

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PAULO HENRIQUE MAXIMIANO DE OLIVEIRA**

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO NAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DO CONCRETO**

**FORMIGA – MG**  
**2014**

PAULO HENRIQUE MAXIMIANO DE OLIVEIRA

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO NAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DO CONCRETO

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Civil do UNIFOR, como requisito parcial  
para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Civil.

Orientador: Michael Silveira Thebaldi

FORMIGA – MG

2014

O48 Oliveira, Paulo Henrique Maximiano de.  
Influência da adição de resíduo cerâmico nas propriedades mecânicas do concreto / Paulo Henrique Maximiano de Oliveira. – 2014.  
81 f.

Orientador: Michael Silveira Thebaldi.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)-Centro Universitário de Formiga–UNIFOR, Formiga, 2014.

1. Resíduo Cerâmico. 2. Pozolanas. 3. Concreto. I. Título.

CDD 624.1834

Paulo Henrique Maximiano de Oliveira

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO NAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DO CONCRETO

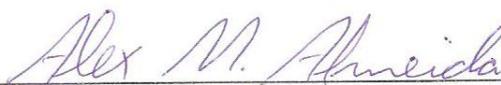
Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Curso de  
Engenharia Civil do UNIFOR, como  
requisito parcial para obtenção do  
título de bacharel em Engenharia  
Civil.

BANCA EXAMINADORA



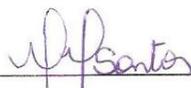
---

Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi  
Orientador



---

Prof. Dr. Alex Magalhães de Almeida  
UNIFOR



---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Mirian Aparecida Isidro dos Santos  
UNIFOR

Formiga, 07 de novembro de 2014

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades e por todas as bênçãos que me foram concedidas.

Aos meus pais pelos conselhos, incentivo e pela força que sempre me deram.

Agradeço à minha noiva Mayra pelo amor e por estar sempre ao meu lado, me ajudando de todas as formas possíveis.

Ao meu orientador Michael, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, por sua dedicação e incentivo; e também a todos os professores que compartilharam suas sabedorias contribuindo com meu crescimento profissional.

Enfim, agradeço aos que contribuíram de alguma forma para que eu realizasse este trabalho: administração e direção da Cerâmica Arcos LTDA.; engenheiros e técnicos da Parana Engenharia e Comércio e CSN, que disponibilizaram equipamentos para a realização dos ensaios; equipe do CETEC-Senai.

Todos que, direta ou indiretamente, me ajudaram, o meu muito obrigado!

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo verificar a possibilidade de utilização dos resíduos de cerâmica vermelha em concretos, como substituição parcial do cimento Portland. Para isto, foram feitos ensaios químicos, físicos e de determinação do índice de atividade pozolânica com o cimento, a fim de averiguar se o mesmo atendia as prescrições da NBR 12653/2014. Concretos com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo cerâmico foram fabricados, nas proporções de 0, 10, 20 e 30%. Os concretos fabricados passaram pelo teste *slump* para verificação de suas consistências no estado fresco, ensaios de resistência a compressão simples aos 7 e 28 dias de cura, absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica após 28 dias de cura. As propriedades mecânicas dos concretos com substituição foram comparadas com as do concreto de referência, para verificar a influência da substituição parcial do cimento por resíduo cerâmico. As propriedades químicas e físicas do resíduo cerâmico atenderam as prescrições da NBR 12653/2014. O índice de atividade pozolânica do resíduo cerâmico com o cimento foi fixado em 77%, ficando 13% abaixo do valor estabelecido pela norma. A consistência do concreto foi aumentando à medida que o teor de substituição aumentou, mantendo a mesma relação água/cimento do concreto de referência. Os concretos com substituição apresentaram perda de resistência à compressão para as duas idades de cura avaliadas. A absorção de água por imersão e índice de vazios também aumentou a medida que foram adicionados resíduos cerâmicos. Sendo assim, foi constatado que o resíduo cerâmico não atendeu todos os requisitos estabelecidos pela NBR12653/2014 e sua substituição não trouxe benefícios consideráveis ao concreto.

Palavras-chave: Resíduo cerâmico. Pozolanas. Concreto.

## **ABSTRACT**

This study aimed to verify the possibility of using residue red ceramic in concrete as a partial replacement of Portland cement. For this, were done chemical assays and physical tests and tests to determine the pozzolanic activity index with cement for ascertain whether it met the requirements of NBR 12653/2014. Concretes with different contents of cement replacement by ceramic residue were fabricated, in proportions of 0, 10, 20 and 30%. Fabricated concrete passed the slump test to check their consistencies in the fresh state, resistance assays to compressive 7 and 28 days of curing, water absorption by immersion, void ratio and density after 28 days of curing. The mechanical properties of concrete with replacement were compared with the reference concrete to check the influence of partial replacement of cement with ceramic residue. The chemical and physical properties of the ceramic residue met the requirements of NBR 12653/2014. The pozzolanic activity index of the ceramic residue with cement was set at 77%, leaving 13% below the value set by the standard. The consistency of the concrete has been increasing as the level of substitution increased while maintaining the same water/cement ratio concrete reference. The concrete with substitution showed loss of compressive strength for the ages healing evaluated. The absorption of water by immersion and void ratio also increased as ceramic residues were added. Thus, it was found that the ceramic residue did not meet all the requirements established by NBR12653 / 2014 and its replacement hasn't brought considerable benefits to the concrete.

Keywords: Ceramic residue. Pozzolan. Concrete.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Cúpula do Panteão.....	16
FIGURA 2 – Resíduos sólidos espalhados pela indústria.....	36
FIGURA 3 – Desenvolvimento sustentável nas empresas.....	37
FIGURA 4 – Pirâmide de gestão de resíduos sólidos em indústria cerâmica.....	39
FIGURA 5 – Amontoado de resíduos cerâmicos.....	41
FIGURA 6 – Moinho tipo pulverizador de disco.....	42
FIGURA 7 – Resíduo passante na peneira 4,5mm.....	43
FIGURA 8 – Panela de pulverização.....	43
FIGURA 9 – Moinho pulverizador de panela.....	44
FIGURA 10 – Resíduo passante na peneira ABNT 200# (0,0075mm).....	44
FIGURA 11 – Moldagem dos corpos de prova.....	50
FIGURA 12 – Adensamento da argamassa.....	51
FIGURA 13 – Corpos de prova aguardando ruptura.....	51
FIGURA 14 – Rompimento do corpo de prova com substituição de cimento por resíduo cerâmico.....	52
FIGURA 15 – Rompimento do corpo de prova sem substituição de cimento por resíduo cerâmico.....	52
FIGURA 16 – Betoneira para mistura dos materiais.....	55
FIGURA 17 – Teste de <i>Slump</i> .....	56
FIGURA 18 – Lançamento do concreto nos moldes.....	57
FIGURA 19 – Adensamento manual.....	57
FIGURA 20 – Cura inicial dos corpos de prova.....	58
FIGURA 21 – Corpos de prova após desmoldagem.....	58
FIGURA 22 – Tanque de cura.....	59
FIGURA 23 – Rompimento do corpo de prova.....	60
FIGURA 24 – Corpo de prova rompido.....	60
FIGURA 25 – Estufa de secagem.....	62
FIGURA 26 – Corpos de prova dentro da estufa de secagem.....	63
GRÁFICO 1 – Variação da resistência.....	69
GRÁFICO 2 – Variação da absorção em relação ao teor de substituição de cimento por resíduo cerâmico.....	74

GRÁFICO 3 – Variação do índice de vazios em relação ao teor de substituição de cimento por resíduo cerâmico.....	75
--	----

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Composição química da escória de alto forno Acelormittal Tubarão.....	24
TABELA 2 – Classes de agressividade ambiental.....	31
TABELA 3 – Ensaio químicos do cimento CII-E.....	45
TABELA 4 – Ensaio físico do cimento CII-E.....	45
TABELA 5 – Características físicas da areia lavada utilizada.....	46
TABELA 6 – Características físicas da Brita 1 utilizada.....	46
TABELA 7 – Consumo de materiais por metro cúbico de concreto.....	54
TABELA 8 – Resultado das análises químicas do resíduo cerâmico.....	65
TABELA 9 – Resultado das análises físicas.....	66
TABELA 10 – Quantidade em massa necessário para moldagem de três corpos de prova.....	66
TABELA 11 – Índice de atividade pozzolânica com o cimento.....	66
TABELA 12 – Consistência dos concretos com e sem substituição de cimento por resíduo cerâmico por meio de teste de <i>Slump</i> .....	68
TABELA 13 – Média da resistência à compressão dos corpos de prova rompidos aos 7 dias de cura.....	68
TABELA 14 – Média da resistência à compressão dos corpos de prova rompidos aos 28 dias de cura.....	68
TABELA 15 – Perda da resistência.....	70
TABELA 16 – Resumo da análise de variância da análise de resistência para os diversos tratamentos de concreto.....	71
TABELA 17 – Resistência à compressão do concreto em função da porcentagem de substituição por resíduo cerâmico.....	72
TABELA 18 – Resistência à compressão em função da idade de cura do concreto.....	72
TABELA 19 – Massa seca, massa saturada e absorção de água por imersão para os diferentes teores de substituição de cimento por resíduo cerâmico.....	73
TABELA 20 – Massa seca, massa saturada, massa da amostra imersa em água e índice de vazios para cada teor de substituição de cimento por resíduo cerâmico.....	75
TABELA 21 – Massas específicas dos concretos analisados.....	76

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CETEC – Centro Tecnológico (CETEC-Senai)

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

FIEMG – Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

NBR – Norma Brasileira

RC – Resíduo cerâmico

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	JUSTIFICATIVA.....	14
3	OBJETIVOS.....	15
3.1	Objetivo geral.....	15
3.2	Objetivos específicos.....	15
4	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
4.1	Histórico – argamassas contendo adição pozolânica.....	16
4.2	Pozolanas.....	17
4.2.1	Materiais pozolânicos naturais.....	18
4.2.1.1	Rochas vulcânicas.....	18
4.2.1.2	Tufo vulcânico.....	19
4.2.1.3	Terras diatomáceas.....	18
4.2.1.4	Argilitos de argila mal cristalizados.....	19
4.2.2	Materiais pozolânicos artificiais.....	19
4.2.2.1	Argilas calcinadas.....	20
4.2.2.2	Metacaulim.....	20
4.2.2.3	Cinzas volantes – sub produto industrial.....	21
4.2.2.4	Escória de alto forno – sub produto industrial.....	23
4.2.2.5	Cinzas de casca de arroz – sub produto da agricultura.....	24
4.2.3	Uso da pozolana no cimento Portland.....	25
4.2.4	Reação Pozolânica.....	26
4.3	Cimento Portland.....	27
4.3.1	CPII – E Cimento Portland composto com escória.....	28
4.3.2	Propriedades químicas.....	29
4.3.2.1	Calor de hidratação.....	29
4.3.2.2	Tempo de pega.....	30
4.3.2.3	Exsudação.....	30
4.3.2.4	Resistência a agentes agressivos.....	31
4.3.2.5	Reação álcali-agregado.....	32
4.4	Utilização dos resíduos ceramicos em concretos.....	34
4.4.1	Resíduo gerado em indústria de cerâmica vermelha.....	35

4.4.2	Sustentabilidade nas empresas – reutilização e benefícios ao meio ambiente.....	36
4.4.3	Melhorias agregadas ao produto final (argamassas e concretos).....	40
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	41
5.1	Moagem do Resíduo Cerâmico.....	42
5.2	Caracterização das amostras.....	45
5.3	Índice de atividade pozolânica com o cimento.....	50
5.4	Dosagem do Concreto.....	53
5.5	Produção do concreto.....	54
5.6	Análise do concreto no estado fresco.....	55
5.7	Análise do concreto no estado endurecido.....	56
5.7.1	Moldagem e cura dos corpos de prova.....	56
5.7.2	Resistência a compressão.....	59
5.7.3	Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.....	61
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
6.1	Caracterização da amostra de resíduo cerâmico.....	65
6.2	Índice de atividade pozolânica com o cimento.....	66
6.3	Análise do concreto no estado fresco.....	68
6.4	Resistência a compressão.....	68
6.5	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.....	73
7	CONCLUSÃO.....	77
	REFERENCIAS.....	78

## 1 INTRODUÇÃO

A evolução industrial, tecnológica e urbana tem afetado diretamente o meio ambiente. O consumismo desenfreado, juntamente com a exploração dos recursos naturais, acabam acarretando numa grande geração de resíduos que além de poluir a natureza, comprometem a qualidade de vida do ser humano. Isso leva à busca por alternativas que possam contribuir para o desenvolvimento sustentável do planeta (RIBEIRO; MORELLI, 2009).

A indústria da construção civil aparece no cenário mundial como uma das principais consumidoras de recursos naturais e uma das maiores geradoras de resíduos. Portanto, cabe à mesma desenvolver formas para minimizar este consumo excessivo, utilizando de fontes renováveis e métodos ecologicamente corretos que possam contribuir para a diminuição dos impactos ambientais.

Segundo RIBEIRO E MORELLI (2009) a construção civil, “anualmente, consome cerca de 210 milhões de toneladas de agregados (areia e brita) e até 75% do total de recursos naturais utilizados pelo homem (incluindo agregados, água, metais, combustível fósseis, etc.)”. Também é uma das maiores geradoras de resíduos, produzindo cerca de 60% do lixo provenientes de rejeitos e subprodutos da construção civil. Isso corresponde a 90 milhões de toneladas/ ano de resíduos (RIBEIRO; MORELLI, 2009).

Esse cenário, porém, pode ser modificado, uma vez que há uma grande possibilidade de inserção dos resíduos gerados em obras no processo de produção das mesmas. Um exemplo é o reaproveitamento de resíduos na produção de cimento, argamassas, telhas, blocos, artefatos de concreto pré-moldados, entre outros (FIEMG, 2013).

Vários estudos de natureza acadêmica e pesquisas, como realizada pelo IPT (2014) sobre a aplicação de cacos cerâmicos, foram realizados a respeito da utilização de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica na produção de concretos e argamassas, com o objetivo de reduzir o consumo de cimento e dar um destino final para o resíduo (IPT, 2014).

O cimento tem uma extensa utilização em obras civis e industriais em todo o mundo, sua produção no Brasil aproxima-se de 78 toneladas/ano. Os efeitos negativos causados pela sua produção, como os impactos ambientais da extração de argila e calcário, o alto consumo energético, e a grande emissão de gás

carbônico na atmosfera são os efeitos mais prejudiciais ao meio ambiente. Estima-se que para cada tonelada de cimento uma outra tonelada de dióxido de carbono é lançada no ar, contribuindo dessa forma para o aquecimento global (ABCP, 2009).

Busca-se, por meio deste trabalho, promover a implantação de métodos que tragam benefícios ao meio ambiente, contribuindo para a diminuição das áreas de descartes dos rejeitos e diminuindo o consumo de cimento, que é um dos produtos que mais causam prejuízos ao meio ambiente, em se tratando de sua produção.

## 2 Justificativa

Há extensas discussões sobre impactos causados pelo homem à natureza. Impactos estes que muitas vezes relacionam-se às necessidades que o ser humano tem de se abrigar, de consumir e, sobretudo, sobreviver, não sendo diferente na construção civil.

Para produzir é necessário consumir, e como consequência tem-se a geração dos resíduos. É importante então, buscar novos meios para o reaproveitamento de materiais e redução do consumo dos recursos naturais.

Alguns estudos vêm sendo realizados visando a reutilização dos resíduos das indústrias de cerâmica vermelha na produção de concretos e argamassas, o que gera um destino sustentável para estes rejeitos e provável ganho na qualidade do concreto, o que será verificado ao fim deste trabalho de conclusão de curso.

