

**UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI
INSTITUTO DE CIÊNCIA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Érica Cantão da Fonseca
Fabiane Gonçalves Almeida
Ricardo Ramalho dos Santos
Taynara Borges de Oliveira**

**ESTUDO DE DOSAGEM E AVALIAÇÃO DE CONCRETO CELULAR ESPUMOSO
COM ADIÇÃO DE CAL E CINZAS DA BIOMASSA DE EUCALIPTO PARA FINS
DE ALVENARIA ESTRUTURAL**

Teófilo Otoni – MG

2019

**Érica Cantão da Fonseca
Fabiane Gonçalves Almeida
Ricardo Ramalho dos Santos
Taynara Borges de Oliveira**

**ESTUDO DE DOSAGEM E AVALIAÇÃO DE CONCRETO CELULAR ESPUMOSO
COM ADIÇÃO DE CAL E CINZAS DA BIOMASSA DE EUCALIPTO PARA FINS
DE ALVENARIA ESTRUTURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal
dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como
requisito para obtenção do título de bacharel.

Orientador: Prof. Me. Flávio Alchaar Barbosa

Teófilo Otoni – MG

2019

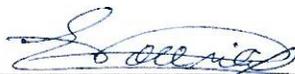
**Érica Cantão da Fonseca
Fabiane Gonçalves Almeida
Ricardo Ramalho dos Santos
Taynara Borges de Oliveira**

**ESTUDO DE DOSAGEM E AVALIAÇÃO DE CONCRETO CELULAR ESPUMOSO
COM ADIÇÃO DE CAL E CINZAS DA BIOMASSA DE EUCALIPTO PARA FINS
DE ALVENARIA ESTRUTURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal
dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como
requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Me. Flávio Alchaar Barbosa

Data de aprovação 05/02/2019



Prof. Me. Eduardo Lourenço Pinto
Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia – UFVJM



Prof. Me. Flávio Alchaar Barbosa
Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia – UFVJM



Prof. Dr. Stênio Cavalier Cabral
Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia – UFVJM

Teófilo Otoni – MG

AGRADECIMENTOS

Agradecemos em primeiro lugar a Deus, que iluminou o nosso caminho durante esta caminhada. Por todas as bênçãos concebidas.

As nossas famílias, que são fortaleza infinita, sempre do nosso lado, em todas as dificuldades, dando forças para prosseguir.

Agradecemos aos professores da UFVJM, em especial nosso orientador, Prof. Me. Flávio Alchaar Barbosa, pela paciência e disposição.

Aos Técnicos de laboratório, por todo o auxílio, no decorrer dos experimentos, e em todas as atividades que realizamos.

Ao corpo docente da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, por nos acolher como alunos, proporcionando-nos conhecimento, e a toda equipe que administra essa excelente instituição, gratidão e orgulho em sermos discentes desta.

Por fim, gostaríamos de agradecer aos nossos colegas, que são peças fundamentais no curso de Engenharia Civil, esperamos que no futuro próximo sejamos colegas de profissão, e que Deus nos encaminhe em direção à vitória.

RESUMO

O presente estudo mostra os resultados de uma pesquisa que verifica a viabilidade técnica do emprego do concreto celular espumoso com incorporação de diferentes teores de cinza de biomassa de eucalipto, juntamente com a cal, para posterior utilização em fins de alvenaria estrutural. A fim de atingir os objetivos desta pesquisa, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o assunto, além do trabalho experimental realizado no laboratório de engenharia civil no Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia – ICET, na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, na cidade de Teófilo Otoni – Minas Gerais. O trabalho consistiu na produção de corpos de prova de concreto celular espumoso, com traço de dosagem padrão e de traços com adição de cinza e cal. Posteriormente procedeu-se a análise das suas propriedades e do seu desempenho por meio da realização de ensaios de compressão axial e absorção de água. Alcançou-se satisfatórios resultados em todos os traços produzidos, referentes aos parâmetros exigidos pelas normas vigentes para o uso desse tipo de concreto na execução de paredes moldadas no local. A partir da análise dos resultados atingidos no trabalho experimental, foi comprovado que o concreto celular espumoso com adição de cal e cinza da biomassa de eucalipto desenvolvido, é adequado à produção de elementos construtivos e apresenta benefícios quando aplicados à construção civil, podendo ser uma alternativa para o reaproveitamento das cinzas de eucalipto, que em geral são descartadas de forma indevida, em substituição à dosagem convencional do concreto, promovendo assim a minoração dos impactos ambientais, resultando em impactos econômicos positivos.

Palavras-chave: Construção civil. Concreto celular espumoso. Cinza de biomassa de eucalipto. Cal.

ABSTRACT

The present study shows the results of a research that verifies the technical viability of the use of foamed cellular concrete with incorporation of different proportions of ash of eucalyptus biomass, together with hydrated lime, for later use in structural masonry purposes. In order to reach the objectives of this research, a bibliographical review on the subject was carried out, as well as an experiment carried out in the civil engineering laboratory at the Institute of Science, Engineering and Technology – ICET, in the Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, in Teófilo Otoni City – Minas Gerais. The work was divided in two stages, the production of foamed cellular concrete test specimens, with standard dosage trace and of traces with addition of ash and hydrated lime. Afterwards it was made the analysis of their properties and of their performance by conducting tests of axial compression and water absorption. Satisfactory results were obtained in all traces produced, referring to the parameters required by the current norms for the use of this type of concrete in the execution of cast-in-place concrete walls. From the analysis of the results obtained in the experiment, it was proved that the foamed cellular concrete with the addition of hydrated lime and ash of eucalyptus biomass developed, is adequate for the production of constructive elements and presents benefits when applied to the civil construction, being an alternative for the reutilization of eucalyptus ashes, which are usually discarded in an improper way, replacing the conventional dosage of the concrete thus promoting the reduction of environmental impacts, resulting in positive economic impacts.

