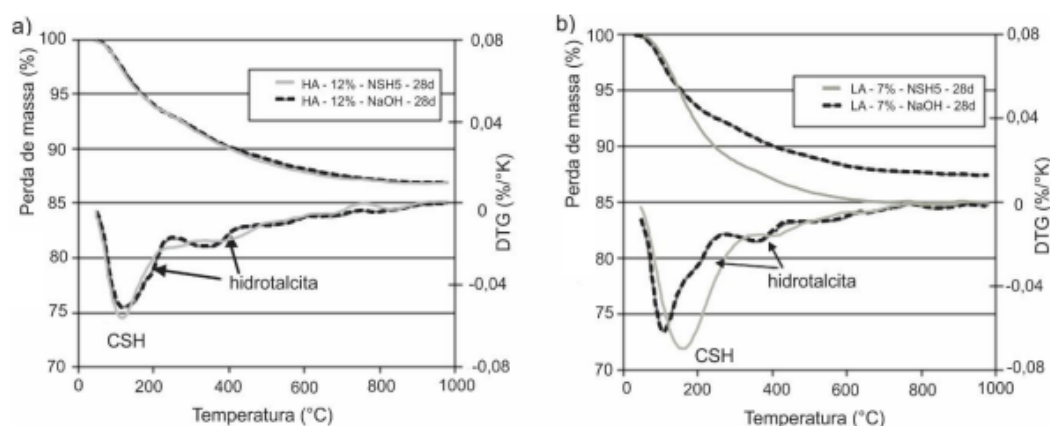
Figura 3- Padrão DRX das escórias anidras A7 e A17 em comparação com o DRX das escórias ativadas com NaOH e WG aos 180 dias



Fonte: Adaptado de BEN HAHA *et al.*, (2012)

Ben Haha *et al.* (2011b) observaram, ainda, duas amostras anteriores, que apresentam C-S-H e hidrotalcita em uma fase, a partir das análises obtidas dos estudos e que estão representadas na Figura 4.

Figura 4 Análises termogravimétricas realizadas aos 28 dias (TG e DTG) de sistemas álcali ativados com ambas escórias: (a) Escória HA (12% de Al_2O_3) e (b) Escória LA (7% de Al_2O_3)



Fonte: Adaptado de BEN HAHA *et al.*, (2011b)

Os autores concluíram, então, que o C-S-H e a hidrotalcita são os principais produtos de hidratação em ambas as amostras. Além disso, o ativador NaOH é responsável por acelerar a reação inicial, enquanto o $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$ confere melhor desempenho mecânico às argamassadas em idades mais avançadas, o que resulta em um produto com menos porosidade.

3.2.3 Durabilidade

Juenger *et al.* (2011) descobriram em seus estudos que o processo de cura é um grande responsável pela boa durabilidade dos sistemas álcali ativados. Assim, seu controle deve ser feito de forma mais cautelosa em materiais com maior teor de água, afim de conquistar uma estrutura de refinamento dos poros, ou seja, uma estrutura de poros mais favorável, junto da busca de estudos mais aprofundados.

No Quadro 2, é possível observar um resumo de diferentes trabalhos baseados em cimentos álcali ativados e suas respectivas matérias-primas e processos de cura que variam de imersa a úmida, de acordo com as pesquisas de cada autor.

Quadro 2 - Diversos cimentos álcali ativados e seus processos de cura

Material	Especificações e Relação a/c	Cura	Autor
CP ⁴ e EGAF ¹	ASTM C778 0.5 (argamassa)	Imersa	Acevedo-Martinez <i>et al.</i> , 2012
MK ² e hidróxido de cálcio	EN 196-1	Úmida temp.: 35°C, 45°C e 60°C	Alonso <i>et al.</i> , 2001b
EGAF ¹	EN 196-1 0.38, 0.46, 0.53	Cura úmida; seca (temp.: 60, 80 e 95°C); e em temp. ambiente	Altan <i>et al.</i> , 2012
EGAF ¹	EN 196-1 0.40 (pasta) 0.45 (argamassa)	Cura seca e imersa	Ben Haha <i>et al.</i> , 2011a
EGAF ¹	ACI 211.1–91 0.42 (concreto)	Cura úmida	Bernal <i>et al.</i> , 2011
MK ² , EGAF ¹ e CVMP ³	NBR 12006/90	Cura em temp. ambiente	Bigno <i>et al.</i> , 2005
EGAF ¹	0.4	Cura em temp.: 25, 35,45 e 60°C	Fernández-Jiménez <i>et al.</i> , 1997.
EGAF ¹	NBR 7215 0.48 (argamassa) 0.55 (pasta)	Cura úmida e seca	John, 1995.
EGAF ¹	0.5 (solução ativador/escória) (pasta)	Cura úmida	Puertas <i>et al.</i> , 2004.
EGAF ¹	Relação a/c determinada pelo escoamento da argamassa (UNE 80 116-86)	Cura imersa (UNE-EN 196-1)	Puertas <i>et al.</i> , 2007

¹EGAF = Escória granulada de alto forno

²MK = Metacaulim

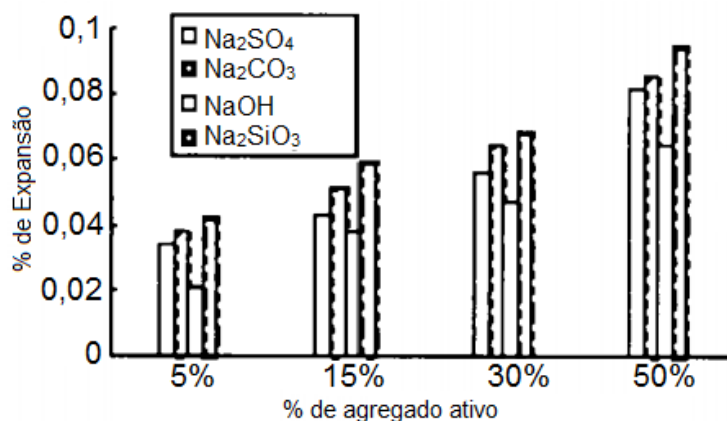
³CVMP = Cinza volante micropulverizada

⁴CP = Cimento Portland

Fonte: Langaro, 2016

Outro fator importante, analisado por Chen *et al.* (2002), é a reação álcali-agregado (RAA), que afeta, além da vida útil das estruturas, a sua segurança. Em seus estudos, foram observados as expansões que as RAAs causam nas argamassas álcali ativadas, onde a menor influência é causada pelo NaOH e a maior, pelo silicato de sódio (Na₂SiO₃), conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5- Influência dos tipos de componentes alcalinos nas taxas de expansão do RAA em argamassas de cimento álcali ativado a 180 dias



W(Na₂O_{eq}) = 3,5%; 0,15-0,75 mm; 180 dias

Fonte: Adaptado de CHEN *et al.*, (2002)

3.2.4 Ativadores

Os ativadores servem para abaixar o índice do pH da mistura e, então, acelerar sua reação de hidratação. São vários os disponíveis no mercado, sendo alguns dos principais os hidróxidos alcalinos de sódio (NaOH) e de potássio (KOH) (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2008a), o silicato de sódio e a cal hidratada [Ca(OH)₂] (JOHN, 1995).

O tipo de ativador a ser adicionado, de forma pura ou mista, e a concentração da dosagem são responsáveis por influenciar em algumas propriedades do produto final como a resistência mecânica (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2008a) e a durabilidade (BEN HABA *et al.*, 2011a).

Ben Haha *et al.* (2011a) analisaram em seus estudos escórias ativadas com hidróxido de sódio e com silicato de sódio, o *waterglass* (WG). Assim, os autores observaram que em 1 dia, a força de compressão das amostras com NaOH foram de 8 a 10 MPa maiores que a com WG. Entretanto, a partir de 1 ano, as escórias ativadas com WG apresentam resistências bem maiores que as primeiras.

Ainda, com a adição de óxido de magnésio (MgO), ambas escórias apresentam um rápido aumento das forças de compressão durante todo período, sendo mais relevante para as escórias M11 e M13 em relação a M8, onde os teores de MgO por peso são de 10,5%, 13,2% e 7,7%, respectivamente (BEN HABA *et al.*, 2011a). Essa análise pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2- Forças de compressão das escórias em MPa

idade (dias)	M8		M11		M13	
	NaOH	WG	NaOH	WG	NaOH	WG
1	8.3	n.m.	9.3	3.1	9.5	3.3
7	13.9	21.5	17.8	32.4	17.3	40.4
28	24.2	44.4	25.4	70.9	27.2	78.7
180	24.9	65.1	28.1	93.9	29.9	108.3
360	25.3	69.1	27.1	94.7	28.4	104.7

n.m. = não medido

Fonte: Adaptado de Ben Haha *et al.*, 2011a

Em seus estudos, John (1995) utilizou silicato de sódio (Na_2O e SiO_2) e cal hidratada como ativadores, sendo aquele responsável por proporcionar aumento da resistência à compressão, devido à diminuição da porosidade do material, ocasionada por uma menor organização cristalina dos produtos hidratados, e este, por diminuir o tempo de perda da trabalhabilidade. O autor concluiu, então, que cimentos ativados com silicatos de sódio apresentam resistência à compressão de até 100 MPa a mais do que os cimentos Portland, mesmo teor de calor de hidratação e velocidade de carbonatação e, em contrapartida, uma maior retração hidráulica.

De acordo com Puertas (1995), os ativadores alcalinos mais importantes do ponto de vista mecânico são o NaOH, o Na_2CO_3 e o WG, além de algumas misturas de ativadores também podem ser muito eficazes, como a mescla de Na_2CO_3 , Na_2SO_4 e $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Ainda segundo o autor, as principais funções ativadoras devem ser:

- Acelerar a solubilização da escória;
- Favorecer a formação de hidratos estáveis de baixa solubilidade;
- Favorecer a formação de uma estrutura compacta com esses hidratos formados.

Segundo Chen e Brouwers (2007a), os principais ativadores dos cimentos álcali ativados por escória são os sulfatos, o cimento Portland, o silicato e hidróxido de sódio, sendo este último um exemplo de ativadores que atuam geralmente como catalisadores por raramente reagirem com os óxidos, enquanto outros participam da reação da escória, como os sulfatos.