Em uma indústria na cidade de Arcos-MG, foi possível verificar a grande geração de resíduos de blocos cerâmicos, o que gera impasse quanto ao local de deposição destes rejeitos que são produzidos continuamente e não possuem utilidade para a própria indústria.

Visando então uma forma de retirar estes resíduos das dependências da empresa sem que se tenha um descarte que polua o ambiente, propõe-se a utilização dos mesmos como complemento pozolânico na composição de concreto.

### **3 Objetivos**

#### **3.1 Objetivo geral**

Verificar a viabilidade da utilização dos rejeitos de cerâmica vermelha como componente pozolânico na produção de concretos.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Realização de ensaios para verificação das potencialidades presentes nos resíduos cerâmicos;
- Analisar as propriedades mecânicas nas diferentes porções da mistura cimento e resíduo cerâmico;
- Verificar a melhor proporção entre o cimento e o resíduo cerâmicos.

## 4 REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 Histórico – Argamassas contendo adição pozolânica

Diferentes materiais foram descobertos a milhares de anos atrás, desde a história primitiva, por civilizações desprovidas de recursos construtivos. Esses materiais eram utilizados nas construções de grandes monumentos que perduram até os dias de hoje. A exemplo disto são as edificações feitas pelos Romanos e Egípcios utilizando os materiais descobertos por eles. Estes materiais contribuíram muito com o desenvolvimento da construção civil (ARAÚJO JÚNIOR; RONDON, 2009; AFONSO; ANDRADE, 2009).

A partir do século II a.C foi descoberto em Roma um material com características cimentícias, o *opus cementium* (uma mistura de areia vulcânica com calcário e tijolos quebrados, um ancestral do concreto). Com essa massa, os Romanos conseguiram construir grandiosas estruturas, como a cúpula do Panteão (FIG.01) que tem 43,2 m de altura e nenhum pilar de sustentação (AFONSO; ANDRADE, 2009).

Figura 1 – Cúpula do Panteão



Fonte: < <http://olhares.uol.com.br/panteão-de-romafoto2587933.html> >. Acesso em: 26 abr. 2014

Algumas descrições antigas, referente ao período da civilização romana, citam a importância da adição de pozolanas naturais e artificiais na obtenção de

argamassas de elevada resistência mecânica e com características impermeáveis (ARAÚJO JÚNIOR; RONDON, 2009).

Segundo Farias Filho; Rolim e Toledo Filho (2000) antes do surgimento do cimento Portland, as argamassas e concretos eram fabricadas usando uma mistura de materiais pozolânicos e cal. Solos argilosos calcinados, na forma de fragmentos de materiais moídos, foram as primeiras pozolanas artificiais que, quando misturados à cal, constituíram o primeiro cimento hidráulico produzido pelo homem (FARIAS FILHO; ROLIM; TOLEDO FILHO, 2000)

Muitos estudos já foram realizados sobre a adição pozolânica na produção de argamassas e concretos. Os resultados ainda que não concretizados, indicam, que o uso de resíduos cerâmicos como substituição pozolânica, na fabricação de argamassas, contribui positivamente com algumas características das argamassas, porém sem ser capaz de substituir de forma integral os aglomerantes existentes no mercado (ARAÚJO JÚNIOR; RONDON, 2009).

## 4.2 Pozolanas

Pozolanas são substâncias que contêm em sua composição sílica e alumina, que embora não tenha qualidades aglomerantes próprias, ao serem finamente moídas e misturadas com a água, reagem com o hidróxido de cálcio do cimento formando compostos cimentícios (BAUER,2011).

O nome pozolana vem da descoberta de rochas vulcânicas que foram encontradas ao sul da Itália, em uma região denominada *Pozzuoli*. Essas rochas, quando moídas, misturadas a cal e água se transformam em um composto bem parecido com o cimento.

As pozolanas podem ser naturais, surgindo a partir do intemperismo de rochas vulcânicas; artificiais, ou seja, qualquer tipo de argilas submetidas a altas temperaturas; ou ainda, subprodutos industriais, como, escória de alto forno, cinzas volantes, cinzas de casca de arroz, entre outros (Leite e Molin, 2002). Todas elas apresentam algumas variações em suas características físicas e mineralógicas, dependendo da origem de sua formação.

Vários fatores influenciam na reação pozolânica, e conseqüentemente no resfriamento e no desenvolvimento da resistência do concreto. Alguns desses

fatores são, sua forma, finura, distribuição do tamanho das partículas, densidade e composição mineralógica (MONTANHEIRO, et al.,2002).

A adição de pozolana ao cimento, propicia um ganho de resistência em meios agressivos, diminui o calor de hidratação, provoca a impermeabilização dos capilares formados pelos produtos de hidratação do cimento, diminui a segregação de agregados, proporciona maior trabalhabilidade, tornando-o adequado a aplicações que exijam baixo calor de hidratação (MARTINS, A. et al., 2010)

Esse material, quando utilizado pela indústria de cimento, gera uma redução dos custos de produção, minimiza os impactos ao meio ambiente, além das vantagens para o produto, como a de torna-lo mais resistente a ação da água (YAMAMOTO,2000).

#### **4.2.1 Materiais pozolânicos naturais**

Segundo a NBR 12653/2014 (ABNT, 2014), pozolanas naturais são materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% de  $\text{SiO}_2$ ), ou de origem sedimentar, com atividade pozolânica. Sua composição química é formada por uma combinação de sílica, alumina, e quantidade menores de outros compostos como, cálcio, magnésio, ferro, potássio e sódio.

Segundo Netto (2006), as pozolanas naturais podem apresentar algumas variações em suas propriedades à medida que variam os componentes ativos das rochas, suas características físicas e mineralógicas.

##### **4.2.1.1 Rochas vulcânicas**

São rochas formadas a partir da consolidação do magma, expulso nas erupções vulcânicas e de cinzas vulcânicas soltas. O processo de resfriamento, passando do estado líquida para sólido é muito rápido, impedindo a cristalização dos minerais, formando uma estrutura vítrea. A exemplo de rochas vulcânicas está o basalto e a obsidiana (PONTES,2011).

#### **4.2.1.2 Tufo vulcânico**

São rochas constituídas de fragmentos de tamanho médio e fino proveniente das atividade vulcânica explosiva. São originadas da ação hidrotérmica nas cinzas vulcânicas dando origem aos minerais zeolíticos. Segundo Pontes, as zeólitas possuem uma estrutura cúbica em forma de jaula e que apresenta uma grande superfície interna e externa. Esta grande superfície específica é a base para reatividade elevada destes materiais (PONTES, 2011).

#### **4.2.1.3 Terras diatomáceas**

É um grupo de pozolanas caracterizadas por serem originadas da decomposição de matéria orgânica. São organismos fotossintetizadores que vivem em uma grande variedade de ambientes aquáticos. Esses organismos se revestem de uma carapaça ou frústula (camada externa das algas) de sílica não cristalina. A sedimentação no fundo dos lagos, das frústulas mortas, dá origem a depósitos minerais de frústulas ricas em sílicas com uma mistura de material argiloso e uma pequena quantidade de elementos como alumina, ferro e metais alcalinos dando origem a uma estrutura amorfa hidratada (MONTANHEIRO et al., 2002).

#### **4.2.1.4 Argilitos de argila mal cristalizados**

Segundo Pontes (2011), argilas mal cristalizadas são materiais obtidos de origem diversas, como vulcânitos, detríticos ou diatomídeos. Estes materiais podem ser utilizados em sua forma natural ou após ativação térmica (calcinação).

#### **4.2.2 Materiais pozolânicos artificiais**

As pozolanas artificiais são materiais com atividade pozolânica, originadas por meio de processos industriais ou provenientes de tratamento térmico. Podem ser divididos em: argilas calcinadas, metacaulim, cinzas volantes, escória de alto forno, cinzas de casca de arroz entre outras (NETTO,2006; PONTES 2011).

#### 4.2.2.1 Argilas calcinadas

A argila é um importante material natural, utilizada por várias indústrias como matéria-prima na fabricação de materiais cerâmicos e agregados, além de suas outras finalidades industriais, como aditivo na fabricação do papel, borracha, entre outros. Segundo Caputo (2012), são constituídas de pequenos minerais cristalinos, originadas do intemperismo de rochas sedimentares compostas de óxidos e grãos finos de silicatos de alumínio. Suas partículas são menores que 1/256 mm ou 4µm de diâmetro.

Nos grupos dos minerais argilílicos se destacam a caulinita, montmorilonita e illita. A caulinita, é formada alternadamente por silício e alumínio ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  ou  $H_4Al_2Si_2O_9$ ); as montmorilonitas são formadas por uma unidade de alumínio entre duas unidades de silício; são argilas muito expansivas devido suas ligações instáveis  $[(OH)_4Si_8Al_4O_{20}nH_2O]$ ; e as illitas possuem uma estrutura parecida com as montmorilonitas, sendo porém menos expansivas  $[(OH)_4K_y(Si_{8-y}Al_y)(Al_4Fe_4Mg_4Mg_6)O_{20}]$  (CAPUTO,2012).

Quando essas argilas sofrem um processo de industrialização, sendo submetidas a queima em elevadas temperaturas, recebem o nome de Argilas calcinadas. A queima da mesma altera sua estrutura molecular, tornando um material amorfo e altamente reativo. Este material possui características pozolânicas, podendo ser originados de rejeitos de tijolos moídos ou ter uma fabricação própria, como é o caso do metacaulim. O que diferencia o rejeito cerâmico do metacaulim, é a pureza de suas composições, sendo o metacaulim um material produzido exclusivamente com a finalidade de ser pozolânico, e por isso, sua produção segue um rigoroso controle e prospecção das argilas (YAMAMOTO, 2000; NETTO,2006).

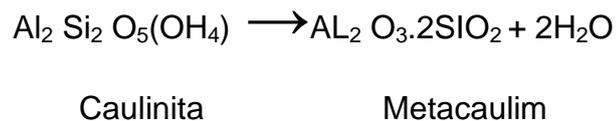
#### 4.2.2.2 Metacaulim

Metacaulim é um material pozolânico artificial, fabricado a partir da extração, calcinação em temperatura em torno de 800 a 900°C, e moagem de argilominerais caulínicos, derivadas do caulim, uma rocha constituída de material argiloso, com baixo teor de ferro e cor branca (LUZ, et al.2005).

No Brasil existem grandes reservas de caulim, que além de ser a principal matéria prima para produção do metacaulim, também é utilizado na produção do papel, tintas cerâmicas, borrachas, plásticos, fibras de vidro entre outros (LUZ, et al.2005).

O metacaulim, além de ser produzido pelo beneficiamento das argilas caulínicas, também pode ser produzido através da moagem de tijolos cerâmicos, mas para que se tenha um metacaulim de alta reatividade, é necessária a calcinação de argilas que tenha acima de 90% de caulinita (MOTA, 2006 *apud* NETTO, 2006).

A composição química dos argilominerais caulínicos é formada por silicatos de alumínio hidratados que, quando calcinados a elevadas temperaturas, perde os íons hidroxilas de suas estruturas cristalinas, formando o metacaulim, segundo a reação abaixo (NASCIMENTO,2009).



Esse material se torna altamente reativo com os compostos do cimento, principalmente o hidróxido de cálcio, devido a formação de uma estrutura amorfa após a sua calcinação (NASCIMENTO, 2009).

O metacaulim pode ser classificado segundo a sua reatividade, podendo ser, baixa, media ou alto, dependendo do nível de pureza das argilas cauliniticas. É um material produzido com a finalidade de atender o mercado como adição pozolânica na produção de cimento e/ou concreto agregando alguns benefícios ao produto final. Existem poucas empresas no Brasil destinadas a fabricação do metacaulim, mas o mercado para esse produto vem crescendo bastante, devido ao grande número de empresas que produzem cimento e concreto estarem utilizando o material pozolânico (SANTOS, 2012).

#### **4.2.2.3 Cinzas volantes – sub produto industrial**

O carvão é uma das principais fontes de energia da humanidade, podendo ser vegetal, obtido após a queima da madeira, ou mineral, formado a partir da sedimentação de resíduos orgânicos, sendo encontrado no subsolo terrestre e

extraído pelo sistema de mineração. O carvão vegetal, é muito utilizado como combustível para lareira, churrasqueira, fogões a lenha, além de abastecer alguns setores da indústria, enquanto que o carvão mineral é um dos combustíveis fosseis responsáveis pela produção de energia elétrica (Câmara de Comercialização de energia elétrica – CCEE).

Segundo a CCEE, o carvão é responsável por 39% de toda a energia gerada no mundo. No Brasil, a principal produção de energia, vem de usinas hidroelétricas, produzindo cerca de 95% da energia gerada. Somente em regiões distantes das hidroelétricas centrais, com poucos recursos hidrográficos e com boas reservas naturais de óleo, carvão ou gás se utilizam energia produzida em termoelétricas. Sua geração é maior, quando há um período de estiagem muito grande, o que prejudica a geração de energia das hidroelétricas.

Na combustão do carvão em altas temperaturas, para a produção de energia elétrica em usinas termoelétricas, dois tipos de cinzas são formados, que são as cinzas pesadas e cinzas volantes. As cinzas volantes são as cinzas de textura mais finas, que são levadas pelos gases de combustão das fornalhas da caldeira e abatidas por precipitadores eletrostáticos. Já as cinzas pesadas, são as cinzas mais espessas, que caem no fundo da fornalha, em tanques de resfriamento e removidas hidraulicamente por fluxos de água (NETTO, 2006).

A produção de cinzas num contexto mundial, ultrapassa 550 milhões de ton/ano, sendo que no Brasil, é gerado mais de 1,7 milhões de ton/ano. No Brasil, a geração de cinzas volantes deverá ter um considerável aumento, devido ao aumento do consumo de carvão mineral para produção de energia em usinas termelétricas. Estima-se que a geração de cinzas deverá chegar de 3,5 a 4 milhões de ton/ano (ROCHA JÚNIOR, 2012).

As cinzas volantes são compostas por silício e alumínio com baixos teores de ferro e menores quantidades de Mg, Ca, Ti, P, S, Na e K. O teor de dióxido de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) influencia na pozolanicidade da cinza, visto que a sílica amorfa é que reage com a cal livre e a água no concreto, dando origem a quantidade maiores de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (NETTO,2006).

Ainda de acordo com Netto, (2006) a adição de cinzas volantes no concreto, contribui para melhorar várias características do mesmo, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Retarda o tempo de início e fim de pega, melhora a trabalhabilidade, diminui o calor de hidratação, reduz a exsudação de água e a

segregação de concretos, reduz a permeabilidade, resistência mecânica superiores em idades mais avançadas. Um dos aspectos negativos com relação ao uso das cinzas, é a falta de uniformidade das características das cinzas podendo ocorrer variações significativas entre diferentes procedências e fornecimentos.

#### **4.2.2.4 Escória de alto forno – sub produto industrial**

A escória de alto forno é um resíduo da produção do ferro gusa em alto forno para a produção do aço. O processo de produção do aço é feito em três etapas. A primeira etapa é a redução, seguida por refino e laminação. No processo de redução, o minério de ferro entra no alto forno em forma granular e é aquecido em temperaturas a mais de 1400°C, juntamente com o coque ou carvão vegetal. O calcário, Também é adicionado a mistura, e trabalha como um fundente das impurezas do minério de ferro, formando as escórias. O resultado de todo esse processo é o ferro líquido, chamado de ferro gusa. A etapa seguinte do processo é o refino, onde o ferro gusa é transformado em aço, mediante a queima de impurezas e adições (GERDAU, 2014).

Quando o minério de ferro é submetido a elevadas temperaturas, suas impurezas são separadas e podem ser removidas. Essa massa que é removida é a escória de alto forno (THOMAZ, 2012).

Segundo Thomaz (2012), em siderurgias que operam altos fornos a carvão de coque são geradas 200 a 300 kg de escória por tonelada de ferro gusa.