Keywords: Construction. Foamed cellular concrete. Ash of Eucalyptus biomass. Hydrated lime.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Concreto com agregados leves, concreto celular e concreto sem finos	12
Figura 2 – Montagem das instalações prediais	22
Figura 3 – Montagem dos painéis internos.....	23
Figura 4 – Biomassa de eucalipto antes da queima	27
Figura 5 – Areia após secagem em estufa	31
Figura 6 – Peneiramento da areia	31
Figura 7 – Pesagem do cimento.....	31
Figura 8 – Cinzas antes e depois de serem peneiradas	32
Figura 9 – Agitador mecânico	32
Figura 10 – Geração de espuma e sua adição ao concreto	33
Figura 11 – Corpos de prova moldados.....	33
Figura 12 – Corpos de prova desenformados	34
Figura 13 – Cura do Concreto	34
Figura 14 – Ensaio de Compressão em prensa hidráulica.....	35
Figura 15 – Dessecadores para resfriamento.....	36
Figura 16 – Saturação das amostras	37
Figura 17 – Análise comparativa de resistência à compressão entre os traços	38
Figura 18 – Análise comparativa entre os resultados do ensaio e a NBR 12646 (ABNT, 1992)	39
Figura 19 – Análise comparativa dos resultados do ensaio de compressão e a ABNT/CEE 185:000.01-001-1	40
Figura 20 – Argamassa Convencional x Concreto Celular	41
Figura 21 – Teor de ar incorporado	41
Figura 22 – Ruptura cisalhada lateral, ângulo de 45°	42
Figura 23 – Absorção de água em relação ao tempo.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de concretos conforme massa específica seca.....	11
Tabela 2 – Síntese das justificativas de escolha dos constituintes do concreto celular.....	28
Tabela 3 – Dosagem de concreto celular espumoso por m ³	29
Tabela 4 – Proporções dos constituintes dos traços	30
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de compressão dos corpos de prova.....	37

LISTA DE SIGLAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia

COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais

CPV-ARI – Cimento Portland de alta Resistência Inicial

IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto

ICET – Instituto de Ciência e Tecnologia

NBR – Norma Brasileira

UFVJM – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivo Geral	10
2.2	Objetivos Específicos	10
3	REFERENCIAL TEÓRICO	10
3.1	Concreto Leve	10
3.1.1	<i>Concreto Celular Espumoso</i>	12
3.2	Agente espumante	14
3.3	Cimento Portland	14
3.4	Agregados	16
3.5	Água de amassamento	17
3.6	Histórico do uso da cinza e da cal	17
3.7	Cinzas de eucalipto	18
3.8	Cal	19
3.9	Mecanismo da reação entre a cinza e a cal	20
3.10	Paredes de concreto celular moldadas no local	21
4	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1	Materiais	24
4.1.2	<i>Areia média de rio</i>	26
4.1.3	<i>Água</i>	26
4.1.4	<i>Cinzas da biomassa de eucalipto</i>	26
4.1.5	<i>Cal Calcítica Hidratada</i>	27
4.1.6	<i>Aditivo Espumante sintético</i>	27
4.2	Métodos	28
4.2.1	<i>Dosagem dos Traços</i>	29
4.2.2	<i>Confecção e Cura dos Corpos de Prova</i>	30
4.2.3	<i>Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos</i>	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1	Análise do Ensaio de Compressão Axial	37
5.2	Análise do Ensaio de Absorção	43
6	CONCLUSÃO	45
7	TRABALHOS FUTUROS	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1 INTRODUÇÃO

Os concretos convencionais feitos de cimento Portland com acréscimo de agregados de massa específica normal são materiais de construção excelentes, pois tem boa durabilidade, satisfatória resistência à compressão e rigidez, e ainda tem o custo relativamente reduzido. Contudo, certas deficiências devem ser observadas nos concretos normais, tais como: elevado peso próprio, baixa resistência a agentes químicos e à tração. (TEZUKO, 1989).

Conforme Petrucci (1978), devido ao elevado peso próprio do concreto, viu-se que era necessária a sua redução, já que a rapidez na execução da construção, bem como sua economia, variam inversamente em relação ao peso próprio. Surgiram então os concretos especiais, e entre eles o concreto leve, em que a sua principal característica era a diminuição da massa específica aparente, resultado da substituição parcial dos materiais sólidos por ar, por meio da adição de aditivos espumantes, gerando o concreto celular espumoso.

Além disso, há ainda uma recente preocupação com a sustentabilidade no setor de construção civil, buscando evitar o impacto ambiental provocado por esse setor. Atualmente, muitos estudos relacionados ao aproveitamento dos rejeitos industriais com a finalidade de obter produtos com vantagens técnicas e econômicas vêm sendo feitos, propondo uma destinação ecologicamente viável para esses resíduos. No Brasil, já são utilizados há alguns anos, porém em baixa escala, sendo usados apenas em concretos sem fins estruturais e pavimentação. (TROIAN, 2010).

Entre os resíduos que vem sendo utilizados estão as cinzas de eucalipto. Para Foelkel (2011), a cinza da madeira de eucalipto é uma biomassa removida das caldeiras e constitui-se de minerais oxidados, não totalmente queimados, sendo um material residual de qualidade variável. Além disso é possível constatar características pozolânicas, esclarecendo o uso desse tipo de resíduo sólido mineral na indústria da construção civil. Respondendo à crescente demanda exigida atualmente, boa parte desse resíduo pode ser adicionada na fabricação de novos elementos construtivos econômicos e sustentáveis.

Recena (2007) diz que a cal, por sua vez, é amplamente utilizada na fabricação de argamassas, melhorando a sua trabalhabilidade no estado fresco, trazendo um ganho de produtividade. Segundo o manual da ABCP (2002), a cal na argamassa ainda retém água na mistura, evitando a sua falta no processo de endurecimento, devido à finura da cal, ajudando na cura da argamassa. Também auxilia na absorção das deformações atuantes na estrutura da

edificação, impedindo assim que apareçam patologias. (COELHO; TORRAL; JALALI, 2009).

Com o intuito de analisar a propriedade mecânica de resistência do concreto celular para uso na construção civil, este trabalho visa estudar a viabilidade técnica do emprego do concreto celular espumoso com adição de cinza da biomassa de eucalipto, juntamente com a cal, para fins de alvenaria estrutural.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do estudo foi a avaliação do comportamento do concreto celular espumoso para fins de alvenaria estrutural, ao incorporar diferentes dosagens de cinzas da biomassa de eucalipto, promovendo uma melhor finalidade ao resíduo, geralmente descartado de forma inadequada, em substituição à dosagem convencional de composição do concreto.

2.2 Objetivos Específicos

- Produzir corpos de prova cilíndricos de concreto celular espumoso, com composição padrão e composição com adição de cinzas da biomassa de eucalipto em teores distintos, juntamente com a cal, em substituição parcial ao agregado miúdo.
- Realizar ensaios de compressão axial e absorção de água, a fim de analisar a resistência mecânica e o teor de absorção, e relacionar com a variabilidade da porcentagem de adições.
- Avaliar a viabilidade do uso desse tipo de concreto na execução de paredes moldadas no local.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Concreto Leve

Conforme Rossignolo (2009), os concretos leves caracterizam-se principalmente pela redução da massa específica em comparação aos concretos dito convencionais, resultante da substituição parcial dos materiais sólidos por ar. Sua classificação é dividida em concreto com agregados leves, concreto celular e concreto sem finos (Figura 1).

