



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAS
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

FRANCISCO ROBSON DOS SANTOS

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA E GESSO DA
CONSTRUÇÃO CIVIL NAS PROPRIEDADES DO CIMENTO PORTLAND**

MOSSORÓ-RN

2019

FRANCISCO ROBSON DOS SANTOS

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA E GESSO DA
CONSTRUÇÃO CIVIL NAS PROPRIEDADES DO CIMENTO PORTLAND**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, PPGCEM, da Universidade Federal Rural do Semiárido, UFERSA, como parte das exigências do programa para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais. Linha de Pesquisa: Aplicações tecnológicas de materiais regionais.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Klebson Gomes dos Santos - UFERSA.

Co-Orientador: Prof^a. Dr. Andarair Gomes dos Santos - UFERSA

MOSSORÓ-RN

2019

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semiárido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S231e Santos, Francisco Robson dos .
EFEITOS DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE CERÂMICA
VERMELHA E GESSO DA CONSTRUÇÃO CIVIL NAS
PROPRIEDADES DO CIMENTO PORTLAND / Francisco
Robson dos Santos. - 2019.
85 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Klebson Gomes
dos Santos.

Coorientadora: Prof. Dr. Andarair Gomes dos
Santos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais, 2019.

1. Sustentabilidade. 2. resíduos. 3.
reciclagem. 4. cimento ecológico. I. Gomes dos
Santos, Prof. Dr. Francisco Klebson, orient. II.
Gomes dos Santos, Prof. Dr. Andarair, co-orient.
III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semiárido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA E GESSO DA
CONSTRUÇÃO CIVIL NAS PROPRIEDADES DO CIMENTO PORTLAND**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, PPGCEM, da Universidade Federal Rural do Semiárido, UFRSA, como parte das exigências do programa para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

DATA DE APROVAÇÃO: 02/04/2019

BANCA EXAMINADORA

FW Klebson G. Santos

Prof. Dr. Francisco Klebson Gomes dos Santos – UFRSA
Orientador

Andaraí Santos

Profª. Drª. Andaraí Gomes dos Santos – UFRSA
Co-orientadora

Clodomiro Alves Júnior

Prof. Dr. Clodomiro Alves Júnior – UFRSA
Membro interno ao programa

Wagner Lopes Torquato

Prof. Dr. Wagner Lopes Torquato – IFRN
Membro externo à instituição

DEDICATÓRIA

Ao Deus que sempre abençoa.
Ilumina as nossas vidas.
A Ele seja dada toda honra
e toda glória!

AGRADECIMENTO

Aos meus pais, por toda motivação e incentivo.

Ao Prof. Dr. Francisco Klebson, por toda paciência e atenção durante a orientação.

A Cimento Apodi por apoio tecnológico.

Aos técnicos de laboratório da Cimento Apodi, pelo apoio.

À minha esposa e filha, pelo amor e carinho.

Aos meus irmãos.

Ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, pela oportunidade.

A todos os professores do programa, pelo apoio sem medir esforços.

À UFERSA, por todo apoio acadêmico para meu crescimento profissional.

A todos que, direto e indiretamente, contribuíram para este trabalho, o meu muito obrigado.

"É graça divina começar bem. Graça maior é persistir na caminhada certa. Mas a graça das graças é não desistir nunca."

(Dom Helder câmara).

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal inserir resíduos de cerâmica vermelha e gesso reciclado da construção civil no processo de produção de cimento Portland Pozolânico. Os mesmos substituem parcialmente o clínquer do cimento, propiciando um duplo benefício ao meio ambiente: imobilizar rejeitos industriais agregando-lhes valor e reduzir o consumo de cimento que é grande emissor de gases poluentes e consumidor de recursos naturais. Foram realizados ensaios em laboratório mediante um planejamento fatorial utilizando o Software *Statistica* 12.0. As técnicas usadas para as análises das amostras foram a Difração e espectrometria de fluorescência de Raios-X, análise química da atividade pozolânica da cerâmica vermelha (IAP), ensaios mecânicos, porosidade, resistência aos Sulfatos e reação álcali-agregado. Através dos ensaios foi possível atestar a viabilidade do uso dos resíduos na produção do cimento, assim como suas características e propriedades. Foi observado que até 30% de adição de resíduo de cerâmica vermelha combinado com 4,5% de gesso não afeta a qualidade do cimento obtido quando comparado com as exigências das normas vigentes.

Palavras-chave: Sustentabilidade; resíduos, reciclagem, cimento ecológico.

ABSTRACT

The present work has as main objective to insert residues of red ceramics and recycled plaster of the civil construction in the process of Portland cement Pozzolanic. They partially replace the cement clinker, providing a double benefit to the environment: immobilize industrial waste adding value and reduce the consumption of cement that is a major emitter of polluting gases and consumer of natural resources. Laboratory tests were performed using a factorial design using Software Statistica 12.0. X-Ray fluorescence spectrometry, chemical analysis of pozzolanic activity of red ceramics (IAP), mechanical tests, porosity, resistance to sulfates and alkali-aggregate reaction were used. Through the tests, it was possible to attest the viability of the residues in the cement production, as well as its characteristics and properties. It was observed that up to 30% of the addition of red ceramic residue combined with 4.5% of gypsum does not affect the quality of the cement obtained when compared to the requirements of the current norms.

Keywords: Sustainability; waste, recycling, ecological cement.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Tipos de Cimentos Normatizados no Brasil.....	25
Tabela 2-Principais constituintes do clínquer Portland.	29
Tabela 3 - Caracterização química do Clínquer e Calcário	46
Tabela 4 - Planejamento experimental Cimento Pozolânico NBR 5736-1991	49
Tabela 5 - Composição química dos resíduos de cerâmica vermelha	56
Tabela 6 - Resultado da Atividade Pozolânica do Resíduo de Cerâmica Vermelha	60
Tabela 7 - Composição química do RGC	61
Tabela 8 - Composição química e física das amostras de cimento obtidos.....	74
Tabela 9- Lista de reagentes.	75
Tabela 10- Lista de equipamentos.	76
Tabela 11- Lista de Normas.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Fluxograma da produção de cimento (Adaptado de: Mehta e Monteiro, 2006).....	21
Figura 2- Fluxograma simplificado da metodologia.	44
Figura 3 - Localização do fornecedor da amostra de RCV (Adaptado de: Ferrão <i>et al.</i> , 2014).	45
Figura 4 - Gráfico de Pareto para resistência à compressão.....	55
Figura 5-Difratograma do RCV.....	58
Figura 6-Difratograma do RGC (comparação Natural x resíduo).....	62
Figura 7-Tempos de pega dos cimentos ecológicos.	63
Figura 8-Desenvolvimento de resistência à compressão.....	65
Figura 9-Resistência à compressão aos 28 dias de Cura	65
Figura 10-Porosidade das amostras de cimento ecológico.....	67
Figura 11 - Variação dimensional das barras prismáticas e avaliação da resistência a sulfatos.	69
Figura 12- Variação dimensional das barras prismáticas das reações Álcalis-sílica.....	70
Figura 13- 2kx e 5kx da amostra com 30% de RCV + 4,5% de RGC.	72
Figura 14- Álcalis solúveis e totais.	75

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira de cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas técnicas
ASTM	<i>American Society For Testing And Materials</i>
CP V ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CONAMA	Conselho Nacional Do Meio Ambiente
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
C ₂ S	Silicato dicálcico
C ₄ AF	Ferro-Aluminato tetracálcico
DRX	Difração de Raios-X
FRX	Fluorescência de Raios-X
FSC	Fator de saturação da cal
IAP	Índice de atividade pozolânica
ICDD	<i>International Center for Diffraction Data</i>
kV	Kilo Volts
MA	Módulo de Alumínio
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MS	Módulo de sílica
PNRS	Política Nacional de resíduos sólidos
RAS	Reação Álcali-Sílica
RCV	Resíduos de cerâmica vermelha
RGC	Resíduos de gesso da construção

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 OBJETIVOS.....	19
2.1 OBJETIVO GERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 A indústria Cimenteira.....	20
3.2 Processo Produtivo	21
3.2.1 Tipos de cimento	24
3.3 Contribuição Ambiental.....	26
3.4 Pozolanas (Resíduo de cerâmica vermelha)	27
3.4.1 Indústria da Cerâmica Vermelha.....	27
3.4.2 Uso de pozolana no cimento	28
3.4.3 Efeitos da pozolana no cimento	29
3.5 Gesso reciclado	32
3.5.1 Gipsita Natural	32
3.5.2 Obtenção do gesso.....	33
3.6 Resíduos gerados na construção	35
3.7 Interação e efeito do gesso nas propriedades do cimento.....	35
3.8 Parâmetros de caracterização do cimento ecológico	36
3.8.1 Tempo de Pega	37
3.8.2 Resistência Mecânica à Compressão.....	38
3.8.3 Determinação da porosidade e absorção de água.....	39
3.8.4 Mitigação da reação álcali-agregado.....	40
3.8.5 Determinação de resistência a sulfatos.....	42

3.8.6 Microscopia Eletrônica de Varredura	43
4 MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1 Sequência experimental.....	44
4.2 Materiais e Reagentes	45
4.2.1 Reagentes	45
4.2.2 Equipamentos utilizados	47
4.2.3 Lista de Normas	47
4.3 Caracterização do resíduo de cerâmica vermelha e gesso da construção	47
4.3.1 Índice de atividade pozolânica com cal (IAP) do RCV – NBR NM 5751/92	47
4.3.2 Determinação da composição mineralógica.....	48
4.3.3 Determinação da composição Química.....	48
4.4 Produção do cimento ecológico.....	49
4.5 Caracterização físico-química, mecânica e de durabilidade dos cimentos ecológicos	50
4.5.1 Determinação dos tempos de pega	50
4.5.2 Determinação da resistência à compressão	51
4.5.3 Determinação da porosidade e absorção de água por imersão e fervura	51
4.5.4 Determinação dos álcalis totais e solúveis	52
4.5.5 Determinação da resistência a sulfatos.....	53
4.5.6 Determinação de mitigação da reação álcalis-agregado	53
4.5.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	54
4.6 Análise estatística	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1 Caracterizações dos resíduos	56
5.1.1 Análise Química do RCV.....	56
5.1.2 Análise mineralógica do RCV.....	58
5.1.3 Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal dos resíduos de cerâmica vermelha	59

5.1.4 Análise Química do RGC.....	61
5.1.5 Análise Mineralógica do RGC	62
5.2 Influência dos resíduos nos tempos de pega	63
5.3 Influência dos resíduos na resistência à compressão	65
5.4 Avaliação da Porosidade	67
5.5 Avaliação da durabilidade das argamassas compostas com o cimento ecológico...	69
5.5.1 Resistência aos sulfatos	69
5.5.2 Mitigação da reação álcalis-agregado	70
5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura	72
6 CONCLUSÕES.....	73
ANEXO A	74
ANEXO B	75
ANEXO C	75
ANEXO D	76
ANEXO E	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais preocupações dos pesquisadores nos últimos anos está relacionada à busca por mecanismos capazes de proteger o meio ambiente. Isto se deve ao fato de muitos processos industriais ainda consumirem grandes quantidades de energia, matéria-prima, com o consequente aumento nos níveis de emissões de gases nocivos à natureza (HARBI; DERABLA; NAFA, 2017). A indústria da construção civil, por estar diretamente ligada ao desenvolvimento da humanidade, tem um papel fundamental nesta questão. Pelo fato de sua tecnologia demandar grandes volumes de materiais, energia e recursos, a torna importante na prevenção de uma degradação ambiental irreversível, através da busca por uma tecnologia sustentável e limpa (BULATOVIĆ *et al.*, 2017).

Este ramo industrial tem o concreto como seu principal produto, que devido suas vantagens com relação a outros materiais, tem intensificado cada vez mais seu uso. Este alto consumo traz consigo um aumento nos níveis de produção da indústria cimenteira, que embora tenha melhorado sua contribuição com relação ao meio ambiente, ainda é uma das grandes responsáveis pelas emissões de gases poluentes (MIKULCIC *et al.*, 2016; XU *et al.*, 2017).

Dentre os gases liberados na natureza, o dióxido de carbono (CO₂) se destaca, na qual é produzido durante a formação do clínquer, tanto pela queima de combustíveis fósseis como também devido à decomposição do calcário. Estima-se que para cada tonelada de cimento produzido, quase uma tonelada deste gás seja lançado na atmosfera. Apenas neste processo fabril, são emitidos de 8 a 10% de todo CO₂ antropogênico emitido no planeta e deverá ser de 10 a 15% até 2020 (ABADIE; GOICOECHEA; GALARRAGA, 2016).

Desta forma, faz-se necessário a busca e desenvolvimento de processos e produtos sustentáveis com o intuito de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, o consumo de energia e o esgotamento dos recursos naturais. A utilização de subprodutos ou resíduos como materiais alternativos, tanto na produção cimento como na obtenção do concreto proporcionará uma tecnologia mais sustentável através da criação de um equilíbrio entre desenvolvimento e meio ambiente (YUKSEL *et al.*, 2013; KANNAN *et al.*, 2017).

Assim sendo, vários resíduos têm chamado atenção de muitos pesquisadores e se tornado objeto de estudo. Dentre os principais estão às fontes de sulfato de cálcio, oriundos da construção civil e outros seguimentos industriais e os de caráter pozzolânico, como as cinzas volantes, as microssílicas, as escórias de alto forno, as cinzas de casca de arroz, as cinzas de bagaço de cana, argilas calcinadas e muitos outros. Os mesmos são compostos ricos em

aluminossilicatos de estrutura amorfa, que em proporções adequadas com o cimento, interagem química e fisicamente com os produtos de hidratação do mesmo, modificam a microestrutura do material e melhoram algumas propriedades de argamassas e concretos. Os mesmos podem substituir parcialmente o clínquer do cimento, cada uma com suas características físico-químicas, propiciando um duplo benefício ao meio ambiente: imobilizar rejeitos industriais agregando-lhes valor e reduzir o consumo de clínquer que é grande emissor de gases poluentes e consumidor de recursos naturais (ROBAYO *et al.*, 2016; ROSALES; CABRERA; AGRELA, 2017; NEJAD *et al.*, 2017; ROSELLÓ *et al.*, 2017; KAZMI *et al.*, 2017).

Reciclagem e reaproveitamento de resíduos são formas de contribuir com meio ambiente e pensando nesta temática, a pesquisa busca contribuir para preservação dos recursos naturais e do meio ambiente, uma vez que tem como objetivo estudar a viabilidade de produzir um cimento mais ecológico através da incorporação de resíduos de cerâmica vermelha como material pozolânico e resíduos de gesso da construção civil como retardador de pega do cimento. Abrindo assim horizontes para novas possibilidades do uso do cimento Portland, melhorando suas propriedades de acordo com sua finalidade.

A pesquisa torna-se viável, sobretudo devido à presença de fábricas de cimento na região do semiárido e segundo por esta região ser um potencial em produzir derivados de cerâmicas vermelhas calcinadas, principalmente tijolo e telha. Estima-se que anualmente são produzidos mais de 1500 trilhões de unidades destes produtos no mundo e que quase 7% tornam-se resíduos e são lançados na natureza de forma aleatória, causando um impacto negativo ao meio (ROBAYO-SALAZAR *et al.*, 2017). O gesso por sua vez, por ser um dos materiais mais consumidos na construção civil, há uma grande geração deste durante sua aplicação ou mesmo durante demolição. Mais de 80 milhões de toneladas somente de placas de gesso são geradas anualmente no planeta, que podem causar impactos ambientais se não forem bem gerenciados (SUÁREZ; ROCA; GASSO, 2016). Em muitos países, a reciclagem destes resíduos é uma questão ambiental e obrigação legal. No Brasil, o gesso não pode ser depositado em aterros sanitários, devido ao risco de contaminação do solo, lençóis freáticos e a liberação de gases tóxicos.

Até 2011, através da resolução 307/2002, o CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, classificava o gesso gerado da construção civil, como resíduo classe C, para os quais não existia tecnologia disponível e economicamente viável que permitisse sua reciclagem e recuperação. A partir de maio de 2011, com a resolução 431/2011, passou a ser classificado como Classe B, passível de reciclagem e recuperação. Esta modificação fez com que um produto, antes mal visto ambientalmente, passasse a ser atraente para algumas empresas. As

indústrias cimenteiras surgem neste cenário como uma alternativa viável de reciclagem e reaproveitamento dos mesmos (CHANDARA *et al.*, 2009). Nelas, estes resíduos podem ser adicionados durante a produção de cimento, com objetivo de retardar as reações químicas de hidratação, que muitas vezes acontecem de forma rápida.

Além disso, esta pesquisa pretende também investigar a melhor composição dos cimentos obtidos, avaliando as propriedades físicas, químicas e mecânicas, bem como averiguar as propriedades de durabilidade, como a capacidade de mitigar as reações álcalis-agregado, uma patologia deletéria do concreto e a resistência a meios agressivos, como resistência a sulfatos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Produzir e caracterizar cimento Portland pozolânico incorporando resíduos de cerâmica vermelha (oriundos de olarias) e gesso (reciclado da construção civil) como retardador de pega.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar os resíduos quanto a sua composição química e mineralógica;
- Caracterizar os resíduos de cerâmica vermelha quanto às propriedades pozolânicas;
- Fazer um planejamento fatorial, de forma a obter as substituições possíveis dos resíduos de cerâmica vermelha e gesso reciclado;
- Avaliar as características destes cimentos quanto as suas propriedades químicas, físicas e mecânicas;
- Avaliar o efeito da incorporação quanto à capacidade de mitigar algumas patologias deletérias como reação álcalis-agregado através de ensaios em condições aceleradas de cura;
- Avaliar o efeito da incorporação quanto à capacidade de resistência aos sulfatos quando submetido ao ataque de íons sulfatos em cura acelerada em solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4) de acordo com ASTM C1012/NBR 13583.
- Caracterização microestrutural via microscopia eletrônica de varredura (MEV);

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo abordará a base teórica da presente pesquisa e serão apresentados elementos sobre resíduos de cerâmica vermelha, gesso reciclado e demais assuntos referentes aos mesmos, que servirão como suporte para este trabalho. Serão apresentados trabalhos relacionados ao reaproveitamento de resíduos em matriz cimentícia, como forma de mostrar sólidos resultados nesta área, incrementando assim qualidade aos resultados obtidos.

3.1 A indústria Cimenteira

A indústria de cimento é um setor industrial com alto consumo de energia, de recursos naturais e um dos principais contribuintes para as emissões de gases de efeito estufa (GEE), especificamente a emissão de CO₂. A mesma é responsável por cerca de 6-8% do total de emissões de carbono, e o subsetor de cimento consome aproximadamente 12-15% da energia industrial total, tornando-se assim o segundo maior contribuinte de CO₂ logo após a indústria de energia. Contemporaneamente, a produção de cimento é um importante indicador representativo da construção da infraestrutura da sociedade. Nos últimos 100 anos, a população mundial cresceu de 1,5 bilhão para 7 bilhões, sendo que quase 3 bilhões de pessoas vivem hoje em torno das cidades. A taxa de população e urbanização continua aumentando anualmente, especialmente nos países em desenvolvimento, fazendo com que este ramo continue com a produção sempre crescente (SHEN *et al.*, 2017).

A produção de cimento envolve a mineração de matérias-primas como calcário, argilas e até passivos ambientais, para serem triturados e posteriormente queimados a quase 1450°C. O resultado disso é a formação do clínquer, principal componente do cimento na qual é composto por várias fases cristalinas, das quais as mais importantes são: alita, belita, aluminato e ferrita. Alita e belita são fases de silicato de cálcio, consistindo apenas de CaO e SiO₂, sendo que a alita é uma fase de silicato tricálcio (Ca₃SiO₅) e a belita uma fase de silicato dicálcico (Ca₂SiO₄). A fase formada pela reação de CaO puro e Al₂O₃ puro, é uma fase de aluminato tricálcico (Ca₃Al₂O₆) e a fase de ferrita, formada por CaO puro, Al₂O₃ e Fe₂O₃ é uma fase de aluminoferrite de tetracálcio (Ca₄Al₂Fe₂O₁₀) e são estes compostos responsáveis pelas características de argamassas e concretos de resistência e dureza (QUEIROZ *et al.*, 2013).

Nesta etapa produtiva do cimento ocorrem os altos índices de consumo de energia e emissão de gases poluentes antropogênicos, emitindo cerca de 0,81 toneladas de CO₂ por cada

tonelada de cimento produzido. Esta grande quantidade de dióxido de carbono é gerada por quatro diferentes fontes. Desta emissão, 40% são causadas pela queima de combustível fóssil, 10% é devido ao transporte de matérias-primas bem como a geração de eletricidade e o restante (quase 50% da emissão total na fábrica de cimento) é gerado pela decomposição de calcário (BENHELAL; ZAHEDI; HASHIM, 2012).

O clínquer obtido nesta etapa produtiva é misturado a outros componentes como as escórias, as pozolanas, especialmente com o gesso para formar os diversos tipos de cimento que são então comercializados. Portanto uma das formas possíveis para fazer com que este setor passe de vilão a grande contribuinte sustentável, é através da tentativa de substituição parcial do clínquer, principalmente com passivos ambientais, como forma de minimizar as emissões de gases poluentes e o grande consumo de recursos naturais (QUEIROZ *et al.*, 2013).

3.2 Processo Produtivo

A Figura 1 mostra um fluxograma simplificado do processo via seco para fabricação de cimento Portland.