Na Tabela 3, é possível observar alguns tipos de cimentos que foram objeto de estudo de cada autor, com seus respectivos ativadores e teores de concentração, resumidos por Langaro (2016).

Tabela 3- Diversos cimentos álcali ativados e seus ativadores

Material	Quantidade (Substituição, combinação)	Ativador	Quantidade (% em massa)	Autor
CP ⁴ e EGAF ¹	0 a 80%	Silicato de sódio	0,4,6 e 10% de Na ₂ O	Acevedo-Martinez <i>et al.</i> , 2012
EGAF ¹	100%	NaOH + KOH + Silicato de sódio	0, 0.5, 0.85, 1.16, 1.46, 1.75, 2.63, 3.63, 4.46%	Altan <i>et al.</i> , 2012
EGAF ¹	100%	NaOH e Silicato de sódio	3.77% e 10%	Ben Haha <i>et al.</i> , 2011a
EGAF ¹	100%	Silicato de sódio	5% de Na ₂ O	Bernal <i>et al.</i> , 2011
MK ² , EGAF ¹ e CVMP ³	50% (MK) 50 a 70% (EGAF) 30 a 50% (CVP)	Silicato de sódio (alcalino e neutro) e KOH	Em relações molares	Bigno <i>et al.</i> , 2005
EGAF ¹	100%	NaOH + silicato de sódio	4% de Na ₂ O	Fernández-Jiménez <i>et al.</i> , 1997.
EGAF ¹	100%	NaOH + silicato de sódio + Ca(OH) ₂	0.2 e 5% de Na ₂ O, SiO ₂ (faixa entre 0 a 14.4) Ca(OH) ₂ de 0, 2.5 e 5%	John, 1995.
EGAF ¹	100%	Solução de Silicato de sódio + NaOH e solução de NaOH	4% de Na ₂ O	Puertas <i>et al.</i> , 2004.
EGAF ¹	100%	Silicato de sódio e NaOH	4 e 5% de Na ₂ O	Puertas <i>et al.</i> , 2007

¹EGAF = Escória granulada de alto forno

²MK = Metacaulim

³CVMP = Cinza volante micropulverizada

⁴CP = Cimento Portland

Fonte: Langaro, 2016

4 RESÍDUO CERÂMICO

De acordo com a resolução nº 307 do CONAMA (BRASIL, 2002), os resíduos da construção civil são constituídos de materiais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto e argamassa, e dentre diversas destinações, devem ser reutilizados ou reciclados.

Entretanto, ainda há uma grande perda temporária e permanente de materiais não renováveis na construção civil, as quais geram danos ambientais como entupimento de galerias de drenagem e assoreamento dos rios, fatores agravantes em épocas de chuva, além da própria poluição (HOLANDA E SILVA, 2011).

Um desses materiais perdidos é a cerâmica, cuja indústria é uma das mais antigas da história, uma vez que o homem descobriu que ao misturar argila, encontrada em abundância na natureza, com água e depois queimá-las, objetos poderiam ser criados (*American Ceramic Society, 2020a*).

Apesar do tempo de descoberta, o produto cerâmico ainda é amplamente utilizado nas construções nos dias atuais (HOLANDA e SILVA, 2011). Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM, 2020a), destacam-se as regiões Sul e Sudeste, em relação ao seu desenvolvimento, devido à fatores como facilidade de obtenção de matéria-prima, melhor infraestrutura e sua densidade demográfica.

De acordo com os dados disponibilizados pela Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER, 2020), há cerca de 6903 de Cerâmicas e Olarias no país, as quais geram 293 mil empregos diretos e 900 mil, indiretos. Na Tabela 4, é possível observar alguns dados mais específicos do setor.

Tabela 4 - Dados do Setor Cerâmico no Brasil

	Nº Empresas Aproximado	% Aproximado por Área	Prod./Mês (Nº de Peças)	Consumo-Ton/Mês (Matéria Prima: Argila)
Blocos/Tijolos	4346	63%	4.000.000.000	7.800.000
Telhas	2547	36%	1.300.000.000	2.500.000
Tubos	10	0,10%	325,5Km*	-

*Produção apontada pela Associação Latino-Americana de Fabricantes de Tubos Cerâmicos (Acertubos), considerando o número de 10 empresas, responsáveis pela fabricação de 3.906km/ano.

Fonte: ANICER, 2020

Por sua definição, cerâmica é uma pedra artificial obtida da argila ou de sua mistura (PEDROTI, 2011). Além disso, segundo a Sociedade Americana de Cerâmica (*American Ceramic Society*, 2020b), os materiais cerâmicos são definidos como inorgânicos, não-metals e policristalinos, cujas propriedades variam de acordo com suas ligações químicas. De modo geral, são considerados duros, frágeis, pouco dúcteis e bons isolantes térmicos (AZEREDO, 2015).

Bustamante e Bressiani (2000) listaram os principais segmentos do Setor Cerâmico de acordo com a classificação quanto ao seu valor anual de produção, conforme Tabela 5.

Tabela 5- Classificação dos principais segmentos do setor cerâmico no Brasil quanto ao valor de produção

Segmento	Valor da Produção (1.000 US\$/Ano)
Cerâmica Estrutural (Vermelha)	2.500.000
Revestimentos (pisos e azulejos)	1.700.000
Matérias Primas Naturais	750.000
Refratários	380.000
Cerâmica Técnica, Especiais, outras	300.000
Sanitários	200.000
Louça de Mesa e Adorno	148.000
Fritas, Vidrados e Corantes	140.000
Matérias Primas Sintéticas	70.000
Cerâmica Elétrica	60.000
Equipamentos para Cerâmica	25.000
Abrasivos	20.000
Total do Setor	6.293.000

Fonte: Bustamante e Bressiani, 2000

Ainda, é possível observar os estados de alguns desses segmentos no mapa do Brasil na Figura 6 (BUSTAMANETE e BRESSIANI, 2000):

Figura 6 - Localização da produção de alguns segmentos do Setor Cerâmico no Brasil



Fonte: Bustamante e Bressiani, 2000

4.1 Atividades Pozolânicas

Atividade pozolânica é a propriedade de um material pozolânico ser capaz de se combinar com a cal e formar um composto aglomerante, sob condições normais de pressão e temperatura (AMORIM *et al.*, 1999). Quanto maior o desarranjo estrutural do material e sua instabilidade em meio básico, mais intensa será a reação pozolânica, que também depende de sua finura, temperatura e concentração dos reagentes (ZAMPIERI, 1989).

O material pozolânico natural não necessita de nenhum tratamento para potencializar sua eficácia pozolânica, com exceção da moagem, que aumenta a superfície de contato para as reações ocorrerem. Já na pozolana artificial, as temperaturas elevadas auxiliam na cristalização do material, uma vez que durante o seu resfriamento, as fases cristalinas se transformam em amorfas, o que confere a reatividade ao produto (GOBBI, 2014).

Segundo Zampieri (1989), a terra argilosa foi, provavelmente, o primeiro material aplicado como material ligante descoberto pelo homem, enquanto, na civilização grega, um dos primeiros materiais utilizados como aglomerante foi a cal. De acordo com o autor, na época de suas primeiras aplicações, já se sabia que alguns materiais vulcânicos, quando moídos finamente e misturados à cal e areia, resultavam

em uma argamassa mais resistente mecanicamente, além de endurecerem e resistirem após o contato com a água.

Assim, cerca de 3600 anos atrás, os solos argilosos calcinados como materiais pozolânicos artificiais, junto com a cal, formavam o primeiro cimento hidráulico, que caíram em desuso após o aparecimento do cimento Portland (VIEIRA, 2005).

Após muitos estudos e novas adições ao cimento Portland, as escórias de alto forno e os materiais pozolânicos tiveram maior evidência. As primeiras, por adquirirem coesão e resistência de forma gradativa, enquanto estas, por seu antigo histórico de desempenho. Destaca-se, também, que as argilas calcinadas foram as primeiras pozolanas aplicadas como adição mineral ao CP (ZAMPIERI, 1989).

Os cimentos pozolânicos ganharam importância a partir de 1923, na Itália, com as pozolanas naturais provenientes de rochas vulcânicas (PAPADAKIS e VENUAT, 1968 *apud* ZAMPIERI, 1989). Já no Brasil, sua efetiva comercialização se iniciou apenas em 1969, no Rio Grande do Sul, a partir do uso de cinzas volantes (ZAMPIERI, 1989).

Atualmente, de acordo com a (ABNT, 2018), na NBR 16697, os cimentos Portland podem ter teores de material pozolânico que variam entre 15% e 50% de sua massa total. Além disso, segundo a (ABNT, 2014) na NBR 12653, essas pozolanas conferem melhor durabilidade e desempenho mecânico dos concretos, argamassas e pastas, no estado endurecido. Isso se deve a uma combinação da menor permeabilidade para a relação a/c , teor de hidratação e redução do grau de hidróxido de cálcio no cimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

4.2 Cerâmica vermelha

A cerâmica vermelha, também chamada de estrutural, é a responsável por produzir tijolos furados, maciços, telhas, blocos de vedação, manilhas, tabelas ou lajes e pisos rústicos (BUSTAMANTE e BRESSIANI, 2000). De acordo com o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE, 2015), ela recebe a denominação “vermelha” devido à presença de compostos ferrosos que lhe conferem uma coloração avermelhada.

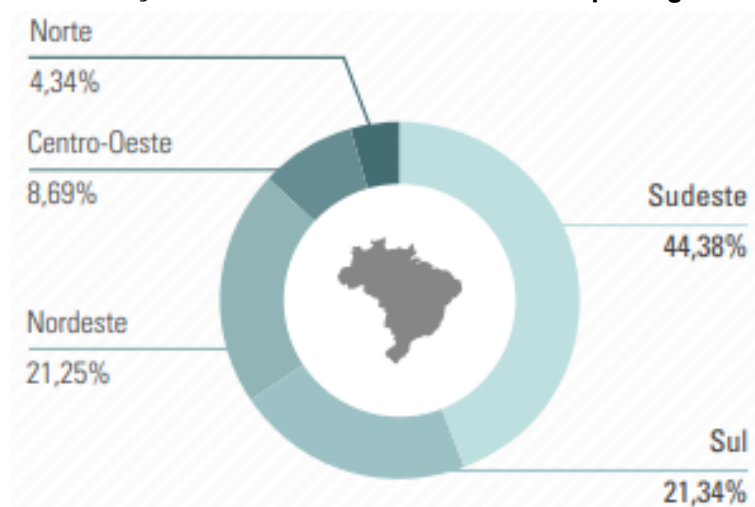
Essas cerâmicas são produzidas da mistura de argilas plásticas e não plásticas, submetidas a queima entre 600°C e 1000°C. Assim, argilas naturais ou calcinadas, além das cinzas volantes e escórias de alto forno, também possuem reatividade pozolânica, em menor grau (MACIOSKI, 2017). No Paraná, as mais utilizadas na fabricação de blocos cerâmicos são a caulinita, a illita e a montmorilonita (MINEROPAR, 2009).