A NBR 8953 (ABNT, 2015) classifica os concretos pela massa específica, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação de concretos conforme massa específica seca

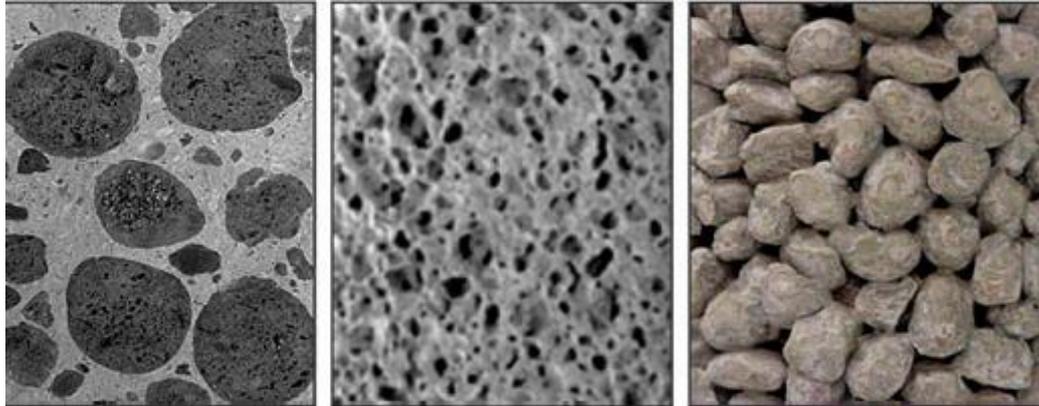
Tipo de Concreto	Massa específica seca (kg/m³)
Normal	2000 - 2800
Leve	< 2000
Pesado ou Denso	> 2800

Fonte: NBR 8953 (ABNT, 2015).

Maycá, Cremonini e Recena (2008) assim descrevem os três tipos de concreto leve, de acordo com a seguinte classificação:

- Concretos com agregados leves: resultam da substituição parcial ou total dos agregados tradicionais por agregados leves. Dependendo do uso de agregados leves graúdos e miúdos, ou da mistura de agregado graúdo leve com areia natural, a massa específica varia entre 950 kg/m³ e 2000 kg/m³. Resistência mecânica moderada e mau isolante térmico.
- Concretos celulares (ou aerados): resultante da ação de produtos geradores de gás ou espuma, que incorporados à pasta de cimento, reagem gerando gases formadores de bolhas. Classificados como especialmente leves, tem massa específica que varia entre 300 kg/m³ e 1900 kg/m³. Baixa resistência mecânica e ótimo isolante térmico.
- Concretos sem finos: confeccionados apenas com agregado graúdo e aglomerante, sua resistência tem ligação direta à resistência do agregado e ao consumo de cimento. Classificados como moderadamente leves, com sua massa específica oscilando entre 700 kg/m³ e 1800 kg/m³. Baixa resistência mecânica e bom isolante térmico.

Figura 1 – Concreto com agregados leves, concreto celular e concreto sem finos



Fonte: ROSSIGNOLO, 2009.

Melhorias foram observadas em comparação aos concretos convencionais quanto ao isolamento termoacústico, resistência ao fogo e ao congelamento e descongelamento. Entretanto, deve-se enfatizar que, apesar da melhoria nessas propriedades, por conta da substituição parcial dos materiais sólidos por ar, ocorre uma significativa diminuição nas propriedades mecânicas dos concretos leves. (CORTELASSI, 2005).

Tais mudanças nas propriedades do concreto têm ligação com o volume de vazios existentes, utilizando a composição com presença de ar para obter o concreto leve. O ar pode ser acrescentado diretamente à massa através da incorporação de espumas ou aditivos químicos, ou com a eliminação das partículas finas do agregado e com o uso de agregados graúdos porosos, que são recursos utilizados para viabilizar a introdução e manutenção da espuma na estrutura do concreto. (SILVA, 2015).

3.1.1 Concreto Celular Espumoso

A NBR 12645 (ABNT, 1992) assim define o concreto celular espumoso (ou aerado):

Concreto leve obtido pela introdução, nas argamassas, de bolhas de ar, com dimensões milimétricas, homogêneas, uniformemente distribuídas, estáveis, incomunicáveis e indeformadas ao fim do processo, cuja densidade de massa aparente no estado fresco deve estar compreendida entre 1300 kg/m^3 e 1900 kg/m^3 .

Nota: As bolhas de ar podem ser obtidas na forma de uma espuma pré-formada ou geradas no interior do misturador por ação mecânica deste, devido a um agente espumante. (ABNT, 1992, p. 1).

O concreto celular espumoso pode ser confeccionado em condições simples de operação, sem uso de equipamentos especiais, apenas o gerador de espuma, e sem a necessidade de mão de obra especializada. É ainda autonivelante, não precisa de vibração e sua cura acontece em condições atmosféricas consideradas normais. (TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992).

Por não haver presença de reações químicas, pois a introdução de poros é feita por meios mecânicos, seja utilizando a espuma pré-formada ou pela formação da espuma adicionada à argamassa no misturador, o processo de produção de concreto celular através de agentes espumantes é o mais controlável e econômico. (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000).

Para Cortelassi (2005), em comparação ao concreto dito convencional, o concreto celular espumoso no estado fresco possui uma maior trabalhabilidade, por ter uma maior quantidade de vazios em sua estrutura, sendo então uma propriedade que se destaca nesse tipo de concreto. Para garantir ao concreto uma alta trabalhabilidade, plasticidade e fluidez, incorpora-se o aditivo espumante no lugar dos agregados graúdos, gerando bolhas de ar com baixo atrito superficial e elevada elasticidade. (NEVILLE, 1997).

Ao se tratar da variação da resistência mecânica à compressão, Freitas (2004, p. 48) diz:

A resistência à compressão do concreto celular espumoso varia com os seguintes fatores: consumo de cimento, fator água/cimento, finura do cimento, idade, tipo de cura (úmida ou ar), processo de produção, tipo de agente espumígeno, volume de espuma, quantidade e granulometria dos agregados adicionados à mistura e, principalmente, o volume de ar incorporado que representará a porosidade e a massa específica do concreto celular.

Teixeira Filho e Tezuka (1992) afirmam que a resistência mecânica de um concreto pode ser minorada pela porosidade. Um volume de poros de 5% em relação à massa específica, por exemplo, resulta em uma resistência 30% menor.

Buscando diminuir o desperdício de materiais a geração de entulho e baixa produção da mão de obra na indústria de construção civil, o concreto celular espumoso vem sendo usado na confecção de vedações verticais, como painéis pré-fabricados e concretagem de paredes no local. (LAWRENCE; LORDSLEEM JUNIOR; BARROS, 1998).