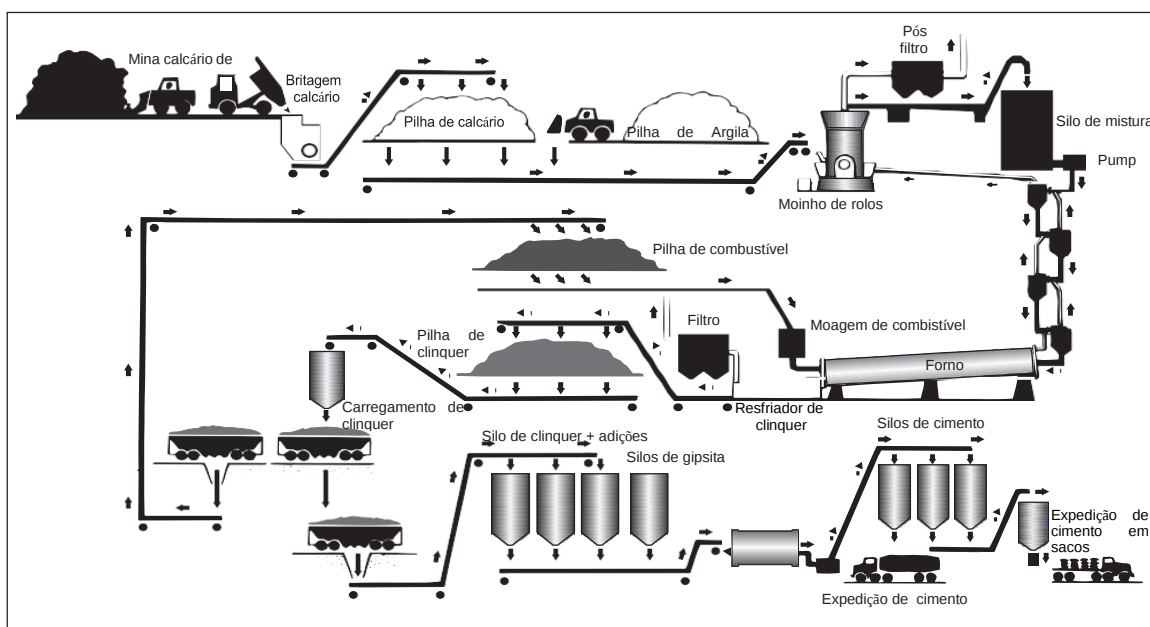


Figura 1-Fluxograma da produção de cimento (Adaptado de: Mehta e Monteiro, 2006)

Há duas rotas possíveis para fabricação de cimento, uma se dá pela moagem e homogeneização da mistura bruta realizada sob a forma de uma pasta contendo 30% a 40% de água. No entanto, fábricas de cimento modernas optam por um processo via seco, mais eficiente energeticamente do que o processo via úmido. Para a produção de clínquer, os fornos de processo via seco são equipados com pré-aquecedores em suspensão de múltiplos estágios, responsáveis por permitirem a troca de calor eficiente entre gases quentes e a mistura crua, exigindo assim um consumo de energia de combustível da ordem de 800 kcal/kg de clínquer contra os 1400kcal/kg para os fornos de processo úmido (BENHELAL; ZAHEDI; HASHIM, 2012).

O processo atual de produção de cimento pela rota via seca pode ser dividida em 3 etapas fundamentais: o tratamento da matéria ainda crua, processo a altas temperaturas e pós tratamento de clínquer/cimento. Como os silicatos de cálcio são os principais constituintes do cimento Portland, a matéria prima para a produção de cimento deve fornecer cálcio e sílica em formas e proporções adequadas. Materiais com base em carbonato de cálcio que ocorrem naturalmente, como calcário, giz, marga e conchas do mar, são as fontes industriais comuns de cálcio, tendo a argila e a dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) geralmente como impurezas (BENHELAL; ZAHEDI; HASHIM, 2012).

As matérias primas mineradas são trituradas e, dependendo das flutuações na composição química, são separadamente pré-homogeneizadas para fornecer a consistência adequada da qualidade do produto. Após esta etapa, as matérias primas são moídas e secas simultaneamente em moinhos varridos a ar. Após moídas, o produto final é estocado em grandes silos, na qual possuem sistema de agitação a ar. Dessa forma, homogeneidades comparáveis em relação ao método úmido são alcançados (SHARPLEY, 2015).

A farinha crua, como é chamado após moagem, é então aquecida em torres de ciclones. Este pré-aquecedor é basicamente uma série de ciclones dispostos em torres de 50 a 120 m de altura, na qual aproveita gases quentes (1000°C) oriundas do calcinador e forno rotativo para aquecer a farinha em fluxo contracorrente, aumentando assim a temperatura de alimentação de 100°C para 800°C em menos de um minuto. Nesta etapa podem ocorrer alguns problemas quando são liberados teores elevado de voláteis inorgânicos nos gases, principalmente sulfatos e cloretos de sódio e potássio da matéria prima ou combustível no forno rotativo, pois podem condensar nas paredes do pré-aquecedor formando depósitos sólidos, limitando o movimento de gás e material (BENHELAL; ZAHEDI; HASHIM, 2012).

Ainda na torre, a farinha crua quente entra no calcinador a cerca de 800°C , sendo a energia necessária para a reação de descarbonatação endotérmica (calcinação) obtida a partir

de gases quentes oriundos do forno rotativos e combustão adicional. Na maioria das vezes, o ar quente do resfriador de clínquer, o chamado ar terciário, é utilizado como ar de combustão. Nesta etapa, o consumo de combustível para calcinação pode representar até 60% do combustível necessário para a produção de clínquer. Dessa forma pode-se obter um grau de decarbonatação de 90 a 95% e o material sólido entra no forno rotativo a uma temperatura de cerca de 900 °C (BENHELAL; ZAHEDI; HASHIM, 2012).

Após decarbonatada, a farinha entra no forno para iniciar o processo de clínquerização. Os fornos rotativos variam muito em comprimento e diâmetro, dependendo do projeto de todo o sistema, na qual inclui todos desde o pré-aquecimento da farinha crua até o resfriamento do clínquer. Dimensões típicas para sistemas de fornos rotativos com pré-aquecedor de ciclone e calcinador variam de 50 a 100 m de comprimento e de 3 a 7 m de diâmetro. Estes fornos operam tipicamente a uma inclinação de 1° a 3° a partir da horizontal e com uma velocidade de rotação de 2 a 4,5 rpm, resultando em tempos de residência de 20 a 40 min. A farinha sólida pré-calcinada é alimentada no forno na extremidade mais alta, combustível sólido ou líquido juntamente com o ar primário é soprado no forno e queimado na extremidade inferior do mesmo, criando uma chama com temperaturas em torno de 2000°C. Além disso, o ar secundário do clínquer refrigerado também é injetado no forno para finalizar combustão no maçarico. A farinha calcinada se move contra os gases quentes em direção à região quente (zona de sinterização) do forno, obtendo assim transferência de calor entre gases, sólidos e as paredes do forno. A alimentação é aquecida a 1500°C, levando a várias reações químicas e mudanças mineralógicas nas diferentes zonas do forno: decomposição do restante CaCO_3 não-calcinado e formação das fases do clínquer. Em temperaturas de até 1250 °C, ocorrem reações de estado sólido, e as fases belita, aluminato e ferrita são gradualmente formadas. Além disso, nestas temperaturas são liberados voláteis inorgânicos do material de alimentação e combustível consistindo principalmente em álcalis, sulfatos e cloretos, que condensam e formam depósitos como anéis dentro do forno. Em temperaturas mais elevadas (1300-1500°C), ocorre a fusão da fase aluminato e a fase da ferrita e até certo ponto a belita, formando uma fase líquida, o que leva à aderência de partículas sólidas (granulação / nodulização). Além disso, o CaO livre e a belita reagem para se formarem as fases alita (BENHELAL; ZAHEDI; HASHIM, 2012).

Após o forno, o clínquer a 1500°C alimenta um resfriador, muito importante para a qualidade do produto e para a eficiência energética do processo de produção como um todo, pois permite assim a recuperação de calor. É essencial que o clínquer quente seja resfriado rapidamente para abaixo de 1200-1250°C, pois o resfriamento rápido causa a recristalização da fase de aluminato finamente granulada, resultando em uma reação de hidratação lenta e

controlável durante a fase cimento. Por outro lado, uma fase de aluminato de granulação grossa formada devido a baixas taxas de resfriamento, causa uma rápida reação do cimento. O efeito do resfriamento rápido é o parâmetro mais importante na fase clínquer, na qual é termodinamicamente estável somente em temperaturas acima de 1250 °C. Abaixo desta, a alita se decompõe em belita e óxido de cálcio. Dessa forma, resfriamento rápido a temperaturas abaixo dessa temperatura crítica resulta em uma propriedade metaestável (BENHELAL; ZAHEDI; HASHIM, 2012).

Depois de formado, o clínquer é então armazenado em silos para a preparação da produção cimentos. O clínquer precisa ser triturado e misturado com aditivos, sendo os mais importantes o gesso ou anidrita, que controlam as reações rápidas do concreto durante a hidratação. Outros aditivos, dependendo do tipo de cimento desejado, são, por exemplo, escória de alto-forno, calcário ou cinza como material pozzolânico (BENHELAL; ZAHEDI; HASHIM, 2012).

3.2.1 Tipos de cimento

Como foi mencionado anteriormente, a material base do cimento é o clínquer, um produto artificial, responsável pelas principais características de dureza e resistência do concreto. Para a obtenção dos diversos tipos de cimento que são normatizados, de acordo com cada aplicação, o mesmo é então misturado a outros componentes como as escórias alto forno, as pozolanas, uma ou mais forma de sulfato de cálcio e são cominuídos até adequação dos parâmetros exigidos em cada norma (ABCP, 2016).

A Tabela 1 mostra os diversos tipos de cimento, de acordo a classe de resistência e composição para cada tipo de produto de acordo com o que especifica as normas reguladora.

Tabela 1-Tipos de Cimentos Normalizados no Brasil.

Tipo	Sigla	Classe (MPa)	Composição (%)				Norma Brasileira
			Clinker + gesso	Escória	Pozolana	Filler	
Comum	CP I	25	100		0		NBR 5732
		32					
		40					
	CP I – S	25	95-99		1 a 5		
		32					
		40					
Composto	CP II – E	25	56-99	6-34	0	0-10	NBR 11578
		32					
		40					
	CP II – Z	25	76-94		6-14	0-10	
		32					
		40					
	CP II – F	25	90-94	0	0	6-10	
		32					
		40					
Alto-forno	CP III	25	65-25	35-70	0	0-5	NBR 5735
		32					
		40					
Pozolânico	CP IV	25	85-45	0	15-50	0-5	NBR 5736
		32					
Alta Resistência Inicial	CP V - ARI	-	100-95	0	0	0-5	NBR 5733

Fonte: Normas Técnicas.

Esta tabela traz um resumo dos principais cimentos que são comercializados no Brasil com estas nomenclaturas. Cada tipo tem em sua designação do material então adicionado ao clinker Portland juntamente com uma fonte de Sulfato de Cálcio para determinada aplicação. Como objeto deste trabalho, a Norma NBR 5736 impõe as condições para produção do cimento Portland pozolânico, na qual pode ser adicionada os resíduos de cerâmica vermelha.

3.3 Contribuição Ambiental

Um dos desafios de diversos setores industriais é o manejo correto de resíduos oriundos de seus processos fabris ou atividades que geram resíduos, como a construção civil, as termelétricas, as siderúrgicas, bem como durante a produção de tijolo e telha, por exemplo. Estes setores industriais geram passivos, que muitas vezes causam impactos ambientais, sendo necessária a busca por alternativas que contribuam para esta correta destinação. As indústrias cimenteiras são vistas como grandes consumidores destes resíduos e pelo fato da compatibilidade com seus principais constituintes, ela consegue consumir uma grande variedade de passivos destes setores (CAMARINI *et al.*, 2016; ROBAYO-SALAZAR; RIVERA; GUTIÉRREZ, 2017).

Essa técnica de reaproveitamento nas cimenteiras, com a eliminação destes resíduos é chamada de co-processamento. Esta tecnologia é bastante difundida na Europa, Japão e Estados Unidos, tendo início no Brasil na década de 1990. Seu principal objetivo é reutilizar estes resíduos, como substitutos de matéria-prima e de combustíveis não renováveis. No Brasil, esta técnica é regulamentada pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), através da resolução 296/1999, incorporada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que traz consigo todas as diretrizes acerca da técnica e requisitos mínimos que as cimenteiras devem possuir (ABCP, 2016).

Para Queiroz *et al.*, (2013) esta estratégia é voltada para a otimização da produtividade dos recursos e assim aumentar a eficácia ambiental onde a indústria do cimento é identificada como um setor relevante para essa questão global, pois o processo produtivo permite o uso de resíduos em seu processos com substituições parciais das matérias-primas e até mesmo na substituição de combustíveis tradicionais.

Essa técnica proporciona menor custo de produção, diminuição na emissão de gases poluentes, introduzindo resíduos de diferentes atividades industriais, que além de contribuir para a redução do passivo ambiental evitam que os mesmos sejam descartados em locais inadequados. Dessa forma, a análise ecológica é feita através da comparação entre a eficiência ecológica, a partir dos dados da poluição e os valores de CO₂ equivalente da indústria cimenteira, antes e depois da adoção da reutilização de resíduos (BENHELAL; ZAHEDI; HASHIM, 2012).

3.4 Pozolanas (Resíduo de cerâmica vermelha)

3.4.1 Indústria da Cerâmica Vermelha

A cerâmica envolve todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos após tratamento térmico em temperaturas elevadas. O setor cerâmico é amplo e heterogêneo, o que induz a dividi-lo em subsetores ou segmentos em função de diversos fatores como matérias primas, propriedades e área de utilização (Associação Brasileira de Cerâmica, 2013).

A cerâmica vermelha é classificada, pela Associação Brasileira de Cerâmica (2013), como sendo todos os materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas) e também utensílios de uso doméstico e de adorno, sendo as argilas, principal matéria prima utilizada neste setor.

O Anuário Estatístico (2010) afirma que a localização geográfica das fábricas de cerâmica vermelha é determinada principalmente por dois fatores: a localização da jazida (devido à grande quantidade de matéria prima processada) e a proximidade dos centros consumidores (em função dos custos de transporte). Ainda sobre este seguimento, a mineração de argila tem a predominância de minas de pequeno porte, de 1.000 a 20.000 t/mês. Segundo o Anuário Estatístico (2011), no Brasil a argila destaca-se como a terceira maior produção da mineração, posicionando-se abaixo da produção de agregados (542 Mt) e minério de ferro (380 Mt). A partir da produção estimada de 88 bilhões de peças cerâmicas, em 2011, considerando a massa média de 2,0 kg/peça, pode-se estimar a utilização de aproximadamente 180 Mt de argila.

Ainda sobre os levantamentos do setor, a geração de resíduos obtida durante o processo produtivo já foi vista como grande problema ambiental. Segundo a Anicer Anuário Estatístico (2011), algumas cerâmicas chegam a ter até 10% de perda na produção somente na etapa de queima, 20% nos pós queima, dependendo do nível de organização das empresas. Esse subproduto é então utilizado principalmente como cascalhamento de estradas, produção de saibro para quadras de tênis, mistura com cimento como material pozolânico e pavimentação.

3.4.2 Uso de pozolana no cimento

O termo "pozolana" tem dois significados distintos. O primeiro indica as rochas piroclásticas, essencialmente vítreo e às vezes zeolitizadas, que ocorrem tanto na vizinhança de Pozzuoli (o antigo Puteoli da época romana) quanto em torno de Roma. O segundo significado inclui todos aqueles materiais inorgânicos, naturais ou artificiais, que por si só não possuem capacidade ligante, mas que endurecem em água quando misturados com hidróxido de cálcio, cal, ou com materiais que podem liberar hidróxido de cálcio, como o clínquer de cimento Portland. O termo "pozolana" estará se referindo a este último significado, definitivamente mais amplo que o primeiro, e portanto, abrangerá um grande número de materiais muito diferentes em termos de origem, composição e estrutura (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Durante muito tempo, o uso de pozolanas foi restrito principalmente à Itália, onde reservas consideráveis de pozolanas naturais encontram-se, e à Grécia (terra de Santorin). Em outros países, o interesse por estes materiais é relativamente recente e surgiu da necessidade de reutilizar alguns materiais residuais, como as cinzas volantes e a fumaça de sílica. Esse histórico pode ajudar a explicar por que tantos países há muito desconfiam da presença de cimentos pozolânicos, apesar do uso milenar de argamassa de cal-pozolana e da experiência de quase cem anos em cimentos pozolânicos. Em qualquer caso, os resultados de uma série de estudos confirmaram substancialmente que os cimentos pozolânicos podem produzir concreto, mostrando uma alta resistência final e grande resistência ao ataque de agentes agressivos (HEWLETT, 2004).

Estabelecer uma classificação precisa de pozolanas se mostra difícil, já que este nome comum inclui materiais que são muito diferentes em termos de composição química, natureza mineralógica e origem geológica e que são relacionados apenas pela propriedade geral que eles têm de reagir e endurecer quando misturados com cal e água. A classificação mais comumente aceita diz respeito à origem das pozolanas e, portanto, uma primeira subdivisão é entre materiais naturais e artificiais. Materiais naturais não requer nenhum tratamento adicional além da moagem, pozolanas artificiais resultam de modificações químicas e/ou estruturais de materiais que originalmente não possuem ou apenas detêm propriedades pozolânicas fracas. Estes últimos podem ser resíduos de determinados métodos de produção ou produtos fabricados a partir de matérias-primas selecionadas (MEDINA *et al.*, 2016; ROSELLÓ *et al.*, 2017).

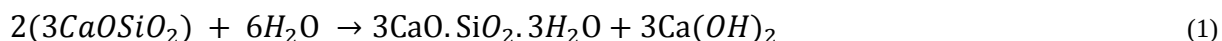
3.4.3 Efeitos da pozolana no cimento

O cimento Portland é constituído por um certo número de compostos cujas reações com a água dão origem ao processo de endurecimento. Quatro compostos são usualmente considerados como os principais constituintes deste aglomerante, os quais encontram-se discriminados na Tabela 2. Cada composto do cimento reage com a água, liberando calor e formando cristais correspondentes a cada uma das três fases sólidas principais geralmente presentes na pasta endurecida, além dos grãos de clínquer não hidratados (NICOLEAU; NONAT, 2016).

Tabela 2-Principais constituintes do clínquer Portland.

Nome do Composto	Composição em Óxidos	Abreviações
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato Tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

A fase silicato de cálcio hidratado (ver Equação 1), abreviada para C-S-H ou $\text{CaOSiO}_2.\text{H}_2\text{O}$, constitui cerca de 50% a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado, sendo responsável pela alta resistência mecânica à compressão da mesma (METHA e MONTEIRO, 2006).

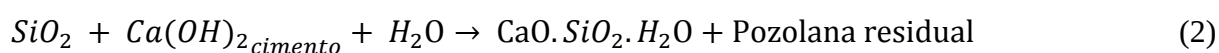


Os cristais de hidróxido de cálcio, um dos produtos de hidratação, na química do cimento abreviados por CH (Equação 1), são grandes e frágeis, constituindo de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta hidratada. Ao contrário do C-S-H, o CH não contribui potencialmente para a resistência mecânica da pasta endurecida. Além disso, a presença de uma quantidade considerável destes cristais no cimento Portland tem um efeito desfavorável sobre a resistência química, em razão da sua alta solubilidade (METHA e MONTEIRO, 2006).

Os sulfoaluminatos de cálcio ocupam de 20% a 15% do volume de sólidos da pasta endurecida, desempenhando um papel menor nas relações estrutura-propriedade (TANG *et al.*, 2015).

Do exposto anteriormente, pode-se concluir que o CH é, pois, o ponto fraco da estrutura da pasta de cimento, visto que, sendo o mesmo um produto solúvel, pode ser lixiviado, deixando a estrutura porosa e resultando não apenas na diminuição da resistência, mas também no aumento de sua permeabilidade, com consequências negativas para a durabilidade da mesma (HEWLETT, 2004).

A pozolana, quando introduzida neste sistema, reage com o CH da pasta de cimento, não apenas consumindo-o ao invés de produzi-lo, mas também produzindo novos compostos cimentícios resistentes, como o Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H). Esta reação, apresentada na Equação 2, é denominada de reação pozolânica.



As partículas finamente divididas da pozolana residual (que não reage com os produtos de hidratação do cimento) e outros compostos formados durante a reação pozolânica, como os Cálcio Aluminato Hidratados, atuam apenas como *filler*, reduzindo a porosidade da estrutura resultante. A combinação dos efeitos pozolânico e *filler* decorrentes da reação pozolânica representa uma contribuição importante para a resistência e durabilidade da pasta endurecida frente a meios ácidos (ROSELLÓ *et al.*, 2017).

Segundo Metha e Monteiro (2006), com respeito às interações físicas da pozolana na pasta de cimento resultantes da reação entre suas partículas e o hidróxido de cálcio, dois efeitos podem ser considerados: o refinamento do tamanho dos poros e o refinamento do tamanho do grão.

O primeiro se refere à formação de produtos de hidratação secundários (principalmente silicatos de cálcio hidratados) ao redor das partículas de pozolana, que tende a preencher os vazios capilares grandes com um material microporoso e, conseqüentemente, de baixa densidade. Do mesmo modo, no processo referido como refinamento do tamanho do grão, a nucleação do CH ao redor das partículas finas e bem distribuídas da pozolana, tem o efeito de substituir os cristais grandes e orientados desta fase por numerosos cristais pequenos e menos orientados, além de produtos de reação pouco cristalinos. Ambos os processos contribuem para o aumento de resistência da pasta de cimento.

A aptidão dos materiais pozolânicos de reagirem com a cal, formando compostos de propriedades aglomerantes, reside no fato de o silício e o alumínio presentes na sua composição se encontrarem em estruturas amorfas ou desordenadas atômicamente. A princípio, quanto maiores forem o desarranjo estrutural do material e a sua instabilidade em meio básico, mais intensamente se manifestará a reação pozolânica (AİTCIN; FLATT, 2016).