O processo de resfriamento das escórias é feito de duas formas. A primeira forma é ao ar ou cristalizada, onde as mesmas são vazadas em um estado líquido em pátios apropriados e são resfriadas ao ar. Esta é denominada de escória bruta de alto forno, que devido ao seu lento processo de resfriamento, os seus componentes formam distintas fases cristalinas, e com isto, não adquirem poder de aglomerante hidráulico. A segunda forma é resfriada com água ou granulada, onde ela é resfriada bruscamente por meio de jatos de água sob alta pressão. “Não havendo tempo suficiente para formação de cristais, a escória se granula vitrificando, e recebe o nome de escória granular de alto forno” (ACELORMITTAL,2014).

A composição química da escória de alto forno tem poucas variações e depende da matéria prima e do tipo de ferro gusa, mas basicamente, é constituída

de óxidos de cálcio, silício, alumínio e magnésio, além de quantidades menores de óxidos de ferro, manganês, titânio e enxofre. Na TAB. 1 apresenta-se a composição química da escória de alto forno.

Tabela 1 – Composição química da escória de alto forno  
Arcelormittal Tubarão (Valores de referência)

Compostos	Porcentagem
FEO	0,45%
SiO <sub>2</sub>	33,65%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,42%
CAO	41,60%
MGO	7,95%
TIO	0,73%

Fonte: <[http://www.cst.com.br/produtos/co\\_produtos/catalogo\\_produtos/escoria\\_forno/index.asp](http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_forno/index.asp)>. Acesso em: 20 abr. 2014.

Existem várias aplicações para a escória de alto forno, entre elas estão, base de estrada, asfalto, aterro e terraplenagem agregado para concreto e cimento. A maior parte da produção de escoria de alto forno está para produção de cimento, devido a sua capacidade de reagir sob a ação da água. A mesma quando moída e em contato com a água adquire propriedades cimentastes, podendo substituir o clínquer na produção do cimento Portland (ACELORMITTAL,2014).

#### 4.2.2.5 Cinzas de casca de arroz – sub produto da agricultura

O arroz é um dos cereais mais consumidos do mundo, e o Brasil é o 9º maior produtor mundial. Sua produção se concentra nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Mato Grosso. Segundo dados do Ministério da Agricultura, o Brasil colheu 11,26 milhões de toneladas na safra 2009/2010 e o consumo deverá crescer em uma taxa de 0,86% ao ano alcançando 14,37 milhões de toneladas em 2019/2020 (BRASIL, 2009).

Da primeira etapa do beneficiamento dos grãos, obtém-se a casca de arroz, numa razão de 200 gramas por quilograma de arroz em casca. A casca de arroz é constituída de quatro camadas fibrosas, esponjosas ou celulares, que são altamente silicosas. A composição química média é de aproximadamente 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica. Com a combustão controlada, a celulose e a lignina

podem ser removidas, restando apenas a sílica numa forma vítrea e micro porosa, de altíssima superfície específica (PEDROZO,2008).

Segundo Netto (2006), apud Santos (2006) a cinza de casca de arroz é um material resultante da queima da casca de arroz para a produção de energia calorífica, empregada no processo de secagem dos grãos e também para produção de energia elétrica em usinas termelétricas, ou ainda, no processo de calcinação para obtenção de sílica com alto teor de pureza.

Após a queima da casca, a quantidade de cinzas de casca de arroz gira em torno de 20% em massa, com um elevado teor de sílica amorfa. O que propicia a este resíduo uma alta reatividade adquirindo características pozolânicas, podendo ser adicionado na fabricação do cimento, argamassa e concreto (PEDROZO, 2008).

#### **4.2.3 Uso da pozolana no cimento Portland**

Existem muitos tipos de cimento, e o que diferencia cada tipo de cimento é a proporção de compostos como o clínquer e sulfatos de cálcio, além das porções de aditivos como as escórias de alto forno e as pozolanas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2009).

Segundo a NBR 5732:1991, durante a moagem do clínquer, é permitido acrescentar, nos teores especificados pela norma, materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto forno e/ou materiais carbonáticos.

Para o cimento Portland comum, o teor de material pozolânico, juntamente com outros materiais, como escória de alto forno e materiais carbonáticos, está na ordem de 1 a 5%. Para o cimento Portland composto com pozolanas CII-Z, as proporções da mesma são um pouco maiores, na ordem de 6 a 14%. Já o cimento Portland de alto forno CP-III, e o cimento Pozolânico CP-IV, as adições de pozolanas é na ordem de 15 a 50% em massa (ABCP, 2009).

Segundo pesquisa realizada pela revista FAPESP, onde foi verificado o uso de material pozolânico nos cimentos produzidos no Brasil, constata-se que as regiões do país onde mais é utilizado este composto são as regiões sul e nordeste, sendo que o mesmo advém da utilização de cinzas provenientes de queima de carvão e do uso de argilas calcinadas, respectivamente nas duas áreas. Já na região sudeste, que produz a maior quantidade de cimento do país, é verificado

baixo uso de pozolanas em comparação com o uso de clínquer (YAMAMOTO, 2000).

Nos Estados Unidos, diferentemente do Brasil, grande parte das concreteiras utilizam as pozolanas naturais na produção de concretos para as mais diversas construções. Na Europa, países como a França e Alemanha, também fazem grande uso das pozolanas naturais na produção de cimento (BAUER,2011).

Apesar dos estudos que já foram realizados sobre os materiais pozolânicos e sua eficiência quando adicionado ao cimento, no Brasil, seu uso é pouco difundido, existindo poucas literaturas a seu respeito. Seu uso é mais difundido na Europa e nos Estados Unidos (BAUER,2011).

Segundo Bauer (2011), o uso das pozolanas nos concretos de cimento Portland, contribui positivamente com muitas características desse material. “De modo geral, cerca de 20 a 40% do cimento utilizado na fabricação do concreto, pode ser substituído por pozolanas, sem que diminua sua resistência final e com diversas melhorias nas qualidades do produto”. Um problema existente em sua utilização seria sua composição variável, que dificulta a investigação de seu comportamento.

Ainda de acordo com Bauer (2011), as pozolanas deixaram de ser utilizadas devido ao desenvolvimento da indústria de cimento Portland, mas existe uma disposição recente para o emprego desse material.

Com a crescente preocupação em relação ao consumo de matérias primas e poluição ao meio ambiente, busca-se a utilização de materiais alternativos. As pozolanas artificiais, se tornam uma boa alternativa na produção do cimento e/ou concretos, devido a sua alta produção, sendo um produto derivado de vários processos industriais, e aos benefícios que seu uso pode trazer para o produto acabado. Além disso, seu uso pode trazer redução de custo para a indústria do cimento e minimizar os impactos ambientais causados pela produção do mesmo (YAMAMOTO,2000).

#### **4.2.4 Reação Pozolânica**

Durante o processo de hidratação do cimento, ocorre a formação de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H). Esta formação se origina através da hidratação do silicato Tricálcico ( $C_3S$ ) que se hidrolisa formando o silicato bicálcico ( $C_2S$ ) e

hidróxido de cálcio (CH). A maior parte da pasta de cimento hidratada é formada por C-S-H, sendo o maior responsável pela resistência da mesma (BAUER,2011).

Segundo Netto (2006), se for adicionado material pozolânico na pasta de cimento, cujo os óxidos  $\text{SiO}_2 + \text{AlO}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  estão presentes no estado amorfo ou com uma estrutura cristalina fraca, em presença de água, os mesmos reagiram com o hidróxido de cálcio livre na pasta de cimento, formando C-S-H similar aos produzidos pela hidratação dos silicatos de cálcio do cimento Portland. As reações podem ser descritas como:



De acordo com Mehta e Monteiro (2008 apud SOUZA, 2011) esta reação vai resultar em menor liberação de calor no processo de hidratação do cimento, devido as reações acontecerem de forma mais lenta, aumento da resistência, da durabilidade da pasta em meios ácidos e maior impermeabilidade devido ao processo de refinamento dos poros, uma vez que a um melhor preenchimento dos espaços capilares da pasta.

### 4.3 Cimento Portland

O cimento é um produto obtido pela extração de rochas calcárias, onde as mesmas são submetidas a um processo de beneficiamento para produção do clínquer, sua principal matéria prima. Após a produção do clínquer, o cimento já está quase pronto, bastando apenas adicionar algumas substâncias para melhorar as suas propriedades finais, e assim efetuar a moedura da mistura, dando origem ao cimento Portland (BAUER, 2011).

Os componentes básicos do cimento são a cal (CaO), a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), certa porção de magnésio (MgO) e uma pequena porcentagem de anídrico sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ), que é adicionado após a calcinação para retardar o tempo de pega da mistura. Esses componentes são agregados pelo aquecimento da mistura em elevadas temperaturas (BAUER, 2011).

No Brasil são fabricados oito tipos de cimento, e o que os diferenciam, é a porcentagem de compostos que são adicionados na fabricação dos mesmos. Abaixo segue os oito tipos de cimento produzidos no Brasil:

- Cimento Portland comum CP I e CP I-S (NBR 5732)
- Cimento Portland composto CP II (NBR 11578)
- Cimento Portland de alto forno CP III (Com escória - NBR 5735)
- Cimento Portland CP IV (com pozolana - NBR 5736)
- Cimento Portland CP V (alta resistência inicial - NBR 5733)
- Cimento Portland CP (RS) (resistência a sulfatos - NBR5737)
- Cimento Portland de baixo calor de hidratação (BC) - (NBR-13116)
- Cimento Portland Branco (CPB) - (NBR12989)

Segundo Bauer (2011) é importante conhecer as proporções dos compostos que serão acrescentados na produção do cimento, para que assim, sejam adicionadas de maneira a alcançar as propriedades finais desejadas, tanto para o cimento quanto para concreto.

Um dos tipos de cimento mais utilizado pela indústria da construção civil é o CPII. Este tipo cimento pode ser utilizado nos mais diversos casos, como placas de concreto, assentamento de cerâmica, blocos e tijolos, concreto armado e concreto protendido. Devido a sua ampla utilização no mercado, o CP II será utilizado no presente trabalho para estudo de sua utilização com adições de material pozolânico, no caso, resíduo moído de cerâmica vermelha.

#### **4.3.1 CPII-E (cimento Portland composto com escória)**

Segundo a NBR 11578/1991 o cimento Portland CPII-E é um aglomerante Hidráulico no qual se pode adicionar durante a moagem do clínquer, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio, além de porcentagens de materiais pozolânico, escória granular de alto forno e/ou materiais carbonáticos nos teores especificados pela norma, sendo 56 a 94% de clínquer e gesso, 6 a 34% de escória, 0 a 10% de calcário. As exigências químicas, físicas e mecânica estão definidas na NBR 11578/1991.

### 4.3.2 Propriedades químicas

Para conhecer as propriedades químicas do cimento, é preciso entender o seu processo de hidratação. O processo se inicia com a hidrólise (quebra da ligação química de uma molécula) do silicato tricálcico ( $C_3S$ ), formando o silicato bicálcico e hidróxido de cálcio (CH). O hidróxido de cálcio se precipita, formando um sólido com estrutura cristalina, enquanto que, o silicato bicálcico combina-se com a água, adquirindo duas moléculas de água, formando um composto gelatinoso. “Os dois últimos constituintes principais do cimento, o aluminato tricálcico e o ferro aluminato de cálcio se hidratam, resultando, do primeiro, cristais de variado conteúdo de água, e do segundo, uma fase amorfa gelatinosa” (BAUER, 2011, p.46).

Ainda segundo Bauer (2011), o aluminato tricálcico é responsável pelo início imediato da pega do cimento. Para que esse início de pega seja controlado, é necessário adicionar uma quantidade de sulfato de cálcio hidratado no processo de fabricação do mesmo, antes da moagem final. A adição de material pozzolânico no cimento/ou concreto, também contribui com muitas características do material, como suas propriedades químicas, calor de hidratação, tempo de pega, exsudação, reação álcali-agregado além de melhorar a resistência a agentes agressivos.

#### 4.3.2.1 Calor de hidratação

Durante o processo de endurecimento do cimento, ocorre a hidratação dos compostos. Esta reação de hidratação é exotérmica, onde os silicatos presentes na massa do cimento irão reagir com o hidróxido de cálcio do mesmo, liberando uma quantidade considerável de calor. Segundo Fusco (2008), este fato pode trazer graves problemas em concretagens de grandes massas.

Também de acordo com Fusco (2008), durante a primeira fase de endurecimento do concreto a liberação de calor é mais intensa, fazendo com que a massa de concreto se expande, provocando uma heterogeneidade da mesma. Essa heterogeneidade provoca fissuras no concreto, mas à medida que segue o processo de hidratação as fissuras vão sendo controladas.

O calor de hidratação varia de acordo com a composição do cimento, especialmente com as proporções de silicato e aluminatos tricálcio. Os valores do calor de hidratação dos constituintes do cimento são 120 cal/g para o silicato

tricálcico ( $C_3S$ ), 62 cal/g para o silicato bicálcico, 207 cal/g Aluminato tricálcio ( $C_3A$ ), 100/g  $C_4AF$ , 203 cal/g para magnésia, 279cal/g para a cal (BAUER, 2011).

A adição de material pozolânico na massa de concreto, contribui para diminuir o calor de hidratação, visto que a reação na pasta de cimento vai acontecer de forma mais lenta, liberando menos quantidade de calor (FUSCO, 2008).

#### **4.3.2.2 Tempo de pega**

Ao se iniciar o processo químico de hidratação da massa de concreto, suas propriedades físicas vão sendo alteradas, melhorando assim suas características mecânicas, tornando a massa mais consistente e imprópria para o trabalho. Então, entende-se por tempo de pega, o prazo disponível para operação de manuseio do concreto, antes que o mesmo comece a perder suas características de trabalhabilidade (BAUER, 2011).

Segundo Bauer (2011), a pega e o endurecimento são fases do processo de hidratação do concreto, sendo que, a pega está na primeira fase do processo e o endurecimento na segunda e última fase. “A caracterização da pega dos cimentos é feita pela determinação de dois tempos distintos – tempo de início e fim de pega”. Para determinação destes tempos, são feitos ensaios onde é medida a resistência a penetração de uma agulha (vicat) na pasta de cimento (BAUER, 2011). A norma que prescreve o método de ensaio para determinação do início e fim de pega é a NBR 11581/1991. A NBR 11578/1991 cimento Portland CPII, estabelece que o tempo de início de pega deve ser  $\geq 1$  hora e o tempo de fim de pega não deve ser superior a 10 horas.

#### **4.3.2.3 Exsudação**

Quando o concreto é lançado, a água presente na massa tende a se mover em direção à superfície, devido a segregação dos componentes do concreto. Segundo Fusco (2008) os grãos de concreto sendo mais pesados que a água, tende a sedimentar, fazendo com que a mesma seja expulsa para a parte superior do concreto. Este fenômeno de afloramento da água é denominado exsudação, e causa perda de resistência, prejudica a durabilidade e uniformidade do concreto.

Para que a exsudação seja evitada, a relação água/cimento deve ser controlada, evitando o emprego excessivo de água. Segundo Bauer (2011) a finura do cimento influi na redução de exsudação, devido a diminuição dos espaços vazios entre os grãos, aumentando a resistência do percurso ascendente da água. A adição de material pozolânico no concreto ajuda no controle da exsudação e segregação, visto que este material quando finamente moído promove maior retenção de água e coesão, tornando a massa mais homogênea, evitando assim o afloramento da mesma.

#### 4.3.2.4 Resistência a agentes agressivos

Muitos fatores influenciam na durabilidade do concreto, entre eles estão os materiais constituintes, o processo de fabricação, a aplicação, sua adequada especificação para o uso a que se destina, bem como o ambiente em que será exposto. Segundo a NBR 6118/2007 que especifica os requisitos básicos exigíveis para projeto de estruturas de concreto simples, armado e protendido, a classe de agressividade ambiental é dividida conforme a TAB. 2.