Um dos fatores limitantes ao uso do concreto celular se refere ao seu desempenho nas diversas aplicações da construção civil, devido à falta de estudos na área. Em

contrapartida, o concreto convencional apresenta um amplo e bem documentado repositório sobre o seu desempenho. (TIKALSKY; POSPISIL; MACDONALD, 2004).

3.2 Agente espumante

A definição dada pela NBR 12645 (ABNT, 1992, p. 1) para o agente espumante é a seguinte:

Produto de composição química capaz de produzir bolhas de ar estáveis no interior de pastas de cimento ou argamassas.

Nota: As bolhas devem resistir aos esforços decorrentes da mistura, lançamento ou bombeamento do material, permanecendo estáveis até o início da pega normal do cimento.

Petrucci (1978) diz que, por serem protegidos por patentes, é difícil obter informações exatas acerca da composição química desses produtos. Geralmente os aditivos espumantes são produtos tensoativos, compostos geralmente de sais de resinas de madeira, materiais proteicos, ácidos graxos e detergentes sintéticos. (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Sobre a confecção de espuma para incorporação ao concreto celular, a NBR 12645 (ABNT, 1992) ainda dispõe que:

Para a produção da espuma, é necessária a utilização de um agente espumante que pode ser de origem sintética ou proteica. A espuma pode ser pré-formada para posterior incorporação à argamassa ou gerada dentro desta por agitação em misturador especial. Em ambos os casos, devem ser respeitados os prazos de validade dos agentes espumantes, especificados pelos fabricantes. (ABNT, 1992, p.2).

Em forma de espuma, os aditivos possibilitam a fabricação de concreto celular com propriedades excelentes, quando acrescentadas ao concreto ou à argamassa. O agente espumígeno melhora a trabalhabilidade do concreto quando em estado fresco, durante o seu manuseio, evitando segregação e reduzindo a exsudação, além de melhorar o isolamento termoacústico do material no estado endurecido. (CORTELASSI, 2005).

3.3 Cimento Portland

O cimento Portland é um pó fino que possui propriedades aglutinantes, aglomerantes ou ligantes e, quando misturado à água, devido a essas propriedades, endurece e

não se decompõe quando submetido novamente à água. Os concretos e argamassas usados na construção civil são fabricados ao misturar o cimento com água, areia, brita, cal, pó de pedra e outros.

A Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2002) atesta que o cimento Portland, quimicamente, é o material mais ativo dos concretos e argamassas, por ser o principal responsável por chegar ao produto final após a mistura dos materiais. Uma maior quantidade de cimento provoca uma maior plasticidade, maior coesão, maior calor de hidratação, maior variação volumétrica, menor segregação e menor exsudação.

Neville (1997) diz que o cimento Portland foi assim denominado originalmente por se assemelhar à pedra de Portland na cor e na qualidade. Produto composto principalmente de calcário, alumina e sílica que, por meio do seu processo de fabricação, forma compostos complexos que combinam com água, funcionando como uma espécie de cola que aglutina as partículas de agregado entre si ao serem hidratados. Sua produção consiste na mistura de argila e calcário, que em seguida é colocada em um forno onde passa por aquecimento, e após o seu rápido resfriamento, obtém-se o clínquer, que posteriormente passa pelo processo de moagem juntamente com o gesso.

Baseando-se em estudos feitos por Bauer (1987) e Neville (1997), pode-se considerar o cimento Portland como um material constituído essencialmente de clínquer e adições. O clínquer está presente em todos os variados tipos de cimento Portland sendo, portanto, o material mais importante na composição do cimento. As adições definem os diversos tipos de cimento, sendo estes: gesso, escórias de alto-forno, materiais carbonáticos e pozolânicos. (ABCP, 2002).

No Brasil, os cimentos são classificados pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. São nomeados pela sigla CP, seguidos de um número romano de I a V de acordo com sua composição, podendo ser adicionada à sua classificação a resistência mínima à compressão alcançada após um período de cura de 28 dias, com valores de 25, 32 e 40 MPa. Segundo Pedroso (2009), o mercado nacional dispõe de oito tipos diferentes de cimentos:

- Cimento Portland Comum (CP-I);
- Cimento Portland Composto (CP-II);
- Cimento Portland de Alto-Forno (CP-III);
- Cimento Portland Pozolânico (CP-IV);
- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP-V ARI);
- Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS);

- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC);
- Cimento Portland Branco (CPB).

3.4 Agregados

A NBR 9935 (ABNT, 2011) conceitua os agregados como um “Material granular, geralmente inerte com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto.”.

A NBR 7211 (ABNT, 2005) dispõe sobre os agregados, classificados quanto ao tamanho como:

- Miúdos: grãos que passam pela peneira de malha 4,75 mm e são retidos na peneira com malha de 150 µm;
- Graúdos: grãos que ficam retidos na peneira com malha de 4,75 mm e passam pela peneira de malha de 75 mm.

A NBR 7211 (ABNT, 2005) discorre acerca da composição do agregado da seguinte maneira:

Os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos. Não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto. (ABNT, 2005, p. 4).

Outra classificação dada aos agregados se refere à sua origem, que pode ser natural, como o pedregulho, areia, pedra britada e cinzas vulcânicas, ou artificial, exemplificado pelos rejeitos industriais, escória de alto forno e cinza volante. (MEHTA; AITCIN, 1990).

Conforme citado por Mehta e Monteiro (1994), determinadas características dos agregados afetam propriedades do concreto, como porosidade, composição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial das partículas, resistência à compressão, resistência à abrasão, e módulo de elasticidade, pois ocupam geralmente de 70% a 80% do volume total do concreto. A distribuição granulométrica, por exemplo, influi na porcentagem de vazios e na densidade de empacotamento das partículas existentes. (SANTOS, 2008).

Dubaj (2000) diz que a areia de rio é o agregado mais utilizado nas misturas de argamassas. Entre as principais funções do seu uso estão a redução do consumo de

aglomerantes, aumento da resistência mecânica à compressão, diminuição da retração e auxílio no preenchimento dos vazios, pois seus grãos têm dimensão máxima de até 4,8 mm.

3.5 Água de amassamento

A água é um dos principais elementos na engenharia, pois está presente na mistura do cimento com os agregados para formação do concreto. Sua dosagem tem influência nas características técnicas do concreto e deve atender algumas especificações.

Nessa toada, Helene (1999) alega que a água de amassamento é um fator que afeta diretamente na qualidade do concreto, seja em sua composição ou na relação do fator água/cimento. O fator água/cimento influencia na suscetibilidade do concreto à incorporação de agentes externos, pois interferem em propriedades como porosidade, permeabilidade e capacidade de absorção.