Outro aspecto a ser considerado com relação à reação pozolânica é a forma mais lenta com que a mesma ocorre quando comparada ao cimento, resultando em uma taxa de liberação de calor e desenvolvimento de resistência consequentemente lentas (METHA e MONTEIRO, 2006). Segundo Kazmi *et al.*, (2017), a cinética desta reação dependerá, além das características mineralógicas da pozolana, de sua finura, da temperatura e concentração dos reagentes.

Aİtcin e Flatt, (2016) assim resumem as interações que ocorrem entre a pozolana e o cimento Portland, para eles as pequenas partículas da pozolana, menos reativas do que o cimento Portland, quando dispersas na pasta de cimento, geram um grande número de pontos de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação. Além do mais, este mecanismo torna a pasta mais homogênea e densa com respeito à distribuição dos poros devido às reações pozolânicas que ocorrem entre a sílica amorfa da adição mineral e o hidróxido de cálcio pelas reações de hidratação do cimento. Em adição, o efeito físico dos grãos mais finos permite um empacotamento mais denso com o cimento e reduz os problemas na zona de transição entre a pasta e o agregado. Como resultado, esta zona mais fraca é reforçada devido a maior aderência entre essas duas fases, promovendo melhoras na microestrutura e nas propriedades do concreto de um modo geral”

3.5 Gesso reciclado

3.5.1 Gipsita Natural

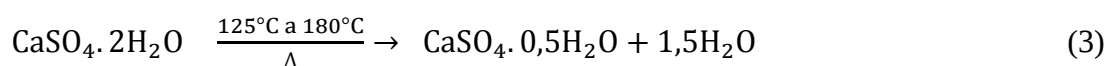
A gipsita é um abundante mineral encontrado em regiões de todo o planeta. Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (2015), a produção mundial deste mineral no ano de 2014 foi de 246 milhões de toneladas (Mt). A China continua sendo o país que mais produz, com 53,7% de toda a produção mundial. O Brasil é o maior produtor da América do Sul e o 13º do mundo, com uma produção de aproximadamente 3,4 Mt, valor que representou 1,4% do total mundial.

No Brasil, Pernambuco se destaca como principal estado produtor da gipsita, responsável em 2014, por 84,3% do total produzido. O “Polo gesseiro do Araripe”, como é conhecido, está situado no extremo oeste do estado, composto pelos municípios de Araripina, Trindade, Ipubi, Bodocó e Ouricuri, e juntos são responsáveis pelas 24 das 35 empresas que declararam ter produzido gipsita no Brasil em 2014. O minério extraído deste pólo é conhecido pela sua alta pureza que chega a ser da ordem de 95% e consistente concentração de sulfatos. O mesmo possui uma composição química teórica em torno 46,6% de SO_3 , 32,5% de CaO e 20,9% de H_2O (BARBOSA *et al.*, 2014), Possuindo como principais propriedades físicas:

- Sistema cristalino do tipo monoclinico;
- Cor variável, podendo ser incolor ou branca;
- Brilho vítreo e sedoso;
- Dureza variando de 1,5 a 3 (escala Mohs);
- Densidade relativa de 2.320 kg/m³;
- Hábito prismático;
- Clivagem nas quatros direções;
- Morfologia de tamanhos de cristais que variam de acordo com as condições.

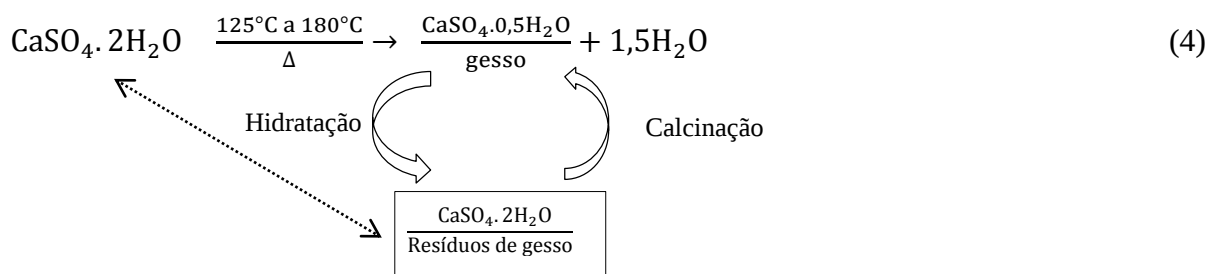
3.5.2 Obtenção do gesso

O gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) é o principal produto obtido a partir da desidratação térmica do mineral gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Esta obtenção é feita em fornos industriais submetendo este mineral a temperaturas que variam em torno de 125°C a 180°C . Durante o aquecimento ocorre a conversão do dihidrato em hemidrato com a perda de 1,5 mols de H_2O , de acordo com a Equação 3. Esta etapa é importante, pois definem as principais propriedades do gesso que são necessárias para sua utilização, como por exemplo, na construção civil (MEHTA e MONTEIRO, 2006; GERALDO *et al.*, 2017).



A gipsita pode ser calcinada em fornos sob pressão atmosférica, chamado via seca, na qual é produzindo gesso tipo alfa (α) com cristais grandes e regulares ou sob atmosfera rica em vapor de água, chamado via úmida, produzindo gesso tipo beta (β), com cristais pequenos e irregulares. Estas características definem a qualidade desse gesso e a correta aplicação para os mesmos, que vão desde aplicações mais nobres, como o gesso hospitalar, até aplicações convencionais como na construção civil (BARBOSA *et al.*, 2014; GERALDO *et al.*, 2017).

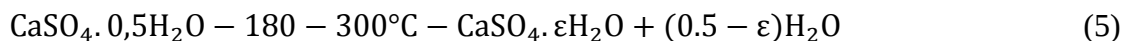
Estes hemidratos são formas metaestáveis, que ao serem hidratados reagem rapidamente, liberando uma grande quantidade de calor. Nesta hora, são formados cristais de hidratos de cálcio sob a forma de agulha, que se precipitam na solução, recrystalizando o dihidrato, voltando à sua forma estável, como mostra a Equação 4 (CAMARINI *et al.*, 2016).



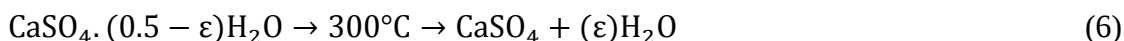
Fonte: Adaptado de (GERALDO *et al.*, 2016).

Durante a etapa de desidratação térmica, a gipsita pode ser totalmente desidratada, em temperaturas acima de 180°C .

- A partir de 250°C, o gesso torna-se anidro (sem água) e o resultado é a formação de anidrita solúvel tipo III, conforme Equação 5. Esta é ávida por água, e que, rapidamente, na presença desta, transforma-se em hemidrato (FLORES MEDINA *et al.*, 2016).



- Entre 400 e 800°C, forma-se anidrita II, torna-se insolúvel, totalmente desidratado, transformando-se num material inerte, com características semelhantes à anidrita natura, como mostra a Equação 6 (FLORES MEDINA *et al.*, 2016).



- Entre 800 e 1230°C, forma-se anidrita I, totalmente inerte, impura, já contaminada com óxido de cálcio (CaO), mostrando início da decomposição do sulfato de cálcio, como mostra a Equação 7 (FLORES *et al.*, 2016).



- Acima de 1200°C, o gesso sofre decomposição da anidrita I em óxidos de cálcio e anidrido sulfúrico, de acordo com a Equação 8 (FLORES MEDINA *et al.*, 2016).



O ε , presente nas equações serve para mostrar a variação real do percentual do teor de água gerado e isso se deve ao fato dos mecanismos terem baixas diferenças, dificultado assim o ponto correto da conversão (FLORES *et al.*, 2016). No entanto, nestas condições, o hemidrato pode apresentar número de molécula de cristalização variando entre 0,15 a 0,66, com valores típicos de 0,5. A qualidade do gesso obtido para aplicação na construção civil está diretamente ligada ao seu teor de hemidratos, responsável e determinante pelas suas características como aglomerante.

Existem também formas de gipsita ou gesso que são oriundas de processos industriais, conhecidas por gesso sintético, tal como fosfogesso (ISLAM; HABIB; TANVEER, 2017) oriundas da produção de ácido fosfórico, fluorogesso da produção de ácido fluorídrico, gesso

da dessulfurização de gases das termelétricas (XU *et al.*, 2017), da produção de TiO_2 (GAZQUEZ *et al.*, 2013a), entre outros. Assim como há estudos para o reaproveitamento dos resíduos de gesso da construção civil, os pesquisadores também estudam estes com o intuito de minimizar o impacto ambiental causado por eles, desenvolvendo formas sustentáveis de seus reaproveitamentos, principalmente como aditivos nas indústrias cimenteiras.

3.6 Resíduos gerados na construção

As atividades desenvolvidas em todas as etapas da cadeia produtiva do gesso geram resíduos, cuja natureza e volume, além do impacto ambiental causado por eles, dependem dos processos de produção e gerenciamento em cada etapa. Na construção civil, a geração destes resíduos se dá principalmente na etapa de mistura da pasta para aplicação de renderização, na produção de pré-moldados, componentes e na demolição de edifícios (KATZ; BAUM, 2011).

Este resíduo tem causado grande preocupação ambiental, se fazendo necessária a busca por processos ou tecnologias que sejam capazes de absorvê-los sem a geração de novos passivos. Nesse sentido, a reciclagem é uma alternativa que tem crescido para minimizar o impacto negativo causado (CHANDARA *et al.*, 2009). Em estudos recentes sobre o assunto, Suárez; Roca e Gasso (2016), constataram que são geradas mais de 450 milhões de toneladas de resíduos oriundos da construção civil no mundo, anualmente, dentre eles, cerca de 80 milhões de toneladas são resíduos de placas de gesso.

3.7 Interação e efeito do gesso nas propriedades do cimento

Com as devidas melhorias no processo de obtenção de clínquer através do desenvolvimento e aprimoramentos de fornos rotativos de processo contínuo, começaram a obter um produto mais homogêneo e reativo, dessa forma viu-se a necessidade de um reagente que retardasse o endurecimento rápido deste cimento, onde uma ou mais formas de sulfato de cálcio começaram a ser adicionadas durante o processo de moagem (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Desde sua descoberta por acaso como inibidor das reações rápidas do cimento, fontes de sulfato de cálcio passaram a ser explorado por muitos pesquisadores para compreender os

mecanismos envolvidos durante a cinética reacional da interação deste composto com o cimento quando em contato com a água (POURCHET *et al.*, 2009).

O cimento Portland é constituído por uma quantidade de componentes cujas reações com a água são responsáveis pelo processo de endurecimento e devido ao seu caráter hidráulico, tornou-se imprescindível adição de uma ou mais fontes de sulfato de cálcio. Como mencionado anteriormente, os principais minerais presentes no cimento são silicatos de tricálcio (C_3S), silicato de dicálcio (C_2S), aluminato de tricálcio (C_3A) e o ferro aluminato tetracálcico (C_4AF). Como observado por vários autores em seus experimentos, a hidratação do cimento se divide na hidratação dos silicatos e dos aluminatos, e por ser o mineral mais reativo, o C_3A se hidrata precocemente, levando a formação de um hidroaluminato de cálcio ($3CaO-Al_2O_3-Ca(OH)_2-nH_2O$), que induz o enrijecimento da pasta. Para evitar este fenômeno, sulfato de cálcio é adicionado ao processo para retardar a reação, levando a formação do mineral etringita ($Ca_6Al_3(SO_4)_3(OH)_{12}.26H_2O$) (HEWLETT, 2004). Segundo Minard *et al.*, (2007), este mineral se precipita na superfície e interage com mesmo, formando assim uma espécie de bloqueio, não deixando o C_3A se dissolver na solução, evitando assim problemas na aplicação deste produto.

O mecanismo reacional responsável por esta blindagem ainda é dúvida para muitos pesquisadores, no entanto algumas teorias mostram os mecanismos mais aceitos para a cinética reacional. Minard *et al.*, (2007) defende a adsorção de íons Ca^{2+} e íons SO_4^{2-} em sítios ativos da superfície do C_3A . Por outro lado, Pourchet *et al.*, (2009) defendem que o retardo na reação se dá pela precipitação da fase etringita na superfície do C_3A e interação molecular entre os cristais formados. No entanto, Quennoz e Scrivener (2009), mostrou que a teoria da adsorção em sítios ativos do C_3A , tem forte influência no retardo da taxa reacional em seus experimentos.

3.8 Parâmetros de caracterização do cimento ecológico

Quando um cimento é formulado com determinadas adições, o mesmo pode apresentar características físico-químicas, mecânicas e de durabilidades diferentes, sendo necessária aplicação de metodologias para avaliação destas propriedades. A seguir serão apresentadas algumas técnicas que foram utilizadas na caracterização do cimento obtido.

3.8.1 Tempo de Pega

Um aspecto importante quando da aplicação de materiais cimentícios em construções, está relacionado às propriedades físicas de endurecimentos. Estas são manifestações do processo de hidratação do cimento e início das reações químicas, estando ligado à perda de plasticidade, aumento da rigidez em razão da diminuição da consistência da pasta do mesmo. Esta perda de consistência está atrelada a redução gradual da água livre do sistema, onde parte desta água irá formar novos produtos de hidratação, ficará adsorvida em superfície de produtos pouco cristalino e outra parte evaporará, ocasionando assim o endurecimento da mesma (HEWLETT, 2004).

Em aplicações de materiais à base de cimento, o tempo inicial de ajuste é o principal parâmetro que rege o cronograma de operação para o transporte, colocação, consolidação e acabamento de processos de concreto. O tempo de ajuste inicial que está além da especificação pode colocar em risco a trabalhabilidade para a colocação correta e o progresso do cronograma de construção. O controle sobre o tempo de ajuste inicial começa no processo de produção de cimento. Durante esse processo, a amostra de cimento é retirada para encontrar o tempo inicial de ajuste. O método de teste padrão é adotado pela maioria das fábricas produtoras de cimento para determinar este tempo de ajuste inicial. (YAPHARY *et al.*, 2017).

O início desta solidificação chamada de início de tempo de pega está relacionado com a capacidade de utilização deste produto, depois disso, o chamado tempo final de pega está ligado a não utilização deste, pois o mesmo encontra-se em total rigidez e sem condições de aplicação. Para o controle da cinética e determinação destes tempos é utilizado o aparelho de Vicat, uma técnica conhecida universalmente, que mede a resistência de uma pasta de cimento com uma consistência específica à penetração de uma agulha com determinada carga padrão (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Uma das formas de ajuste nos tempos de solidez do cimento é adicionar uma ou mais forma de sulfato de cálcio, seja na forma hidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), na forma hemidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) ou na forma anidra (CaSO_4), cada uma com suas características. Estes podem ser adicionados em cimento de forma a inibir as reações rápidas de hidratação, viabilizando desta forma o seu uso. A principal fonte deste composto é a gipsita, comumente utilizada na indústria do cimento, no entanto muitos estudos são realizados, como forma de tentar aproveitar outras fontes deste reagente em cimento, principalmente resíduos considerados passivos industriais, avaliando sua eficiência quanto aos tempos de pega.

Xu *et al.*, (2017), utilizou uma fonte de sulfato de cálcio oriunda do processo de dessulfurização de gases de combustão de termelétrica na região da China, que estava desencadeando muitos problemas ambientais. Devido à pureza deste composto, viu-se a possibilidade de utiliza-lo como sulfato de cálcio ecológico em cimento, trazendo benefícios econômicos e ecológicos através de um gerenciamento correto, minimizando assim o consumo de recursos naturais e energias na indústria cimenteira.

Flores Medina *et al.*, (2016), utilizou como fonte de sulfato de cálcio, gesso reciclado da construção civil. A avaliação da pureza destes compostos através de técnicas de Difração de Raios-X, possibilitou a utilização destes em cimento, onde pôde ser adicionado em torno de 5% deste resíduo na composição do cimento. Observou-se que este manteve o tempo de trabalhabilidade dentro do esperado e isso se deve ao fato da anidrita presente na composição se dissolver mais lentamente.

3.8.2 Resistência Mecânica à Compressão

Um dos principais parâmetros que se deve avaliar num cimento e que irá refletir no concreto endurecido é sua capacidade de resistir a esforços mecânicos, principalmente a resistência a compressão. Esta propriedade deve ser avaliada para poder validar um cimento quanto ao seu uso ou quanto determinada adição de um resíduo pode ser usada sem comprometer a qualidade de um cimento na qual venha a absorver (HEWLETT, 2004).

Esta capacidade de suportar esforços deve principalmente aos componentes do clínquer Portland, em particular aos silicatos tricálcico (3CaOSiO_2) e dicálcicos (2CaOSiO_2), pois são eles os responsáveis pelas reações que produzirão compostos capazes de dar esta característica aos cimentos, desde o momento da sua hidratação como também no decorrer de sua aplicação. Durante a hidratação do cimento, seus minerais que estão num estado metaestável de alta energia, reagem com água formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), comumente chamados de géis de silicatos ou de C-S-H, maiores responsáveis pela resistência das pastas de cimento. Muitos estudos têm sido feitos com intuito de incorporar resíduos na matriz cimentícia e sua capacidade de suportar esforços mecânicos. Os autores apostam nesta utilização como contribuição ambiental e também na possibilidade de melhoria dessa propriedade (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Zhang, Pan e Wu (2016), produziram um cimento a partir da mistura de metacaulim como material Pozolânico e uma fonte de sulfato de cálcio obtida a partir da dessulfurização de gases de combustão. Foi possível observar que algumas amostras se mostraram com uma resistência menor com relação as demais e isso se deu devido esta amostra conter mais conteúdo de gesso em relação ao metacaulim. O gesso não é ativado quimicamente como o metacaulim, sendo capaz de reagir com os produtos de hidratação do clínquer, em especial com o hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , formando mais compostos cimentícios e aumentando assim a capacidade de resistir à força de compressão.

Roselló *et al.*, (2017), avaliaram as propriedades de cinzas de casca de arroz quanto a sua pozolanicidade e possibilidade de aplicação em a cimento e concreto, atestando melhorias nos dados de resistência mecânica, verificando que até 25% de substituição de cimento houve um ganho de 98% na resistência da argamassa aos 28 dias.

Carvalho *et al.*, (2018), utilizaram escória oriunda do processo de obtenção do ferro gusa em siderúrgica para produzir cimento, onde observou ganho de até 35% na resistência à compressão das argamassas durante o período de cura das amostras destes cimentos. Este fato se deu principalmente, devido à morfologia dos grãos do resíduo na qual melhorou a adesão entre as partículas, proporcionando assim uma melhoria nas propriedades mecânicas.

Singh, Srivastava e Bhunia (2017) estudaram o efeito da substituição parcial de cimento por resíduos de mármore, um passivo ambiental na região da Índia, nas propriedades do concreto. Através do estudo, foi possível obter uma substituição de até 15% em massa dos resíduos e com isso melhorias nas propriedades mecânicas foram evidenciadas, principalmente nas tensões de compressão. Esta melhoria está relacionada a algumas reações entre o carbonato de cálcio dos resíduos com a pasta de alumina do cimento para formar aluminato de cálcio na fase hidratada.

3.8.3 Determinação da porosidade e absorção de água

A resistência do concreto é a propriedade mais valorizada por designers e engenheiros de qualidade. Em sólidos, existe uma relação inversa fundamental entre a porosidade (fração volumétrica de vazios) e a força. Consequentemente, em materiais multifase como o concreto, a porosidade da microestrutura de cada componente pode se tornar um limitante de resistência (AGRELA *et al.*, 2017).

Os agregados naturais são geralmente densos e fortes, portanto, é a porosidade da pasta da matriz cimentícia, bem como a zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo, que geralmente determina a característica de resistência do concreto de peso normal. Embora a relação água-cimento seja importante na determinação da porosidade tanto a matriz como a zona de transição e, portanto, a resistência do concreto, fatores como condições de compactação e cura (grau de hidratação do cimento), tamanho e mineralogia do agregado, tipos de aditivos, geometria do corpo de prova e condição de umidade, tipo de estresse e taxa de carga também podem ter um efeito importante na resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Portanto, na tentativa de inserir diversos resíduos na matriz cimentícia, há uma preocupação de qual o nível de vazios que uma determinada estrutura venha a ter. Dessa forma é realizado ensaio baseado no princípio de Arquimedes para a determinação dessa propriedade e poder avaliar possíveis problemas de resistência e durabilidade (ASENSIO *et al.*, 2016; ROBAYO-SALAZAR *et al.*, 2017; ROSELLÓ *et al.*, 2017).

3.8.4 Mitigação da reação álcali-agregado

Os testes de reação álcalis-agregado visam fornecer informações acerca da capacidade de determinado cimento em inibir ou minimizar as reações entre os constituintes reativos dos agregados (sílica amorfa) e os íons alcalinos e hidroxilas presentes na solução intersticial da pasta de cimento, podendo ter efeito altamente prejudicial para argamassas e concretos (RIBEIRO *et al.*, 2012). Este efeito deletério ocorre devido aos produtos das reações serem de caráter fortemente expansivo, causando tensões internas nos materiais com consequente aparecimento de fissuras e rachaduras (KAWABATA; YAMADA, 2017).