O setor dessa indústria, no Brasil, foi impulsionado na década de 1960, devido à criação do Sistema Financeiro da Habitação e do Banco Nacional da Habitação, que ocasionou um aumento do número de construções no país (CABRAL JUNIOR *et al.*, 2008). Desde então, vem ganhando cada vez mais espaço, sendo produzidos cerca de 4 bilhões de blocos de vedação e estruturais e 1,3 bilhão de telhas por mês no país, nos dias mais atuais (SEBRAE, 2015).

Segundo Macedo *et al.* (2008), a cerâmica vermelha representa, aproximadamente, 40% de toda indústria cerâmica brasileira e consome cerca de 70 milhões de toneladas de matérias-primas ao ano, o que leva a uma grande extração não racional ou otimizada de argila, material heterogêneo finito cuja disponibilidade depende da sua formação geológica e local de extração.

Na Figura 7, é possível observar as proporções da produção de cerâmica vermelha de acordo com cada região do Brasil, com destaque para as regiões Sul, Sudeste e Nordeste (SEBRAE, 2015).

Figura 7 - Produção nacional de cerâmica vermelha por região brasileira



Fonte: SEBRAE, 2015

Além da abundância de material, também há um grande índice de perda da cerâmica, devido a sua fragilidade que contribui para as perdas desde o transporte e sua própria movimentação, até o seu armazenamento e posterior aplicação. Esse fator, relacionado ao processo produtivo do Cimento Portland e às composições da argila, sua matéria prima principal, tornaram o resíduo de cerâmica vermelha um forte candidato como aglomerante hidráulico em substituição à argila utilizada no cimento convencional (MOURA *et al.*, 2018).

Ademais, as indústrias de cerâmica vermelha queimam seus materiais, geralmente entre 700°C e 900°C, enquanto geram alguma fase vítrea, sem formar quase nenhuma nova fase mineral, além de ocorrer a desidroxilação e amorfismo dos argilominerais no processo, que conferem reatividade pozolânica ao material triturado (GARCIA *et al.*, 2014). Ainda, os autores afirmam que isso só é possível quando a queima da argila não atinge temperaturas superiores a 979°C.

A única norma que especifica as faixas de temperaturas de queima para argilominerais utilizados como material pozolânico é a indiana IS 1344/81 (*Specification for calcinated clay pozzolana*), que determina:

- Caulinita: de 700°C a 800°C;
- Ilita: de 900°C a 1000°C;
- Esmectita: de 600°C a 800°C.

Dessa forma, vários autores estudaram essa hipótese de substituição e obtiveram resultados distintos. Moura *et al.* (2018) analisaram três amostras diferentes de resíduos de telha cerâmica vermelha pelo método analítico difração de raios-X (DRX) e fluorescência de raios-X (FRX) para obter suas composições, sendo possível observar os resultados desse segundo na Tabela 6.

Tabela 6- FRX de resíduos com telha cerâmica vermelha

Composição química em óxidos dos resíduos de telha cerâmica vermelha (% em massa)							
Resíduos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	SO ₃	Outros
Telha 1	69,250	19,052	6,431	2,057	0,540	0,109	2,561
Telha 2	57,871	24,526	11,026	2,500	0,483	-	3,593
Telha 3	54,149	29,531	10,086	2,557	-	-	3,677

Fonte: Moura *et al.*, 2018

Ambos os métodos auxiliaram na indicação da presença de sílica e óxido de ferro, compostos importantes do Cimento Portland, além da alumina no segundo, fatores positivos na pesquisa para a substituição de argila na produção do CP (MOURA *et al.*, 2018).

Já Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) analisaram a possibilidade de substituir parcialmente o cimento em concretos e argamassas, por resíduos de tijolos e telhas retirados da região central de Portugal. Os autores concluíram em seus estudos que os resíduos triturados apresentaram uma menor resistência a compressão e um considerável índice de atividade pozolânica que viabilizava sua incorporação em argamassas e concretos.

Sales e Alferes Filho (2014) também estudaram a substituição parcial do cimento Portland por pó de resíduos cerâmicos, na produção de concretos. Em seus ensaios com argamassa de cimento, os autores obtiveram um índice de atividade pozolânica de 76,9%. Já no ensaio de concreto, analisaram três amostras com 10%, 20% e 40% de substituição do cimento pelo pó cerâmico, que apresentaram as resistências à compressão disponíveis na Tabela 7, com destaque para a amostra de 20% (PT20), que apresentou melhor desempenho.

Tabela 7- Resultados dos ensaios de compressão de Sales e Alferes Filho

Mistura	Resistência à compressão					
	3 dias		7 dias		28 dias	
	Média (MPa)	Coef. Var. (%)	Média (MPa)	Coef. Var. (%)	Média (MPa)	Coef. Var. (%)
PT00	23,51	3,12	25,83	14,57	31,79	10,87
PT10	21,97	13,68	25,78	13,77	28,17	10,48
PT20	17,79	3,37	20,87	2,53	35,33	6,26
PT40	14,72	9,57	17,54	8,43	26,42	3,99

Fonte: Sales e Alferes Filho, 2014

De acordo com Gobbi (2014), as pozolanas que sofrem resfriamentos mais bruscos (choques térmicos), apresentam maior grau de reatividade após sua sinterização, devido à falta de tempo para se reordenar estruturalmente, como é o caso das cinzas volantes e escórias. Assim, Macioski (2017), decidiu aplicar esse método em seus estudos para analisar se o mesmo ocorria com materiais cerâmicos.

Macioski (2017) observou um aumento da reatividade do material em partículas inferiores a 0,15mm de diâmetro, onde esse limite máximo analisado pelo ensaio Chapelle modificado, apresentou índices menores que os limites mínimos

permitidos para ser classificado como material pozolânico. Ainda, observou que é necessário uma maior quantidade de pozolana com a cal da que a estabelecida pela norma.

Apesar de ter utilizado um material cerâmico que não obteve resultados suficientes para ser classificado como pozolana e uma cal de grau de pureza baixo, Macioski (2017) comprovou em sua pesquisa, a viabilidade da inserção de resíduos cerâmicos como matéria-prima para produção de aglomerante álcali ativado, uma vez que as resistências mecânicas obtidas no estudo foram de 8,45 MPa aos 28 dias e podem ser utilizadas em aglomerantes para peças sem fins estruturais, como de pavimentação. Por fim, concluiu que há a necessidade de maior aprofundamento de pesquisas relacionadas para viabilizar sua aplicação em concretos e argamassas.

5 IMPACTOS AMBIENTAIS

De acordo com a Resolução CONAMA nº 01, promulgada em 1986, impacto ambiental é definido como:

Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais. (BRASIL, 1986, p. 1).

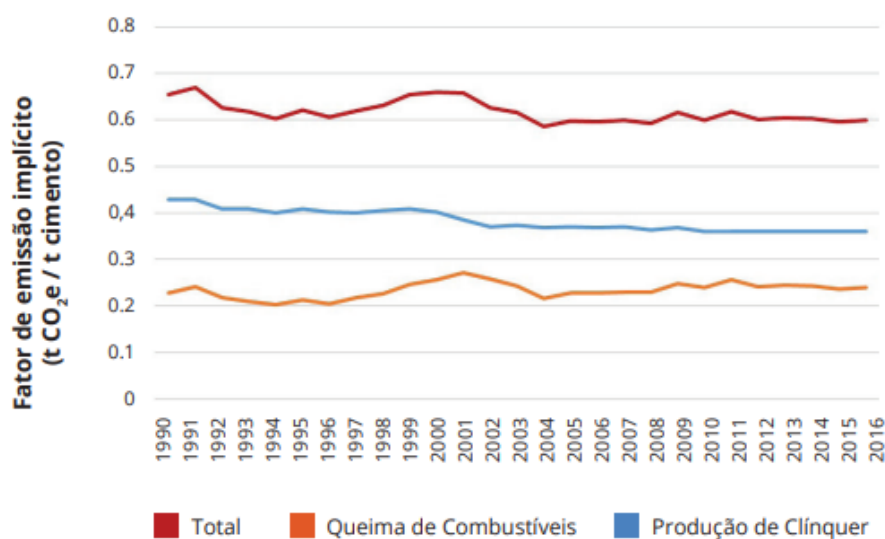
Um dos maiores causadores de impactos ambientais no mundo é o concreto, devido a sua alta demanda, já que é o segundo recurso mais consumido no planeta, atrás somente da água (WBCSD, 2009). A produção de cimento, principal componente do concreto, no Brasil, foi de cerca de 57 milhões de toneladas de cimento em 2016 (SNIC, 2020).

Segundo Lima, Fernandes e Dantas (2018), o gás carbônico, nocivo à saúde e ao meio ambiente, é o principal gás do efeito estufa (GEE) emitido em construções, sendo o clínquer o responsável pela maior parte de sua emissão durante a produção do cimento.

Quantitativamente, libera-se, em média, entre 700 e 800 kg de CO₂ a cada uma tonelada de cimento produzido (LIMA, FERNANDES, DANTAS, 2018). A Figura 8 apresenta a evolução do índice de emissão de CO₂ pela queima de combustíveis, onde é possível observar o fator de emissão implícito, ou seja, a quantidade de tonelada de gás carbônico liberada durante o processo produtivo do cimento, dada pela produção de clínquer e pela queima de combustíveis para sua fabricação, entre os anos de 1990 e 2016.

Ainda, pode-se observar que o índice de liberação proveniente do clínquer diminuiu ao longo dos anos devido a sua substituição por outros materiais, apesar das emissões totais se manterem relativamente constante. Uma possível explicação, de acordo com o Sistema De Estimativa De Emissões De Gases De Efeito Estufa (SEEG, 2018), é a variedade de fatores que influenciam esse índice, como os tipos de materiais utilizados na substituição do clínquer e os tipos de fontes energéticas utilizadas.