Tabela 2 – Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: NBR 6118/2007

Como pode ser visto na TAB. 2, estruturas de concreto em contato com regiões marinhas ou industriais tem um risco maior de sofrer deterioração, devido ao ataque de substâncias químicas sujeitas a reações com os constituintes do cimento.

Segundo Bauer (2011), os silicatos de cálcio que não foram completamente hidratados e principalmente a cal hidratada presente no cimento hidratado, são os elementos suscetíveis aos ataques químicos. As águas ácidas ou até mesmo outros ácidos como os resíduos industriais, agem sobre a cal do cimento hidratado,

variando em função da concentração de carbono. Quanto à concentração de anídrico carbônico,

Se a concentração é baixa, o sal formado é o carbonato de cálcio, pouco solúvel, que obstrui os poros, constituindo proteção a ataques posteriores.

Se a concentração é relativamente forte, o carbonato formado é dissolvido como bicarbonato, prosseguindo o ataque até completa exaustão da cal presente. Os sais de cálcio são atacados em seguida.

[...]

A água sulfatada ataca o cimento hidratado por reação do sulfato com aluminato, produzindo um sulfoaluminato com grande aumento de volume. Essa expansão interna é responsável pelo fissuramento que, por sua vez facilita o ataque, conduzindo o processo a completa deterioração do material.

(Bauer, 2000, p.48).

A adição de pozolanas no concreto contribui com a resistência aos agentes agressivos, pois segundo Netto (2006), a pozolanas reagem com os hidróxidos de cálcio presentes, que não foram consumidos na primeira reação, completando assim a reação entre os compostos e evitando que os hidróxidos de cálcio fiquem livres na massa, sujeitos a serem solubilizados por agentes agressivos, o que provocaria sua lixiviação e decorrente disso o aparecimento de poros que facilitariam deterioração do concreto.

#### **4.3.2.5 Reação álcali-agregado**

A reação álcali-agregado é um fenômeno que acontece no concreto endurecido devido às reações dos álcalis do cimento com agregados finamente divididos. Esses agregados possuem em sua composição sílica altamente reativa que, em contato com a água se solubilizam, reagindo com os íons alcalinos de sódio e potássio, provenientes da hidratação das impurezas do cimento, formando um gel expansivo. Essas reações causam grandes danos as estruturas de concreto, provocando fissuras e deslocamentos que podem levar a um comprometimento das mesmas (FUSCO, 2008; BAUER 2000).

As reações álcali-agregado são classificadas em três tipos, as quais estão citadas abaixo:

- Reação álcali-sílica: ocorre devido a reação dos álcalis do cimento (potássio e sódio), com a sílica amorfa presente em alguns tipos de agregados reativos. A reação se inicia nos poros do concreto, onde os álcalis existentes irão reagir

com a sílica reativa presentes no agregado, formando um gel expansivo que provocará fissuras no concreto (LIMA; SILVA; COSTA; 2009, NOGUEIRA 2010).

- Reação álcali-silicato: é um processo parecido com o da reação álcali-sílica, porém é mais lento, provocando a deterioração da estrutura de concreto. É uma reação onde os álcalis presentes no cimento reagem com silicatos reativos presentes em rochas sedimentares, metamórficas e ígneas. Segundo Figueiroa e Andrade (2007 apud LIMA; SILVA; COSTA; 2009), a reação álcali-silicato é a mais comum no Brasil, devido a utilização de agregados reativos, como, quartzitos, granitos e gnaisses
- Reação álcali carbonato: é uma reação bem diferente das descritas anteriormente, pois ocorre devido o ataque dos álcalis do cimento ao calcário dolomítico, formando compostos cristalizados, como: brucita, carbonato alcalino e carbonato de cálcio. Este ataque é chamado de desdolomitização e após a sua ocorrência, o carbonato alcalino formado reage com os produtos da hidratação do cimento, regenerando-se e provocando o enfraquecimento da zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento, provocando fissuras devido à perda de aderência dos materiais (LIMA; SILVA; COSTA; 2009; NOGUEIRA, 2010).

Apesar de existirem três tipos de reação álcali agregado, é de interesse maior somente a reação álcali-sílica, devido esta ser a mais comum dentre as três descritas anteriormente (NOGUEIRA,2010).

Segundo Fusco (2008) o melhor a ser feito para se controlar a reação álcali-agregado, é estudar a fonte dos agregados e efetuar ensaios químicos para detectar a eventual reatividade dos mesmos. Além disso, duas medidas de precauções devem ser tomadas. A primeira é o controle do teor de álcali do cimento, pois a reação só ocorre com teores de álcalis acima de 0,6% dosados em termos de óxido de sódio. A segunda é o emprego de pozolanas na dosagem do concreto, pois a pozolana provoca uma reação álcali-sílica imediatamente na preparação do concreto, consumindo os álcalis do cimento, e inibindo a expansão posterior dentro do concreto endurecido.

#### 4.4 Utilização dos resíduos cerâmicos em concretos

Novas técnicas sustentáveis vêm sendo estudados para incorporar melhorias na produção e na lucratividade de empresas dos mais variados setores, por meio da implantação da gestão de qualidade. Busca-se aplicar métodos produtivos tecnológicos e inovadores durante ou após a fabricação dos produtos (VELLANI; RIBEIRO, 2009).

Para as indústrias cerâmicas, geradoras de resíduos em potencial, é necessário a implantação de métodos que possibilitem a reutilização dos mesmos de forma a aumentar a lucratividade e minimizar as agressões ao meio ambiente. Duas importantes alternativas que vem sendo estudadas para a reciclagem dos rejeitos de cerâmica vermelha são: seu retorno à produção, incorporando-os moídos à massa formada por argila e água, o que reduziria o consumo de matéria prima para produção dos artefatos; ou ainda a incorporação destes resíduos moídos aos concretos substituindo parcialmente o cimento, uma vez que este material também possui propriedades pozolânicas (IPT, 2014).

A “pozolanicidade de tijolos” (ARAÚJO JÚNIOR; RONDON, 2009, p. 2) pode ser constatada desde períodos remotos da história mundial. Antes mesmo da descoberta do cimento Portland, os romanos faziam o uso argamassas de tijolos triturados e cal para a obtenção de um material hidráulico e resistente. Desde muito tempo é sabido que os tijolos cerâmicos possuem propriedades pozolânicas e que, quando misturados à cal e água, apresentam características que se assemelham aos cimentos na composição de concretos e argamassas em geral. (ARAÚJO JÚNIOR; RONDON, 2009).

Os benefícios desta nova forma de utilização proposta aos resíduos gerados pelas indústrias de cerâmica vermelha são inúmeros: nova fonte de rentabilidade e liberação de espaço nos pátios das industrias ceramistas; diminuição do consumo de cimento na construção civil e dos descartes ilegais de resíduos na natureza; além do melhoramento do produto final com “redução da permeabilidade, diminuição da porosidade capilar, maior resistência a sulfatos e melhoria da resistência à compressão a longo prazo” (ARAÚJO JÚNIOR; RONDON, 2009, p.3).

#### 4.4.1 Resíduos gerados em indústrias de cerâmica vermelha

As indústrias cerâmicas são importantes fornecedoras de produtos para o setor da construção civil, produzindo materiais de grande utilização, como tijolos, telhas e lajotas. Este tipo de indústria é importante geradora de impactos ambientais, sendo que os principais provêm da deterioração das áreas onde é explorada a matéria prima, do consumo de energia e consequente emissão de poluentes na atmosfera, além da geração de resíduos sólidos (Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG), 2013).

A produção de cerâmica vermelha no Brasil atinge cerca de 130 milhões de toneladas por ano, sendo feita, em sua maioria, por empresas de pequeno e médio porte. O estado de Minas Gerais desponta neste ramo ceramista como o segundo maior produtor do país, atrás do estado de São Paulo, apresentando grandes jazidas de argila que constitui a matéria prima da produção das cerâmicas. Do total da produção de todo o país, pelo menos 5% de produto final é rejeitado e algumas vezes utilizado como cascalho (FIEMG, 2013; IPT, 2014).

Os resíduos gerados pelas indústrias cerâmicas provêm de várias etapas da produção, sendo os principais: resíduos comuns (recicláveis ou não), resíduos perigosos, cinzas, material cru não conforme e produto final fora de especificação. (FIEMG, 2013).

Os resíduos sólidos finais fora de especificação constituem-se de peças quebradas e outras que não se encontram de acordo com as normas técnicas existentes destinadas a esta produção (FIG. 2). A destinação final deste produto é de responsabilidade do produtor que geralmente o deixa disposto nos pátios da empresa para que mais tarde seja descartado ou utilizado no cascalhamento de estradas ou pátios de empresas, o que não traz lucratividade alguma à empresa.

Novos métodos de reaproveitamento destes rejeitos vêm sendo estudados, objetivando uma nova forma de lucratividade econômica às empresas do setor e também a minimização de danos ao meio ambiente, gerados pela produção dos produtos cerâmicos, implantando com isto uma produção mais sustentável. Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2014), existem duas potenciais utilizações aos resíduos sólidos: “como matéria-prima (chamote) retornando à massa cerâmica (estabelecendo o tipo de moagem e a proporção em que podem ser

usados), e como aditivo mineral ativo, de ação pozolânica, em argamassas e artefatos de cimento” (IPT, 2014).

Figura 2 - Resíduos sólidos espalhados pela indústria



Fonte: o autor (2014)

#### **4.4.2 Sustentabilidade nas empresas – reutilização e benefícios ao meio ambiente**

As empresas que adotam o desenvolvimento sustentável no seu processo de produção ganham em credibilidade, têm maior lucratividade no comércio de seus produtos e ainda contribuem com o meio ambiente e com a sociedade.

Para Jappur et al (2008), “a inclusão do conceito de desenvolvimento sustentável, no mundo corporativo das empresas, foi definida pelo WBCSD (World Business Council for Sustainable Development), como o alcance do equilíbrio entre as três dimensões que balizam a sustentabilidade corporativa, que são: a econômica; a ambiental e a social. Estas dimensões influenciam todas as organizações constituintes de uma cadeia produtiva, e não somente uma organização ou empresa” (Jappur et al, 2008 apud Marcos; Galvão, 2011, p.03).

O desenvolvimento sustentável de uma empresa, segundo Santana (2008) leva em conta além dos aspectos ambientais e sociais que envolvem todo o procedimento de fabricação de seus produtos, também a lucratividade. A sustentabilidade empresarial (FIG. 3) então prevê uma integração de todos estes fatores para que cresça da melhor forma possível.

FIGURA 3 – Desenvolvimento sustentável nas empresas



Fonte: Santana, 2008, p.26

Dizendo respeito diretamente sobre as indústrias cerâmicas, verifica-se também a necessidade da aplicação do desenvolvimento sustentável de forma a minimizar os impactos causados ao meio ambiente pelos processos decorrentes da produção, buscando uma integração da indústria com o meio em que se insere.

As indústrias de cerâmica vermelha, quanto aos danos que causa ao meio ambiente, são responsáveis, segundo o IPT (2014), pela “degradação das áreas de extração da argila, consumo de energia, geração de resíduos sólidos decorrentes de perdas por falhas na qualidade do produto, emissão de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa”. Todos estes fatores mostram o quanto é importante a implantação da sustentabilidade tanto no processo de produção dos artefatos de cerâmica quanto na destinação final dos resíduos gerados.

O processo de extração de matéria prima constitui uma intervenção do homem na natureza, o que vem a gerar impactos na área explorada. Esta exploração deve ser licenciada pelos órgãos municipais competentes. A argila é um dos minerais mais utilizados nas indústrias, principalmente as que produzem

materiais para a construção civil. É produto gerado por meio do intemperismo das rochas e considerada “o recurso mineral (não renovável) mais abundante na natureza” (Pedrassini, 2013).

Ainda segundo Pedrassini (2013) “como a extração é feita a céu aberto, o resultado final dessa intervenção dependerá dos critérios adotados na mineração e na recuperação ambiental da jazida”. Antes de 1960, as jazidas eram exploradas sem nenhuma preocupação com a recuperação da área, mas após este período grupos ambientalistas começaram a levantar a bandeira da sustentabilidade propondo a exploração consciente e a requalificação das áreas exploradas. Para o geólogo Luciano Cordeiro de Loyola, uma forma de diminuir os impactos gerados pela extração de argila é evitar ao máximo o desperdício durante a produção, controlando para que tudo saia em conformidade. Já para Jaime Pedrassini é quase que impossível reduzir os impactos uma vez que estão diretamente relacionados com o local de extração e não tanto com a indústria em si (NOVACER, 2013, p.18).

A indústria cerâmica também é causadora de poluição por meio da emissão de gases poluentes na atmosfera. Os gases são emitidos durante várias etapas do processo, como: durante o transporte de matéria prima e do material fabricado; ou ainda durante a queima dos combustíveis nos fornos. “Vários fatores interferem na ocorrência das emissões como: falta de controle operacional e mão de obra desqualificada, tipo de combustível e forno utilizado” (FIEMG, 2013). Este tipo de poluição pode ser controlado instalando filtros nas chaminés dos fornos, aplicando técnicas mais eficientes e automatizando, mesmo que em menor escala, o processo de produção.

Outro aspecto que também pode ser visto, talvez como o principal impacto gerado pelas indústrias cerâmicas ao meio ambiente, é o que se relaciona com geração de resíduos sólidos. Durante todo o processo de produção eles são gerados, mas o que é rejeitado na etapa final, que constitui o resíduo cozido não-conforme, gera grande volume e pouca utilidade (NOVACER, 2013).

A utilização dos resíduos como substituição pozolânica em concretos além de gerar uma nova fonte de lucratividade às empresas, contribui com o meio ambiente por meio da redução de descartes indevidos dos rejeitos e, também pelo fato de que isto reduziria consideravelmente o consumo de cimento, que agride o meio ambiente de forma mais severa que a produção das cerâmicas, que é considerada um dos

produtos industrializados mais naturais do mundo (Araújo Júnior; Rondon, 2009; NOVACER, 2013).

Quanto à minimização ou reaproveitamento da geração de resíduos a FIEMG apresenta a pirâmide (FIG. 4) onde é possível perceber como deve ser priorizado o processo de gerenciamento dos resíduos produzidos, estando a reutilização e reciclagem ao centro da pirâmide, onde verifica-se que estes são os métodos mais eficazes de destinação dos resíduos quando não é possível evitar a sua geração.

FIGURA 4 – Pirâmide de gestão de resíduos sólidos em indústria cerâmica



Fonte: FIEMG, 2013, p.32

Esta reutilização dos resíduos proposta enquadra numa forma de desenvolvimento sustentável em empresas do ramo ceramista, o que traria benefícios tanto para o meio quanto para a economia da empresa.

Empresas que não mantêm ações para atuar sobre seus próprios resíduos não são capazes de integrar desempenho ecológico e econômico. Sustentabilidade pode ser alcançada quando há, concomitantemente, desempenho econômico, social e ecológico. Assim, uma ação ecológica somente aumenta a sustentabilidade quando integra desempenho econômico e ecológico. Essa integração chama-se ecoeficiência. (Vellani; Ribeiro, 2009).

A sustentabilidade aplicada nos processos produtivos de indústrias vem propor um crescimento que não agrida o meio ambiente, que esteja em harmonia com a sociedade e que ainda traga benefícios econômicos para os empresários,

sendo portanto de fundamental importância para garantir o desenvolvimento consciente e o aprimoramento da produção.

#### **4.4.3 Melhorias agregadas ao produto final (argamassas e concretos)**

Muitos estudos vêm sendo propostos, desde algum tempo atrás, buscando a incorporação de materiais alternativos nos concretos, como substituição pozolânica parcial do cimento Portland. Estes novos materiais em estudo são os resíduos de cerâmica vermelha, cinzas de cascas de arroz e metacaulinita. Esta utilização permitiria o uso de rejeitos, evitando assim o seu descarte no meio ambiente, e também reduziria o consumo de cimento, que provoca grande poluição enquanto é produzido (Vieira, 2005).