A água de amassamento é essencial no processo de hidratação. De acordo com a NBR 15900-1 (ABNT, 2009), a água de amassamento não pode constar um pH menor que 5,0 (água ácida) e teor de sulfato superior a 2000 mg/L. A contaminação na água de amassamento do concreto, por substâncias como açúcares, fosfatos, nitratos, chumbo e zinco podem alterar os tempos de pega e resistências do concreto.

A NBR 12655 (ABNT, 2015) especifica que a água destinada ao amassamento do concreto deve ser mantida em caixas estanques e tampadas, para impedir a contaminação por substâncias estranhas.

3.6 Histórico do uso da cinza e da cal

Nardi (1975) relata um histórico aprofundado da utilização de cinzas e da cal desde as civilizações antigas. Há aproximadamente 2000 anos atrás, os chineses empregavam a cal, um dos primeiros materiais de construção da Engenharia, junto a argila, para a construção da Grande Muralha da China. Os egípcios, os romanos, os gregos e os chineses também empregavam a cal nas mais variadas aplicações.

Desde a antiguidade havia a exploração das propriedades da cinza juntamente com o uso da cal. Em 312 a.C. os romanos utilizaram cinzas vulcânicas junto a cal viva (CaO) na construção de via Ápia (estrada que ia de Roma a Brindes) e dos primeiros aquedutos, com o intuito de se obter uma argamassa hidráulica em que acoplassem as pedras aplicadas. (SILVA,

1982).

Na ilha Santorim, os romanos do século VII a.C. utilizaram cinzas vulcânicas como aditivo para aumentar a resistência da argamassa de cal manuseada nas cisternas, isso se dá porque as mesmas apresentavam características pozolânicas. O termo pozolana teve origem em uma cidade chamada Pozzuoli, na Itália. Em razão de se tornar importante no comércio de materiais, os romanos exploravam a cinza vulcânica para utilização na argamassa de suas construções, misturando-a com cal viva, atestando a qualidade e a durabilidade de cimentos pozolânicos. (MATEOS, 1961).

Segundo Casanova (1988), foi empregada a cinza vulcânica na construção de várias obras como o desembarcadouro de Calígula (séc. I a.C.), do Panteão (27 a.C.) e do Coliseu (80 d.C.). Foi utilizada uma mistura de cal com duas a três partes de cinza vulcânica na construção do Panteão.

Para Silva (1982), devido à proliferação das termoeletricas e o crescimento industrial no final do século XIX e início do século XX, houve um aumento no uso das pozolanas. A busca de um produto com menor custo e com a preocupação com o efeito poluentes da cinza proveniente da queima de carvão, levou ao surgimento de inúmeras pesquisas sobre o seu uso como material de construção nas obras, resolvendo o problema de descarte de um resíduo e sugerindo o seu reaproveitamento.

3.7 Cinzas de eucalipto

A cinza da queima da biomassa, em conformidade com Foelkel (2011), pode ser considerada como um resíduo sólido de origem mineral. A cinza de madeira de eucalipto é definida como “material residual e muito variável em qualidade, recolhido tanto do fundo como do precipitador de coleta de particulados dos gases de exaustão da caldeira de força alimentada em base de biomassa energética (madeira e/ou casca de árvores).” (FOELKEL, 2011, p. 22).

As cinzas de madeira de eucalipto possuem a cal virgem (CaO) como principal nutriente, passando a ser carbonato de cálcio (CaCO₃). Resulta no hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) ao entrar em contato com a água, e em sua composição química há uma proporção significativa de dióxido de silício (SiO₂), conhecida como sílica (SILVÉRIO; HORN, 2013).

Para Foelkel (2011), o níquel, zinco, cobre, chumbo, cromo, cádmio e arsênio são os principais metais pesados encontrados na cinza de biomassa de eucalipto, por outro lado o

mercúrio e o selênio apresentam baixo teor. Geralmente são compostas de areia, minerais oxidados e carbono orgânico que não foi completamente queimado.

A composição das cinzas pode ser bastante variada, pois depende da qualidade da madeira e até das condições de operação da caldeira. As cinzas também podem ser contaminadas com areia ou pedras, dependendo do local onde são armazenadas, elevando o teor de cinzas variavelmente, em função das contaminações e das proporções de casca e madeira que foram queimadas. (FOELKEL, 2011).

Para Ramos, Matos e Coutinho (2013), as cinzas de madeira de eucalipto podem substituir o cimento ou areia em razão da atividade pozolânica. Sua adição ocasiona um efeito químico na mistura devido às reações pozolânicas, e isso se dá devido a formação das reações dos compostos de hidratação do cimento, resultando na reação sílica amorfa existente nas pozolanas com o hidróxido de cálcio. (MORAES, 2001).

3.8 Cal

A cal é um produto de origem mineral, provenientes das pedras calcárias ou dolomíticas, encontrada na forma de grãos grandes e porosos, comumente na cor branca, constituída por compostos químicos e físicos, que vem sendo formado há cerca de 4,5 milhões de anos atrás até os dias atuais, ao longo de sua história geológica. (GUIMARÃES, 2002).

Guimarães (2002) ainda cita que no Sudeste do Brasil estão as maiores reservas de calcário, onde é extraída a matéria-prima da cal, porém há outras reservas distribuídas por todas as regiões do país. Existem diferentes tipos de cal utilizada na construção, em que se destacam a cal hidratada e a cal hidráulica.

Sabbatini (1986) diz que a cal hidratada passa por três processos a partir do seu estado natural, que são: calcinação, hidratação ou extinção e carbonatação (endurecimento). Calcinação é o processo controlado da decomposição térmica da pedra calcária ou dolomítica, onde as temperaturas variam entre 900 e 1200 °C, e após a queima é obtida a cal virgem ou cal viva. Prosseguindo o processo, a cal virgem passa pela extinção, um procedimento exotérmico onde é moída e misturada com uma quantidade suficiente de água, gerando uma reação química resultando na cal hidratada, que é separada da não hidratada por meio de peneiramento. (BAUER, 1992).

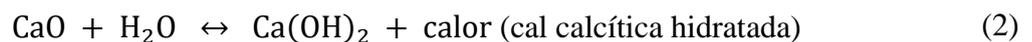
Consoante a NBR 7175 (ABNT, 2003, p. 2), a cal hidratada é caracterizada como um “Pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de

hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.”.

A cal hidratada melhora a qualidade das argamassas por ser constituído de grãos com elevada leveza e finura de seus grãos, propiciando fluidez, coesão e retenção de água. Em mistura com água, as suas partículas muito finas têm função de lubrificante, reduzindo o atrito entre os grãos de areia. O resultado é uma maior plasticidade da argamassa, que por consequência propicia uma melhor trabalhabilidade e uma maior produtividade ao diminuir o custo do m³. Além disso, permite que as argamassas tenham maiores deformações sem fissuração, em relação ao que teriam apenas com cimento Portland. (COELHO; TORRAL; JALALI, 2009).