Figura 8 - Evolução da emissão de CO₂ em toneladas por tonelada de cimento por fonte de emissão



Fonte: SEEG (2018)

Os agregados do concreto de Cimento Portland (CP) são provenientes de fontes naturais não renováveis e consumidos de uma forma desenfreada que precisa ser contida para evitar uma estagnação dessas fontes, sendo importante a sua substituição por outros materiais de fontes alternativas (MODRO, 2009). John (2000) estima que esse consumo, no Brasil, seja de, aproximadamente, 210 milhões de toneladas de agregados por ano apenas para produzir concretos e argamassas.

Dessa forma, os cimentos álcali ativados tornam-se uma opção sustentável ao CP, pois muitas vezes, utilizam apenas subprodutos sem destinação correta da indústria de construção, sem que haja a necessidade de uma calcinação da matéria prima (LANGARO *et al.*, 2016).

Além disso, em comparação aos CPs, os cimentos álcali ativados reduzem, aproximadamente, 73% das emissões de gases de efeito estufa, 43% da demanda de energia e 25% do uso de água devido ao reaproveitamento de subprodutos da indústria siderúrgica (YE e RADLIŃSKA, 2016).

No que diz respeito ao tijolo, o material é um dos materiais de alvenaria mais utilizados como material de construção (ZAWRAH *et al.*, 2016). Sua utilização representa cerca de 90% das coberturas e alvenarias do Brasil, enquanto a indústria de cerâmica vermelha é responsável por cerca 4,8% da indústria da construção civil (ANICER, 2020) e consome, aproximadamente, 70 milhões de toneladas de matérias primas por ano (GESICKI, BOGGIANI, SALVATTI, 2002 *apud* MACEDO *et al.*, 2008).

Além dos tijolos, telhas e blocos cerâmicos também são alguns exemplos de cerâmica vermelha (ABCERAM, 2020b). Entretanto, apesar de muito utilizados, suas jazidas de argila, sua matéria prima principal, não possuem estudo necessário para racionalizar sua extração (MACEDO *et al.*, 2008), além de poder prejudicar a paisagem e os ecossistemas (JOHN, 2000).

Ademais, como há um grande número de resíduos de cerâmica perdido nas olarias, reutilizá-los na produção do Cimento Portland torna sua aplicação como material pozolânico uma alternativa viável (GARCIA *et al.*, 2014), além de ter sua geração concentrada, o que facilita sua recuperação (JOHN, 2000).

Ainda, há um alto índice de quebra dos materiais no manuseio e transporte, composta de, aproximadamente, 2,28% de tijolos, 2,01% de lajotas e 8,17% de telhas, como observado por Melo (2017) em seu estudo de caso. Já nos estudos feitos em Pernambuco, por Holanda e Silva (2011), foi verificado que de uma extração de mais de 126000 m³ de argila, há uma perda de cerca de 27795 m³ de recurso natural e de mais de 23,5 milhões de tijolos por mês.

Tabela 8- Projeção dos resultados da pesquisa para o cenário do Estado de Pernambuco

Análise	argila (m³/mês)	tijolo (und/mês)
Volume na Jazida	126.945	-
Produção Estadual	-	100.000.000
Perda equivalente na ICV/SE-PE	3.651	3.092.784
Perda equivalente na ICC/SE-PE	24.144	20.450.919
Valor do na Cerâmica 1:3	R\$ 16,67	-
Valor em PE	-	R\$ 0,32
Consumo médio de uma casa popular de 36,84 m ²	-	2.370
Perda material	27.795	23.543.702
Perda monetária	R\$ 148.102,18	R\$ 7.533.984,65

Fonte: Adaptado de Holanda e Silva (2011)

Na Tabela 8, é possível observar as análises feitas no estudo de caso de Holanda e Silva (2011), onde foi concluído que a perda de tijolos na produção é equivalente à construção de 9935 casas populares de quase 37 m².

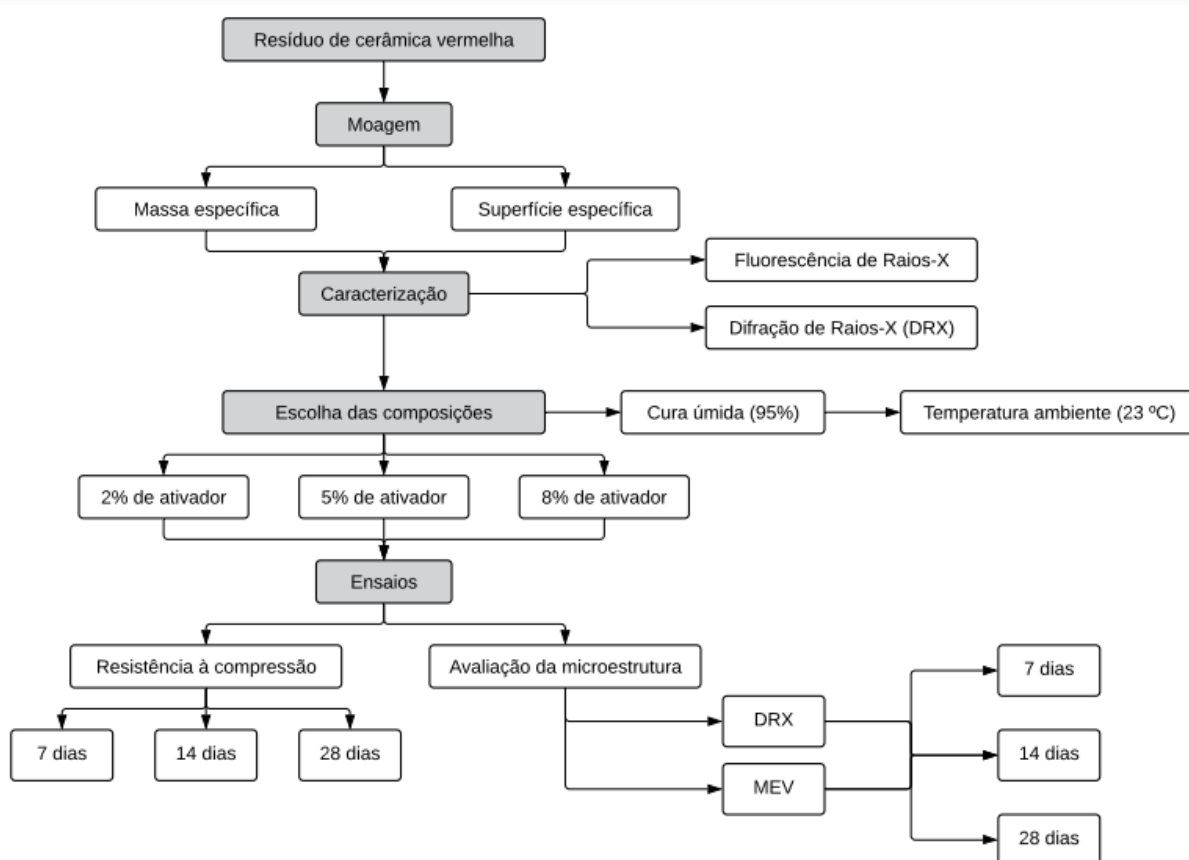
6 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, estão apresentadas as escolhas do preparo do material e caracterização de suas matérias primas empregadas, com o intuito de comparar a resistência à compressão do cimento álcali ativado em diferentes traços e verificar as composições químicas obtidas.

Para isso, foram utilizados métodos e porcentagens de ativador geralmente empregados para análise e produção de cimento Portland e, também, baseados em estudos já realizados por Langaro (2016), onde a autora analisou a viabilidade do CAT a partir da valorização da escória de alto forno a carvão vegetal, mas adaptado para este trabalho, com resíduos cerâmicos. O motivo da escolha do trabalho se deu pelos resultados positivos obtidos pela autora em sua pesquisa.

Para ilustrar o desenvolvimento da metodologia, tem-se o diagrama representado na Figura 9.

Figura 9 - Diagrama dos métodos de pesquisa



Fonte: Autoria própria (2020)

6.1 Resíduos de cerâmica vermelha

Os resíduos utilizados no trabalho foram advindos de olarias, mais precisamente da produção de tijolos do estado de Santa Catarina. Na Fotografia 1, é possível observar uma amostra do material já moído e seco, pronto para utilização experimental.

Fotografia 1 - Amostra do resíduo cerâmico moído



Fonte: Autoria própria (2020)

6.1.1 Preparação do resíduo moído

Para obter o material da Fotografia 1, o resíduo de cerâmica vermelha passou pelo processo de secagem em estufa a 100°C durante 24 horas e, em seguida, foi moído em um moinho de bolas (Fotografia 2) por 20 minutos. Essa etapa de preparação foi realizada pelo laboratório de materiais do *campus* Pato Branco, sendo enviado o resíduo já pronto para aplicação na mistura.

Fotografia 2 - Moinho de bolas



Fonte: Frare (2016)

6.1.2 Caracterização do resíduo de cerâmica vermelha

Para caracterizar o material, primeiro foi realizado o ensaio do frasco *Le Chatelier* e, com o resultado obtido, foi obtido a massa específica do material (g/cm^3) pela Equação 7, regulamentada pela (ABNT, 2017) na NBR 16605, onde d é a densidade, m a massa e v , o volume.

$$d = \frac{M}{V} \quad \text{Equação 7}$$

Em seguida, realizou-se o ensaio de permeabilidade ao ar, também conhecido como método de *Blaine* e regulamentado pela (ABNT, 2015) na NBR 16372, para determinar a finura e uniformidade da moagem do resíduo e, assim, obter sua superfície específica (cm^2/g), pela Equação 8.

$$S = K \frac{\sqrt{\varepsilon^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \sqrt{0,1\eta}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

S é a superfície específica em massa;

K é a constante do aparelho (3,68);

ε é a porosidade da camada (0,5);

t é o tempo medido em segundos;

ρ é a massa específica do cimento;

η é a viscosidade do ar à temperatura do ensaio ($1,8 \times 10^{-5}$).