Nestas misturas há menor consumo de cimento, conseqüentemente há menor extração de matérias primas, redução de custos com recuperação ambiental, redução do gás carbônico (CO<sub>2</sub>) lançado na atmosfera e outras vantagens. Além disso proporcionam características importantes nas argamassas e concretos tais como a redução da permeabilidade, diminuição da porosidade capilar, maior resistência a sulfatos e melhoria da resistência à compressão a longo prazo (KIHARA e SHUKUZAWA, 1982; WILD, KHATIB e O'FARREL, 1997; O'FARREL, WILD e SABIR, 2001; TURANLI, BEKTAS e MONTEIRO, 2003 apud ARAÚJO JÚNIOR; RONDON, 2009, p. 02).

Farias Filho; Rolim; Toledo Filho (2000) em seus experimentos constataram que os resíduos de cerâmica vermelha, ou seja as argilas calcinadas, “possuem elevada atividade pozolânica e grande potencialidade para o uso, como adição mineral, em misturas com cimento Portland”.

A utilização dos aditivos minerais, como a argila calcinada, nos concretos, além de trazer inúmeros benefícios para o meio ambiente, promovendo a sustentabilidade ambiental, também traz inúmeros benefícios ao produto final, agregando qualidade, resistência e durabilidade, numa das misturas de maior importância na construção civil.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

Para realização do presente estudo, foi utilizada uma amostra de resíduos cerâmico coletada em uma indústria ceramista, localizada nas margens da BR 354, km 484, na cidade de Arcos-MG. A coleta foi feita em um amontoado de resíduo cerâmico (FIG. 5) estocado no pátio da Cerâmica, composto apenas por restos de tijolos cerâmicos quebrados. A amostra de resíduo RC consistia de cacos de dimensões variadas.

Figura 5 – Amontoado de resíduo cerâmico



Fonte: O autor (2014)

Foram utilizadas amostras de cimento Portland CII-E da marca cimento Nacional adquirido em uma loja de materiais para construção. A escolha deste cimento foi pelo fato de ser um produto que pode ser usado em todas as etapas da construção civil e devido a isto é o mais usual em obras de pequeno e médio porte. Foram utilizadas ainda amostras de agregado miúdo proveniente do areal Campo Alegre e agregado graúdo proveniente da Agrimig Calcário agrícola, ambos os materiais foram coletados no pátio de agregados da empresa Paranas Engenharia e Comércio.

O Resíduo Cerâmico passou por um processo de beneficiamento para adequá-lo as necessidades do projeto, efetuar as análises físico químicas e assim

utiliza-lo com material pozolânico em substituição ao cimento na produção do concreto. Os demais materiais também foram analisados para caracterização de suas propriedades físicas e químicas, afim de se obter dados suficientes para realização dos estudos.

### 5.1 Moagem do resíduo cerâmico

Para efetuar os ensaios de caracterização da amostra de Resíduo cerâmico e para uma possível utilização como material pozolânico, foi necessário que a mesma sofresse um processo de beneficiamento, sendo moída até atingir uma finura adequada para tais fins.

Para iniciar o processo de beneficiamento, a amostra foi triturada manualmente com o auxílio de um soquete, sem nenhum controle de granulometria. Para a segunda etapa do beneficiamento do resíduo, foi utilizado um moinho tipo pulverizador de disco (FIG. 6), para moagem prévia do material, com utilização máxima do torque do equipamento.

Figura 6 – Moinho tipo pulverizador de disco



Fonte: O autor (2014)

O resíduo foi moído até passante total na peneira de 4,5mm como mostra a FIG. 7.

Figura 7 – Resíduo passante na peneira 4,5mm



Fonte: O autor (2014)

Para a terceira e última etapa de moagem, foi utilizado um moinho tipo pulverizador de panela. Foram colocadas pequenas porções, na ordem de 70g por porção na panela de pulverização (FIG. 8).

Figura 8 – Panela de pulverização



Fonte: O autor (2014)

A mesma foi levada ao moinho pulverizador de panela (FIG. 9), por um tempo de 30 segundos, tempo este suficiente para que a amostra adquirisse a granulometria ideal para realização dos trabalhos (FIG. 10).

Figura 9 – Moinho pulverizador de panela



Fonte: O autor (2014)

Figura 10 – Resíduo passante na peneira  
ABNT 200# (0,0075mm)



Fonte: O autor (2014)

Foram moídos 10Kg da amostra RC seguindo os processos descritos acima e peneirada até passante na peneira ABNT 200# (0,0075mm).

Após o preparo da amostra RC, a mesma foi submetida a ensaios com o objetivo de conhecer suas propriedades físico químicas. Foram efetuadas as análises para determinação do teor de óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), Anídrico sulfúrico (SO<sub>3</sub>), dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), além das análises físicas para determinação da massa específica, umidade e índice de finura por meio da peneira 75 µm.

## 5.2 Caracterização das amostras

Para realização dos estudos, foi necessário conhecer as particularidades de cada amostra utilizada. A amostra de cimento CII-E foi submetida a ensaios Físicos, químicos e mecânicos, as amostras de agregados miúdo e graúdo passaram por ensaios físicos para determinação de suas principais características e a amostra de resíduos cerâmicos também foi submetida a ensaios físicos e químicos. Todas as análises foram feitas afim de se obter o maior número de dados para concretização dos trabalhos.

As propriedades físico químicas do cimento CII-E foram fornecidas pelo fabricante conforme descritas em TAB. 3 e 4.

Tabela 3: Ensaios Químicos do cimento CII-E

Ensaios	Metodologia	UM	Resultados	Exigências
Resíduo insolúvel (RI)	ABNT NM 15/12	%	2,41	≤ 2,5
Perda ao Fogo (PF)	ABNT NM 18/12	%	5,91	≤ 6,5
Oxido de Magnésio (MgO)	ABNT NM 21/12	%	2,01	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre (SO <sub>3</sub> )	ABNT NM 16/12	%	2,42	≤ 4,0
Anídrico Carbônico (CO <sub>2</sub> )	ABNT NM 20/12	%	4,98	≤ 5,0

Fonte: Companhia Nacional de Cimento

Tabela 4: Ensaio Físico do cimento CII-E

Ensaios	Metodologia	UM	Resultados	Exigências
Área específica (Blaine)	ABNT NM 76/98	cm <sup>2</sup> /g	4.118	≥ 2600
Massa específica	ABNT NM 23/01	g/cm <sup>3</sup>	2,99	Não aplicável
Índice de finura - #75µm (Nº 200)	ABNT NBR 11579/2013	%	1,10	≤ 12,0
Resíduo na peneira #325	ABNT NBR 9202/85	%	10,28	Não aplicável
Água de consistência normal	ABNT NM 43/03	%	28,0	Não aplicável
Início de pega	ABNT NM 65/03	Minutos	182	≥ 60
Fim de pega	ABNT NM 65/03	Minutos	244	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582/2012	Mm	0,00	≤ 5,0

Fonte: Companhia Nacional de Cimento

As características dos agregados utilizados também foram disponibilizadas pelos fornecedores, as quais estão descritas em TAB. 5 e 6.

Tabela 5: Características físicas da areia lavada utilizada

Ensaio	Resultados	Norma
Módulo de finura	2,95	NBR 7217
Dimensão máxima característica (mm)	4,6	NBR 7217
Massa específica (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,58	NBR 9776
Massa unitária (Kg/dm <sup>3</sup> )	1,45	NBR 7251
Impurezas orgânicas (ppm)	<300	NBR 7220
Teor de materiais pulverulentos %	0,29	NBR 7219
Teor de argila e torrões %	4,65	NBR 7218

Fonte: Areal Campo Belo

Tabela 6: Características físicas da brita 1 utilizada

Ensaio	Resultados	Norma
Módulo de finura	5,9	NBR 7217
Dimensão máxima característica (mm)	12,3	NBR 7217
Massa específica (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,68	NBR 9776
Massa unitária (Kg/dm <sup>3</sup> )	1,59	NBR 7251

Fonte: Agrimig Calcário

As análises químicas e físicas na amostra de Resíduo Cerâmico foram realizadas pela Fundação Centro Tecnológico CETEC-Senai, no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento em Química. As metodologias adotadas para realização dos ensaios químicos foram fornecidas pelo laboratório.

Para determinação do teor de silício (SO<sub>2</sub>), a amostra foi aberta por fusão com tetraborato de sódio na porção de uma parte da amostra para oito partes do fundente. O material fundido foi dissolvido com HCl 1:1 (uma parte de HCl concentrado e uma parte de água). Foi adicionado metanol e levado a seco para retirada do excesso de fundente. Após a retirada do excesso de fundente, foram realizados os seguintes passos:

- Resfriamento da amostra à temperatura ambiente, foi retomado com 30 ml de HCl 1:1;
- Foi mantida a ebulição até a dissolução dos sais;
- Foi filtrado em papel de filtro faixa branca e lavado com água quente;
- O conjunto resíduo + papel de filtro foi transferido para um cadinho de platina;
- Foi calcinado em mufla elétrica, a 1000°C, por uma hora;
- A amostra foi resfriado em dessecador e pesada (A);
- O material foi Fluorizado (Gotas de H<sub>2</sub>O e de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1:1 e +/- 20 ml de HF – a seco);

- Foi calcinado novamente por 5 min (antes, passar no bico de gás);
- O material foi resfriado em dessecador e pesado (B).

O teor de silício (SiO<sub>2</sub>) foi encontrado através da seguinte expressão:

$$\%SiO_2 = \frac{A - B}{M} \times 100$$

Em que:

A: peso do cadinho antes de fluorizar (Kg);

B: peso do cadinho depois de fluorizar (Kg);

M: massa da amostra (Kg).

O teor de alumínio foi encontrado por meio das seguintes etapas:

- Foi retomado o resíduo da análise de silício e fundido com pirossulfato de potássio;
- Foi redissolver o material fundido no filtrado da análise de silício.
- O material foi avolumado para 250 ml;
- Foi Pipetado 0,1 g para um béquer de 250 ml;
- O mesmo foi Diluído com 50 ml de água;
- O material foi neutralizado com NaOH\* 10 % (utilizando papel tornassol), colocando um pouco em excesso;
- Foi mantido em ebulição por 5 min.;
- Após a ebulição, o material foi filtrado com papel de filtro faixa preta, lavando com água quente;
- No filtrado, foi acidulado com HCl 1:1, até que o pH esteja entre 2,0 - 3,0 (utilizar pHmetro);
- Foi adicionado 30 ml de EDTA 0,05 mol/L;
- O pH foi acertado entre 5,5 – 5,6 com CH<sub>3</sub>COONa;
- A amostra foi tampada e mantida em ebulição por 15 min.;
- Titular com ZnCl<sub>2</sub> 0,05 mol/L, ainda morno, mantendo sempre o pH entre 5,5 – 5,6.

Indicador = Alaranjado de xilenol;  
Viragem = Amarelo para rosa.

O teor de alumínio, então, pode ser calculado de acordo com a equação:

$$T_{Al} = \frac{(\text{Vol. EDTA} \times \text{F.C} - \text{Vol. ZnCl}_2 \times \text{F.C}) \times 100 \times \text{F.V}}{m}$$

Em que:

$T_{Al}$  = teor de alumínio (%).

Fator volumétrico:

Al = 0,001349;

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0,002549.

Para determinação do teor de carbono e enxofre, a amostra foi fundida com fundentes e ferro metálico em um forno de indução e detectados por infravermelho em um equipamento LECO CS 400.

Os elementos cálcio ferro e magnésio foram dosados por absorção atômica. Foi construída uma curva com padrões de cada elemento obedecendo a lei de Beer, a amostra foi diluída, para que a leitura da amostra estivesse dentro da faixa da curva construída. Com a leitura da amostra e os dados da curva, foi calculada a concentração de elemento da amostra. As determinações foram feitas das soluções obtidas na abertura da amostra para dosagem de silício e alumínio.

A umidade do resíduo cerâmico foi determinada através da pesagem de 1g de material e sua secagem em estufa. A mesma foi definida pela diferença de massa do material seco em estufa e do material antes da secagem, conforme equação:

$$U = \frac{m_1 - m_2}{m_1}$$

Em que:

$U$  : umidade da amostra (%);

$m_1$ : é a massa da amostra antes da secagem (g);

$m_2$  : é a massa da amostra após secagem (g).

O índice de finura do resíduo cerâmico foi obtido por meio do peneiramento na peneira 75 $\mu$ m (nº 200), de acordo com a NBR 11579/2012. O mesmo foi dado pela seguinte equação:

$$F = \frac{RC}{M} \times 100$$

Em que:

$F$  : índice de finura do cimento (%);

$RC$  : resíduo do cimento na peneira 75  $\mu$ m (g);

$M$  : massa inicial do cimento (g).

A massa específica do material ensaiado foi calculada segundo a NBR NM 23: 2001 através da seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Em que:

$\rho$  : massa específica do material ensaiado (g);

$m$  : massa do material ensaiado (g);

$v$  : volume do frasco volumétrico (m<sup>3</sup>).

### 5.3 Índice de atividade pozolânica com o cimento

Com o intuito de constatar o índice de atividade pozolânica do resíduo cerâmico com o cimento, foi realizado o ensaio normalizado pela NBR 5752/1992. Este ensaio consiste na determinação do índice de atividade pozolânica de uma determinada adição com o cimento.

Para realização do mesmo, foram preparadas duas amostras de argamassa, uma de referência, sem adição, e uma outra com 35% de substituição da massa de cimento em volume pela adição de resíduo cerâmico. Após o preparo das argamassas, foi moldado três corpos de prova de dimensão (50x100) mm para cada uma das amostras de argamassa, seguindo as recomendações da NBR 7215/1996 (FIG. 11 e 12).

Figura 11 - Moldagem dos corpos de prova



Fonte: O autor (2014)

Figura 12 – Adensamento da argamassa



Fonte: O autor (2014)

Logo após a moldagem, os corpos de prova permaneceram por um período de 24h no mesmo local onde foram moldados, para cura inicial. Em seguida foram desmoldados e levados para um recipiente fechado, a uma temperatura de aproximadamente 38°C, onde permaneceram durante 27 dias (FIG. 13). Após os 27 dias, os corpos de prova foram retirados do recipiente de cura, 1h antes da ruptura por compressão.

Figura 13 – Corpos de prova aguardando ruptura



Fonte: O autor (2014)

A determinação do índice de atividade pozolânica foi alcançada calculando a resistência a compressão de cada corpo de prova, e efetuando a média

da resistência a compressão dos mesmos, por meio dos rompimentos dos corpos de prova (FIG. 14 e 15).

Figura 14 – Rompimento do corpo de prova com substituição de cimento por resíduo cerâmico



Fonte: O autor (2014)

Figura 15 – Rompimento do corpo de prova sem substituição de cimento por resíduo cerâmico



Fonte: O autor (2014)

O índice de atividade pozolânica é dado pela expressão:

$$i = \frac{f_{cb}}{f_{ca}} \times 100$$

Em que:

$i$ : Índice de atividade pozolânica com o cimento (%);

$f_{cb}$ : resistência média aos 28 dias, dos corpos de prova moldados com cimento e material pozolânica (MPa);

$f_{ca}$ : resistência média aos 28 dias, dos corpos de prova moldados só com o cimento (MPa).

#### 5.4 Dosagem do Concreto

Para realização das dosagens, foi necessário obter um concreto de referência, afim de que suas características fossem comparadas com as dos concretos com teores de substituição de cimento por resíduo cerâmico. Então foram dosados concretos com e sem substituição de cimento por resíduo cerâmico, com o objetivo de avaliar a influência da substituição do cimento pelo mesmo. O concreto sem utilização de resíduo cerâmico foi denominado concreto de referência, enquanto que os demais serão citados conforme as diferentes porcentagens de substituição.