Existem três tipos principais de reações álcalis agregados (RAA), as reações álcalis-sílica (RAS), as reações álcalis-silicato e as reações álcalis-carbonato. Dentre estas, a RAS tem recebido maior atenção, e estão essencialmente ligadas as reações químicas entre formas reativas da sílica que possui uma estrutura de caráter amorfo ou desordenado e íons alcalinos (Na^+ e K^+) e hidroxilas (OH^-). Quando as formas reativas da Sílica são submetidas a atmosferas de solução fortemente alcalina, os íons hidroxilas (OH^-) presentes atacam os grupos siloxanos ($\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$) dos agregados para formar grupo silanol ($\equiv\text{Si-OH}$). As reações continuam e os grupos silanóis reagem com grupos hidroxilas presentes nos poros da solução resultando em íons de sílica dissolvidas, principalmente em (H_3SiO_4 e $\text{H}_2\text{SiO}_4^{-2}$) que se combinam na sequência com íons de Potássio (K^+), Sódio (Na^+) e Cálcio (Ca^{+2}), este oriundo das reações de

hidratação do clínquer, principalmente a portlandita (Ca(OH)_2), produzindo os silicatos de cálcio hidratados, os hidratos de silicatos alcalinos e gel de RAS, esta são formas de géis que absorvem umidade, se expandem e causam tensões internas resultando inicialmente em pequenas rachaduras que pode levar a sérios problemas estruturais em diversos tipos de obras ao redor do planeta (KIM; OLEK; JEONG, 2015).

Muito se aprendeu sobre o RAS nos últimos 70 anos, começando do trabalho pioneiro de Stanton, que reconheceu corretamente o significado do teor de álcalis no cimento, a disponibilidade de umidade e o efeito de pozolanas na severidade da RAS no concreto. Stanton também propôs um método de teste, que posteriormente evoluiu para o teste da barra de argamassa, para avaliar a reatividade potencial do cimento-combinações agregado. Desde a década de 1940, a pesquisa primariamente enfocou (a) a compreensão dos mecanismos de reação (b) desenvolvimento de métodos de teste rápidos e confiáveis para identificar minerais e agregados, (c) prever o desempenho de longo prazo misturas de concreto em serviço e (d) propondo uma avaliação de métodos eficazes para mitigar o RAS em estruturas novas ou existentes em condições de exposição (por exemplo, temperatura, pressão, umidade) taxa e magnitude de RAS (RAJABIPOUR *et al.*, 2015).

Este ensaio é realizado sob determinadas condição de temperatura e concentração de uma solução de NaOH, onde os efeitos são observados através da variação dimensional da expansão de barras, aparecimento de fissuras em formas de mapeamentos, que caracterizam o efeito das reações. Uma vez que esta característica está relacionada com a durabilidade de argamassas e principalmente concreto, onde são utilizadas grandes quantidades de agregado.

Sabendo do efeito negativo destas reações, o mecanismo e condições na qual tal efeito é potencializado, que muitos pesquisadores vêm avaliando formas de minimizar estes problemas estruturais em concretos, buscando inserir diversos materiais ou resíduos na matriz cimentícia, como forma de mitigar esta reação e ao mesmo tempo poder contribuir com o desenvolvimento sustentável. Materiais com caráter pozolânico vêm sendo objeto de estudo neste sentido e vários resultados foram publicados recentemente, utilizando cinzas volantes oriundos da queima de carvão mineral em termelétricas, resíduos de cerâmica vermelha, escórias de alto forno, metacaulim entre outros que são passivos ambientes para seus geradores, mas que muito bem aproveitados por outros seguimentos industriais, como a indústria cimenteira (CARVALHO *et al.*, 2017a).

Kazmi *et al.*, (2017), utilizou cinzas de bagaços de cana de açúcar com o intuito de avaliar tanto seu caráter pozolânico como também seus efeitos no controle das reações Álcali-silica no concreto. Nele, os pesquisadores dosaram esta cinza de 10 a 40 % em relação à massa

de cimento, podendo observar que a mesma, além de uma pozolana eficiente, capaz de fornecer mais resistência à compressão aos 28 dias de cura, foi capaz de diminuir expansão em barras em até 46% quando substituído 40% do bagaço da cana no cimento. Estando relacionada a uma maior diluição dos íons alcalinos quando da existência de uma relação CaO/SiO_2 baixa e teor de alumina maior, culminando assim nesta redução.

Resultados semelhantes também foram obtidos por (LI; THOMAS; IDEKER, 2017), quando utilizaram agregados leves e finos como a ardósia expandida, xisto e argila em concreto. Nesta pesquisa, foi possível observar que a substituição de agregados reativos por estes agregados leves no concreto na redução da expansão das barras prismáticas foi efetiva.

3.8.5 Determinação de resistência a sulfatos

Outra forma de avaliar a durabilidade de argamassas e concretos está relacionada à capacidade destes em suportar ambientes agressivos, sendo assim este ensaio visa fornecer informações do desempenho de estruturas quando estão expostas a meios como os solos, lençóis freáticos, rios, águas do mar e resíduos industriais com altas concentrações de íons Sulfatos, como por exemplo, que são potencialmente deletérias chegando a causar danos difíceis de serem reparados. Este fenômeno está relacionado ao transporte destes íons para o interior através de estruturas porosas, ocorrendo posteriormente reações químicas com os produtos de hidratação do cimento de caráter expansivo (BULATOVIĆ *et al.*, 2017).

A conversão dos produtos de hidratação para produtos nocivos como a Etringita, gesso e Thaumasita, leva a descalcificação do C-S-H (Silicatos de Cálcio Hidratado), causando o enfraquecimento da pasta, falta de coesão influenciando no amolecimento, na expansão e craqueamento do concreto (SHARMA; KHAN, 2017).

Dessa forma, um concreto se mostra resistente aos ataques de Sulfatos, quando se utiliza um cimento com esta característica cujas propriedades são compactas e de baixa permeabilidade. Estes são os principais fatores associados a este fenômeno caso se mostrem contrário, estando associadas aos tipos de íons envolvidos, condições de exposição e período de exposição.

Sendo assim diversos autores buscaram estudar a o efeito da adição de resíduos e utilizar técnicas capazes de avaliar as possíveis expansões das barras prismáticas, como os trabalhos

realizados por (BASSUONI; NEHDI, 2009; IKUMI *et al.*, 2016; MASSAAD *et al.*, 2016; MELEŠEV *et al.*, 2017; NAJJAR *et al.*, 2017).

3.8.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise de microscopia mais utilizada para avaliar a microestrutura de amostras de cimento e seus derivados é a microscopia eletrônica de varredura, o MEV, que é uma análise morfológica capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra.

Nas amostras de cimento, foi utilizado um feixe de elétrons de intensidade de 10 kV e ainda, para melhor visualização da imagem é necessário metalizar a amostra com uma fina camada de ouro para uma melhor dissipação de energia, uma vez que o cimento tem uma baixa capacidade de condução elétrica (KAVITHA *et al.*, (2016)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será abordado o processo de desenvolvimento das análises, assim como a metodologia aplicada em cada parâmetro das amostras obtidas.

4.1 Sequência experimental

A Figura 2 resume a metodologia adotada no presente trabalho baseada em normas brasileiras (NBR's) e americanas (ASTM).

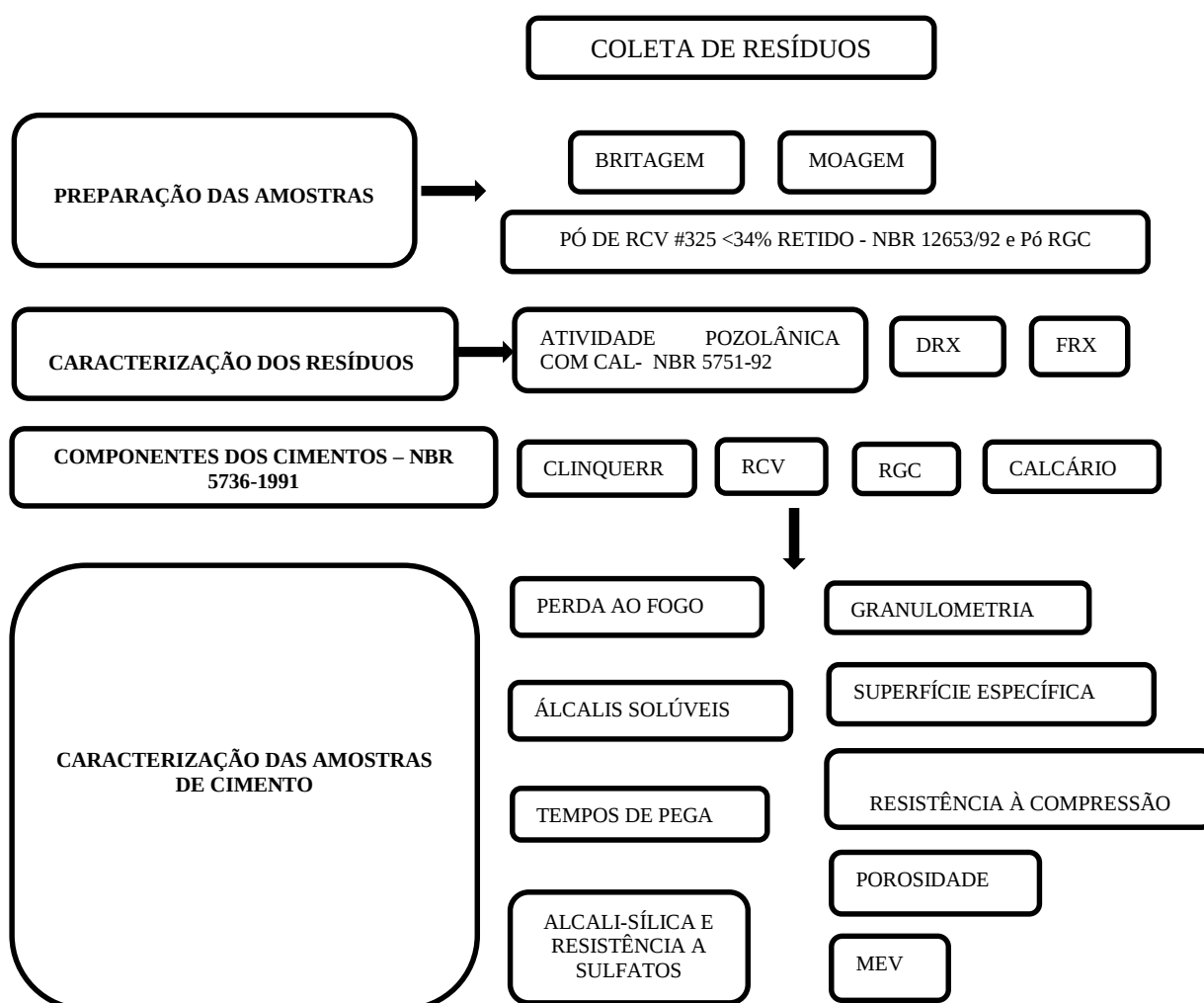


Figura 2- Fluxograma simplificado da metodologia.

4.2 Materiais e Reagentes

4.2.1 Reagentes

Foram utilizados os seguintes materiais e reagentes durante esta pesquisa:

Os resíduos de cerâmica vermelha foram fornecidos por uma fábrica de tijolo e telha na cidade de Limoeiro do Norte-CE, uma das 412 unidades de produção neste seguimento no estado do Ceará, sendo a região do vale do Jaguaribe, na qual inclui esta cidade, responsável por aproximadamente 35,7% da produção do estado, chegando a mais de 70 milhões de peças por mês, segundo estudo socioeconômico realizado pelo IEL-CE em parceria com Sindcerâmica do Ceará em 2014. A Figura 3 mostra a localização desta unidade fabril.

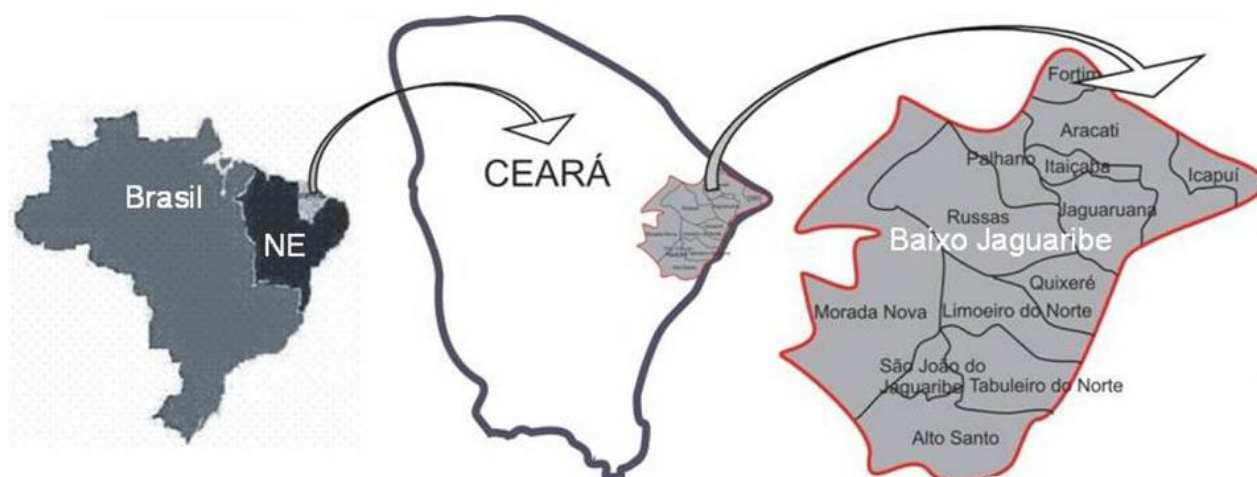


Figura 3 - Localização do fornecedor da amostra de RCV (Adaptado de: Ferrão *et al.*, 2014).

Os resíduos de gesso da construção civil foram fornecidos por uma recicladora da cidade de Fortaleza-CE, oriundos da construção do shopping Riomar, de forma a verificar a possibilidade de reaproveitamento na produção de cimento.

Calcário (CaCO_3) fornecido pela Cimento Apodi-CE, segundo as Normas que regem a produção de cimento, em particular a NBR 5736-91, que trata da produção de cimento pozolânico, pode ser adicionado como material *filler* durante a produção de cimento em até 5% em massa.

Clinker Portland fornecido pela Cimento Apodi-CE, é a matéria base e principal componente do cimento, rico em silicatos e aluminatos de cálcio. A composição química tanto do clinker como do calcário utilizado, foram fornecidos pelo produtor de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização química do Clinker e Calcário

Composição	Clinker (%)	Calcário (%)
SiO ₂	20,13	3,70
Al ₂ O ₃	4,82	1,71
Fe ₂ O ₃	3,25	1,01
CaO	62,59	47,81
MgO	5,50	3,81
SO ₃	1,74	1,14
Na ₂ O	0,09	0,04
K ₂ O	0,75	0,43
Na ₂ O _{eq}	0,58	-
P ₂ O ₅	-	-
TiO ₂	0,22	-
LOI	0,23	41,86
	99,90	101,51
FSC	97,50	-
C ₃ S	64,80	-
C ₂ S	8,80	-
C ₃ A	7,30	-
C ₄ AF	9,9	-
% Carbonato de Cálcio	-	85,17
MS	2,49	-
MA	1,48	-

Baseado nas equações de Bogue (KAZMI *et al.*, 2017) (C₃S= (4,071)*CaO-(7,6)*SiO₂-(6,718)*Al₂O₃-(1,43)*Fe₂O₃-(2,852)*SO₃); (C₂S=(2,867)*SiO₂-(0,7544)*C₃S); (C₃A= (2,65*Al₂O₃-(1,692)*Fe₂O₃); (C₄AF= (3,043)*Fe₂O₃).

$$\text{Fator de Saturação da Cal (FSC)} = \frac{\text{CaO}}{2,8 * \text{SiO}_2 + 1,18 * \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65 * \text{Fe}_2\text{O}_3};$$

$$\text{Módulo de Sílica (MS)} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3};$$

$$\text{Módulo de Alumínio (MA)} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3};$$

A lista com demais reagentes utilizados nesta pesquisa podem ser encontrados no Anexo C, tabela 9

4.2.2 Equipamentos utilizados

A lista completa com os equipamentos utilizados nesta pesquisa pode ser encontrada no Anexo D, tabela 10.

4.2.3 Lista de Normas

A lista completa com as normas utilizadas nesta pesquisa pode ser encontrada no Anexo E, tabela 11.

4.3 Caracterização do resíduo de cerâmica vermelha e gesso da construção

4.3.1 Índice de atividade pozolânica com cal (IAP) do RCV – NBR NM 5751/92

Primeiramente foi realizado ensaio para determinação da eficiência dos resíduos de cerâmica vermelha quanto sua pozolanicidade, reagindo o mesmo com hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, segundo a Norma NBR NM 5751/92. Para tanto, o resíduo foi submetido a ensaio de moagem para adequação de sua granulometria, utilizando equipamentos de britagem, pulverização a disco e moagem utilizado um moinho de bolas, com diâmetro da carga moedora variando entre (10 a 25 mm) e rotação de 20 rpm. O mesmo foi submetido a 640 rotações em 32 minutos até que sua granulometria atingisse um retido <34% na peneira #325 ou 45 μm , segundo NBR (12653/92). Feito isso, foi determinado sua massa específica, segundo a NBR NM 23/2000, com auxílio do frasco Le Chatelier para determinar a quantidade de massa para composição dos corpos de prova, segundo a Equação 9:

$$\text{Material Pozolânico} = 2 \times \frac{\delta_{\text{Poz}}}{\delta_{\text{Cal}}} \times 104 \quad (9)$$

Onde: δ_{Poz} é a massa específica do resíduo de cerâmica vermelha

δ_{cal} é a massa específica do hidróxido de cálcio cujo valor é 2,24g/cm³

104 é a massa do Hidróxido de cálcio

Após isso, os mesmos foram homogeneizados num recipiente fechado por 2 minutos e em seguida determinado a relação água/mistura (resíduo+cal) para confecção dos corpos de prova, segundo NBR 7215/2002 em ensaio de abatimento, até atingir índice de consistência de 225±5mm na mesa de consistência padrão. Logo após, foram confeccionados três corpos de provas de dimensões 100mm x 50 mm de diâmetro, sendo os mesmos submetidos à cura em temperatura de 52±2°C, durante sete dias. Após este período, foram determinadas as resistências à compressão destas amostras utilizando uma prensa para ensaios mecânicos com capacidade de 200 kN, comparando os valores obtidos com as exigências normatizadas e adequação para adição em cimento.

4.3.2 Determinação da composição mineralógica

Para determinar a composição mineralógica dos resíduos, foi utilizado um difratômetro de Raios-X modelo *Cubix Cement³ Panalytical* (Amsterdam, Holanda), equipada com Tubo de Raios-X com ânodo de Ródio (Rh) e radiação K α , corrente de 40mA e tensão de 45kV. Os padrões de raio-X em faixa de 2 θ entre os ângulos 5 a 70° e tempo por passe de 0,021 s.

Para isso, foi aplicado o método do pó prensado para confecção das pastilhas, contendo uma massa de 12g de amostra mais 1g de aglutinante, neste caso o amido, segundo NBR 14656/2001, para melhorar a coesão entre as partículas do resíduo e de forma que pastilha não fique quebradiça e seja durável. Logo após esta mistura foi submetido a uma carga de 100 kN, utilizando uma prensa hidráulica. O refinamento e apreciação do difratograma foi feito utilizando o método de *Rietveld*, através *Software HighScore Plus*, tendo como referências os padrões de uma base de dados ICDD (*International Center for Diffraction Data*).

4.3.3 Determinação da composição Química

A caracterização química destes resíduos foi feita utilizando um espectrômetro de fluorescência de Raios-X modelo *Panalytical PW4400*, equipado com tubo de Raios-X com

ânodo de Ródio (Rh), utilizando uma tensão de 40 kV e corrente de 50mA com potência de 2kW.

Para tanto, foi aplicado o método do pó prensado para confecção de amostras em forma de pastilha. Para isso, foi pesado 12g de amostra com 1g de aglutinante, como amido, segundo NBR 14656/2001, para melhorar a coesão entre as partículas do resíduo e de forma que pastilha não fique quebradiça. Logo após esta mistura foi submetido a uma carga de 100kN, utilizando uma prensa hidráulica, modelo Emic. A análise e apreciação dos resultados foram feitas utilizando o *Software SuperQ* da *Panalytical*, onde o mesmo é composto de curvas de calibração, com padrões que serviram de referência para consistência do resultado.

4.4 Produção do cimento ecológico

Foi utilizada como referência a Norma NBR 5736/91 para definição do teor de adição dos resíduos de cerâmica vermelha durante a produção de cimento. Esta Norma trata da produção de cimento Portland pozolânico, onde o teor de adição deste material pode variar de 15 a 50% em massa de cimento. Já para adição de gesso foi utilizado como referência os dados obtidos por FLORES MEDINA *et al.*, 2016), com teor variando de 3 a 6% em massa no cimento. Para tanto foi feito um planejamento fatorial 2^3 com repetição no ponto central, utilizando o *Software Statística* 12.0. Com isso foi obtida a sequência dos ensaios com as respectivas receitas para cada amostra (Tabela 4).

Tabela 4 - Planejamento experimental Cimento Pozolânico NBR 5736-1991

Ensaio	Resíduos de Tijolo %	Teor de Gesso %	Teor de Calcário %	Teor de Clinquer %	Soma (%)
Am 0	0	3	5	92	100
Am 1	15	3	5	77	100
Am 2	15	6	5	74	100
Am 3	50	3	5	42	100
Am 4	50	6	5	39	100
Am 5	15	4,5	5	75,5	100
Am 6	50	4,5	5	40,5	100
Am 7	30	3	5	62	100
Am 8	30	6	5	59	100
Am 9	30	4,5	5	60,5	100
Am 10	30	4,5	5	60,5	100
Am 11	30	4,5	5	60,5	100

Para a obtenção das amostras de cimento ecológico, foi feita a moagem da mistura utilizando um moinho de bolas. A mistura continha 5 kg de materiais, de acordo com a Tabela 7, e foi submetida à moagem por um período de 32 minutos até que os parâmetros físicos atendessem os requisitos estabelecidos em norma, como grau de finura, através de ensaio de granulometria utilizando um peneirador a vácuo e peneira 45µm, ensaio de superfície específica, utilizando um permeabilímetro de Blaine NBR NM 76/98, perda de massa a 950°C segundo NBR NM 18 e massa específica NBR NM 23/2000. A composição química foi determinada segundo item 4.3.3.