Ambos são ensaios usualmente realizados para caracterização de cimentos Portland, foram realizados no próprio laboratório de materiais da UTFPR *campus* Guarapuava e estão representados na Tabela 9.

Tabela 9 - Caracterização física do resíduo cerâmico

Massa específica (g/cm ³)	Superfície específica (cm ² /g)
2,656	5367,81

Fonte: Autoria própria (2021)

6.1.3 Fluorescência de raios-x (FRX)

Por meio da análise semi quantitativa realizada no ensaio de fluorescência de raios-x, é possível identificar a presença, ou não, de óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) e seus respectivos percentuais, componentes que conferem resistência ao material ao reagir com o ativador e formar o C-S-H.

Devido à falta de disponibilidade de equipamentos necessários para essa medição, foi utilizado uma análise de Macioski (2017) de um pó cerâmico feito por meio de um espectrômetro de fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda, em que se obteve os resultados apresentados na Tabela 10, de acordo com o componente encontrado e seu respectivo teor.

Tabela 10 - Composição química por FRX de pó cerâmico

(continua)

Óxidos	Teor
SiO ₂	52,6%
Al ₂ O ₃	30,0%
Fe ₂ O ₃	8,4%
TiO ₂	1,7%
K ₂ O	0,9%
MgO	0,8%
CaO	0,5%

Tabela 10 - Composição química por FRX de pó cerâmico**(conclusão)**

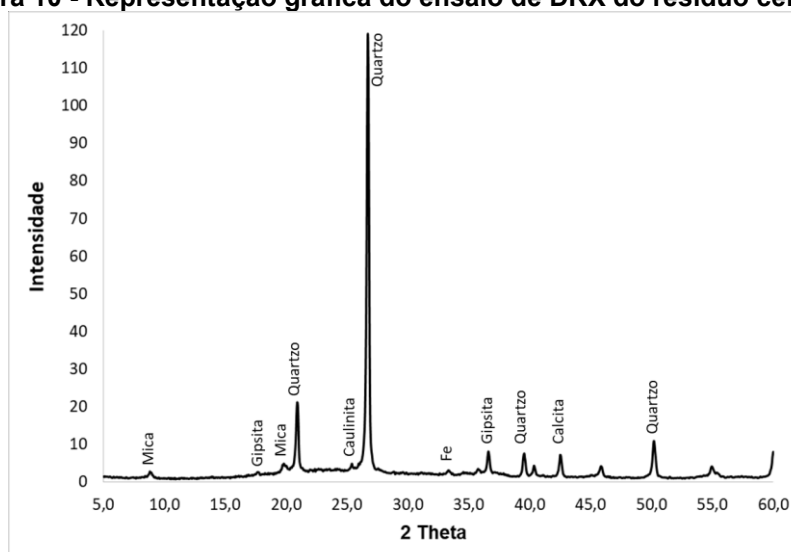
Óxidos	Teor
SO ₃	<0,1%
MnO	<0,1%
ZrO ₂	<0,1%
Na ₂ O	<0,1%
P ₂ O ₅	<0,1%
Perda ao fogo	4,67%

Fonte: Adaptado de Macioski (2017)

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), os óxidos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ devem somar no mínimo 70% como requisito químico de uma pozolana natural ou artificial. Dessa forma, o resíduo analisado por Macioski (2017) cumpre o requisito, uma vez que seus componentes somaram 91% do material. Além disso, também é possível notar a presença, ainda que pequena, de CaO.

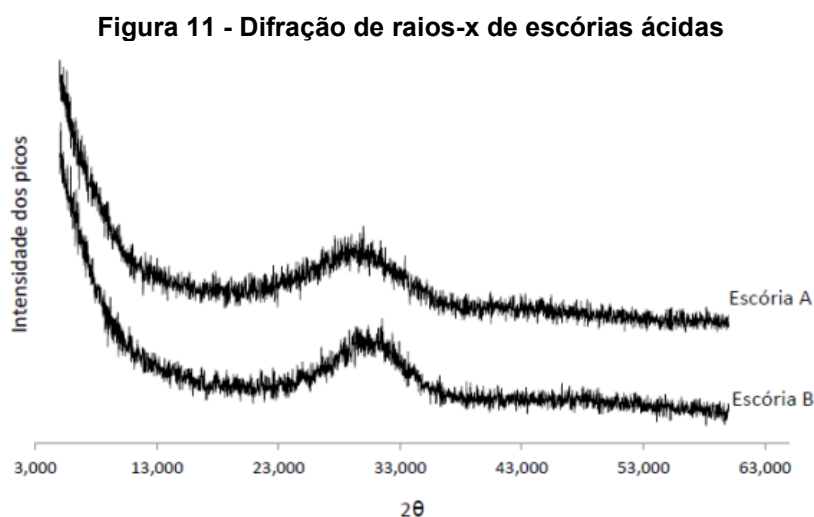
6.1.4 Difração por raios-x (DRX) do resíduo cerâmico

O último ensaio de análise da amostra do resíduo cerâmico foi o de espectroscopia por difração de raios-x, que consiste na emissão da imagem gráfica do comportamento dos átomos do material, vide Figura 10.

Figura 10 - Representação gráfica do ensaio de DRX do resíduo cerâmico**Fonte: Autoria própria (2021)**

A partir dela, foi possível identificar o material analisado como cristalino, ou seja, com seus átomos bem arranjados, uma vez que apresentou picos no gráfico.

Nesta etapa do trabalho, foi esperado um material amorfo, ou seja, com ausência dessa ordenação no arranjo dos átomos, como obtido nas amostras de Frare (2016), conforme Figura 11.



Isso facilitaria as reações químicas para formação de compostos hidratados, responsáveis por conferir resistência ao cimento.

Este ensaio foi realizado na UTFPR – *Campus* Pato branco por meio do equipamento da marca *Panalytical*, modelo EMPYREAN, na qual as amostras foram analisadas de acordo com o comprimento de onda e seu ângulo de varredura.

6.2 Ativador

Foi utilizado, como ativador, o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), por ser de fácil acesso e apresentar bons resultados em pesquisas similares de outros autores, como de Macioski (2017).

6.3 Preparo das pastas

6.3.1 Definição dos teores de ativador

Como observado por Langaro (2016), o processo de cura que apresentou melhor desempenho foi o com 5% de ativador. Por isso, foram realizados corpos de prova com o mesmo índice, além de misturas com 2% e 8% de ativador, para se realizar um comparativo do melhor teor no material.

6.3.2 Definição do traço água-cimento

Foi utilizado o traço de 1:0,6 (aglomerante: água), devido a melhor consistência e maleabilidade da pasta obtida. A mistura, então, foi colocada em moldes prismáticos cúbicos de 3 x 3 cm, com 10 golpes de adensamento em cada uma, vide Fotografia 3.

Fotografia 3 - Pasta de cimento adensada em molde



Fonte: Autoria própria (2020)

6.3.3 Cura do cimento

Ainda baseado nos estudos de Langaro (2016) e de Frare (2016), optou-se por realizar o processo de cura úmida, onde o material ficou suspenso sem contato direto com a água, exposto à temperatura ambiente de 23°C e umidade de 95%.

6.3.4 Resistência à compressão do cimento

Neste ensaio, foi utilizado o aparelho da marca EMIC, modelo DL30000 do ano de 2014 (Fotografia 4), disponível no laboratório do próprio *campus*, com uma taxa de carregamento de 1mm/min. Para isso, foram confeccionados 6 corpos de prova para cada teor de ativador na mistura, divididos igualmente entre idades de 7, 14 e 28 dias (2 corpos de prova de cada porcentagem de ativador).

Fotografia 4 - Aparelho EMIC DL30000



Fonte: Autoria própria (2020)

6.3.5 Interrupção da hidratação do cimento

Após rompido, os fragmentos do material foram submersos em acetona por 2 horas para interromper seu processo de hidratação pelo processo de troca de solvente, ou seja, da água para a acetona. Em seguida, foram secados e colocados em estufa por 30 minutos a 60°C, temperatura ideal para que somente a acetona fosse evaporada, sem que afetasse nenhum compósito hidratado formado no material, uma vez que sua temperatura de ebulição é de, aproximadamente, 56,5°C, enquanto a da água é de 100°C. A Fotografia 5 foi tirada após a realização deste processo.

Fotografia 5 - Resíduos de cimento pós secagem em estufa



Fonte: Autoria própria (2020)

6.3.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Foram analisados pequenos fragmentos do material em laboratório por meio de um microscópio eletrônico de varredura, afim de se observar e descrever seu comportamento.

6.3.7 Difração por raios-x (DRX) do cimento

Por fim, outra parte dos fragmentos foi macerada em um cadinho de porcelana e passada em peneira de 75 μm . Em seguida, foi encaminhada para análise de DRX novamente, porém da pasta de cimento já pronta.

A partir de todos esses ensaios, todos os dados e resultados foram analisados cautelosamente para avaliar se a pesquisa era viável, o porquê e o que poderia ser feito em relação a isso.

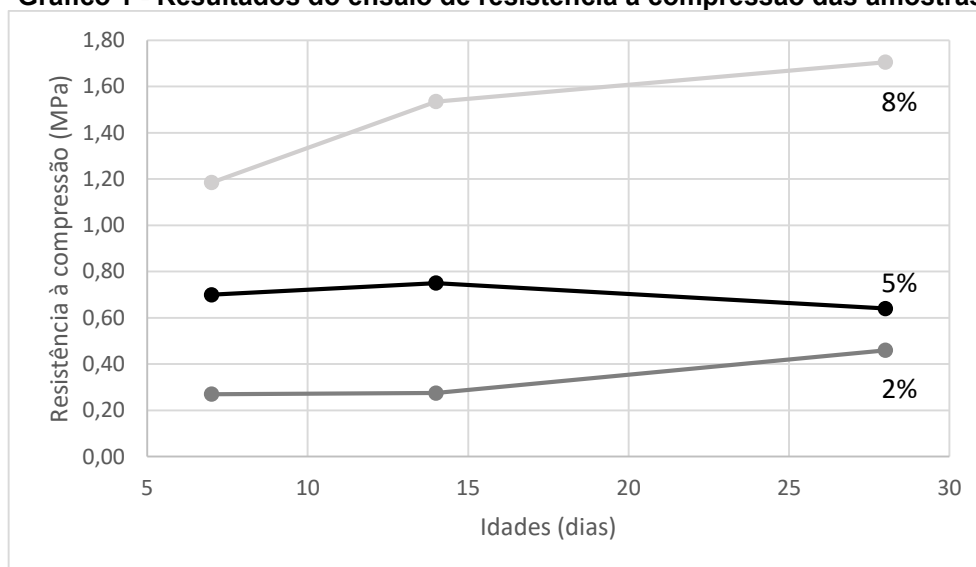
Este ensaio também foi realizado no *campus* da cidade de Pato Branco, por meio do equipamento da marca Panalytical, modelo EMPYREAN, sob os mesmos aspectos do item 6.1.4.