Na produção do concreto de referência, foi utilizado uma dosagem elaborado pelo laboratório de análises da empresa Parana Indústria e Comércio. O traço foi preparado a partir de dados dos materiais empregados, cimento e agregados, e pela definição de algumas características que o mesmo deveria ter aos 28 dias, como resistência a compressão de 25Mpa e baixo valor de absorção. Os materiais utilizados para produção do concreto de referência foram: cimento, areia, brita 0 e brita 1, perfazendo o traço 1; 2,7; 0,8; 1,85. A partir deste, foi calculado o consumo de materiais para cada um dos traços com 10, 20 e 30% de substituição em peso de cimento por resíduo cerâmico, mantendo a massa de agregados e a relação água/cimento.

A TAB. 7 mostra a quantidade específica de cada material, tanto para o concreto de referência quanto para os concretos com teores de substituição.

Tabela 7 – Consumo de materiais por metro cúbico de concreto

Concreto	Cimento kg m <sup>-3</sup>	Resíduo Cerâmico kg m <sup>-3</sup>	Areia kg m <sup>-3</sup>	Brita kg m <sup>-3</sup>		Água L m <sup>-3</sup>	Fator água/cimento
				0	1		
Concreto de referência	350,00	-	928,00	275,00	640,00	195	0,55
Concreto c/ 10% de substituição	315,00	35,00	928,00	275,00	640,00	195	0,55
Concreto c/ 20% de substituição	280,00	70,00	928,00	275,00	640,00	195	0,55
Concreto c/ 30% de substituição	245,00	105,00	928,00	275,00	640,00	195,00	0,55

Fonte: O autor (2014)

## 5.5 Produção do concreto

Após a obtenção do traço para o concreto de referência, todos os materiais utilizados na obtenção das misturas, cimento, areia, brita, água, foram armazenados em pequenas baias para evitar a contaminação dos mesmos. Também foi armazenado amostras de resíduo cerâmico moída para produção dos concretos com substituição. Em seguida, os materiais foram pesados em uma balança de precisão afim de se obter a quantidade necessária de cada mistura. Após pesados, os materiais foram levados para uma betoneira onde foram adicionados aos poucos e misturados por um período de cinco minutos para garantia da homogeneidade do concreto (FIG. 16).

As dosagens dos concretos com teores de substituição, foram elaboradas respectivamente, seguindo o traço do concreto de referência, com parte de seu consumo de cimento em peso substituído por resíduo cerâmico nas porções de 10, 20 e 30%.

Depois de produzidos, os concretos foram despejados em uma macera com capacidade para 300 litros, para que os mesmos passassem por análise no estado fresco e posterior moldagem dos corpos de prova.

Figura 16 – Betoneira para mistura dos materiais



Fonte: O autor (2014)

## 5.6 Análise do concreto no estado fresco

A fim de avaliar o concreto ainda no estado fresco, foi feito o ensaio de abatimento do tronco de cone ou teste de *Slump* normalizado pela NBR 7223/1992. A norma especifica o método para determinar a consistência do concreto no estado fresco através da medida de seu assentamento.

Para realização do ensaio foi necessário um molde na forma de um tronco de cone oco para moldagem do corpo de prova de ensaio, apoiado sobre uma placa, quadrada e uma haste de seção circular, com 16mm de diâmetro e comprimento igual a 600mm para compactação da amostra.

O primeiro passo para execução do ensaio foi umedecer o molde e a placa de base. Com o molde umedecido, o concreto foi lançado em três camadas, cada uma com aproximadamente  $\frac{1}{3}$  da altura do molde, sendo que na última camada o concreto ficou acima da borda do molde. Cada camada foi compactada com 25 golpes da haste de socamento, distribuídos uniformemente. Com a última camada compactada, foi retirado o excesso sobre a superfície do molde com uma colher de pedreiro. O molde foi tirado lentamente na direção vertical sem submeter o concreto a movimentos de torção. Imediatamente após a retirada do molde, foi medido o abatimento do concreto, determinando a altura do molde e a altura do eixo do corpo de prova (FIG. 17).

Figura 17 – Teste de *Slump*



Fonte: O autor (2014)

Este ensaio teve em vista avaliar a influência da adição de resíduo cerâmico na trabalhabilidade do concreto, mantendo a relação água/cimento de 0,55, afim de verificar o abatimento e a performance do concreto, assim como a homogeneidade da pasta.

## 5.7 Análise do concreto no estado endurecido

### 5.7.1 Moldagem e cura dos corpos de prova

Para realização das análises do concreto no estado endurecido, foi utilizado corpos de prova de forma cilíndrica 10 x 20 cm, de acordo os procedimentos prescritos na NBR 5738/2003. Foram moldados 44 corpos de prova, para análise da resistência a compressão simples nos períodos de 7 e 28 dias de cura, e análises da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Os ensaios foram feitos para o concreto de referência e para todos os teores de substituição, sendo 10, 20 e 30%.

Após a produção do concreto e verificação de sua consistência pelo teste de slump, foi procedido uma prévia remistura da amostra, manualmente, para garantir sua uniformidade, e assim dar início a moldagem dos corpos de prova. O concreto foi colocado nos moldes em duas camadas de volume aproximadamente igual (FIG. 18).

Figura 18 – Lançamento do concreto nos moldes



Fonte: O autor (2014)

Cada camada foi adensada manualmente com uma haste, aplicando-se 12 golpes distribuídos uniformemente, sendo atravessado em toda a espessura da camada, e a segunda camada com a haste penetrando aproximadamente 20mm da camada anterior (FIG. 19). Após o adensamento da última camada, foi feito o rasamento da superfície com a borda do molde com o auxílio de uma colher de pedreiro.

Figura 19 – Adensamento manual



Fonte: O autor (2014)

Os corpos de prova ficaram armazenados por um período de 24h no mesmo local onde foram moldados para cura inicial dos mesmos (FIG. 20).

Figura 20 – Cura inicial dos corpos de prova



Fonte: O autor (2014)

Dadas as 24h, os corpos de prova foram desmoldados e devidamente identificados. (FIG. 21).

Figura 21 – Corpos de prova após desmoldagem



Fonte: O autor (2014)

Imediatamente após sua identificação, os mesmos foram armazenados em solução saturada de hidróxido de cálcio (FIG. 22), até o momento dos ensaios de resistência a compressão.

Figura 22 – Tanque de cura



Fonte: O autor (2014)

### 5.7.2 Resistência a compressão

Para avaliação da resistência a compressão, foi realizado o ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, normalizado pela NBR 5739/2007. Os corpos de prova foram rompidos a compressão nas idades de 7 e 28 dias, contados a partir da hora da moldagem, com o objetivo de avaliar a influência da adição pozolânica na resistência do concreto.

Foram rompidos 4 corpos de prova para cada amostra de concreto contendo 0, 10, 20 e 30% de substituição de cimento por resíduo cerâmico, totalizando 16 corpos de prova para a idade de 7 dias e 16 para idade de 28 dias.

Antes da execução dos ensaios, as faces dos pratos e dos corpos de prova foram limpas antes que os mesmos fossem colocados em posição de ensaio. O carregamento de ensaio foi aplicado continuamente e com velocidade constante durante todo o ensaio (FIG. 23 e 24).

Figura 23 – Rompimento do corpo de prova



Fonte: O autor (2014)

Figura 24 – Corpo de prova rompido



Fonte: O autor (2014)

A resistência a compressão foi calculada através da seguinte expressão:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \cdot d^2}$$

Em que:

$f_c$ : resistência a compressão (Mpa);

$F$ : força máxima alcançada (N);

$d$ : diâmetro do corpo de prova (mm).

Os resultados encontrados para resistência a compressão dos corpos de prova com e sem substituição de cimento por resíduo cerâmico passaram por uma análise estatística, afim de que os resultados já encontrados fossem melhor analisados. Para efetuar a análise, foi montado um delineamento completamente casualizado (DIC) em esquema fatorial com as seguintes fontes de variação: teores de substituição (4 níveis: 0%, 10%, 20% e 30%) e tempo de cura (dos níveis: 7 e 28 dias), com quatro repetições. As análises estatísticas foram realizadas no software Sisvar (FERREIRA, 2011).

### **5.7.3 Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica**

A fim de averiguar a influência da adição de resíduo cerâmico na absorção de água no concreto por imersão, no índice de vazios e na massa específica, foram realizados ensaios normalizados pela NBR 9778/2005, que prescreve o processo para determinação dos mesmos.

Para realizar as análises foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos, com dimensão 100x200mm para cada amostra analisada. Foram analisados os concretos com e sem substituição de cimento por resíduo cerâmico, nas porcentagens 0, 10, 20 e 30%.

O processo teve início secando as amostras em estufa a temperatura de 107°C durante um período de 72 horas (FIG. 25 e 26). Após a secagem, as mesmas foram pesadas e suas massas registradas (massa seca -  $m_s$ ). Determinada a massa

seca, as amostras foram imergidas em água a temperatura de 23°C, onde ficaram mantidas por um período de 72 horas para saturação (FIG. 22). A absorção de água por imersão foi dada pela seguinte expressão:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100$$

Em que:

$A$  : absorção de água por imersão (%);

$m_{sat}$  : massa da amostra saturada em água após imersão (g);

$m_s$  : massa da amostra seca em estufa (g).

Figura 25 – Estufa de secagem



Fonte: O autor (2014)

Figura 26 – Corpos de prova dentro da estufa de secagem



Fonte: O autor (2014)

Para determinação do índice de vazios, as amostras foram colocadas em um recipiente cheio de água, sendo progressivamente levado a ebulição. A ebulição foi mantida por um período de 5 horas, mantendo o volume de água constante. A seguir, o recipiente foi deixado em um local apropriado para que a água contida no mesmo esfriasse, naturalmente, até a temperatura de 23°C. O índice de vazios foi calculado seguindo a seguinte equação:

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100$$

Em que:

$I_v$ : índice de vazios (%);

$m_{sat}$  : massa da amostra saturada em água após imersão (g);

$m_s$  : massa da amostra seca em estufa (g);

$m_i$  : massa da amostra saturada imersa em água após fervura ( $\text{g/cm}^3$ ).

As massas específicas das amostras foram obtidas com base nas medias de cada resultado alcançado para massa seca, massa saturada e imersa em água após ebulição. Definidas as médias, as massas específicas foram calculadas de acordo com as seguintes fórmulas:

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad \rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad \rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i}$$

Em que:

$\rho_s$ : massa específica seca ( $\text{g/cm}^3$ );

$\rho_{sat}$ : massa específica saturada ( $\text{g/cm}^3$ );

$\rho_r$ : massa específica real ( $\text{g/cm}^3$ );

$m_s$  : massa da amostra seca em estufa (g);

$m_{sat}$  : massa da amostra saturada em água após imersão (g);

$m_i$  : massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Caracterização da amostra de resíduo cerâmico

Os resultados das análises químicas efetuadas no resíduo cerâmico, realizadas pelo Centro Tecnológico CETEC-Senai, no Laboratório de traços metálicos e via úmida, estão descritos na TAB. 8, onde encontram-se os valores para dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ), Dioxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), oxido de Cálcio ( $\text{CaO}$ ), Oxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), Oxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e oxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Tabela 8 – Resultado das análises químicas do resíduo cerâmico

Identificação da amostra	Parâmetro químicos	Resultado (%)
Resíduo Cerâmico	$\text{CO}_2$	0,12
	$\text{SO}_3$	0,006
	$\text{SiO}_2$	63,94
	$\text{CaO}$	0,17
	$\text{MgO}$	0,53
	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5,69
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	21,65

Fonte: Centro Tecnológico CETEC-Senai

A NBR 12653/2014 especifica os requisitos químicos para que o material possa ser considerado pozolânico. Segundo a norma, o material deve ter uma quantidade maior ou igual a 70% do somatório de teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Como pode ser verificado na TAB. 8, os valores  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  para o resíduo cerâmico são respectivamente 63,94, 21,65 e 5,69%. Os somatórios destes valores chegam a 91,28%, valor este superior ao estabelecido pela norma. A norma também especifica que o material não deve ter um teor de  $\text{SO}_3$  superior a 4%. De acordo com a mesma tabela, o teor de  $\text{SO}_3$  do resíduo cerâmico é de 0,006%, abaixo do máximo estabelecido pela norma.

Os resultados das análises físicas, realizadas pelo laboratório de uma determinada empresa de Arcos – MG, estão descritos na TAB. 9, onde pode ser verificado o índice de finura, massa específica e umidade da amostra. A umidade é um dos fatores especificados pela NBR 12653/2014. A mesma aponta para uma umidade menor ou igual a 3% para o material pozolânico. De acordo com a tabela 2, a amostra de resíduo cerâmico apresentou umidade de 1,94%. Este valor está abaixo do valor máximo especificado pela NBR 12653/2014, mostrando que a

umidade atende os requisitos da norma. A norma não especifica um valor para índice de finura e massa específica.

Tabela 9 – Resultados das análises físicas

Identificação da amostra	Parâmetros físicos	Resultados
Resíduo cerâmico	Índice de finura	65,18
	Massa específica (g cm <sup>-3</sup> )	2,63
	Umidade	2,34

Fonte: O autor (2014)

## 6.2 Índice de atividade pozolânica com o cimento

A quantidade de cada material utilizado para preparação das argamassas com e sem substituição de cimento por resíduo cerâmico, utilizadas para verificação do índice de atividade pozolânica com o cimento, foi especificado pela NBR 5752/1992, conforme a TAB. 10.

Tabela 10 – Quantidade em massa necessária para moldagem de três corpos de prova

Material	Massas necessárias (g)	
	Argamassa 1	Argamassa 2
<b>Cimento Portland</b>	312	202,8
<b>Material Pozolânico</b>	-	96
<b>Areia</b>	936	936
<b>Água</b>	170	170

Fonte: O autor (2014)

Foram rompidos os corpos de prova das duas argamassas distintas, afim de medir a resistência a compressão aos 28 dias de cura. Por meio dos resultados, foi constatado o índice de atividade pozolânica com o resíduo cerâmico (TAB. 11).

Tabela 11 – Índice de atividade pozolânica com o cimento

Argamassa	Resistencia a compressão (MPa)	Índice de atividade pozolânica com o cimento (%)
<b>Argamassa 1</b>	1,35	<b>77</b>
<b>Argamassa 2</b>	1,05	

Fonte: O autor (2014)

Um dos fatores que influi para que o material constitua uma das classes de material pozolânico é o índice de desempenho com o cimento aos 28 dias. Segundo

a NBR 12653/2014, o material deve ter um índice  $\geq 90\%$ . Os resultados da tabela 2 indicam que o resíduo cerâmico não atendeu a exigência estabelecida pela norma para índice de atividade pozolânica com o cimento. O resíduo apresentou índice de 77%, valor 14,44% abaixo do mínimo estabelecido pela norma.

Souza (2011) em experimentos utilizando resíduos de placa cerâmica, realizou o ensaio de índice de atividade pozolânica com o cimento aos 28 e 56 dias de cura. Aos 28 dias, encontrou um índice de 68%, valor 11,68% abaixo do encontrado no presente trabalho. Aos 56 dias de cura este valor aumentou para 78%, indicando a manifestação lenta do potencial pozolânico do resíduo de placa cerâmica.

Segundo Netto (2006) alguns dos fatores que influenciam na atividade pozolânica com o cimento é a finura do material pozolânico, o tempo e condições de cura ao qual a argamassa foi submetida. Como pode ser verificado na tabela 2, o resíduo cerâmico apresentou um índice de finura de 65,18% obtido por meio do peneiramento na peneira 75 $\mu\text{m}$  (nº 200). Este valor está bem acima do valor encontrado para o cimento CII-E utilizado na fabricação dos concretos (TAB. 4). Isto indica que o resíduo possui uma superfície específica bem maior do que a superfície específica do cimento. Segundo Vieira (2005) estes é um fator que influencia diretamente na atividade pozolânica do material, de acordo com o mesmo, quanto mais fino o material melhor será sua reatividade com os compostos do cimento.