Após a confecção das amostras e adequação dos parâmetros físico-químicos, as mesmas foram submetidas a ensaios mais apurados para conformação dos mesmos.

4.5 Caracterização físico-química, mecânica e de durabilidade dos cimentos ecológicos

4.5.1 Determinação dos tempos de pega

Os tempos inicial e final de pega das amostras foram determinados segundo a Norma NBR NM 65/2003. Para tanto foi utilizado o aparelho manual de Vicat, composto de agulhas para determinação dos tempos e da sonda Tetmajer, para determinação da consistência Normal da pasta (NBR NM 43), ou seja, a relação água/cimento ideal. Uma vez determinado a consistência Normal da pasta, a mesma foi preparada para determinação dos tempos de pega. A pasta a ser ensaiada foi composta de 500g de amostra de cimento e água de acordo com a relação de consistência obtido. Para a mistura da pasta foi utilizado um misturador padrão com uma pá rotativa e com rotações de 140 e 285 rpm. Após a preparação da pasta, a mesma foi colocada numa forma do tipo tronco cônico, onde foi submetido a uma série de furações utilizando agulhas de início de pega e após a determinação do início, utilizado à agulha de fim, até atingir um valor especificado. Os tempos foram determinados levando em consideração o momento do lançamento do cimento na água, até os valores especificados através das penetrações experimentais. A Figura X exemplifique este ensaio.

4.5.2 Determinação da resistência à compressão

Para avaliar a influência dos resíduos na resistência a compressão, foi confeccionada corpos de prova de acordo com a norma NBR 7215/96, com dimensões de 100 mm X 50 mm de diâmetro. Os mesmos foram submetidos a um período de cura de 28 dias, em tanque com água saturada com cal e temperatura de 21°C aproximadamente. Foi feito o acompanhamento do desenvolvimento de resistência após a confecção das amostras de 1, 3, 7 e 28 dias. Os corpos de provas foram preparados, misturando 624g de cimento, 1872 g de areia normatizada e relação água/cimento de 0,48. Para preparação da argamassa, foi utilizado um misturador mecânico, respeitando os tempos de mistura água-cimento, durante 30 s e rotação da pá de mistura de 140 rpm e após inserção da areia normal, com tempo de mistura de 2 minutos com rotação de 285 rpm. Com a argamassa pronta, foram utilizadas formas cilíndricas, preenchidas com auxílio de espátulas, quatro camadas de material e adensadas com soquete padrão para retiradas de possíveis bolhas, aplicando 30 golpes em cada camada. Após isso as fôrmas foram colocadas em câmara úmida por um período de 24 horas, em atmosfera de 95% de umidade relativa e 21°C. Depois de 24 horas é feito a desforma e os corpos levados para o tanque de cura em água saturada com cal, por até 28 dias. Para determinação das resistências, foi utilizada uma prensa hidráulica com capacidade para 200KN.

4.5.3 Determinação da porosidade e absorção de água por imersão e fervura

A determinação da porosidade foi feita de acordo com as normas (NBR 09778) (ASTM C642), bem como a metodologia utilizada por CONTRERAS *et al.*, 2016), na qual utilizam o princípio de Arquimedes como critério físico. As amostras de corpo de prova foram submetidas a uma sequência de aquecimento e absorção de água para avaliar os vazios presentes. Os corpos de prova foram colocados em estufa a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ por um período de 72 horas, após isso foi retirado e colocado em dessecador até temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$, tendo sua massa determinada em seguida. Os mesmos foram então colocados submerso em água a temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ por um período de 72 horas. Logo após foram retirados, tendo o excesso de água retirado e então registrados suas massas. A etapa de saturação foi completada, colocando as amostras imersas num béquer com água e levando à ebulição num bico de Bunsen por 5 horas. Após isso, as mesmas foram resfriadas por um período de 14 horas, de forma natural até temperatura de

23±2°C e sua massa registrada na sequência. Foram realizadas as pesagens hidrostáticas das amostras, através da imersão em béquer com água. Após estas séries de ensaios, foram feitos os cálculos para determinação da densidade aparente para cada etapa, absorção de água e teor de vazios, de acordo com as Equações 9 e 10:

$$\text{Abs}(\%) = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100 \quad (9)$$

$$\text{vazio}(\%) = \frac{m_w - m_d}{m_w - m_i} \times 100 \quad (10)$$

onde, m_w é massa úmida; m_d é massa seca e m_i é massa após imersão em água.

4.5.4 Determinação dos álcalis totais e solúveis

A determinação dos teores de álcalis, principalmente os óxidos de sódio (Na_2O) e potássio (K_2O), foi determinada via espectrofotometria de chama de acordo com as Normas NBR NM 17 e 22. Primeiramente foi feito a determinação dos álcalis totais, onde feito à pesagem de 1 g de cimento num cadinho de platina para posterior ataque químico. Primeiramente foi adicionado cinco gotas de água, na sequência foi adicionado 1 mL de ácido nítrico concentrado (HNO_3), acrescentado 2 mL de ácido perclórico concentrado (HClO_4) e 5 mL de ácido fluorídrico concentrado (HF) deixando na chapa a 180 °C até ficar com aspecto xaroposo. Após isso, acrescentou-se 0,5g de ácido bórico (H_3BO_3) e deixou-se em repouso na chapa por 24h. Em seguida continuou-se a dissolução acrescentando 20 mL de água quente e 1 mL de HCl concentrado. Transferiu-se para um béquer de 250 mL diluindo até 100 mL com água com mais 5 mL de ácido clorídrico. Deixou-se na chapa por 10 minutos e depois filtrou-se em faixa branca para um béquer de 400 mL. Aqueceu-se o filtrado e acrescentou-se 2 gotas de vermelho de metila e titulou-se com solução 1:1 de NH_4OH até mudança de coloração do vermelho para amarelo. Depois disso, acrescentou-se 45 mL de oxalato de amônio quente. Deixou-se em repouso por 30 minutos e filtrou-se em faixa azul para um balão volumétrico de 250 mL. Após esta etapa, ligou-se o fotômetro de chama, que foi utilizado para determinação da concentração dos álcalis, 30 minutos antes e preparar as soluções que foram utilizadas para calibração do mesmo. Foram utilizadas para curva de calibração soluções de Na_2O nas

concentrações de 100,80,60,50,40 e 20 ppm e para o K_2O , soluções também de 100,80,60,50,40 e 20 ppm.

4.5.5 Determinação da resistência a sulfatos

Para avaliar a resistência das argamassas a meios sulfatados, este ensaio foi feito submetendo os corpos de prova à cura acelerada numa solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4) e tendo como referência outra solução de água com cal hidratada. Para tanto foram preparados corpos de provas prismáticos de dimensões 25x25x285mm, de acordo com a norma NBR 13583/96. As argamassas foram preparadas tendo como composição 500g de cimento ecológico, 1600 g de areia normal, composto por 400g de cada fração N°s 8, 16, 30 e 100, de acordo com a NBR 7214 e relação água/cimento de 0,60, ou seja, 300g em massa. O modo de preparo da argamassa foi feito de acordo com NBR 7215/96, Item 4.5.2. A forma de preenchimento das formas prismáticas foi feita utilizando espátulas específicas, com duas camadas iguais de materiais e adensamento para eliminar bolhas presentes. Depois de preparados, os corpos de prova foram submetidos à cura inicial em câmara úmida por um período de 40 a 48 horas. Logo em seguida foram feitas as desformas das amostras e colocadas em tanque de cura de água saturada com cal por um período de 12 dias. Após este período, iniciou-se a avaliação das amostras. As mesmas foram avaliadas através das medições da expansão destas barras durante o período de cura, utilizando um relógio comparador ou um paquímetro. Os corpos de provas foram imersos em solução de sulfato de sódio e comparado com outro imerso em solução de água com cal, por um período de 42 dias. Foram feitas medições no período de 7, 14, 21, 28, 35 e 42 dias e considera-se resistente aos sulfatos, se aos 42 dias em solução de Sulfato de Sódio, a variação dimensional for menor que 0,04% segundo ASTM C 150.

4.5.6 Determinação de mitigação da reação álcalis-agregado

Este ensaio está relacionado com a durabilidade e visa determinar a capacidade destes cimentos em mitigar as reações entre os álcalis presentes no cimento (Na_2O ou K_2O) com agregados potencialmente reativos, como as reações álcalis-sílica. Para validar estas amostras,

este experimento foi realizado segundo NBR 15577-4, preparando corpos de provas prismáticos de dimensões 25x25x285mm para avaliar suas expansões quando submetidos à cura acelerada em solução 4% de hidróxido de sódio a 80°C. Para isso foi preparado argamassas com os cimentos em questão utilizando uma mistura de 440g de amostra com 990g do agregado reativo, que neste caso foi usado vidro moído *Pyrex* de borossilicato, segundo NBR 12651/92. O modo de preparado estava de acordo com a NBR 7215, item 4.5.2. Após isto, foi realizado o preenchimento dos moldes em duas camadas utilizando espátulas e soquetes para o adensamento.

Após a moldagem, as barras de argamassas permaneceram nos moldes por 24 horas em câmara úmida, como descrito em 4.5.1. Neste instante foi preparada a solução com hidróxido de sódio, diluindo 40g deste reagente em 900 mL água destilada e após diluição até 1000 mL. Foi preparada solução suficiente para acondicionar as barras e depois das 24 horas, foram feitas as desformas e realizado as primeiras medições das barras, antes de coloca-las imersas na solução. Logo em seguida, foi acondicionado cada barra e levado para cura por período de 30 dias, sendo feito leituras intercaladas neste período e considera-se mitigadora desta reação, quando aos 14 dias em solução alcalina, a variação dimensional for menor 0,10% de acordo com a NBR 15577-1.

4.5.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microestrutura do corpo de prova foi avaliada utilizando-se microscopia eletrônica de varredura (Modelo VEGA 3), aplicada a uma tensão de 10KV, com magnitude de 5Kx. As amostras foram fixadas em suportes (*stubs*) de alumínio, com fita adesiva de carbono. Para conferir condutividade as mesmas, estas foram recobertas com uma camada de ouro de 5nm em metalizador a vácuo, modelo Q150R, por 360 segundos, a 20 mA.

4.6 Análise estatística

Segundo Mehta e Monteiro (2006), a resistência do concreto é a propriedade mais valorizada por designers e engenheiros de qualidade para sua aplicação. Dessa forma se faz necessário avaliar, mediante a produção de um cimento com novos componentes, qual a influência nesta variável. Para tanto, foi utilizado o *software statistica* 12.0 para avaliar o

comportamento dos cimentos frente a variações dos resíduos, principalmente com relação ao RCV, pois foi adicionado até 50% do mesmo. A Figura 4 traz uma das análises estatística, o gráfico de Pareto, para verificar influência destes resíduos na resistência à compressão do cimento obtido.

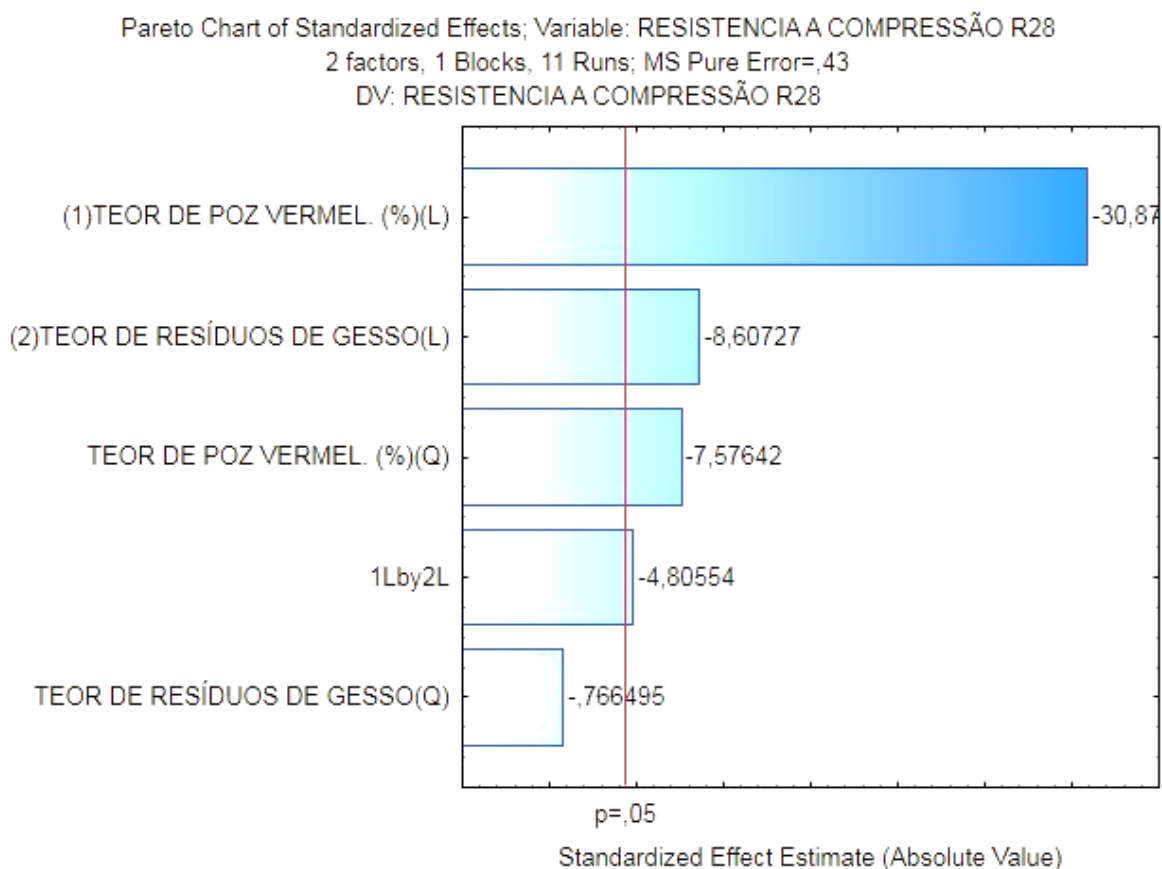


Figura 4 - Gráfico de Pareto para resistência à compressão.

Como se pode perceber na Figura 4, o teor de pozolana ou RCV tem maior impacto nesta variável. Pôde-se perceber ainda, quando avaliado a variação da resistência à compressão para adição de 30% de RCV e mantendo o teor de gesso em 4,5% constante, que uma variação de +1% no RCV pode variar em até -0,92MPa neste parâmetro.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão abordados os dados obtidos durante a pesquisa desde a caracterização dos resíduos até a obtenção dos resultados dos ensaios a partir das argamassas incorporadas com os mesmos.

5.1 Caracterizações dos resíduos

Antes da incorporação dos resíduos na produção de cimento Portland faz-se necessário avaliar a viabilidade dos mesmos quanto a sua aplicação. Dessa forma, os mesmos foram caracterizados quanto a sua composição química, mineralógica e efeito pozolânico do RCV.

5.1.1 Análise Química do RCV

A Tabela 5 mostra a composição química dos resíduos de cerâmica vermelha como forma de avaliar requisitos mínimos para adequação do uso no cimento, principalmente com relação à presença de alguns componentes químicos exigidos para que o mesmo seja classificado como material pozolânico (ILI *et al.*, 2016).

Tabela 5 - Composição química dos resíduos de cerâmica vermelha

Composição	Limite NBR 12653	Resíduos de Cerâmica Vermelha (%)
Dióxido de Silício (SiO ₂)		71,51
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		17,90
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)		4,74
Óxido de cálcio (CaO)		0,68
Óxido de magnésio (MgO)		0,97
Óxido de sódio (Na ₂ O)		0,74
Óxido de potássio (K ₂ O)		1,38
Pentóxido de difósforo (P ₂ O ₅)		0,11
Óxido de titânio (TiO ₂)		0,19
Perda ao fogo	≤ 10%	1,20
Equivalente alcalino em Na ₂ O ⁽¹⁾		1,64
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	>70%	94,15

Nota 1- Equivalente alcalino = %Na₂O+0,658*% K₂O

A partir da análise da Tabela 8, pode ser observado que a soma dos compostos químicos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 obtido foi de 94,16%, obedecendo os requisitos de norma, maior que 70%. Isto mostra que o mesmo está em consonância com as recomendações mínimas descrita pela NBR 12653. Resultados semelhantes também foram observados nos trabalhos de KAZMI *et al.*, (2017) e MEDINA *et al.*, (2016). Estes componentes são os responsáveis pelas reações pozolânicas juntamente com os produtos de hidratação do cimento, em particular o hidróxido de cálcio, melhorando algumas propriedades tanto do cimento como também de concreto.

Outros resultados semelhantes foram obtidos por Robayo-Salazar *et al.*, (2017), quando avaliaram os resíduos de cerâmica vermelha para ser utilizado na produção de cimento, com o intuito de reduzir em até 30% o conteúdo de Clinquer e assim minimizar as emissões de CO_2 antropogênico.

Os dados apresentados na Tabela 5 corroboram com os obtidos por For *et al.*, (2017), quando avaliaram a possibilidade de utilizar resíduos de demolição, principalmente tijolo na produção de concreto, como material pozolânico.

Roselló *et al.*, (2017), avaliando a possibilidade de inserir resíduos de cinzas de casca de arroz na matriz cimentícia, verificaram uma quantidade considerável principalmente de sílica amorfa, componente básico necessário para uma reação pozolânica, podendo perceber que uma adição de 25% deste passivo melhorou em até 98% as propriedades mecânicas de argamassa.

5.1.2 Análise mineralógica do RCV

A Figura 5 mostra a composição mineralógica do RCV, indicando a presença de elementos cristalinos e amorfos.

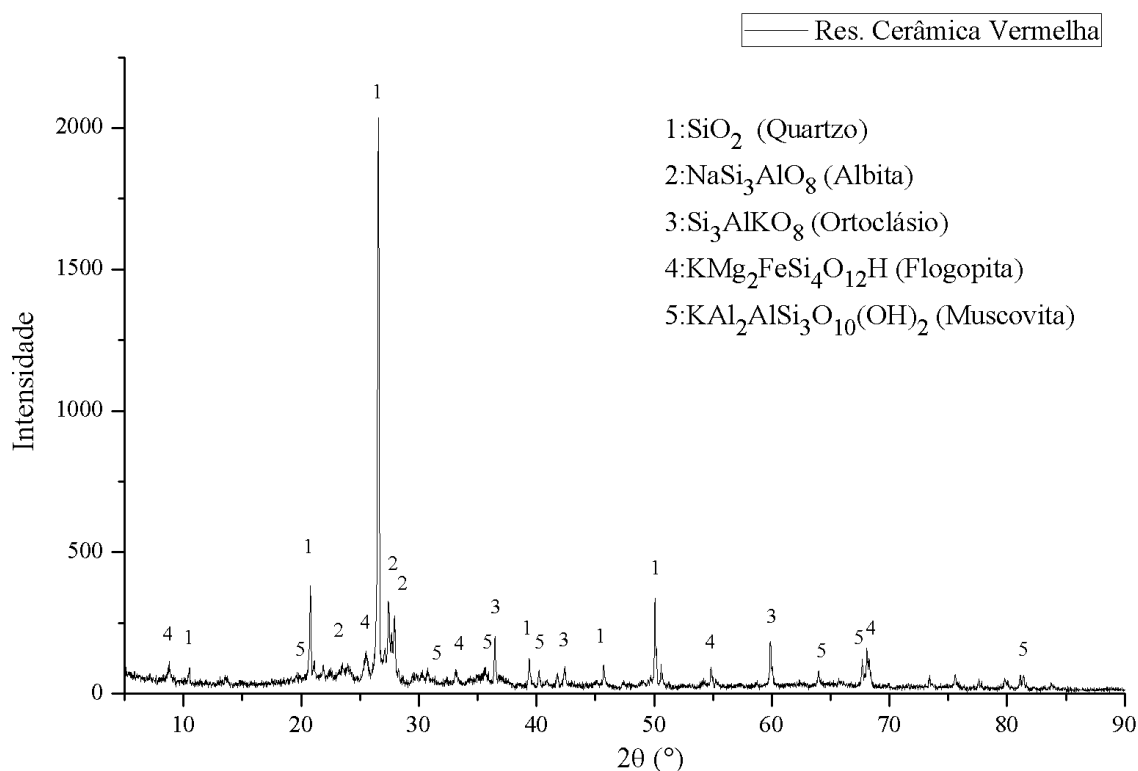


Figura 5-Difratograma do RCV

A análise de DRX confirmou a presença de quartzo (SiO_2) (Ref.Padrão:969012601), Muscovita ($\text{Al}_2\text{Si}_5\text{KO}_{16}$) (Ref.Padrão:969004410), Flogopita ($\text{KMg}_2\text{FeSi}_4\text{O}_{12}$) (Ref.Padrão:969010399), Ortoclásio (Si_3AlKO_8) (Ref.Padrão:969000312) e Albita ($\text{NaSi}_3\text{AlO}_8$) (Ref.Padrão:96-900-9664) como componentes predominantes. Os três últimos são minerais tipicamente feldspatos e altamente cristalinos em condições naturais (MARMOL *et al.*, 2010).