7 RESULTADOS

7.1 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são demonstrados no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Resultados do ensaio de resistência à compressão das amostras



Fonte: Autoria própria (2021)

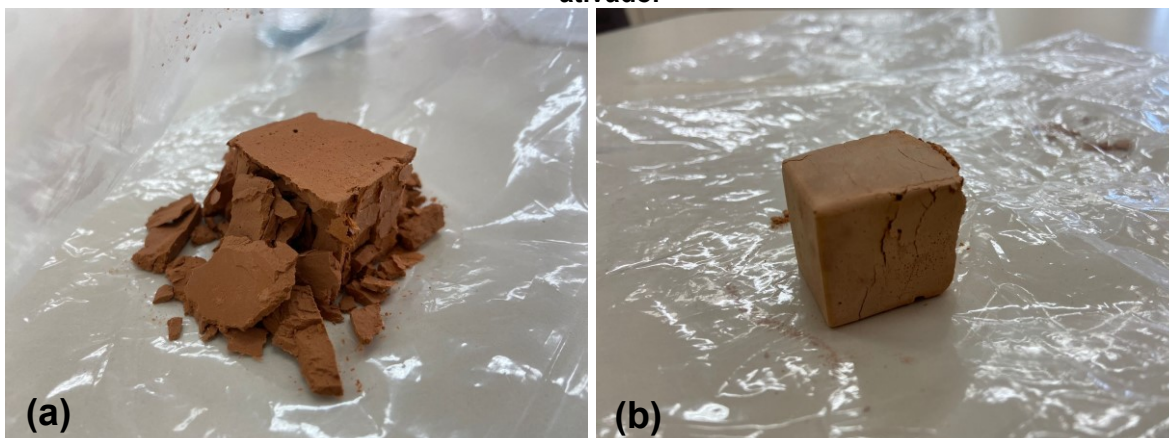
Nele é possível observar um aumento no ganho de resistência em conformidade com o aumento do percentual do teor de ativador, ainda que pouco significativa, com resultados não satisfatórios.

Entretanto, como há um número insuficiente de amostras por percentual de ativador, não é possível afirmar com certeza um aumento significativo de resistência nas amostras com 8%, em comparação com as demais, por meio de uma análise estatística mais aprofundada.

Também, como não há normas nacionais ou internacionais para o cimento álcali ativado, a resistência mínima considerada foi baseada no cimento Portland usual de 25 MPa, muito superior ao obtido no ensaio.

A Fotografia 6 apresenta os corpos de prova com (a) 5% e (b) 8% de ativador, após submetidos ao ensaio de compressão.

Fotografia 6 - Corpos de prova, pós ensaio de compressão, com (a) 5% de ativador e (b) 8% de ativador



Fonte: Autoria própria (2020)

Visualmente, foi possível observar um esmagamento dos corpos de provas com 2% e 5% em todas as idades, como mostrado em (a) 5% de ativador, não ocorrendo uma ruptura do material, possivelmente causado pelo excesso de porosidade presente na cerâmica.

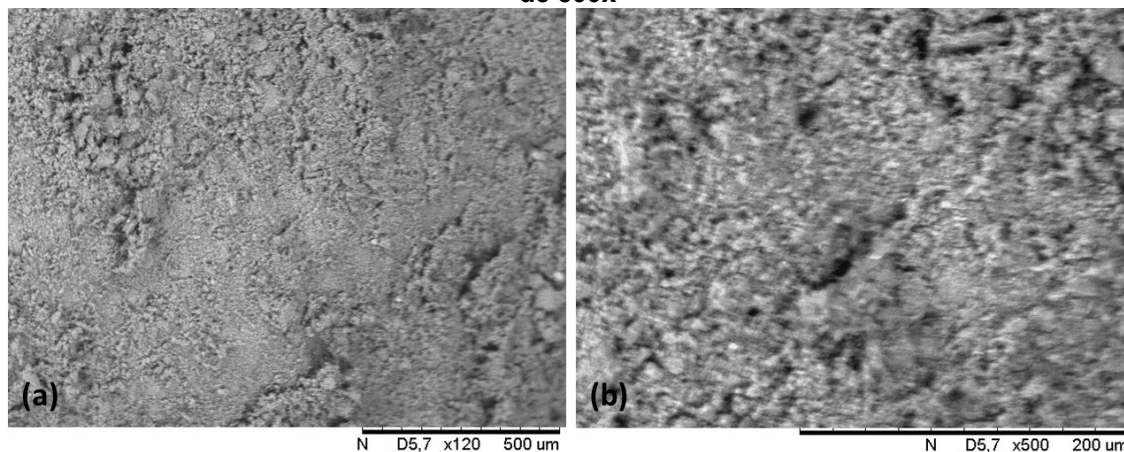
Por sua vez, as amostras com (b) 8% de ativador, foram as únicas que apresentaram ruptura bem definida no ensaio, ainda que em curto prazo e pouco significativas.

7.2 Análise microestrutural

7.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Figura 12 apresenta a análise de MEV das amostras com 2% de ativador (a) ampliação de 120x e (b) de 500x.

Figura 12 - Análise MEV das amostras com 2% de ativador (a) ampliação de 120x, (b) ampliação de 500x

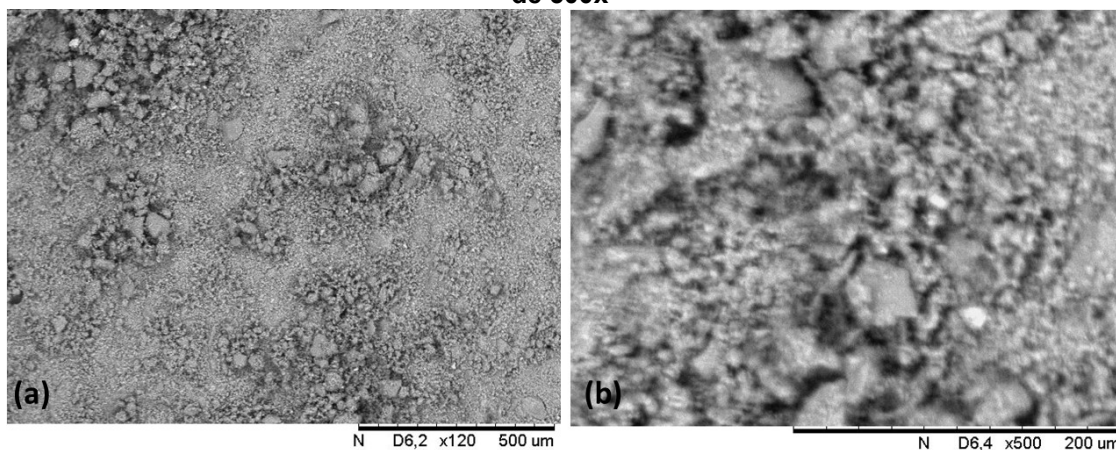


Fonte: Autoria própria (2021)

Não é possível observar os compostos hidratados, uma vez que o material se apresentava muito quebradiço e coberto de pó, devido à baixa resistência apresentada.

A Figura 13 também apresenta a análise de MEV das amostras com (a) ampliação de 120x e (b) de 500x, porém com 5% de ativador.

Figura 13 - Análise MEV das amostras com 5% de ativador (a) ampliação de 120x, (b) ampliação de 500x

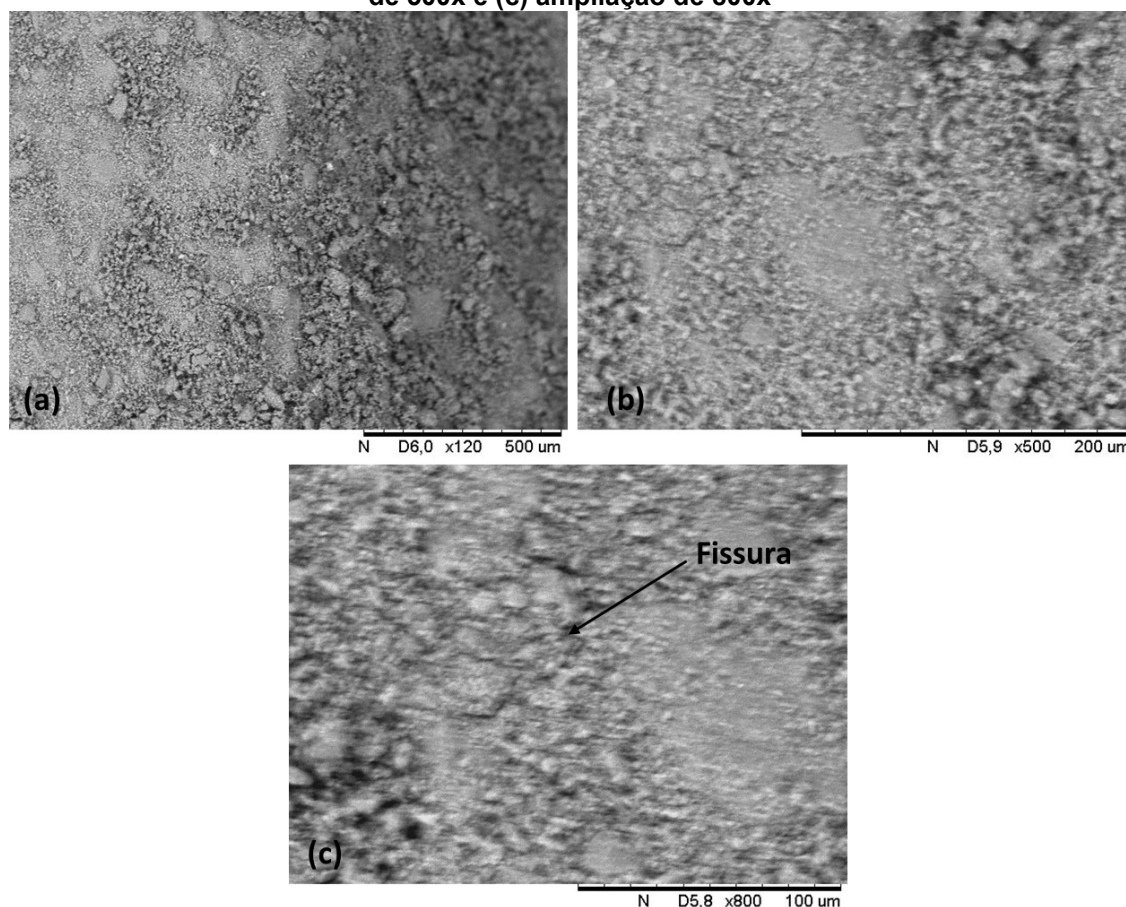


Fonte: Autoria própria (2021)

Como as amostras anteriores, estas também se apresentaram muito porosas, impossibilitando uma leitura mais clara e objetiva a partir da imagem obtida.