Bock (2012) classifica os tipos de cal hidratada como magnésiana, calcítica ou dolomítica, considerando o teor de óxido de cálcio (CaO) contido. A cal dolomítica possui um baixo teor de CaO, cerca de 58% e 65%. A cal magnésiana tem entre 65% e 90%, considerada como uma cal de teor de CaO intermediário. Já a cal calcítica tem um teor acima de 90%.

A cal hidratada calcítica é obtida a partir da calcinação do carbonato de cálcio (CaCO₃) a 900 °C, com adição posterior de água no processo de extinção, como mostra as equações químicas (1) e (2):



3.9 Mecanismo da reação entre a cinza e a cal

Segundo Nardi (1979), o mecanismo de reação entre a cal e a cinza é bastante confuso e complexo. A reação crítica entre elas sobrevém entre os minerais de alumínio e sílica existentes na cinza e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), formando os silicatos e aluminatos. Compostos similares aos do cimento Portland são formadas a partir da interação da cinza como o hidróxido de cálcio. Como a cinza geralmente entra em proporção muito maior na mistura, existe uma carência de hidróxido de cálcio, e qualquer aumento desse material podem ocasionar novas reações, gerando resistências mais elevadas.

Massazza (1998) ressalta que a reação pozolânica é caracterizada pela interação da fase vídrea com o hidróxido de cálcio, sendo interpretada no seguinte modelo (3):



Ocorre na reação a sílica, alumina e ferro vítreos formando hidratos distintos de acordo com a composição química variável nas pozolanas (MASSAZZA, 1998; MINDESS; YOUNG, 1981; FU et al., 2002). A reação química pode ser representada pela equação estequiométrica (4):



Há diversos elementos que influenciam no produto das reações pozolânicas, e a qualidade das matérias é o principal fator. Várias pesquisas ocorrem com a finalidade de determinar as características adequadas das cinzas a fim de possuir uma boa qualidade. (KIHARA, 1983).

Um fator de influência nas reações é o grau de cristalização das cinzas. Segundo a CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia (1984), o desarranjo estrutural provoca a presença de átomos que não alcançaram a posição de energia livre mínima, e como resultado o material se torna instável em meio agressivo. Quando as cinzas são queimadas em altas temperaturas elas alcançam alta cristalização, impedindo o seu ataque pelo íon cálcio.

Encontra-se no mercado inúmeras marcas de cal com variável teor de óxidos, e quanto menor for o teor de impureza, maior a reatividade. A qualidade da cal, da cinza e do agregado é fundamental para atingir as propriedades necessárias dos materiais estabilizados pozolanicamente. Além do mais as condições de cura, o esforço de compactação, proporção dos materiais, tempo e homogeneização da mistura são outros fatores que influenciam. A qualidade da cinza exerce uma maior influência nas reações pozolânicas do que o tipo de cal empregado na mistura. (MOHAN, 1979).

3.10 Paredes de concreto celular moldadas no local

Missurelli e Massuda (2009) apontam que no Brasil há quatro tipos de concreto para o sistema de paredes de concreto, sendo eles o concreto celular (L1), concreto com agregados leves ou com baixa massa específica (L2), concreto com elevado teor de ar incorporado – até 9% (M), e o concreto convencional ou concreto autoadensável (N).

Ainda de acordo com Misurelli e Massuda (2009), o sistema de paredes de

concreto é caracterizado como um atrativo aos empreendedores. Isso se dá devido à capacidade do cronograma físico-financeiro ser cumprido durante o prazo em razão da sistematização do processo. Além disso, os autores declaram que durante este sistema, há uma melhora na produtividade da mão de obra, sem precisar de uma que seja especializada.

Em inúmeras obras com painéis de fôrmas deslizantes ou trepantes, houve a utilização do sistema paredes de concreto durante as décadas de 1970 e 1980, sendo bem aceita na construção industrializada em concreto convencional e em concreto celular. (ABCP, 2008). As Figuras 2 e 3 mostram parcialmente as etapas desse tipo de sistema construtivo.

Figura 2 – Montagem das instalações prediais



Fonte: WENDLER FILHO, 2019.

Figura 3 – Montagem dos painéis internos



Fonte: WENDLER FILHO, 2019.

“A utilização da tecnologia de produção de vedações verticais de concreto celular espumoso moldadas no local deu-se no início da década de 80, na construção das paredes de habitações populares térreas ou tipo sobrados em conjuntos habitacionais.” (LORDSLEEM JÚNIOR *et al.*, 1998, p. 60).

A ABCP (2008) informa que a tipologia usualmente utilizada para o sistema parede de concreto com concreto celular são construções de até dois pavimentos.

O concreto celular (ou aerado) apresenta vantagens no aspecto acústico e térmico sobre os demais.

[...] Foram empregadas na época formas metálicas (alumínio) e concreto celular. O peso final do produto acabado foi consideravelmente menor que o da alvenaria convencional, o que acarretou economia nas fundações. As características consideradas importantes do sistema foi não necessitar a quebra de paredes para instalações hidro-sanitárias e elétricas, além do bom desempenho em relação ao conforto térmico e acústico, em função das características do concreto celular. (SACHT, 2008, p. 52).

A NBR 12646 (ABNT, 1992) descreve requisitos básicos e de funcionalidade que devem ser satisfeitos para projetar e executar paredes em concreto celular espumoso. São eles

o alinhamento; aprumamento e espessura, em concordância dimensional com o projeto; planeza das superfícies; o preenchimento de todos os detalhes e reentrâncias existentes nas fôrmas; aptidão ao recebimento de instalações, embutidas ou não; estanqueidade das juntas (de controle ou dilatação), além de apresentar uma resistência à compressão simples (f_{ckest}) de 2,5 MPa aos 28 dias de idade.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos da pesquisa, foi realizado um trabalho experimental, além da revisão bibliográfica apresentada anteriormente. Essa seção apresenta as etapas de produção dos corpos de prova de concreto celular espumoso, com traço de dosagem padrão e traços com adições de cinza de biomassa de eucalipto e cal, abrangendo os materiais utilizados, os procedimentos para dosagem, mistura, moldagem e cura do traço, e os métodos de ensaios aplicados, sendo eles o ensaio de resistência mecânica à compressão e o ensaio de absorção de água.

Na presente pesquisa buscou-se analisar o comportamento das cinzas da biomassa de eucalipto, consideradas como material de refugo no Brasil, ao serem adicionadas ao concreto celular espumoso para fins de alvenaria estrutural, em substituição parcial ao agregado miúdo, no caso a areia média de rio. O descarte inadequado e o excesso de cinzas produzidas pela queima da biomassa, além da poluição do ar gerada, colocam em risco a sustentabilidade ambiental, que são problemas advindos do aumento de uso do eucalipto como matéria-prima em fábricas de papel e celulose.