É importante salientar que estes resíduos contêm materiais cristalinos, pouco ou não reativos presentes no sistema pozolana-cimento, os quais atuam apenas como *filler*, material *inerte* (que ao reagir com os hidratados do cimento não desenvolvem ganho de resistência mecânica), evidenciado pela presença de minerais com picos mais intensos. Também se faz

importante ressaltar que a detecção de minerais como a muscovita, se faz bastante complexa, tendo em vista a baixa intensidade dos seus picos, distribuídos bem próximos ao ruído de fundo dos picos difratométricos.

Este resíduo é obtido após calcinação em temperaturas que pode variar entre 600-900°C, e como relatam Kakali *et al.*, (2001) e Medina *et al.*, (2016), esta condição causa ativação química em minerais argilosos e em filossilicatos como as muscovitas, faz com que esta apresente maior pozolanicidade. Isso se deve a perda de água quimicamente combinada, quebra de ligação e até mesmo ruptura de sua estrutura cristalina. Na Figura 5, pode ser observado picos de difração da muscovita em 2θ igual a 8,5°, 19°, 32°, 36°, 41°, 64°, 68 e 81°. Esta região da estrutura dos resíduos pode estar relacionada com produção de minerais com propriedades cimentícias.

Outras tentativas de inserir resíduos com estas características no cimento ou concreto foi possível devido os mesmos apresentarem estruturas com características amorfas e ativas quimicamente, observada via análise da difração de raios-X.

Mikhailenko *et al.*, (2018) verificaram a eficácia do metacaulim nas configurações do concreto e avaliando seu potencial pozolânico, concluíram que este material é resultado da ativação térmica do caulim, devido desidroxilação da sua estrutura. Resultados semelhantes foram obtidos por Ili *et al.*, (2016) e Kazmi *et al.*, (2017).

5.1.3 Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal dos resíduos de cerâmica vermelha

Além da caracterização química e estrutural, a viabilidade do uso durante a produção de cimento ou como aditivo em concretos, é validada através do ensaio químico entre o resíduo e o hidróxido de cálcio (ROSELLÓ *et al.*, 2017). A Tabela 6 mostra os resultados dos ensaios realizados na determinação do índice de atividade pozolânica (IAP).

Tabela 6 - Resultado da Atividade Pozolânica do Resíduo de Cerâmica Vermelha

Tabela 6 – Resultado da Atividade Pozolânica do Resíduo de Cerâmica Vermelha							
RESÍDUO	Massa específica (g/cm³)	Massa de Ca(OH)₂ (g)	Índice de atividade pozolânica com Cal				Limite NBR 12653 (MPa)
			Resistência à compressão (MPa)				
			01	02	03	Média	
Cerâmica Vermelha	2,67	104	8,2	8,6	8,2	8,3±0,4526	≥ 6

Como se pode observar, os resultados mostram um valor em torno de 8,3±0,4526 MPa de resistência à compressão para o resíduo, estando 38,33% maior que os 6,0 MPa como limite de Norma. Este resultado mostra que o mesmo pode ser adicionado como aditivo, tanto na produção de cimento como também em argamassas ou concreto como aditivo.

Castro *et al.*, (2017), utilizaram metodologia semelhante para avaliar as propriedades de resíduos de telha vermelha e avaliar seu uso em concreto. Segundo Tydlitát, Svara e Robert (2018), esta característica é importante e determinante na melhoria das propriedades mecânicas de argamassas e concretos, estando relacionado as reações adicionais que são proporcionadas quando a parte ativa deste resíduo interage com a Portlandita (Ca(OH)₂) liberada durante a hidratação dos componentes do clínquer.

For *et al.*, (2017) utilizaram resíduos de cerâmica como aditivos em cimento e pôde verificar um teor de material amorfo no material comprovado mediante análise da atividade pozolânica.

Ili *et al.*, (2016) verificaram os efeitos mecânico e térmico na ativação pozolânico de caulinita e mica, obtendo resultados interessantes e possibilidade de uso destes materiais como aditivos.

De um modo geral, os valores obtidos nos ensaios de IAP com cal para os resíduos de cerâmica vermelha, confirmam o papel da reação deste material com o hidróxido de cálcio. Durante a hidratação dos silicatos de cálcio do clínquer, na qual tem este hidróxido como um dos seus produtos, o mesmo contribui de forma positiva e pode ser reaproveitado na matriz cimentícia, minimizando assim os impactos ambientais que são causados durante a produção do clínquer.

5.1.4 Análise Química do RGC

A Tabela 7 mostra os resultados da análise química do RGC.

Tabela 7 - Composição química do RGC

Composição	Resíduos de Gesso (%)
Dióxido de Silício (SiO ₂)	3,74
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	0,57
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	0,46
Óxido de Cálcio (CaO)	26,83
Óxido de Magnésio (MgO)	0,57
Anidrido Sulfúrico (SO ₃)	43,98
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	0,14
Óxido de Potássio (K ₂ O)	0,16
Perda ao fogo	21,49
Somatório	97,6

As normas que tratam da produção de cimento estabelecem que uma ou mais formas de sulfato de cálcio podem ser adicionado durante o processo de moagem, não determinando um limite para a composição química do mesmo. No entanto deve ser capaz de manter o conteúdo de SO₃ (trióxido de enxofre) no cimento, no caso do tipo pozolânico, como determinação química, em torno de 4% em massa. Mesmo assim, pode-se perceber uma concentração predominante deste composto em comparação aos demais, mostrando ser um material com certo grau de pureza em termos de sulfato de cálcio, avaliado através da análise da sua perda de massa de 21,49%, o que favorece a formação de compostos durante a hidratação do cimento.

Segundo relatam alguns autores, uma concentração de SO₃ maior que 40% no gesso favorece o controle da cinética reacional de hidratação do cimento. Este fato pode ser observado em outros trabalhos como os de (CHANDARA *et al.*, 2009; CAMARINI *et al.*, 2016; FLORES *et al.*, 2016; MAHMOUDI *et al.*, 2016; XU *et al.*, 2017), quando tentaram inserir fontes de sulfato de cálcio de diversos ramos industriais como inibidor das reações violentas no cimento.

5.1.5 Análise Mineralógica do RGC

A Figura 6 mostra as fases mineralógicas contidas na amostra de gesso em comparação a Gipsita natural.

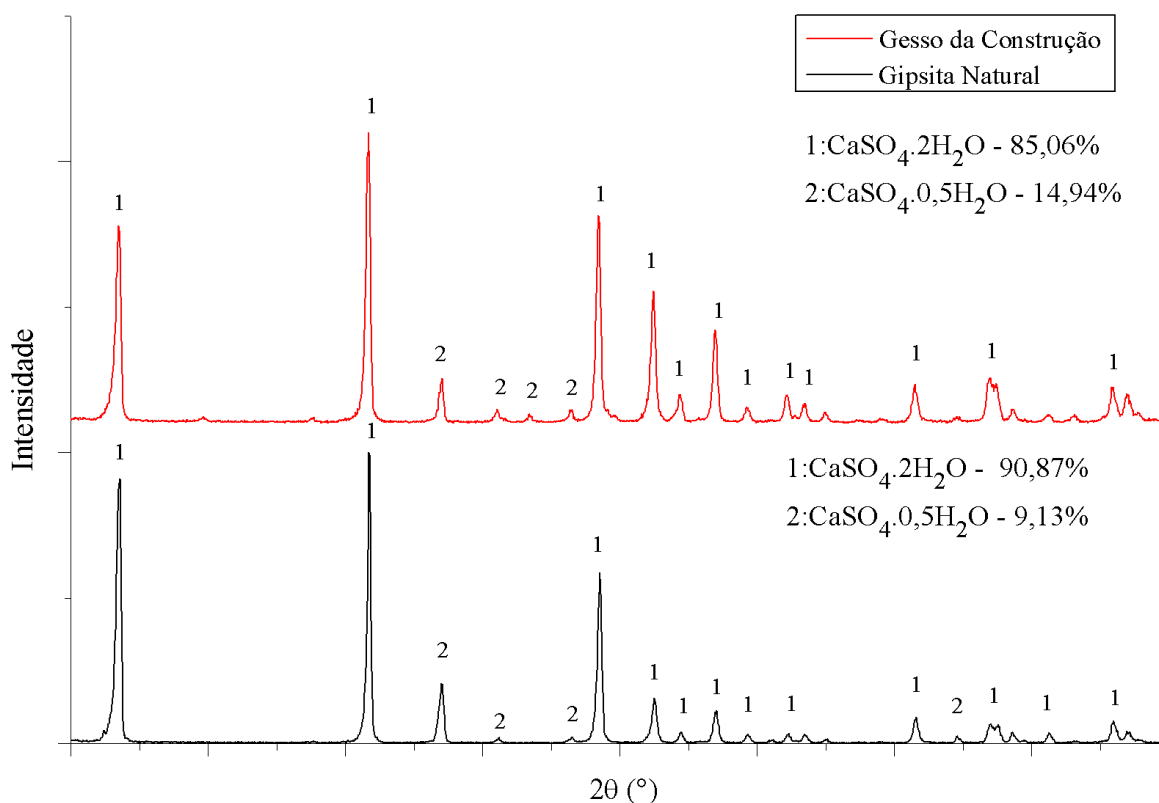


Figura 6-Difratograma do RGC (comparação Natural x resíduo)

A análise difratométrica mostrou a presença do mineral Gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Ref. Padrão: 96-500-0040) e bassanita ou hemidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) (Ref. Padrão: 96-901-2212), estando em consonância com o que foi verificado por CAMARINI *et al.*, (2016) e FLORES *et al.*, (2016), onde estudaram as características de resíduos de placas de gessos e *drywall*.

O comportamento do início das reações de hidratação do cimento com consequente perda da plasticidade da pasta está intrinsicamente relacionado com a capacidade deste composto em atenuar as reações rápidas. Os aluminatos de cálcio (C_3A) presentes no clínquer são os componentes ligados as rápidas interações com a água, formando novas fases mineralógicas como os aluminatos de cálcio hidratado de forma quase instantânea, caso não

haja uma substância para blindar o ataque do mesmo. A esta reação descontrolada dar-se o nome de pega rápida. Portanto são adicionadas fontes de sulfatos de cálcio como o gesso para regular esta reação e preservar a trabalhabilidade (QUENNOZ; SCRIVENER, 2012). Dependendo do teor de hemidrato, na qual possui solubilidade maior em relação ao diidrato, poderão ocorrer fenômenos de falsa pega, devido a reidratação do hemidrato.

Na Figura 6 observa-se a presença majoritária do diidrato em comparação a bassanita, quando é avaliado o RGC em relação à gipsita ao longo de todos os picos obtidos, sendo este componente do gesso o responsável pelo controle efetivo e possibilidade de uso no cimento. Em seus trabalhos, CHANDARA *et al.*, (2009) e GERALDO *et al.*, (2017) utilizaram resíduos de gesso com intuito de contribuir com meio ambiente, e observou neste resíduo uma quantidade satisfatória de gipsita, na qual obteve um desempenho eficiente no controle das reações. Gazquez *et al.*, (2013) observaram que o teor de gipsita foi capaz de atenuar as reações de hidratação do cimento quando utilizou resíduos de gesso da indústria de TiO_2 . Todas estas observações foram feitas avaliando os tempos de pega do cimento.

5.2 Influência dos resíduos nos tempos de pega

Uma das propriedades que se faz importante avaliar é como os tempos de pega do cimento se comportam mediante a substituição do seu principal componente por resíduos industriais. A Figura 7 mostra o resultado obtido para este parâmetro.

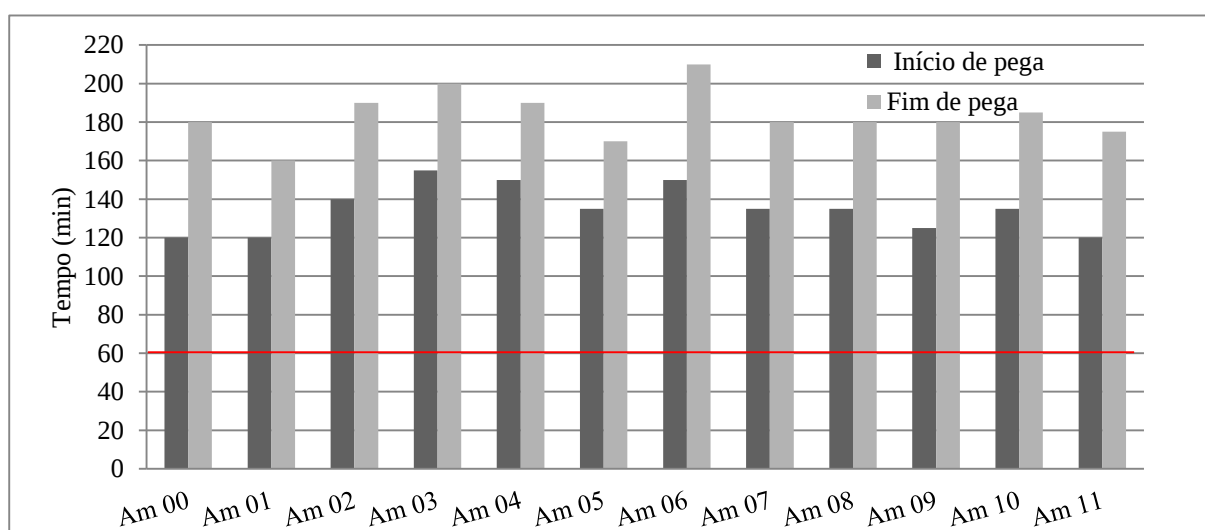


Figura 7-Tempos de pega dos cimentos ecológicos.

A análise desta propriedade foi realizada para determinar a influência da adição no comportamento da mistura em estado fresco, principalmente a quantidade de RGC adicionado, uma vez que o mesmo é o responsável direto pela inibição da cinética reacional do cimento, em função do conteúdo de SO_3 .

As normas que tratam da produção de cimento em escala industrial NBR NM 65/2003 determinam a comercialização de cimento que contenham início de pega maior que 60 min e que o fim de pega não exceda os 600 min, de forma que se tenha tempo adequado para aplicação do mesmo. Desse modo pode-se considerar que os resultados obtidos encontram-se dentro do limite estabelecido, mesmo quando comparado o cimento padrão (Am00), ou mesmo quando o teor de clínquer é bem maior em comparação as adições com 50% de resíduo de RCV ou mesmo 6% de gesso.

Este fato está em consonância com os resultados de Chandara *et al.*, (2009); Camarini *et al.*, (2016); Flores *et al.*, (2016); Mahmoudi *et al.*, (2016) e Xu *et al.*, (2017), onde obtiveram resultados satisfatórios no controle da cinética reacional quando tentaram, em seus estudos, inserir passivos ambientais na indústria cimenteira.

Embora pequenas variações no tempo de início e fim de pega tenham sido observadas para as pastas contendo os resíduos em ambos os teores de substituição, não houve uma variação significativa com relação à amostra de controle, sem substituição (Am00), o que pode contribuir para favorecer a recomendação do uso deste resíduo como material de substituição do cimento.

5.3 Influência dos resíduos na resistência à compressão

As Figuras 8 e 9 mostram o desenvolvimento de resistência das amostras de cimento ao longo de 28 dias de cura.

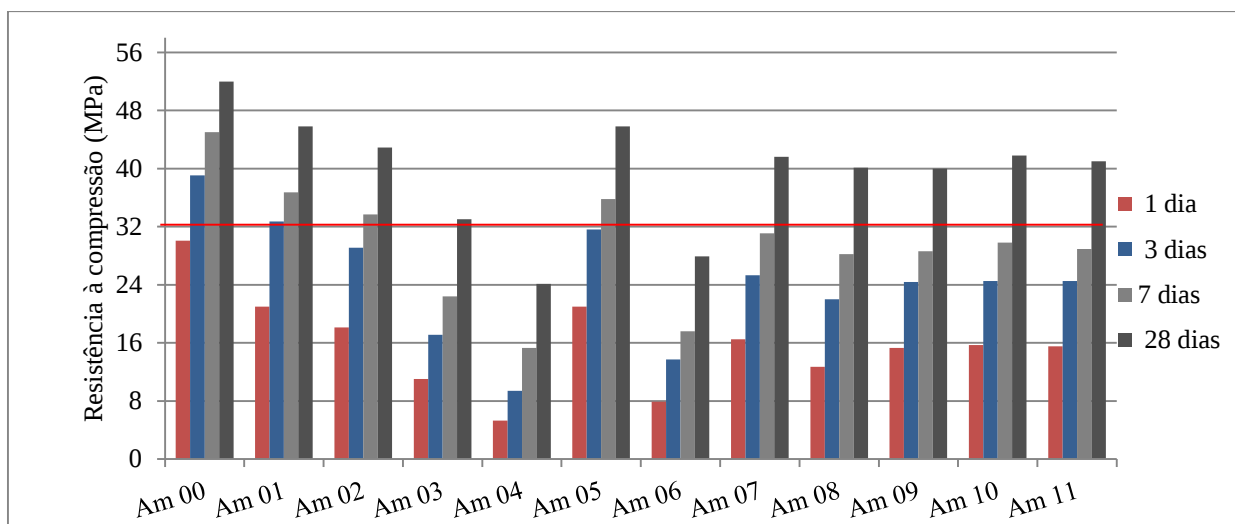


Figura 8-Desenvolvimento de resistência à compressão

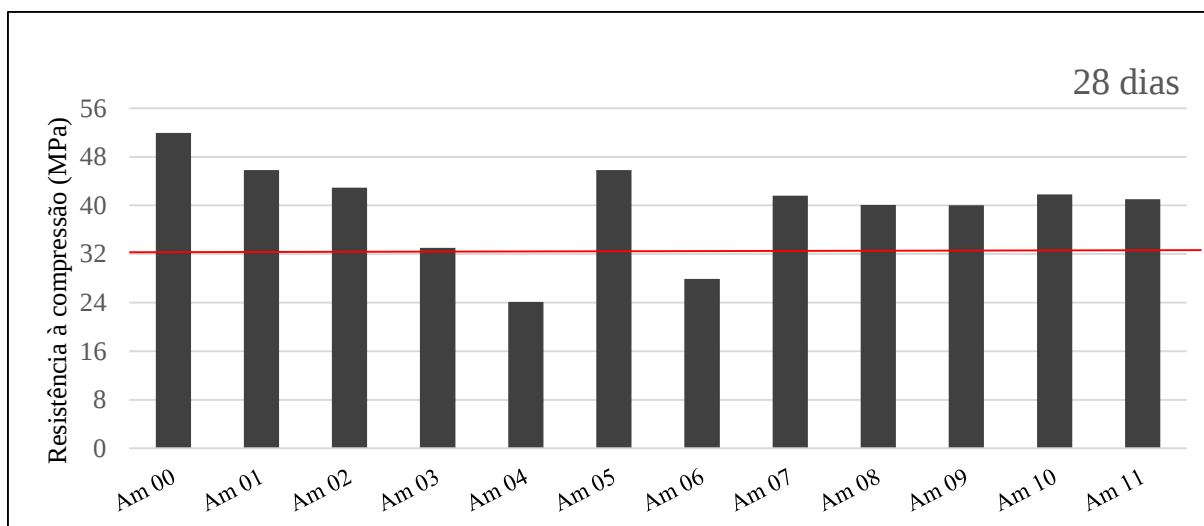


Figura 9-Resistência à compressão aos 28 dias de Cura

As normas que legalizam a produção de cimento classificam os mesmos de acordo com a classe de resistência a compressão aos 28 dias de cura. A Tabela 1 (seção 3.2.1), mostra os tipos de cimento mais produzidos e as respectivas classes de resistência. Nela, pode-se perceber as classes de resistências a 28 dias de 25MPa, 32MPa e 40 MPa. As de 25 MPa são as menos utilizadas, sendo que neste trabalho pôde-se observar valores de até 40MPa para adições de

30% de RCV associado a todos os níveis de RGC. Quando se compara este resultado com os valores para o cimento sem adição (Am 00), observa-se uma diminuição de 11,85% no valor da resistência para adição de 15% de RCV e de 19,93% para adição com até 30% de RCV, no entanto, mesmo com esta diminuição ainda está em consonância com a classe na qual se deseja classificar este produto, seja na classe 32MPa ou até mesmo na classe 40MPa para este tipo de cimento.

O desenvolvimento de resistência a forças de compressão varia de acordo com a adição dos resíduos. No cimento, quanto maior a quantidade de clínquer na mistura maior será a característica de resistência obtida, estando atrelado aos produtos de hidratação formados, em particular os géis de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). No entanto, um dos produtos de hidratação, o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , em nada contribui para aumento de resistência, apesar de estar envolvido na matriz (MAKHLOUFI *et al.*, 2015).

Além disso, por ser um composto solúvel, o mesmo pode vir a causar problemas estruturais, ao passo que ele pode ser lixiviado e causar aumento no nível de poros do concreto. Por outro lado, quando este é submetido à reação com materiais argilosos com características pozolânicas, reage com a parte ativa deste material produzindo mais compostos cimentícios (C-S-H), que garantem maior capacidade de resistência a esforços. Este fato pode explicar, que neste trabalho, a reação pozolânica contribuiu para compensar a perda de resistência aqui mencionado, quando da diluição do cimento pelos resíduos (CARVALHO *et al.*, 2018).

Estes resultados estão de acordo com outros autores quando buscaram alternativa sustentável para produção de cimento e concreto. Tahar *et al.*, (2017), avaliando os efeitos de uma mistura de resíduos no concreto, verificaram um resultado satisfatório na resistência mecânica a 28 dias de cura.

Harbi *et al.*, (2017), estudando a possibilidade de inserir uma mistura de resíduos de tijolo, vidro moído e metacilim no cimento, melhoraram o desempenho mecânico, através de reações pozolânica adicionais na matriz.