Por fim, a Figura 14 apresenta a análise de MEV das amostras com 8% de ativador (a) ampliação de 120x, (b) de 500x e (c) de 800x.

Figura 14 - Análise MEV das amostras com 8% de ativador (a) ampliação de 120x, (b) ampliação de 500x e (c) ampliação de 800x

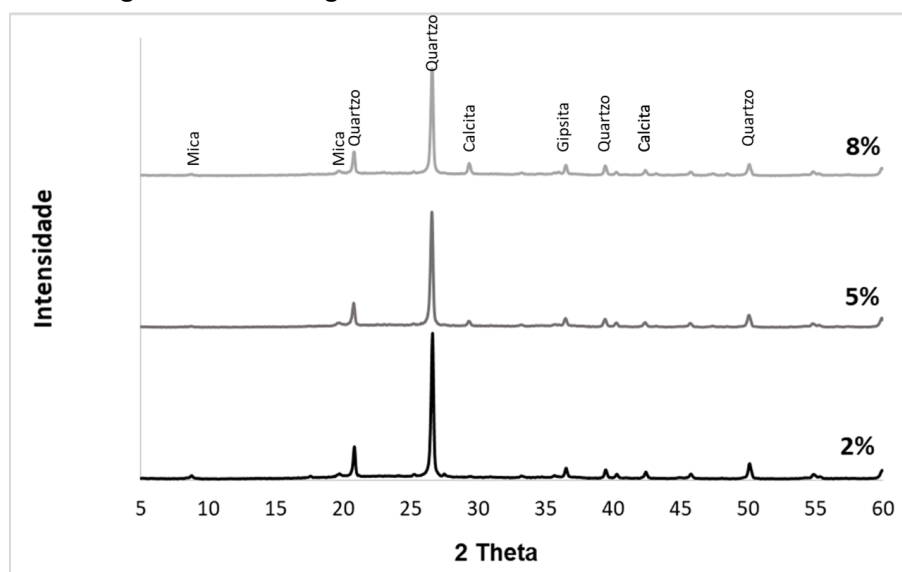


Fonte: Autoria própria (2021)

Nestas, por sua vez, apesar de apresentarem imagens laboratoriais com distorções semelhantes às duas primeiras análises, é possível observar que as amostras com 8% se encontravam com uma estrutura mais densa, responsável por conferir uma maior resistência em relação às demais, ainda que na presença de fissuras.

7.2.2 Difração por raios-x (DRX) do cimento

Na Figura 15, tem-se os difratogramas dos resultados dos ensaios de DRX da pasta de cimento, onde o material foi analisado conforme variação de temperatura e obtendo-se a quantidade proporcional dos compostos, para facilitar o comparativo entre as três variações de ativador. Já nessa etapa, foi esperado um material cristalino.

Figura 15 - Difratoogramas dos ensaios de DRX do cimento

Fonte: Autoria própria (2021)

Na análise comparativa, pode-se observar uma variedade de picos, principalmente na indicação da presença de quartzo em todos os corpos de prova, com pequena redução na magnitude de acordo com o aumento de aditivo no material. Além disso, próximo aos 29°C, nota-se o aparecimento de um pico de calcita, também intensificado pelo aumento de ativador, possivelmente ocasionado pela reação química entre o quartzo (sílica) e o óxido de cálcio presente no cimento, fator que pode justificar o aumento da resistência observado no ensaio de compressão.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, foi analisado a viabilidade de inserção do resíduo de cerâmica vermelha para obtenção do cimento álcali ativado por meio de amostras submetidas a diferentes teores de ativador e idades.

A partir de ensaios laboratoriais de resistência à compressão, bem como de análises microestruturais, pôde-se concluir que o resíduo cerâmico, sob os teores de ativador utilizados, não pode ser empregado como cimento álcali ativado, devido às baixas resistências encontradas e composição altamente porosa.

Apesar do resultado obtido, foi possível observar, graficamente, um aumento da resistência do material proporcional ao aumento do teor de ativador na amostra, sendo a de 2% a menos resistente, enquanto a de 8% se apresentou mais resistente, ainda que de forma insuficiente.

Dessa forma, a porcentagem ideal entre ativador e resíduo não foi encontrado numericamente, mas pôde-se obter um direcionamento de novas pesquisas, a partir de um maior teor de ativador na mistura.

Ainda, por meio das análises microestruturais, pôde-se observar que o resíduo cerâmico utilizado apresentava uma composição atômica cristalina ao invés de amorfa, a qual dificultou a ocorrência das reações químicas para formação de compostos hidratados, responsáveis por conferir resistência ao cimento. Assim, pode ser interessante um estudo da calcinação do resíduo antes de continuar uma possível pesquisa futura de mesmo segmento.

Além disso, foi possível identificar o material como um potencial geopolímero, pela baixa presença de óxido de cálcio (CaO), em contrapartida da alta presença da sílica e alumina na composição da matéria prima do material (RCV). Isso também pode justificar a baixa resistência do cimento estudado, sendo necessário uma maior quantidade de ativador para satisfazê-la, uma vez que o cimento Portland é rico em CaO, responsável por tal característica.

Por fim, a partir do ensaio de DRX do cimento, foi possível identificar uma leve diminuição do pico de quartzo e aumento de calcita formada, possivelmente, pela reação entre a sílica (quartzo) e o óxido de cálcio, responsável também por conferir resistência ao material, o que justifica a maior resistência apresentada pela amostra com 8% de ativador, em comparação com as demais. Este fator também é muito pertinente para motivar uma continuação da pesquisa com teores maiores de ativador.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por fim, com o intuito de se obter com êxito um cimento álcali ativado, baseado nas conclusões retiradas deste trabalho, é possível nortear novos estudos e aprimoramentos a partir de algumas mudanças observadas por meio deste estudo, como:

- Estudo da calcinação do material utilizado;
- Aumento da dosagem do teor de ativador;
- Aumento no número de amostras por teor para análises estatísticas;
- Utilização de outro material em substituição ao resíduo cerâmico vermelho (cinza de casca de arroz, por exemplo);
- Utilização de outro material em substituição ao cimento como ativador (hidróxido de sódio, por exemplo).

REFERÊNCIAS

ABCERAM (Associação Brasileira De Cerâmica). **Cerâmica No Brasil – Considerações Gerais**. Disponível em: <<https://abceram.org.br/consideracoes-gerais/>>. Acesso em: 05 maio. 2020a.

ABCERAM (Associação Brasileira De Cerâmica). **Cerâmica Vermelha**. Disponível em: <<https://abceram.org.br/ceramica-vermelha/>>. Acesso em: 10 jun. 2020b.

ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). **A indústria do cimento e o desenvolvimento do Brasil**. 23 maio. 2014. Disponível em: <<https://abcp.org.br/imprensa/a-industria-do-cimento-e-o-desenvolvimento-do-brasil/?politica=sim>>. Acesso em: 10 maio. 2020.

ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). **Cimento: diferentes tipos e aplicações**. 21 fev. 2018. Disponível em: <<https://abcp.org.br/imprensa/artigos/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/?politica=sim>>. Acesso em: 7 jun. 2020.

ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7. ed. Boletim técnico 106, São Paulo, 2002. 28 p. Disponível em: <<https://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2012/11/28-Guia-basico-de-utilizacao-do-cimento-portland.pdf>>. Acesso em: 15 maio. 2020.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 12653: Materiais Pozolânicos – Requisitos**: Rio de Janeiro, 2014.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**: Rio de Janeiro, 2015.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**: Rio de Janeiro, 2017.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**: Rio de Janeiro, 2018.

AMERICAN CERAMIC SOCIETY. **A Brief History of Ceramics and Glass**. Disponível em: <<https://ceramics.org/about/what-are-engineered-ceramics-and-glass/brief-history-of-ceramics-and-glass>>. Acesso em: 06 jul. 2020a.

AMERICAN CERAMIC SOCIETY. **Structure and Properties of Ceramics**. Disponível em: <<https://ceramics.org/about/what-are-engineered-ceramics-and-glass/structure-and-properties-of-ceramics>>. Acesso em: 5 jul. 2020b.

AMORIM, L. V., PEREIRA, A. S. G., NEVES, G. A., FERREIRA, H. C. Avaliação da atividade pozolânica de resíduos cerâmicos da construção civil. **Anais do 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. Florianópolis-SC, 1999.

ANICER: ANICER – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS INSÚSTRIAS CERÂMICAS. (2020). Disponível em: <<https://www.anicer.com.br/anicer/setor/>>. Acesso em: 10 maio. 2020.

AZEREDO, N.G. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas em blocos cerâmicos estruturais através do método de ultrassom na região de Campos dos Goytacazes - RJ**. 2015. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – RJ, 2015.

BEN HAH, M.; LOTHENBACH, B.; LE SAOUT, G.; WINNEFELD, F. Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag — part I: effect of MgO, **Cement and Concrete Research**, v. 41, ed. 9, 955–963 p., 2011a.

BEN HAH, M.; LE SAOUT, G.; WINNEFELD, F.; LOTHENBACH, B. Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags, **Cement and Concrete Research**, v. 41, ed. 3, 301–310 p., 2011b.