O trabalho foi conduzido em um dos laboratórios de engenharia civil do Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia - ICET, da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM, na cidade de Teófilo Otoni - Minas Gerais, no período de novembro de 2018 a janeiro de 2019.

4.1 Materiais

A escolha dos materiais para se confeccionar o concreto celular espumoso foi realizada de acordo com a disponibilidade dos produtos na região, viabilizando a sua reprodução futuramente em obras da construção civil. Foram utilizados então os seguintes materiais e equipamentos:

- Aditivo espumante;
- Agitador mecânico portátil;
- Agregado miúdo (areia média de rio);
- Água;
- Balanças;
- Baldes;
- Betoneira;
- Caixa d'água;
- Cal hidratada calcítica;
- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI);
- Cinzas de Eucalipto;
- Colher de pedreiro;
- Estufa;
- Formas retangulares;
- Haste de adensamento;
- Máquina de ensaio de compressão (prensa hidráulica);
- Moldes de corpo de prova cilíndricos (10x20);
- Óleo queimado;
- Peneira grossa e peneira malha passante de 350 μm ;
- Proveta de vidro graduada 1000 ml;
- Recipientes de plástico.

4.1.1 Cimento CPV – ARI

O cimento escolhido para elaboração dos corpos de prova foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI), pois mostra um alto desempenho e alta reatividade em baixas idades, em função do grau de moagem a que é submetido. Esse tipo de cimento é o mais apropriado para empregos onde é fundamental a condição de elevada resistência nos primeiros dias de aplicação. (ABCP, 2002).

Esse aumento da alta resistência inicial é alcançado pelo emprego de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, também pelo fato de passar

por moagem mais fina do cimento, adquirindo uma alta resistência com maior velocidade a partir da reação da granulometria mais fina do cimento com a água. (ABCP, 2002).

Conforme a NBR 5733 (ABNT, 2011), o cimento CPV-ARI apresenta em sua composição teores entre 95 e 100% de sulfato de cálcio e clínquer, com a adição de até 5% de material carbonático.

Os concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial requerem maior quantidade de água para o alcance de uma consistência igualitária com outros tipos de cimento. Esse fato deve ser visto com muito cuidado, pois sem a prática da boa tecnologia o concreto pode apresentar patologias, tais como as fissuras. A utilização de aditivos plastificantes ou superplastificantes contribuem para impedir essas manifestações patológicas. (ABCP, 2008).

4.1.2 Areia média de rio

O agregado utiliza na preparação dos concretos foi a areia média de rio, por ser um material abundante na região. Foi retirada de um areial na cidade de Frei Inocêncio, localizada a 97 km de Teófilo Otoni, na região leste do Estado de Minas Gerais. O agregado é formado de sílica natural, sendo um material que não reage com a cal e a água. Para sua utilização, a areia foi colocada em bandejas e levada à estufa para secagem a uma temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$, no decorrer de um prazo de 24 horas. Ressalta-se que o agregado não foi lavado, pois parte-se do pressuposto de que já estaria lavada.

4.1.3 Água

Para a produção do concreto a água utilizada foi obtida através do abastecimento local, fornecida pela concessionária estadual presente na cidade de Teófilo Otoni. Nesta etapa foi feita a análise visual das condições da água utilizada para assegurar a qualidade do concreto produzido, segundo as recomendações da NBR 15900-1:2009.

4.1.4 Cinzas da biomassa de eucalipto

A cinza utilizada foi da biomassa de eucalipto, que é um produto resultante da queima realizada numa produtora de cerâmica, localizada na cidade de Itambacuri – MG, na BR-116, Km 310, situada na Zona Rural da cidade (Rodovia Santos Dumont), região Leste de

Minas Gerais. A biomassa de eucalipto (Figura 4) vem de empresas produtoras de papel e celulose, situadas nos estados da Bahia e do Espírito Santo. Após a chegada das cinzas na Universidade em sacos plásticos, foi realizado o seu peneiramento com granulometria passante de 350 μm .

Figura 4 – Biomassa de eucalipto antes da queima



Fonte: Arquivo pessoal.

4.1.5 Cal Calcítica Hidratada

A cal utilizada na presente pesquisa é do tipo calcítica (teor de $\text{CaO} \geq 90\%$, em relação aos óxidos totais), de antemão hidratada e pulverizada. Consoante Pinto (1971) há uma necessidade “*a priori*” que as cinzas a serem incorporadas à cal sejam ensaiadas com as cales calcíticas e dolomíticas encontradas na região. Convém ressaltar que em Teófilo Otoni e regiões adjacentes, o tipo de cal encontrada nas casas de comércio é do tipo calcítica. Por se tratar de um tipo de cal bastante usada na região, optou-se então por utilizá-la.

4.1.6 Aditivo Espumante sintético

O aditivo espumante sintético empregado no concreto é um agente concentrado líquido de base sintética, isento de cloretos, biodegradáveis, que pode ser utilizado em

geradores de espuma, gerando uma espuma durável de alta densidade, produzindo Concreto Celular e Concreto Leve nas mais variadas densidades. (ECOPORE, 2018).

Suas propriedades são diversas, sendo elas a alta estabilidade dos poros, características otimizadas da densidade, plasticidade em concretos celulares, além de permitir a obtenção de concretos ou argamassas com densidades variadas, produz concretos ou argamassas celulares de fácil manuseio, com ótimo isolamento acústico e excelente conforto térmico, e compatível com a maioria dos cimentos Portland disponíveis no mercado. O aditivo espumante foi previamente diluído em água e posteriormente processado com auxílio um agitador mecânico por cerca de 10 minutos para incorporar ar, gerando a espuma pré-formada. (ECOPORE, 2018).

Tabela 2 – Síntese das justificativas de escolha dos constituintes do concreto celular

Material	Tipo	Justificativa de Uso
Cimento	CPV-ARI	Por conter um menor teor de adições em sua composição, por obter as características físicas e técnicas esperadas (hidratação e resistência à compressão inicial), ser encontrado facilmente no mercado, além de ser bastante utilizado nas indústrias de pré-fabricados.
Agregado miúdo	Areia média de rio	Por ter a capacidade de propiciar a coesão e volume ao concreto, podendo ser adquirida abundantemente no mercado regional.
Água	Abastecimento local	Por ser o material disponibilizado.
Cinzas de Eucalipto	Queima da biomassa de eucalipto	Por fazer uso de rejeitos industriais e redução no custo, contribuindo para a sustentabilidade ambiental.
Cal	Calcítica Hidratada CH-1	Para oferecer melhorias quanto à plasticidade, trabalhabilidade e aglutinação do concreto, facilitando a moldagem e desmoldagem dos elementos pré-fabricados.
Aditivo	Agente espumante	Ser de fácil geração e aplicação, ter grande potencial de crescimento no mercado e ser indicado pra confecção de painéis, blocos e paredes pré-fabricadas.