Do exposto acima, pode-se concluir que a presença do resíduo torna o cimento obtido diferente do cimento Portland sem substituições, não somente pela presença do material como *filler*, como também pelo potencial pozolânico do mesmo. Desta forma, se faz necessário avaliar os novos cimentos como um produto com propriedades diferentes do cimento de origem, já que a intensidade e o caminho das reações pozolânicas dependerá de fatores como, por exemplo, a composição química e mineralógica da matéria-prima de fabricação e os parâmetros associados ao processo de queima da cerâmica vermelha a partir da qual a pozolana foi obtida.

5.4 Avaliação da Porosidade

A Figura 10 mostra a porosidade e absorção de água das amostras.

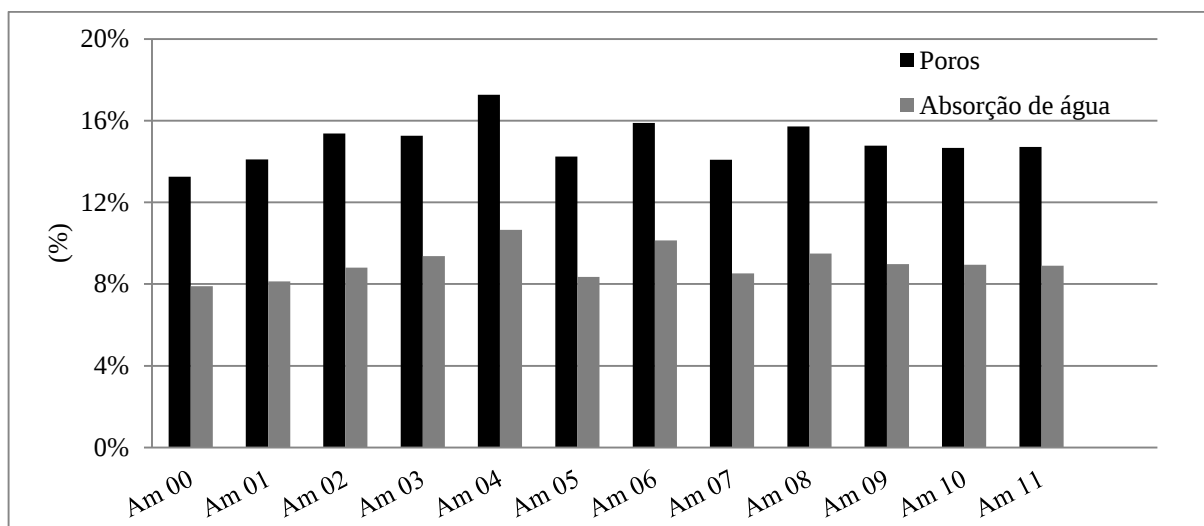


Figura 10-Porosidade das amostras de cimento ecológico

Avaliando a Figura 10, no geral não se observa uma variação tão discrepante de uma mostra para outra, mesmo quando comparado ao cimento sem adição. Pode-se perceber um leve aumento na porcentagem de vazio na amostra com 50% de RCV com 6% de RGC, amostras com maiores substituição, podendo fazer uma analogia com o que foi obtido por (SIVAKUMAR *et al.*, 2017). Em seus trabalhos, estes pesquisadores observam uma redução na absorção de água quando uma há boa ligação entre as partículas de cimento, avaliando a estrutura dos poros mais compactas, resultado dos produtos de hidratação. Como relata AGRELA *et al.*, (2017), a diminuição da porosidade e consequentemente menor absorção de umidade, se deve também aos produtos de hidratação durante as reações pozolânicas que preenchem os espaços vazios. Esta propriedade está ligada diretamente a resistência à compressão, sendo a adição de resíduos uma alternativa viável para melhorar a durabilidade de argamassas e concretos, bem como o desempenho mecânico.

Harbi *et al.*, (2017), relatam em seus trabalhos que absorção de água e a porosidade variam tanto pelo preenchimento dos poros devido aos produtos de hidratação, bem como devido à distribuição granulométrica que acaba também por ter um resultado satisfatório, refletindo assim nas propriedades mecânicas. Na Figura 10, este fato pode ser observado, pois

mesmo inserindo os máximos de adição de RCV (50%) e RGG (6%), os valores de vazios e absorção estão próximos aos valores quando comparados a amostra sem adição ou mesmo com adições de 15% de RCV. Isso mostra que a distribuição granulométrica pode estar contribuindo para uma diminuição no teor de poros, mesmo não contribuindo para um incremento de resistência.

Outro fato importante se deve ao conteúdo de RCV adicionado. Percebe-se que o aumento deste elevou o conteúdo de vazios, e este fato também pode ter relação com alta porosidade de materiais argilosos, que acaba por também elevar a porosidade da argamassa. No entanto, é um aumento que não chegar a ser preocupante, pois não refletiu de forma exagerada nos resultados de resistência a compressão ou em outra propriedade, pois como mencionado, as partículas menores deste material, pode ter contribuído para compensar a porosidade deste material (ROSALES *et al.*, 2017)

Esta característica das amostras contribuem para uma proteção de estruturas que venham a ser feitas com estes cimentos, principalmente quando exposto a ambientes agressivos, evitando assim o ataque de sulfato que acaba causando sérios problemas de deterioração, devido às tensões internas criadas pelos produtos expansivos que são formados durante as reações (ASENSIO *et al.*, 2016).

5.5 Avaliação da durabilidade das argamassas compostas com o cimento ecológico

5.5.1 Resistência aos sulfatos

A Figura 11 apresenta o desempenho das argamassas em resistir a meios agressivos.

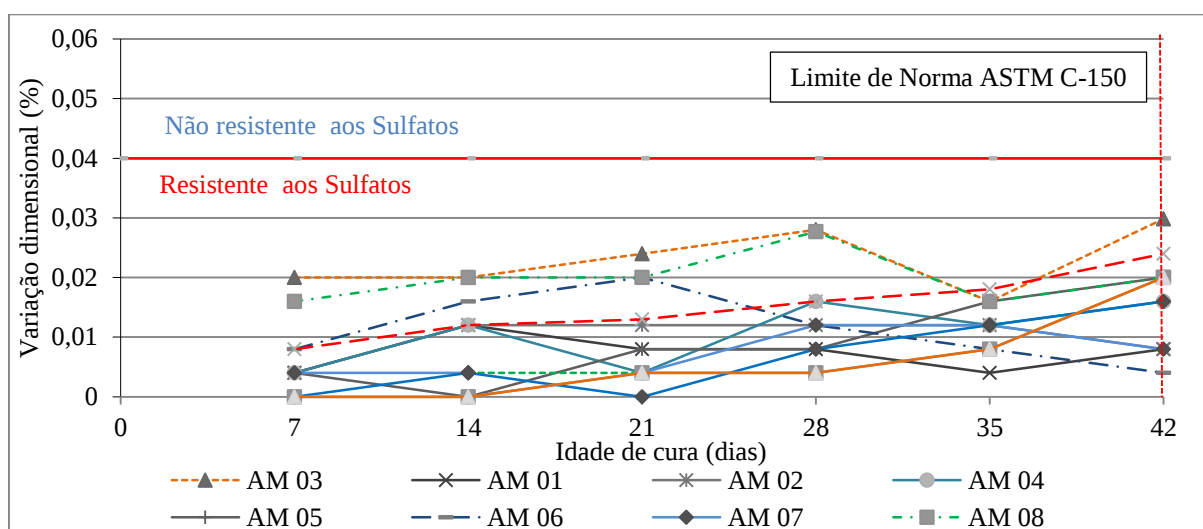


Figura 11 - Variação dimensional das barras prismáticas e avaliação da resistência a sulfatos.

Como se pode perceber, a variação dimensional das barras prismáticas para todas as amostras em questão mostra que os cimentos foram capazes de resistir à atmosfera severa a qual estava submetida, quando se compara os valores até 42 dias de cura nesse meio. Segundo ASTM C-150, um cimento é resistente a sulfato se neste período de cura a variação dimensional for inferior a 0,04%. Outro fato importante utilizado como critério de avaliação e previsão de problema estrutural, é o conteúdo de C_3A do clínquer. Segundo NBR 5737, um cimento é resistente a sulfato se esta concentração for menor ou igual a 8%, mas como viu-se na composição do clínquer utilizado (seção 4.1.1), este valor é 7,3%, calculado de acordo com as equações de Bogue (KAZMI *et al.*, 2017), mostrando que os resultados obtidos estão em consonância com a literatura e normas regulamentadoras.

O ataque do sulfato à estrutura se dá principalmente por migração deste através do meio poroso, mas como vimos na seção 5.4, os valores da porosidades encontradas nas amostras curadas estão de acordo com o que relatam os autores para adição de resíduos. Asensio *et al.*, (2016), mostram em seu trabalho que o melhor desempenho do cimento a este meio foi

observado quando da adição de resíduos na matriz cimentícia e com isso uma diminuição no conteúdo de poros. Isto fez com que as deteriorações das amostras fossem anuladas.

Harbi *et al.*, (2017) ao inserir resíduos de caulinita, metacaulim e resíduos de tijolo, observaram a diminuição da porosidade do corpo de prova devido às reações pozolânicas e com isso limitaram as expansões químicas e as deteriorações.

Mesmos resultados foram obtidos por BULATOVIĆ *et al.*, (2017), quando avaliaram a eficiência de aditivos no cimento e a contribuição para um concreto durável, chegando a uma conclusão que os cimentos que contem adição têm desempenho melhor, principalmente a resistência a sulfato devido conter menor teor de poros nas amostras.

Outras observações importantes foram feitas quando OUYANG; CHEN; JIANG, (2014), na qual perceberam que os produtos obtidos durante a hidratação do cimento poderiam também causar expansões no concreto, no caso a etringita, resultado da hidratação do gesso com o C_3A , que dependendo da sua concentração na pasta de cimento poderá vir a causar problemas estruturais.

5.5.2 Mitigação da reação álcalis-agregado

O resultado da capacidade dos cimentos em mitigar reações álcalis-agregado são apresentados na Figura 12.

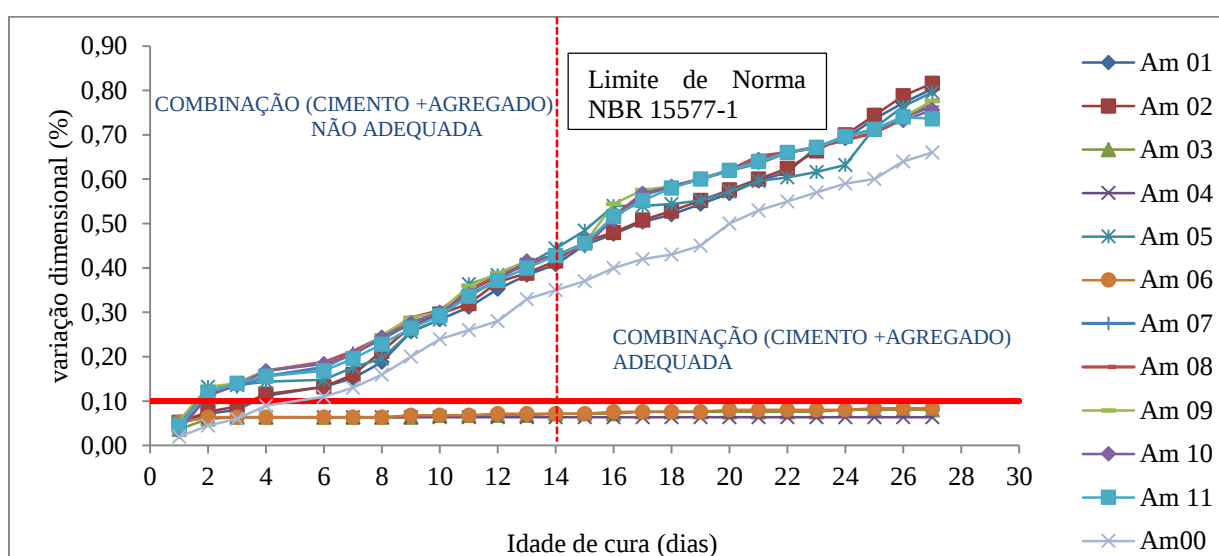


Figura 12- Variação dimensional das barras prismáticas das reações Álcalis-sílica.

A Figura 12 mostra o perfil da expansão obtida das argamassas dos cimentos. Segundo as normas vigentes um cimento é capaz de minimizar tais reações expansivas quando aos 14 dias de cura em solução alcalina, a variação dimensional for menor que 0,10%. Pode se perceber que para todas as amostras 03, 04 e 06 com 50% de adição de RCV, esta variação é atendida e isso pode estar atribuído a uma diminuição da alcalinidade do meio, pelo fato da substituição do clínquer na composição, na qual é responsável por manter o pH elevado, mesmo que esta adição tenha aumentado o teor de álcalis (KAWABATA; YAMADA, 2017).

Já para as composições com 0%, 15% e 30 % de RCV associados a todas as porcentagens de gesso, houve severa expansão nos corpos de prova. Este fato pode estar relacionado ao meio onde o pH se mantinha alcalino com tais amostras de cimento, no entanto com o sódio equivalente (Na_2Oeq) maior que 0,6% (de acordo ASTM C150). Esta condição é ideal para que ocorram as reações expansivas entre a sílica amorfa do agregado com os álcalis disponíveis em meio básico.

Kazmi *et al.*, (2017), investigaram o uso de cinzas de bagaço de cana de açúcar como material pozolânico com intuito de reduzir as reações álcalis-sílica, e relatou que o sucesso da redução estava relacionado à diminuição dos álcalis disponíveis, com equivalente alcalino menor que 0,6%.

Ribeiro *et al.*, (2012) relataram que a adição de lama vermelha como material pozolânico na tentativa de mitigar a RAS, percebeu que aos 14 dias de cura em meio alcalino, a expansão das barras foi maior que 0,10%, se mostrando ineficiente como mitigador. A preocupação do uso se deu com relação ao teor de álcalis serem maiores que 0,6% Na_2Oeq .

Li *et al.*, (2018) obtiveram redução na expansão de barras prismáticas com 50% de adição de argila e xisto concluindo também que a efetividade da redução estava relacionada com a redução dos níveis de álcalis no meio reacional.

Como se observa, esta patologia em termos de análise é similar à resistência a sulfatos, no entanto são diferentes no tocante aos mecanismos de ataque. Percebe-se que nas RAS, ocorre devido à inserção de compostos quimicamente ativo no meio, tanto oriundo do cimento ou adição como também do tipo de agregado que venha ser utilizado em concreto ou argamassas. No caso da resistência a sulfatos o fator determinante para que se iniciem as reações é principalmente porosidade alta do meio.

5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 13 mostra a análise morfológica das amostras com 30% de RCV e 4,5 % de RGC.

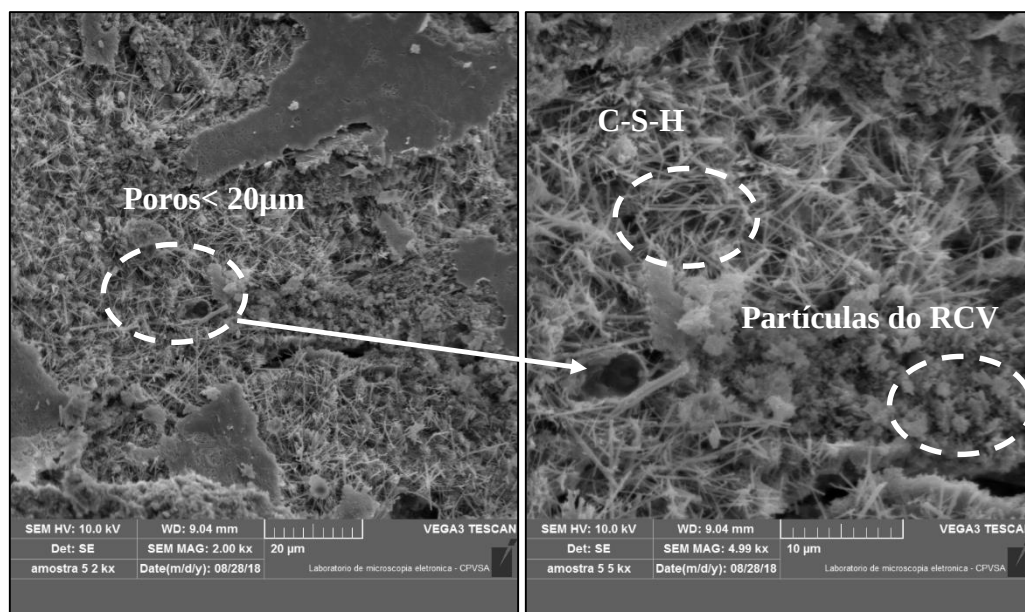


Figura 13- 2kx e 5kx da amostra com 30% de RCV + 4,5% de RGC.

Analisando a Figura 13, pode-se perceber uma estrutura com poros menores que 3 µm, partículas de material possivelmente pozolânico e formação de cristais de C-S-H, como resultado tanto da hidratação do clínquer como também das reações pozolânicas, garantindo um material menos poroso e maior resistência a esforços, corroborando assim com os resultados obtidos por (KONG *et al.*, 2018).

Kavitha *et al.*, (2016) observaram que a microestrutura de argamassas de cimento quando inseriram uma mistura de metacaulim no concreto mostrou uma superfície com poros em torno de 5 µm devido as partículas destes preencherem todos os espaços vazios.

Carvalho *et al.*, (2017) inseriram resíduos da indústria siderúrgica, podendo verificar que as reações pozolânicas também foram capazes de manter uma estrutura com poucos poros e evidenciando as reações devido à presença de C-S-H.

6 CONCLUSÕES

Os resíduos de RCV e RGC demonstram ser componentes que podem ser adicionados durante a produção de cimento, se mostrando alternativas viáveis que podem, além de prolongar a vida útil de jazidas, alcançar diferente nível tecnológico e maiores economias para o setor.

A composição química do RCV atende os requisitos exigidos na literatura e o RGC foi capaz de controlar as reações rápidas no cimento. O RCV possui sua atividade pozolânica dentro das condições exigidas para que o mesmo possa ser adicionado na matriz cimentícia.

A melhor composição foi com adição de 30% de RCV com 4,5% de RGC, que resultou em resistência à compressão maior que 40 MPa. Este valor, embora menor que o da amostra padrão e até mesmo em comparação com as amostras com 15% de substituição, do ponto de vista ambiental ainda se mostra muito eficiente.

No tocante a durabilidade, apenas as substituições com 50% de RCV associado a todas as adições de gesso, foi possível minimizar as reações álcalis-sílica.

Já para a resistência a sulfatos, para todas as amostras o resultado foi efetivo, mostrando que a porosidade das argamassas e concretos estão dentro de um limite aceitável, na qual preserve a estrutura.

Neste sentido, tais resíduos podem ser reaproveitados como matérias primas durante a obtenção de cimento, reduzindo o conteúdo de clínquer na composição e com isso reduções importantes nas emissões de CO₂, preservação dos recursos naturais e reduções importantes nos custos operacionais.

ANEXO A

Tabela 8 - Composição química e física das amostras de cimento obtidos

Composição	Limite NBR 5736/91	Cimento ref.	AM1 (%)	AM2 (%)	AM3 (%)	AM4 (%)	AM4 (%)	AM6 (%)	AM7 (%)	AM8 (%)	AM9 (%)	AM10 (%)	AM11 (%)
SiO ₂		18,819	24,98	24,40	38,52	39,04	26,14	38,69	31,84	31,16	31,25	31,63	32,23
Al ₂ O ₃		4,718	6,40	6,33	10,83	11,23	7,44	11,3	8,86	8,65	8,73	8,79	8,73
Fe ₂ O ₃		3,117	3,55	3,51	5,59	5,8	3,94	5,85	4,51	4,43	4,47	4,53	4,47
CaO		59,178	51,52	50,55	32,99	31,11	48,39	31,78	41,78	41,43	42,1	41,88	41,52
MgO	≤ 6,5%	5,29	5,28	4,96	3,99	3,75	5,08	3,85	4,63	4,46	4,58	4,63	4,51
SO ₃	≤ 4%	3,28	2,11	3,27	1,72	2,55	2,66	2,12	1,98	3,01	2,6	2,56	2,52
Na ₂ O		0,171	0,12	0,12	0,91	0,96	0,13	0,97	0,5	0,43	0,44	0,47	0,49
K ₂ O		0,692	1,02	1,07	1,68	1,7	1,17	1,7	1,41	1,38	1,4	1,4	1,37
P ₂ O ₅		-	0,06	0,06	0,055	0,057	0,051	0,056	0,052	0,052	0,052	0,053	0,052
TiO ₂			0,06	0,06	0,576	0,613	0,373	0,607	0,436	0,442	0,44	0,44	0,437
Perda ao fogo	≤ 4,5%	4,1	3,39	4,00	3,92	3,55	3,73	3,44	3,13	3,56	3,52	3,45	3,45
Na ₂ Oeq	-	0,63	0,79	0,82	2,02	2,08	0,90	2,09	1,43	1,34	1,36	1,39	1,39
Material Pozolânico	15-50	0	15	15	50	50	15	50	30	30	30	30	30
Massa específica (g/cm ³)	-	3,14	3,01	3,01	2,86	2,86	3,01	2,86	2,99	2,99	2,99	2,99	2,99
(# 325)(%)	-	3,1	2,30	3,20	1,50	3,00	4,66	2,10	3,60	3,88	2,55	2,53	2,53
Superfície específica	-	5400	5490	5750	6870	6500	5910	6490	6510	6740	6500	6600	6700

ANEXO B

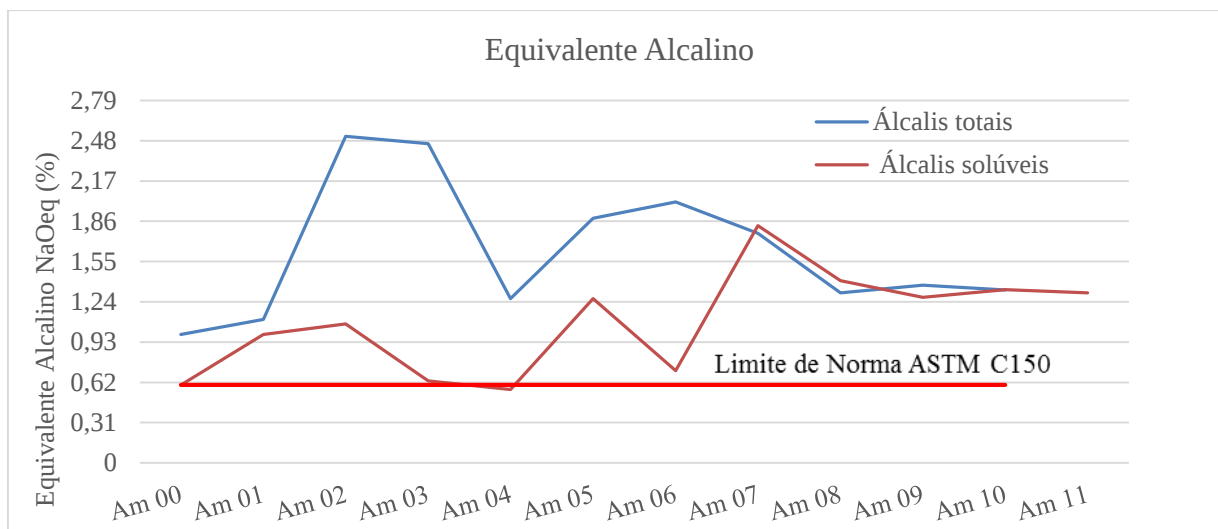


Figura 14- Álcali solúveis e totais.