O resíduo cerâmico não foi submetido a peneiramento na peneira nº 325 (45  $\mu\text{m}$ ), não comprovando o percentual máximo retido de 34% estabelecido pela NBR 12653/2014 de 34%.

### **6.3 Análise do concreto no estado fresco**

Afim de avaliar a influência da adição de resíduo cerâmico na trabalhabilidade do concreto, foram realizados ensaios de abatimento do tronco de cone ou teste de *slump*. Os resultados encontram-se na TAB. 12, onde é possível averiguar os valores dos testes para cada concreto analisado.

Tabela 12 – Consistência dos concretos com e sem substituição de cimento por resíduo cerâmico por meio do teste de *slump*

Concreto	Concreto de referência	Concreto c/10% de substituição	Concreto c/ 20% de substituição	Concreto c/ 30% de substituição
<i>Slump</i> (mm)	120	110	80	60

Fonte: O autor (2014)

Como pode ser visto na TAB. 12, a consistência da massa do concreto foi aumentando a medida que o teor de substituição aumentou. Segundo Vieira (2005), isso pode ser explicado pelo fato do resíduo cerâmico ter uma superfície específica maior que a do cimento, fazendo com que haja um maior consumo de água para que todos os grãos sejam envolvidos.

#### 6.4 Resistência a compressão

Os valores de resistência a compressão simples foram adquiridos rompendo os corpos de prova dos concretos com e sem substituição de cimento por resíduo cerâmico. Os mesmos foram rompidos nas idades de 7 e 28 dias de cura e a media dos valores encontrados para cada teor de substituição estão descritos em TAB. 13 e 14.

Tabela 13 – Média da resistência a compressão dos corpos de prova rompidos aos 7 dias de cura

Resistência a compressão					
Substituição	Exemplares N°	Data da moldagem	Data do ensaio	Dimensão do Cp (mm)	Resistência média (MPa)
<b>0</b>	01	03/09/2014	10/09/2014	100 x 200	13,15
<b>10%</b>	02	03/09/2014	10/09/2014	100 x 200	12,10
<b>20%</b>	03	04/09/2014	11/09/2014	100 x 200	11,25
<b>30%</b>	04	04/09/2014	11/09/2014	100 x 200	9,54

Fonte: O autor (2014)

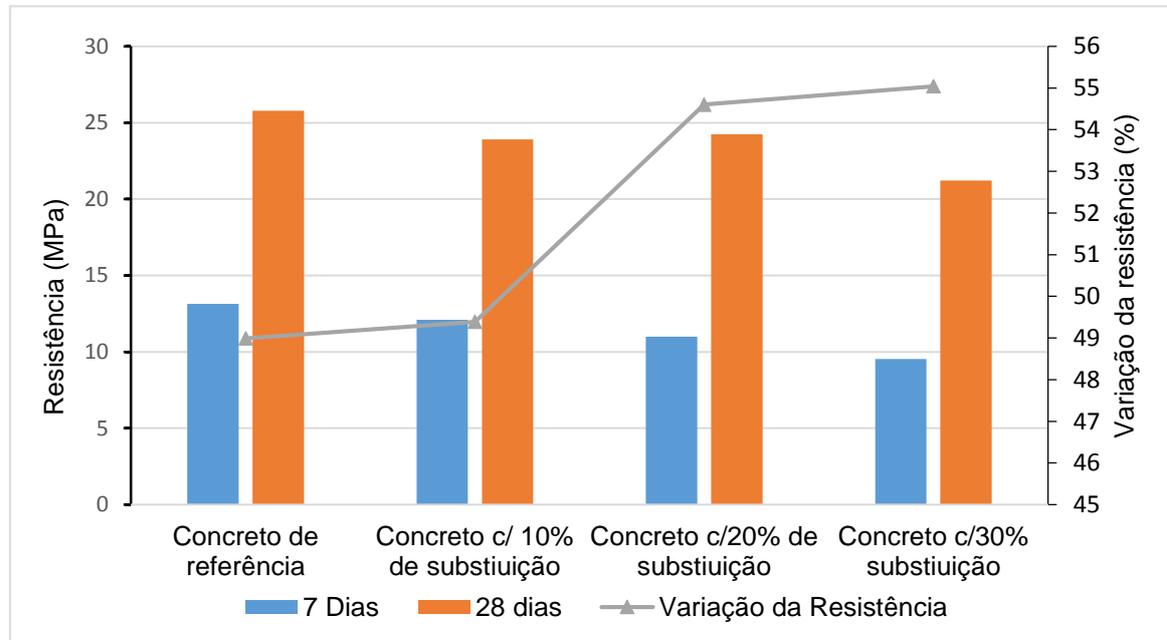
Tabela 14 – Média da resistência a compressão dos corpos de prova rompidos aos 28 dias de cura

Resistência a compressão					
Substituição	Exemplares N°	Data da moldagem	Data do ensaio	Dimensão do Cp (mm)	Resistência média (MPa)
<b>0</b>	05	04/09/2014	02/10/2014	100 x 200	25,78
<b>10%</b>	06	04/09/2014	02/10/2014	100 x 200	23,91
<b>20%</b>	07	04/09/2014	02/10/2014	100 x 200	24,23
<b>30%</b>	08	04/09/2014	02/10/2014	100 x 200	21,07

Fonte: O autor (2014)

Os resultados obtidos foram confrontados com o concreto de referência, sem teor de substituição, com o objetivo de verificar a variação de resistência entre os períodos de 7 e 28 dias de cura (GRAF.1).

Grafico 1 – Variação da resistência



Fonte: O autor (2014)

O GRAF. 1 mostra os valores de resistência a compressão encontrados para os corpos de prova rompidos com 7 e 28 dias de cura. Como pode ser verificado no gráfico, houve um incremento na resistência dos concretos com 28 dias de cura, em relação aos concretos rompidos com 7 dias. A resistência do concreto de referência aumentou 48,99%, a do concreto com 10% de substituição de cimento por resíduo cerâmico aumentou 49,39%, o concreto com 20% de substituição aumentou 54,6% e com 30% de substituição houve um acréscimo de 55,04% na resistência a compressão do concreto. Estes valores mostram que o incremento da resistência foi maior para os concretos com teores de substituição de cimento por resíduo cerâmico, mais não foi suficiente para superar a resistência do concreto sem substituição.

Os valores obtidos também foram confrontados com o concreto de referência, para avaliar a influência do teor de substituição na resistência a compressão nos concretos com 7 e 28 dias de cura. A TAB. 15 compara a resistência do concreto de referência com as do concreto com teores de substituição de cimento por resíduo

cerâmico, e mostra a porcentagem de perda de resistência em relação ao concreto de referência nas idades de 7 e 28 dias de cura.

Tabela 15 – Perda de resistência

Concreto	Comparação com o concreto de referência			
	Idade (7 dias)		Idade (28 dias)	
	Resistência (MPa)	Perda de resistência (%)	Resistência (MPa)	Perda de resistência (%)
<b>Referência</b>	13,15	-	25,78	-
<b>10% substituição</b>	12,1	7,98	23,91	7,25
<b>20% substituição</b>	11,00	16,34	24,23	6,01
<b>30% substituição</b>	9,54	27,45	21,22	17,68

Fonte: O autor (2014)

Como pode ser visto na TAB. 15, houve perda na resistência a compressão dos concretos com substituição de cimento por resíduo cerâmico, em relação ao concreto sem substituição. Ainda de acordo com a tabela, com 7 dias de cura houve um decréscimo de 7,98% na resistência do concreto com 10% de substituição, a resistência também diminuiu 16,34% no concreto com 20% de substituição e no concreto com 30% de substituição a perda foi de 27,45%. Com 28 dias de cura, o concreto com 10% de substituição apresentou 7,25% de perda na resistência, com 20% a perda reduziu para 6,01% e com 30% o decréscimo aumentou novamente, chegando a 17,68% de perda.

Os valores encontrados para 7 dias de cura mostraram que a perda de resistência seguiu uma tendência linear, aumentando de acordo com o aumento do teor de substituição. Ainda pode ser visto que com 7 dias de cura a perda de resistência foi significativamente maior para todos os teores de substituição em relação ao concreto de referência, quando comparados com os concretos com 28 dias de cura. Isto pode ser explicado pelo fato da reação pozolânica ocorrer lentamente, provocando um acréscimo de resistência apenas com idades maiores de cura.

Para 28 dias de cura, a perda de resistência não seguiu uma tendência linear. Como pode ser visto, com 20% de substituição houve decréscimo na perda de resistência em relação aos teores de 10% e 30% de substituição, quando comparados com o concreto de referência. Segundo Zampierri (1993 apud Vieira, 2005) cada pozolana fixa uma quantidade de hidróxido de cálcio para atingir o máximo de resistência a compressão. Para que isso aconteça é necessário

encontrar uma quantidade ótima de substituição. Quando se usar uma quantidade menor que esse valor haverá deficiência na resistência e quando se usar quantidades superiores a esse valor ótimo a pozolana agirá como inerte. Este fato pode explicar a menor perda de resistência para o concreto com 20% de substituição.

Os resultados de resistência a compressão encontrados por Souza (2011) em concretos com 10, 20 e 30% de substituição de cimento por resíduo de placa cerâmica, não apontaram ganho de resistência até a idade de 28 dias. No entanto as perdas de resistência não ultrapassaram 7% em relação ao concreto de referência. Vieira (2005) também encontrou perda de resistência em concretos com 20 e 40% de substituição de cimento por resíduo cerâmico, chegando a 11% de perda em relação ao concreto de referência.

Para verificar se houve algum tipo de interação entre a idade de cura e o teor de substituição, e qual a melhor porcentagem de substituição, foram realizados testes estatísticos. A TAB. 16 indica que não houve nenhum tipo de interação entre a idade e o teor de substituição de cimento por resíduo cerâmico.

Tabela 16 – Resumo da análise de variância da resistência para os diversos tratamentos de concreto

Causas da variação	GL	Quadrado médio e significância de F
		Resistência
Substituição (S)	3	22,86**
Idade (I)	1	1205,16**
S x I	3	0,79 <sup>ns</sup>
Erro	24	0,43
cv		3,72
Média		17,65

Fonte: O autor (2014)

Nota: ns: não-significativo. \*\*: significativo ao teste F a 1% de probabilidade. cv: coeficiente de variação.

Para resistência a compressão, os resultados indicam que o concreto sem substituição foi o que adquiriu maior resistência, o de 10 e 20% de substituição apresentaram resistências iguais e o com 30% de substituição foi o que adquiriu menor resistência, como pode ser visto na TAB. 17. A menor perda de resistência indicada na tabela 9, para 20% de substituição, não foi significativamente expressiva para que diferisse do concreto com 10% de substituição.

Tabela 17 – Resistência à compressão do concreto em função da porcentagem de substituição por resíduo cerâmico

Substituição	Resistência à compressão (MPa)
0	19,47 a
10%	18,01 b
20%	17,74 b
30%	15,38 c

Fonte: O autor (2014)

Nota: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente ao teste de Scott - Knott a 5% de probabilidade.

A maior resistência foi alcançada com 28 dias de cura conforme mostra a TAB. 18.

Tabela 18 – Resistência à compressão em função da idade de cura do concreto

Idade	Resistência à compressão (MPa)
28	23,79 a
7	11,51 b

Fonte: O autor (2014)

Nota: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente ao teste de Scott - Knott a 5% de probabilidade.

Segundo Vieira (2005) a intensidade das reações pozolânicas do resíduo cerâmico com o cimento e conseqüentemente o ganho de resistência dependerá de fatores como a composição química e mineralógica da matéria prima utilizada para fabricação do produto cerâmico e dos processos associados ao processo de queima da cerâmica vermelha a partir da qual a pozolana foi obtida, da finura da pozolana utilizada, além do tempo de cura ao qual o concreto foi submetido após substituição parcial do cimento por resíduo cerâmico, características dos agregados usados na fabricação do concreto, homogeneidade da pasta e relação água/cimento.

No presente trabalho, a perda de resistência dos concretos com teores de substituição pode ter sido ocasionada pela baixa atividade pozolânica do resíduo cerâmico com o cimento, o tempo de mistura da massa pode não ter sido suficiente para total homogeneidade da pasta, a finura do resíduo pode ter sido insatisfatória para que o mesmo tivesse uma boa reatividade com o cimento, o tempo de cura insuficiente para reação completa dos compostos do cimento com o resíduo cerâmico.

## 6.5 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

As verificações da absorção de água por imersão, do índice de vazios e da massa específica dos concretos de referência e com teores de substituição de cimento por resíduo cerâmico, foram feitas seguindo as determinações da NBR 9778/2005.

A absorção de água por imersão foi obtida para o concreto de referência e para os concretos com teores de substituição, por meio de análises efetuadas nos corpos de prova após 28 dias de cura. Foram analisados 3 corpos de prova para cada amostra estudada, onde foram determinados os valores de massa seca ( $m_s$ ), massa saturada ( $m_{sat}$ ) e absorção de água por imersão. As médias dos valores encontrados estão descritas na TAB. 19.

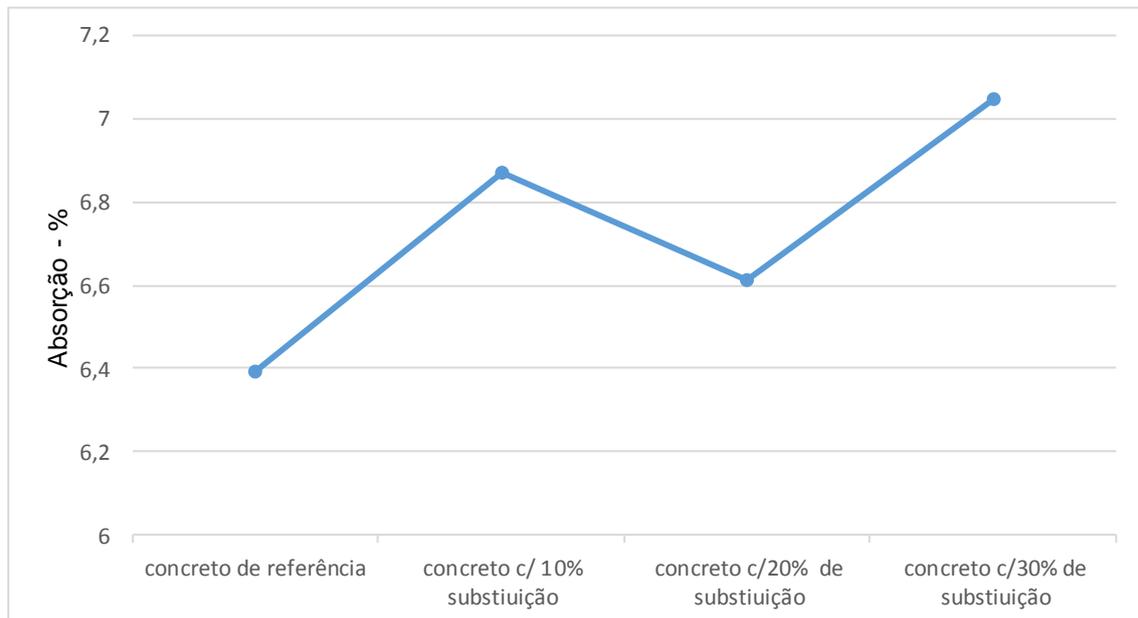
Tabela 19 – Massa seca, massa saturada e absorção de água por imersão para os diferentes teores de substituição de cimento por resíduo cerâmico

<b>Substituição (%)</b>	<b><math>m_s</math> (g cm<sup>-3</sup>)</b>	<b><math>m_{sat}</math> (g cm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Absorção de água (%)</b>
0	3520	3745	6,39
10	3487	3727	6,87
20	3463	3692	6,61
30	3473	3718	7,05

Fonte: O autor (2014)

O GRAF. 2 apresenta a variação da absorção em relação ao teor de substituição de cimento por resíduo cerâmico.