BEN HAH, M.; LOTHENBACH, B.; LE SAOUT, G.; WINNEFELD, F. Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag — Part II: Effect of Al₂O₃. **Cement and Concrete Research**, v. 42, ed. 1, 74–83 p., 2012.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. (1986) **Resolução CONAMA nº. 001, de 23 de janeiro de 1986**. Estabelece as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente: CONAMA, 1986. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Imprensa Oficial.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. (2002) **Resolução CONAMA nº. 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil. Ministério do Meio Ambiente: CONAMA, 2002. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Imprensa Oficial.

BUSTAMANTE, G.M.; BRESSIANI, J.C. A Indústria Cerâmica Brasileira. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 5, n. 3, jun. 2000.

CABRAL JUNIOR, M.; MOTTA, J. F. M.; ALMEIDA, A. S.; TANNO, L.C. RMI's: argila para cerâmica vermelha. IN: Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações. 2.ed. Rio de Janeiro: **CETEM/MCTI**, 2008. p. 747-770.

CABRAL, S.C.; AZEVEDO, M.A. Materiais alternativos para adição ao cimento Portland. **Vozes dos Vales**, Minas Gerais, n. 10, p. 1-16, out. 2016. Disponível em: <http://site.ufvjm.edu.br/revistamultidisciplinar/files/2016/09/Stenio23.pdf>. Acesso em: 27 maio. 2020.

CALDAS, A.H.M.C. **Análise da disposição final dos resíduos de construção e demolição na cidade de João Pessoa**. 2016. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

CBIC (Câmara Brasileira da Indústria da Construção). **Estímulo à Construção resulta em impacto social positivo para o País**. 30 jan. 2019. Disponível em: <<https://cbic.org.br/estimulo-a-construcao-resulta-em-impacto-social-positivo-para-o-pais/>>. Acesso em: 10 maio. 2020.

CHEN, Y. Z.; PU, X. C.; YANG, H; DING, Q. J. Alkali Aggregate Reaction in Alkali Slag Cement Mortars. **Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Ed.**, v. 17, ed. 2, 60-62 p., 2002.

CHEN, W.; BROUWERS, H. J. H. The hydration of slag, part 1: reaction models for alkali-activated slag. **Journal of Materials Science**, v.42, ed. 2, 428–443 p., 2007. DOI 10.1007/s10853-006-0873-2.

FRARE, A. **Cimentos álcalis ativados: efeito da cura térmica no desenvolvimento da resistência mecânica**. 2016. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

GARCIA, E.; *et al.* Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV): Uma Alternativa como Material Pozolânico. São Paulo: **Cerâmica Industrial**, 2014. Disponível em: <<https://ceramicaindustrial.org.br/article/587657577f8c9d6e028b4809/pdf/ci-19-4-587657577f8c9d6e028b4809.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2020.

GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012**: uma análise crítica a partir de métodos complementares. Universidade Federal do Paraná (Dissertação de mestrado), 2014.

GÓMEZ-ZAMORANO, L.Y.; GARCÍA-GUILLÉN, G.; ACEVEDO-DÁVILA, J. L. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland com substituições de escória granulada de alto forno, cinza volante e metacaulim: efeito da utilização de dois aditivos superplastificantes. **Alconpat**, Mérida, v. 5, n. 3, p. 203-2018, dez. 2015.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de cimento Portland**. Cap. 29. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto: IBRACON. 2010.

HEWLETT, P. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4 ed. Elsevier Science & Technology Books. 2004. ISBN: 0750662565.

HOLANDA, R.M.; SILVA, B.B. Cerâmica Vermelha – Desperdício na Construção Versus Recurso Natural Não Renovável: Estudo de Caso nos Municípios de Paudalho/PE e Recife/PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 4, p. 872-890, fev. 2011.

HOLMES, O.W.; The Autocrat of the Breakfast Table. In: HOLMES, Oliver Wendell. **The Autocrat of the Breakfast Table**: every man his own boswell. Boston: Phillips, Sampson, 1858. Cap. 11.

INDIAN STANDARD. **IS 1344**: Specification for calcinated clay pozzolana. Índia, 19821. Disponível em: <<https://law.resource.org/pub/in/bis/S03/is.1344.1981.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2020.

JOHN, M. V. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 199f. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113p. Tese (Livre Docência)

– Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2000.

JUENGER, M. C. G.; WINNEFELD, F.; PROVIS, J. L.; IDEKER, J. H. Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, v. 41, 1232–1243 p., 2011.

KRIVENKO, P. Why Alkaline Activation – 60 Years of the Theory and Practice of Alkali-Activated Materials. **Journal Of Ceramic Science And Technology**. [S.L.], ago. 2017.

LANGARO, E. A. **Cimento álcali ativado a partir da valorização da escória de alto forno a carvão vegetal**. 2016. 139 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

LANGARO, E. A.; *et al.* Estudo do teor de ativador no desempenho de cimentos álcali ativados feitos com escórias ácidas em idades iniciais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 60., 2016, Águas de Lindóia. **Anais....** Águas de Lindóia, 2016. p. 1-13.

LARUCCIA, Mauro Maia. Sustentabilidade e impactos ambientais da construção civil. **Revista ENIAC Pesquisa**, Guarulhos, v. 3, n. 1, p. 69-84, jun. 2014.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIMA, André Barbosa de. **O processo produtivo do cimento portland**. 2011. 39 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LIMA, E.M.; FERNANDES, R.T.V.; DANTAS, S.L. Quantificação de CO₂ emitido decorrente dos materiais empregados na construção de uma residência unifamiliar. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA CONTECC', 2018, **Anais...** Maceió: Contecc, 2018. p. 1-5. Disponível em: <https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/171_qdceddm encduru.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2020.

MACEDO, R. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, [S.L.], v. 54, n. 332, p. 411-417, dez. 2008. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132008000400005>. Acesso em: 25 abr. 2020.

MACIOSKI, G. **Estudo da álcali-ativação de pó de blocos cerâmicos com cal hidratada**. 2017. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 674 p. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO, J. R. S. **A reciclagem de resíduos de cerâmica para utilização no processo de argamassa**. 2017. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, Ppgep/itec, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

MINEROPAR. Avaliação do Potencial de argilas para uso em cerâmicas vermelhas. 1a ed. **Relatório final**. Paraná, 2009.

MME (Ministério de Minas e Energia). Anuário Estatístico 2019. (2019). Setor de transformação de não metálicos. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: maio 2020.

MODRO, N.L.R.I. Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET. **Revista Matéria**, v. 14, n. 1, pp. 725 – 736, 2009.

MOURA, C. A. M.; SILVA, R.B.; REZENDE, G. B. M.; NEVES JUNIOR, A. Caracterização de resíduos telha cerâmica vermelha de fontes distintas visando proposta coprocessamento como matéria-prima para clínquer Portland. **Scientia Cum Industria**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 31-37, 25 dez. 2018. Universidade Caixias do Sul. <http://dx.doi.org/10.18226/23185279.v6iss3p31>.

NEVILLE, A. M.; *et. al.* Tecnologia do Concreto. 2 ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2013. 472 p.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. **Construction and Building Materials**, v. 22, ed. 7, 1305–1314 p. 2008a.

PAULA, L.G. **Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Co-Processamento de Misturas de Resíduos**. 2009. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Conversão de Energia, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

PEDROTI, L.G. **Desenvolvimento de massa cerâmica com o uso de resíduo de granito para obtenção de blocos cerâmicos prensados de encaixe de matriz argilosa**. 2011. 191 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes - RJ, 2011.

PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; CASTROGOMES, J. P.; SANTOS, M. S. S. The Potential Pozzolanic Activity of Glass and Red-Clay Ceramic Waste as Cement Mortars Components. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 197-203, 2012.

PINTO, T. A. **Introdução ao Estudo dos Geopolímeros**. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, 2006. Disponível em: <<http://www.geopolymer.com.br/PDF/introducao.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2020.

PROVIS, John L.; PALOMO, Angel; SHI, Caijun. Advances in understanding alkali-activated materials. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 78, p. 110-125, dez. 2015. Elsevier BV.

PUERTAS, F. Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas de futuro. **Materiales de Construcción**, v. 45, n. 239, 1995. ISSN 0465- 2746.

PUERTAS F.; *et. al.* Morteros de Escoria Activada Alcalinamente. **Propiedades y Durabilidad**, 2003.

SALES, A. T. C.; ALFERES FILHO, R. dos S. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 113-125, jan./mar. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

SEBRAE. Construção civil: cerâmica vermelha. **Boletim de Inteligência**. Dez. 2015. Disponível em: <[http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/\\$File/5846.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/$File/5846.pdf)>. Acesso em: 10 jul. 2020.

SEEG (Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa). **EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL (1990-2013) SETOR DE ENERGIA E PROCESSOS INDUSTRIAIS**. São Paulo: Observatório do Clima, 2015. 64 p. Disponível em: http://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2015/01/energia_industria_2015.pdf. Acesso em: 23 jun. 2020.

SEFF, L.; FOLGUERAS, M.V.; HOTZA, D. Hidratação do Cimento CP V Ari - RS: Influência da Água nas Reações de Hidratação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 49., 2005, São Pedro. **Anais...** Joinville, 2005.

SHI, C. et al. **Classification and Characteristics of Alkali-Activated Cements**. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012.

SILVA, R.J. **Análise energética de plantas de produção de cimento Portland**. 1994. 246 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento). **Dados do setor**. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>>. Acesso em: 22 abr. 2020.

SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento). **Roadmap Tecnológico do Cimento**. 2019. Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Roadmap_Tecnologico_Cimento_Brasil_Book-1.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2020.

VIEIRA, A. A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concreto**. 2005. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

WBCSD (*World Business Council For Sustainable Development*). **The Cement Sustainability Initiative**. Disponível em: <<http://docs.wbcsd.org/2009/07/CSI-RecyclingConcrete-FullReport.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2020.

YE, H.; RADLIŃSKA, A. Shrinkage mechanisms of alkali-activated slag. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 88, p. 126-135, out. 2016. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.07.001>.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1989. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrografia. 191p.

ZAWRAH, M.F.; GADO, R.A.; FELTIN, N.; DUCOURTIEUX, S.; DEVOILLE, L.. Recycling and utilization assessment of waste fired clay bricks (Grog) with granulated blast-furnace slag for geopolymer production. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.L.], v. 103, p. 237-251, set. 2016. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2016.08.001>.