ANEXO C

Tabela 9- Lista de reagentes.

Reagente	Fornecedor
Hidróxido de cálcio PA Synth	LabSynth Produtos para Laboratório LTDA
Querosene PA Quimesp	Quimesp Química Ltda
Areias Normatizadas – NBR 7214, N°s 16, 30, 50 e 100	Solotest
Sulfato de sódio PA	Dinâmica Química Contemporânea LTDA
Hidróxido de sódio (1mol/L) Merck	(Merck)
Ácido bórico PA	Dinâmica Química Contemporânea LTDA
Indicador alaranjado de metila	Merck
Oxalato de amônio	Química Moderna
Ácido perclórico 70%	Merck
Ácido fluorídrico 40%	Merck
Ácido nítrico 65%	Merck
Cloreto de sódio PA	Merck
Cloreto de potássio PA	Merck

ANEXO D

Tabela 10- Lista de equipamentos.

Equipamentos	Modelo/fornecedor
Britador de mandíbula	Modelo BREAKFIX-50, (Astecma, São Paulo/Brasil)
Moinho de disco	Modelo DISK MILL-200, (Astecma, São Paulo/Brasil)
Moinho de bolas	Modelo MB-50, (Astecma, São Paulo/Brasil)
Moinho de panela	Modelo HSM 100P, (Herzog, Alemanha)
Forno mufla	Modelo Q317M21 (Quimis Aparelho Científico Ltda, São Paulo, Brasil)
Estufa incubadora	Modelo Q316M4, (Quimis Aparelho Científico Ltda, São Paulo, Brasil)
Estufa de secagem	Modelo Q317M52 (Quimis Aparelho Científico Ltda, São Paulo, Brasil)
Prensa hidráulica com capacidade 200 kN	Modelo HTP 40 (Herzog, Alemanha)
Mesa de determinação de consistência	(Solotest, São Paulo, Brasil)
Banho termorregulador normatizado	(Solotest, São Paulo, Brasil)
Balança analítica adventurer	Modelo ARZ140, (Ohaus Corporation, Estados Unidos)
Balança hidrostática	Modelo AD200, (Marte, São Paulo)
Peneirador aerodinâmico	Modelo PVE I, (Metal Cairo, São José dos Pinhais, Paraná-Brasil)
Peneiras #400, 325 mesh	(Solotest, São Paulo, Brasil)
Permeabilímetro de Blaine, modelo manual	(Solotest, São Paulo, Brasil)
Difratômetro de Raios-X	Modelo Cubix Cement3, (Panalytical, Holanda)
Espectrômetro de fluorescência de Raios-X	Modelo Axios Max PW4400/30, (Panalytical, Holanda)
Aparelho de Vicat para determinação dos tempos de pega	(Solotest, São Paulo, Brasil)
Câmara úmida	
Tanque de cura	(Solotest, São Paulo, Brasil)
Aparelho de ensaios mecânicos de resistência à compressão com capacidade para 200 kN Instron	Modelo 23-200, (Instron, USA)
Calorímetro semiadiabático	Modelo F-Cal 8000, (Calmetrix, USA)
Espectrofotômetro de chama	Modelo B462, (Micronal, São Paulo, Brasil)

pHmetro	Modelo Q400RS, (Quimis Aparelho Científico Ltda, São Paulo, Brasil)
Paquímetro analógico	Modelo MIP/E-104-1 (Japão)
Misturador com controle de Rotação	Modelo RW20 digital, (IKA, Alemanha)
Microscópio eletrônico de varredura	Modelo VEGA 3 (TESCAN / República Tcheca, 2013)
Metalizador a vácuo	Modelo Q150R (Quorum Technologies Ltda, Laughton, East Sussex, Inglaterra)

ANEXO E

Tabela 11- Lista de Normas.

Norma	Descrição do ensaio
NBR 5751-1992	Índice de atividade pozolânica com cal
NBR 12653 - 1992	Materiais Pozolânicos – especificação
NBR NM 23-2000	Determinação da massa específica
NBR 14656- 2001	Análise química por espectrometria de raios-X – método de ensaio
NBR 5736-1991	Cimento Portland Pozolânico
NBR NM 76-1998	Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)
NBR NM 18-2004	Análise química – determinação da perda ao fogo
NBR NM 65	Determinação do tempo de pega
NBR NM 17	Determinação óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama
NBR NM 22	Determinação dos óxidos no cimento com adição de materiais pozolânicos
NBR 9778-1987	Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios
NBR NM 43-2002	Determinação da pasta de consistência normal
ASTM C642-2006	Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete
ASTM C150-2015	Standard Specification for Portland cement
NBR 7215-2002	Resistência à compressão
NBR 7214-1982	Areia normal para ensaio de cimento

NBR 15577-4-2008	Álcali-agregado parte 5: determinação da mitigação da expansão em barras de argamassas pelo método acelerado
NBR 7214-1994	Cimento Portland de baixo calor de hidratação
NBR 13583-1996	Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABADIE, L. M.; GOICOECHEA, N.; GALARRAGA, I. Carbon risk and optimal retrofitting in cement plants: An application of stochastic modelling, MonteCarlo simulation and Real Options Analysis. **Journal of Cleaner Production**, p. 1–14, 2016.

ABCP. Panorama do Coprocessamento Brasil 2015: O caminho da sustentabilidade. [s. l.], p. 20, 2015. Disponível em < <http://coprocessamento.org.br/> > .Acesso em: 09 de julho de 2017.

AGRELA, F; CABERA, M.; BELTRÁN, M.G.; ROSALES, J.; LÓPEZ, M. Effects of treatments on biomass bottom ash applied to the manufacture of cement mortars, Martín L o. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 424–435, 2017.

AİTCIN, P.; FLATT, R. J. **Science and Technology of Concrete Admixtures** Edited by. [s.l.], v. 59, 2016.

Associação Brasileira de Cerâmica (Documento eletrônico). <Acesso em Janeiro de 2019>. <http://www.abceram.org.br/site/index.php?area=4&submenu=46>

ASENSIO, E.; MEDINA, C.; FRÍAS, M.; ROJAS, M.I.S. Clay-based construction and demolition waste as a pozzolanic addition in blended cements. Effect on sulfate resistance. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 950–958, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751** – Materiais Pozolânicos – Determinação de atividade pozzolânica – Índice de atividade pozzolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 17** – Cimento Portland –Análise química- Determinação óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 22** – Cimento Portland –Análise química- Determinação dos óxidos no cimento com adição de materiais pozzolânicos. Rio de Janeiro, 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653** – Materiais Pozolânicos – especificação. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23** – Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14656** – Cimento Portland- Análise química por espectrometria de raios-X – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736** – Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76** – Cimento Portland-Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18** – Cimento Portland-Análise química – determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65** – Cimento Portland-determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778** – Cimento Portland-Argamassa e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43** – Cimento Portland-determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2002.

ASTM- American Society for testing Materials. **ASTM C642 - Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete**¹. In; Annual Book of ASTM Standards, 2006.

ASTM- American Society for testing Materials. **ASTM C150 - Standard Specification for Portland cement**¹. In; Annual Book of ASTM Standards, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215** – Cimento Portland-resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214** – Cimento Portland-Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-4** – reatividade Álcali-agregado parte 5: determinação da mitigação da expansão em barras de argamassas pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214** – Cimento Portland de baixo calor de hidratação. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13583** – Cimento Portland-Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 1996.

BARBOSA, A. A.; FERRAZ, A.V.; SANTOS, G.A. Caracterização química , mecânica e morfológica do gesso β obtido do pólo do Araripe. **Cerâmica**, v. 60, p. 501–508, 2014.

BASSUONI, M. T.; NEHDI, M. L. Cement and Concrete Research Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 3, p. 206–226, 2009.

BENHELAL, E.; ZAHEDI, G.; HASHIM, H. A novel design for green and economical cement manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 22, n. 1, p. 60–66, 2012.

BULATOVIĆ, V.; MELESEV, M.; RADEKA, M.; RADONJANIN, V.; LUKIC, I. Evaluation of sulfate resistance of concrete with recycled and natural aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 614–631, 2017.

CAMARINI, G.; PINTO, M.C.C.; MOURA, A.G.; MANZO, N.R. Effect of citric acid on properties of recycled gypsum plaster to building components. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 383–390, 2016.

CARVALHO, S. Z.; VERNILLI, F.; ALMEIDA, B.; OLIVEIRA, M.D.; SILVA, S.N. Reducing environmental impacts : The use of basic oxygen furnace slag in portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 385–390, 2018.

CASTRO, A. L.; SANTOS, R.F.C.; GONÇALVES, K.M.; QUARCIONI, V.A. Caracterização de cimentos compostos com resíduo da indústria de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 63, p. 65–76, 2017.

CHANDARA, C.; AZIZLI, K.A.M.; AHMAD, Z. A.; SAKAI, E. Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in portland cement. **Waste Management**, v. 29, n. 5, p. 1675–1679, 2009.

FERRÃO, A. M. Argollo.; BRAGA, L.M.M.; POZZER, C.E. Os Perímetros Irrigados do Baixo Jaguaribe no estado do Ceará [Brasil]: uma experiência referencial de projeto territorial sustentável. Confins. Revue franco-brésilienne de géographie; **Revista franco-brasileira de geografia**, n. 21, 2014.

FLORES, N.; HERNANDEZ-OLIVARES, F.; ARROYO, X.; AGUILERA, A.; FERNANDEZ, F. Characterization of a more sustainable cement produced with recycled drywall and plasterboards as set retarders. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 982–991, 2016.

FOR, J.; KEPPERT, M.; URBANOVA, M.; BRUS, J.; CACHOVA, M.; FORT, J.; TRNIK, A.; LENKA, S.; ZALESKA, M.; CERNY, R. Rational design of cement composites containing pozzolanic additions. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 411–418, 2017.

GÁZQUEZ, M. J.; BOLÍVAR, J. P.; VACA, F. Uso del residuo industrial yeso rojo como sustituto del yeso natural para la fabricación de cementos comerciales Use of the red gypsum industrial waste as substitute of natural gypsum for commercial cements manufacturing. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 62, p. 183–198, 2012.

GERALDO, R. H.; PINHEIRO, S.M.M.; SILVA, J.S.; ANDRADE, H.M.C.; DWECK, J.; GONÇALVES, J.P.; CAMARINI, G. Gypsum Plaster waste recycling: a potential environmental and industrial solution. **Journal Cleaner Production**, [s. l.], 2017.

HARBI, R.; DERABLA, R.; NAFA, Z. Improvement of the properties of a mortar with 5 % of kaolin fillers in sand combined with metakaolin , brick waste and glass powder in cement. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 632–641, 2017.

HEWLETT, P. C. Chemistry of Cement and Concrete. 4 ed **Elsevier Science & Technology Books**, 1066 p. 2004.

IKUMI, T.; CAVALARO, S.H.P.; SEGURA, I.; FUENTE, A.L.; AGUADO, A. Simplified methodology to evaluate the external sulfate attack in concrete structures. **Materials and Design**, v. 89, p. 1147–1160, 2016.

ILI, B.; RANDONJANIN, V.; MALESEV, M.; ZDUJIC, M.; MITROVIC, A. **Applied Clay Science**. Effects of mechanical and thermal activation on pozzolanic activity of kaolin containing mica. v. 123, p. 173–181, 2016.

ISLAM, G. M. S.; HABIB, F.; TANVEER, M. Effect of Phosphogypsum on the Properties of Portland Cement. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 744–751, 2017.

KAKALI, G.; PERRAKI, T.; TSIVILIS, S.; BADOGIANNIS, E. Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity. **Appl. Clay Sci.** 20, 73–80, 2001.

KANNAN, D. M.; ABOUBAKR, S. H.; EL-DIEB, A.S.; TAHA, M. M.R. High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 35–41, 2017.

KAVITHA, O. R.; SHANTHI, V.M.; ARULRAJ, G.P.; SIVAKUMAR, V.R. Applied Clay Science Microstructural studies on eco-friendly and durable Self-compacting concrete blended with metakaolin. **Applied Clay Science**, v. 124–125, p. 143–149, 2016.

KAWABATA, Y.; YAMADA, K. Cement and Concrete Research The mechanism of limited inhibition by fly ash on expansion due to alkali – silica reaction at the pessimum proportion. **Cement and Concrete Research**, v. 92, p. 1–15, 2017.

KAZMI, S. M. S.; MUNIR, M.J.; PATNAIKUNI, I.; WU, Y.F. Pozzolanic reaction of sugarcane bagasse ash and its role in controlling alkali silica reaction. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 1010, 2017

KIM, T.; OLEK, J.; JEONG, H. Alkali – silica reaction : Kinetics of chemistry of pore solution and calcium hydroxide content in cementitious system. **Cement and Concrete Research**, v. 71, p. 36–45, 2015.

KONG, Y.; WANG, P.; LIU, S.; GAO, Z.; RAO, M. Effect of microwave curing on the hydration properties of cement-based material containing glass powder. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 563–573, 2018.

LI, C.; THOMAS, M. D. A.; IDEKER, J. H. A mechanistic study on mitigation of alkali-silica reaction by fine lightweight aggregates. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 104, n. October 2017, p. 13–24, 2017.

MAKHLOUFI, Z.; CHETTIH, M.; BEDERINA, M.; HADJ KADRI, E.I; BOUHICHA, M. Effect of quaternary cementitious systems containing limestone , blast furnace slag and natural pozzolan on mechanical behavior of limestone mortars. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 647–657, 2015.

MARMOL, I.; BALLESTER, P.; CERRO, S.; MONROS, G.; MORALES, J.; SANCHEZ, L. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. **Cem. Concr. Compos.** 32, 617–622, 2010.

MAHMOUDI, S.; BENNOUR, A.; CHALWATI, Y.; SOUIDI, K.; THABET, M.; SRASRA, E.; ZARGOUNI, F. Tunisian gypsums : Characteristics and use in cement. **Journal of African Earth Sciences**, v. 121, p. 267–273, 2016.

MASSAAD, G.; ROZIERE, E.; LOUKILI, A.; IZORET, L. Advanced testing and performance specifications for the cementitious materials under external sulfate attacks. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 918–931, 2016.

MEDINA, G.; DEL BOSQUE, I.F.S.; FRIAS, M.; SANCHES DE ROJAS, M.I; MEDINA, C. Applied Clay Science Mineralogical study of granite waste in a pozzolan / $\text{Ca}(\text{OH})_2$ system : Influence of the activation process. **Applied Clay Science**, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J.M. Concrete :Microestructure, Properties and Materials. 3 ed **McGraw-Hill**, 684 p, 2006.

MIKHAILENKO, P.; CASSAGNABERE, F.; EMAM, A.; LACHEMI, M. Influence of physico-chemical characteristics on the carbonation of cement paste at high replacement rates of metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 164–172, 2018.

MIKULCIC, H.; KLEMES, J.J.; VUJANOVIC, M.; URBANIEC, K.; DUIC, N. Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process. **Journal of Cleaner Production**, v. 136, p. 119–132, 2016.

MINARD, H.; GARRAULT, S.; REGNAUD, L.; NONAT, A. Mechanisms and parameters controlling the tricalcium aluminate reactivity in the presence of gypsum. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 1418–1426, 2007.

NAJJAR, M. F.; NEHDI, M.L.; SOLIMAN, A.M.; AZABI, T.M. Damage mechanisms of two-stage concrete exposed to chemical and physical sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 141–152, 2017.

NEJAD, F. M.; HABIBI, M.; HOSSEINI, P.; JAHANBAKHSH, H. Investigating the mechanical and fatigue properties of sustainable Cement Emulsified Asphalt Mortar. **Journal of Cleaner Production**, 2017.

NICOLEAU, L.; NONAT, A. Cement and Concrete Research A new view on the kinetics of tricalcium silicate hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 86, p. 1–11, 2016.

OUYANG, W.; CHEN, J.; JIANG, M. Evolution of surface hardness of concrete under sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 419–424, 2014.

POURCHET, S.; REGNAUD, L.; PEREZ, J.P.; NONAT, A. Cement and Concrete Research Early C_3A hydration in the presence of different kinds of calcium sulfate. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 11, p. 989–996, 2009.

QUEIROZ, W.; PALAU, J.C.F.; CAMARGO, J.R. Waste materials co-processing in cement industry : Ecological efficiency of waste reuse. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 200–207, 2013.

QUENNOZ, A.; SCRIVENER, K. L. Hydration of C3A–ypsum systems. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 7, p. 1032–1041, 2012.

RAJABIPOUR, F.; GIANNINI, E.; DUNANT, C.; IDEKER, J.H.; THOMAS, M. D.A. Cement and Concrete Research Alkali – silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. **Cement and Concrete Research**, v. 76, p. 130–146, 2015.

RIBEIRO, D. V.; SILVA, A.M.S.; LABRINCHA, J.A.; MORELLI, M.R. Estudo das reações alcalis-sílica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento. **Cerâmica**, v. 58, p. 90–98, 2012.

ROBAYO, R. A.; MULFORD, A.; MUNERA, J.; GUTIERREZ, R.M. Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 163–169, 2016.

ROBAYO-SALAZAR, R. A.; MEJÍA-ARCILA, J. M.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. Eco-efficient alkali-activated cement based on red clay brick wastes suitable for the manufacturing of building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 242–252, 2017.

ROSALES, J.; CABRERA, M.; AGRELA, F. Effect of stainless steel slag waste as a replacement for cement in mortars . Mechanical and statistical study. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 444–458, 2017.

ROSELLÓ, J.; SORIANO, L.; SANTAMARINA, M.P.; AKASAKI, J.L.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J. Rice straw ash : A potential pozzolanic supplementary material for cementing systems. **Industrial Crops & Products**, v. 103, p. 39–50, 2017.

SHARMA, R.; KHAN, R. A. Durability assessment of self compacting concrete incorporating copper slag as fine aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 155, p. 617–629, 2017.

SHEN, W.; LIU, Y.; YAN, B.; WANG, J.; HE, P.; ZHOU, C.; HUO, X.; ZHANG, W.; XU, G.; DING, Q. Cement industry of China : Driving force , environment impact and sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, n. September 2016, p. 618–628, 2017.

SIVAKUMAR, V. R.; KAVITHA, O.R.; ARULRAJ, G.P.; SRISANTHI, V.G. Applied Clay Science An experimental study on combined effects of glass fiber and Metakaolin on the rheological , mechanical , and durability properties of self-compacting concrete. **Applied Clay Science**, v. 147, n. January, p. 123–127, 2017.

SUÁREZ, S.; ROCA, X.; GASSO, S. SC. Product-specific life cycle assessment of recycled gypsum as a replacement for natural gypsum in ordinary Portland cement: application to the Spanish context. **Journal of Cleaner Production**, 2016.

TAHAR, Z.; NGO, T.; KADRI, E.; BOUVET, A.; DEBIEB, F.; AGGOUN, S. Effect of cement and admixture on the utilization of recycled aggregates in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 91–102, 2017.

TANG, S. W.; ZHU, H.G.; LI, Z.J.; CHEN, E.; SHAO, H.Y. Hydration stage identification and phase transformation of calcium sulfoaluminate cement at early age. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 11–18, 2015.

TYDLITÁT, V.; SVORA, P.; ROBERT, C. Physical and chemical characterization of technogenic pozzolans for the application in blended cements. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 106–116, 2018.

XU, L.; WU, K.; LI, N.; ZHOU, X.; WANG, P. Utilization of flue gas desulfurization gypsum for producing calcium sulfoaluminate cement. **Journal of Cleaner Production**, 2017.

YAPHARY, Y. L.; YU, Z.; LAM, R. H. W.; LAU, D. Effect of triethanolamine on cement hydration toward initial setting time. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 94–103, 2017.

YUKSEL, C.; AHARI, R.S.; AHARI, B.A.; RAMYAR, K. Evaluation of three test methods for determining the alkali-silica reactivity of glass aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 38, p. 57–64, 2013.

ZHANG, Y.; PAN, F.; WU, R. Study on the performance of FGD gypsum-metakaolin-cement composite cementitious system. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 1–11, 2016.