Gráfico 2 – Variação da absorção em relação ao teor de substituição de cimento por resíduo cerâmico



Fonte: O autor (2014)

Como pode ser visto, o GRAF. 2 mostra que para todos os valores de substituição, comparados com o concreto de referência, houve um acréscimo no índice de absorção. Com 10% de substituição a absorção aumentou em 6,98%, com 20% o aumento foi de 3,32% e com 30% houve uma elevação de 9,36% no índice de absorção. Ainda pode ser visto que com 20% o aumento de absorção foi o menor em relação aos demais teores de substituição, e com 30% o índice de absorção subiu, ficando com quase 10% acima do valor encontrado para o concreto de referência. O aumento da absorção pode ser explicado pelo fato do índice de vazios ter aumentado com a substituição de cimento por resíduo cerâmico, sem seguir uma tendência linear como pode ser visto no GRAF. 3.

O índice de vazios de cada amostra estudada, foi obtido através da massa seca ( $m_s$ ), massa saturada ( $m_{sat}$ ) e determinado a massa da amostra imersa em água após ebulição ( $m_i$ ). As médias dos resultados encontrados estão apresentadas na TAB. 20.

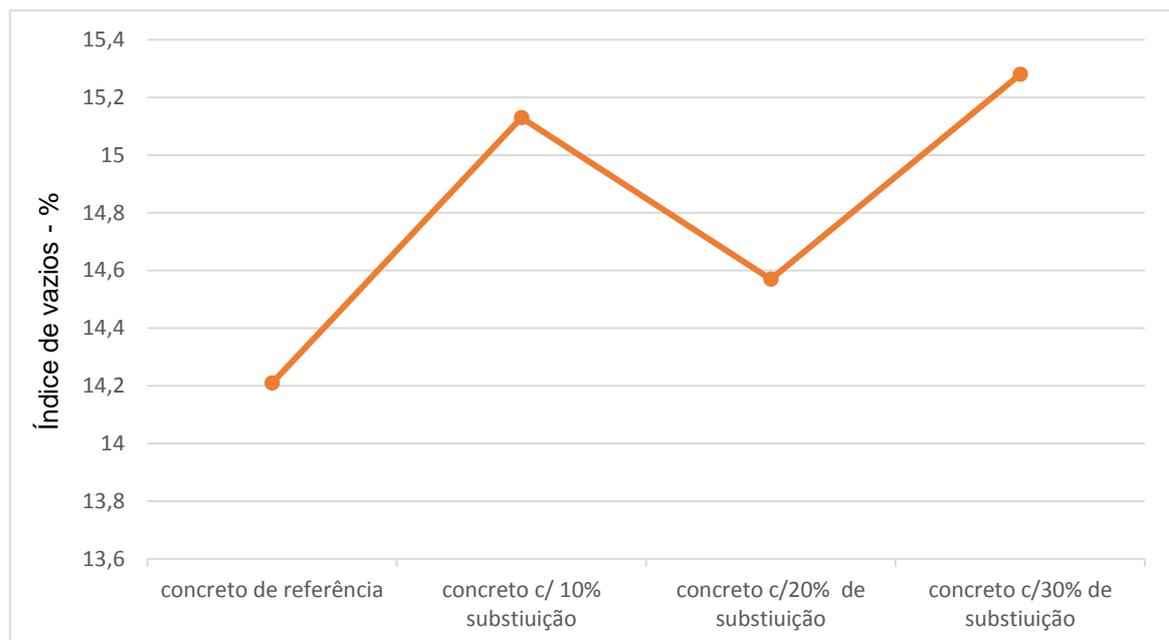
Tabela 20 – Massa seca, massa saturada, massa da amostra imersa em água e índice de vazios para cada teor de substituição de cimento por resíduo cerâmico

Substituição (%)	$m_s$ (g cm <sup>-3</sup> )	$m_{sat}$ (g cm <sup>-3</sup> )	$m_i$ (g/cm <sup>3</sup> )	Índice de vazios (%)
0	3520	3745	2169	14,27
10	3487	3727	2143	15,13
20	3463	3692	2122	14,57
30	3473	3718	2114	15,28

Fonte: O autor (2014)

O GRAF. 3 mostra a variação do índice de vazios em relação ao teor de substituição de cimento por resíduo cerâmico.

Gráfico 3 – Variação do índice de vazios em relação ao teor de substituição de cimento por resíduo cerâmico



Fonte: O autor (2014)

De acordo com o GRAF. 3, pode ser verificado que o índice de vazios também aumentou com o teor de substituição, seguindo a mesma tendência do índice de absorção.

As massas específicas das amostras analisadas, foi determinada de acordo com os resultados obtidos das massas secas, massas saturadas e das massas da amostra imersa em água após fervura, efetuando-se uma média das mesmas (TAB. 21).

Tabela 21 – Massas específicas dos concretos analisados

<b>Concreto</b>	<b><math>\rho_{sat}</math></b>	<b><math>\rho_s</math></b>	<b><math>\rho_r</math></b>
Concreto de referência	2,23	2,37	2,6
Concreto c/ 10% de substituição	2,20	2,35	2,59
Concreto c/20% de substituição	2,20	2,35	2,58
Concreto c/30% de substituição	2,16	2,31	2,55

Fonte: O autor (2014)

Os resultados indicam que as massas específicas saturada, seca e real foram maiores para o concreto de referência. Isto indica que o mesmo possui uma estrutura mais homogênea e compacta, com menos espaços vazios, quando comparado com os concretos com teores de substituição, reforçando os resultados encontrados para o índice de absorção e índice de vazios apresentados nas tabelas 19 e 20 respectivamente.

## 7 CONCLUSÃO

- As propriedades químicas do resíduo cerâmico atenderam as prescrições da NBR 12653/2014;
- O teor de  $\text{SO}_3$  do resíduo cerâmico é de 0,006%, abaixo do máximo estabelecido pela norma;
- A amostra de resíduo cerâmico apresentou umidade de 1,94%, atendendo a exigência estabelecida pela ABNT que é de 3%;
- O resíduo cerâmico não apresentou índice de atividade pozolânica com o cimento mínimo de 90%;
- Os ensaios de abatimento do tronco de cone ou teste de *slump* indicaram que houve um aumento da consistência a medida que o teor de substituição foi aumentando;
- Os concretos com substituição de resíduo cerâmico apresentaram perda de resistência em relação ao concreto testemunha;
- Os resultados para absorção de água por imersão mostraram que houve aumento no teor de absorção a medida que foi adicionado resíduo cerâmico como substituto parcial do cimento.

De acordo com os resultados encontrados neste estudo, pode-se concluir que o resíduo cerâmico não trouxe benefícios para o concreto em nenhum dos teores de substituição, tornando-se uma alternativa inviável para o aproveitamento do mesmo na fabricação de concretos.

Como sugestão, devem ser realizados novos estudos, com um processo mais eficiente para beneficiamento do resíduo cerâmico, a fim de se obter a finura mais adequada para o mesmo e um resultado mais eficiente.

## REFERÊNCIAS

- ACELORMITTAL. Catálogo de produtos. **Escória de alto forno**. Disponível em: <[http://www.cst.com.br/produtos/co\\_produtos/catalogo\\_produtos/escoria\\_forno/index.asp](http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_forno/index.asp)>. Acesso em: 19 maio 2014.
- AFONSO, S.; ANDRADE, C. C. **Materiais de construção e a arquitetura ao longo da história**. Florianópolis: UFSC, 2009. Disponível em: <[http://soniaa.arq.prof.ufsc.br/arq1101/2009/cleide\\_andrade/artigo.pdf](http://soniaa.arq.prof.ufsc.br/arq1101/2009/cleide_andrade/artigo.pdf)>. Acesso em: 16 abr. 2014.
- ARAÚJO JÚNIOR, C. C. de; RONDON, O. C. **Reaproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha na construção civil**. Campo Grande: UFMS, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Básico sobre os cimentos**. A versatilidade do cimento brasileiro. São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro#.U5EFcvldX3S>>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos: determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7223**: Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 11578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23: Cimento portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2001.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** 5. ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 2011. v. 1.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA-CCEE. Onde atuamos. **Fonte.** Disponível em: <[http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/onde-atuamos/fontes?\\_afLoop=140783625333754#%40%3F\\_afLoop%3D140783614078362%26\\_adf.ctrl-state%3D8dkp1pj6y\\_45](http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_afLoop=140783625333754#%40%3F_afLoop%3D140783614078362%26_adf.ctrl-state%3D8dkp1pj6y_45)>. Acesso em: 03 maio 2014.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 6. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 2 v.

FARIAS FILHO, J. de; ROLIM, J. S., TOLEDO FILHO, R. D. Potencialidades da metacaolinita e do tijolo queimado moído como substitutos parciais do cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, set./dez. 2000. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662000000300021](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662000000300021)>. Acesso em: 04 abr. 2014.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS – FIEMG; FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica vermelha.** Belo Horizonte, MG, 2013.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – FIESP. Índices, pesquisas e publicações. **Iniciativas Sustentáveis: Cisper – Investimentos em logística reversa beneficiam o meio ambiente e custos de produção.** Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/iniciativas-sustentaveis-cisper/>>. Acesso em: 02 abr. 2014.

\_\_\_\_\_. **Índices, pesquisas e publicações.** Iniciativas Sustentáveis: Solarium – empresa de revestimentos produz sem emitir gases poluentes ou resíduos. Disponível em: <[www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/iniciativas-sustentaveis-solarium](http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/iniciativas-sustentaveis-solarium)>. Acesso em: 02 abr. 2014.

FERREIRA, D. F. **Sisvar: um sistema computacional de análise estatística.** Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov., 2011.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados.** 1. ed. São Paulo: Editora Pini LTDA, 2008.

**G1 ECONOMIA. Pequenas empresas e grandes negócios. Notícias.** Indústria investe na produção sustentável de telhas e tijolos no TO: fábricas trocam a lenha por casca de arroz na queima dos fornos. Cidade de Paraíso do Tocantins é um pólo industrial em franca expansão. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia/pme/noticia/2011/07/industria-investe-na-producao-sustentavel-de-telhas-e-tijolos-no.html?id=2011/07/industria-investe-na-producao-sustentavel-de-telhas-e-tijolos->

no.html&selector=pme&type=noticia&section=economia&hash=2>. Acesso em: 02 abr. 2014.

GERDAU. Produtos e serviços. **Processo de produção do aço**. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/produtos-e-servicos/processo-de-producao-do-aco.aspx?language=pt-BR>>. Acesso em: 19 maio 2014.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. Notícias. **Aplicação de cacos cerâmicos: estudo do IPT analisa formas de uso dos resíduos de cerâmica vermelha, visando reduzir passivos ambientais**. Disponível em: <<http://www.ipt.br/noticia/780.htm>>. Acesso em: 25 mar. 2014.

LEITE, M. B.; MOLIN, D. D. Avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D. **Sitientibus**, Feira de Santana, n. 26, p. 111-130, jan/jun. 2002. Disponível em: <[http://www2.uefs.br/sitientibus/pdf/26/avaliacao\\_da\\_atividade\\_pozolanica.pdf](http://www2.uefs.br/sitientibus/pdf/26/avaliacao_da_atividade_pozolanica.pdf)>. Acesso em: 16 abr. 2014.

LIMA, R. B. da S.; SILVA, A. S. R. da; COSTA, F. N. **Reação álcali agregado e seus efeitos na construção de edifícios**. Santa Catarina, 2009. Disponível em: <[http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/carmeane/materiais/ART\\_020709.pdf](http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/carmeane/materiais/ART_020709.pdf)>. Acesso em: 20 maio 2014.

LUZ, A. B. da et al. Caulim. In: LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. **Rochas e minerais industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. p. 231-262.

MARCOS, A. R. A.; GALVÃO, M. S. **Panorama da indústria cerâmica focado na sustentabilidade: um estudo de caso**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 31., 2011, Belo Horizonte. Anais eletrônicos... Rio de Janeiro: ABEPRO, 2011. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2011\\_TN\\_STP\\_143\\_904\\_17735.ppd](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2011_TN_STP_143_904_17735.ppd)> Acesso em: 02 abr. 2014.

MARTINS, A. et al. Cimento. Downloads. **Unochapecó**, Curitiba, 2010. Disponível em: <<https://www.unochapeco.edu.br/static/data/portal/downloads/1276.pdf>>. Acesso em 26 abr. 2014.

MONTANHEIRO, T. J. et al. Terras diatomáceas: uma pozolanas natural na Bacia do Paraná, Estado de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 23, n. 2, dez. 2002. Disponível em: <[http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?pid=S0100-929X2002000200001&script=sci\\_arttext](http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?pid=S0100-929X2002000200001&script=sci_arttext)>. Acesso em: 22 abr. 2014.

NASCIMENTO, R. M. do. **Estudo da aditivação do metacaulim de alta reatividade, produzido por meio do método de calcinação flash em cimento Portland**. 2009. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e ciência dos materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

NETTO, R. M. **Materiais pozolânicos**. 2006. 148 p. Monografia (Curso de especialização em construção civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

NOGUEIRA, K. A. **Reação álcali-agregado: diretrizes e requisitos da ABNT NBR 15577/2008**. 2010. 81 p. Monografia (Curso de especialização em Construção Civil) – Universidade Federa de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

O PRODUTO mais natural do mundo. **NOVACER**, Criciúma, ano 4, n.41, p.16-18, set. 2013.

PEDROZO, E. C. **Estudo da utilização de cinza da casca do arroz residual em concretos estruturais: uma análise da durabilidade aos cloretos**. 2008. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

PONTES, J. M. P. do N. **Reactividade de Pozolanas para Argamassas e Betões**. 2011. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – perfil de construção) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

RIBEIRO, D. V.; MORELLI, M. R. **Resíduos sólidos: problemas ou oportunidade?**. Rio de Janeiro: Interciência, 2009. 158p.

ROCHA JÚNIOR, C. A. F. Síntese de zeólitas a partir de cinza volante de caldeiras: caracterização física, química e mineralógica. **Cerâmica**, São Paulo, v. 58, n. 345, p. 43-52. mar. 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v58n345/08.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2014.

SANTANA, N. B. **Responsabilidade socioambiental e valor da empresa: uma análise por envoltória de dados em empresas distribuidoras de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SANTOS, A. Aliado do cimento, metacaulim expande mercado no Brasil. **Massa cinzenta**. São Paulo, 5 set. 2012. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/aliado-do-cimento-metacaulim-expande-mercado-no-brasil/>>. Acesso em: 03 maio 2014.

SOUZA, E. M. F. de. **Utilização de resíduos de placas cerâmicas como aglomerante para concretos**. 2011. 59p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2011.

THOMAZ, E. C. S. Escória de alto forno: parte 1 – fabricação. Nota de aula. **Instituto Militar de Engenharia**, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <[http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos\\_concretos/escoria\\_fabricacao.ppd](http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/escoria_fabricacao.ppd)>. Acesso em: 19 maio 2014.

VIEIRA, A. de A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos.** 2005. 127p. Dissertação (Mestrado em engenharia urbana) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

YAMAMOTO, J. K. Pozolanas: o mapa da mina. **Pesquisa FAPESP**, São Paulo, 60. ed, dez. 2000. Disponível em:  
<<http://revistapesquisa.fapesp.br/2000/12/01/pozolanas-o-mapa-da-mina/>>. Acesso em: 20 abr. 2014.