Fonte: Elaborada pelos autores.

4.2 Métodos

O trabalho experimental se baseou na confecção de cinco tipos de traço de concreto celular espumoso, sendo o primeiro de matriz convencional (cimento, água, areia e aditivo espumante), sem uso de adições, denominado traço padrão, para efeito de comparação de avaliação do desempenho das diferentes proporções de material utilizados. Foram

fabricados 21 corpos de prova de cada traço, totalizando 105 corpos de prova, com idades de rompimento de 7, 14, 21 e 28 dias, para o ensaio de resistência à compressão, e 28 dias, para ensaio de absorção de água por imersão.

O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 5x4 (5 traços para 4 idades de rompimento), com três repetições (3 amostras para cada rompimento), testando-se diferentes proporções da cinza e cal a cada traço.

4.2.1 Dosagem dos Traços

O método de dosagem do traço padrão do concreto celular por agente espumoso utilizado foi feito baseando-se no manual de utilização do aditivo espumígeno de base sintética. Com base na Tabela 3 se pode extrair as proporções de aglomerantes, agregados, água e de aditivo sugeridos e adotados como referência nesta pesquisa.

Tabela 3 – Dosagem de concreto celular espumoso por m³

Tipo de Uso	Não Estrutural				Estrutural			Normal
	400	600	800	1000	1200	1400	1600	
Densidade Seca (kg/m ³)	400	600	800	1000	1200	1400	1600	2350
Areia (kg)	-	210	400	560	750	950	1100	1950
Cimento (kg) +/-	300	310	320	350	360	380	400	320
Água na Massa (L) +/-	110	110	120	120	140	150	160	180
Espuma (L) +/-	800	715	630	560	460	370	290	-
Água na Espuma (L) +/-	58	52	46	41	33	27	21	-
Densidade Úmida (kg/m ³)	474	687	890	1075	1287	1510	1683	2400
Resistência (MPa)	~ 1	~ 2	~ 3	~ 4	6 - 8	10-12	16-18	> 25
Lambda Média (W/m.K)	0,096	1,18	0,21	0,32	0,405	0,45	0,55	2,10

* Materiais utilizados em estado seco.

Fonte: Ecopore (2018). Adaptado.

Como base, foi utilizada a composição almejando-se 1600 kg/m³ de peso específico seco, exceto a água. As proporções de água utilizadas foram de acordo com a trabalhabilidade do concreto e as proporções de aditivo seguiram as recomendações do

fabricante.

Além da dosagem padrão do concreto celular utilizada, para os traços com adição de cal e cinzas de eucalipto foram tomados como referência trabalhos desenvolvidos por Mateos (1961) e Pinto (1971) para adotar os seguintes teores de cinzas: 10, 17,5 e 25% (em peso). O método de dosagem seguiu então as seguintes proporções:

- Traço Padrão – 0% cinza + 0% cal;
- Traço I – 0% cinza + 6% cal;
- Traço II – 10% cinza + 6% cal;
- Traço III – 17,5% cinza + 6% cal;
- Traço IV – 25% cinza + 6% cal.

A partir dessas proporções chegou-se ao peso de cada material utilizado para fabricação dos traços, como visto na Tabela 4.

Tabela 4 – Proporções dos constituintes dos traços

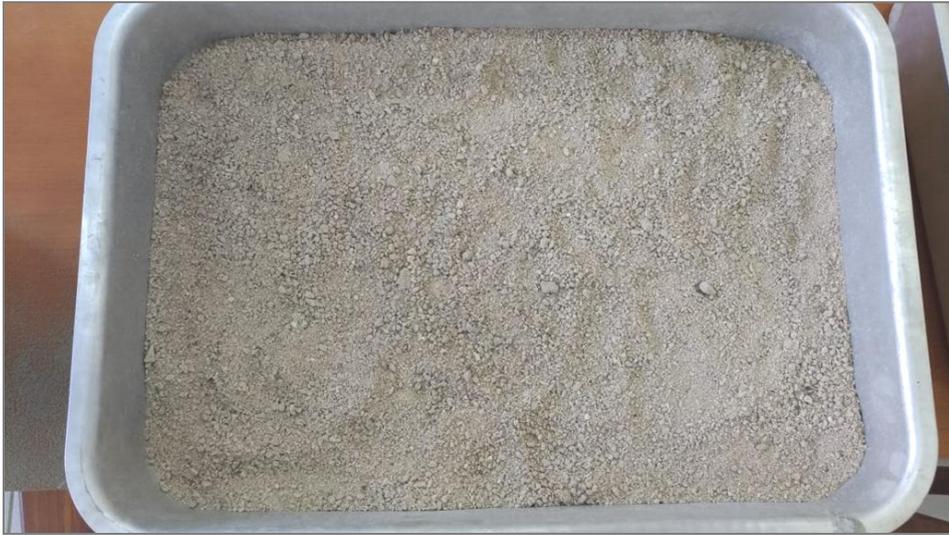
Traço	Cimento (kg)	Areia (kg)	Cal (kg)	Cinza (kg)	Água (L)	Água na espuma (L)	Aditivo (L)
Padrão	15,6	43	0	0	9,7	0,82	0,021
I	15,6	40,42	2,58	0	10,5	0,82	0,021
II	15,6	36,12	2,58	4,3	12,3	0,82	0,021
III	15,6	32,9	2,58	7,53	15,5	0,82	0,021
IV	15,6	29,67	2,58	10,75	16	0,82	0,021

Fonte: Elaborada pelos autores.

4.2.2 *Confecção e Cura dos Corpos de Prova*

Preliminarmente à execução do concreto, a areia de rio utilizada foi levada à estufa à 105 °C, em fôrmas de alumínio, por 24 horas, para a retirada da umidade, como mostra a Figura 5. Posteriormente, a areia foi peneirada em peneira grossa e as cinzas de eucalipto em peneiras de malha passante de 350 µm, a fim de eliminar impurezas indesejadas, que podem influenciar no desempenho e nas propriedades do concreto (Figuras 6 e 8). Todos os materiais tiveram a sua massa previamente medida com o uso da balança, mostrado na Figura 7, e a água com o auxílio de uma proveta graduada.

Figura 5 – Areia após secagem em estufa



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6 – Peneiramento da areia



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 7 – Pesagem do cimento



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 8 – Cinzas antes e depois de serem peneiradas



Fonte: Arquivo pessoal.

O processo de mistura para produzir os concretos seguiu as recomendações descritas na NBR 12645 (ABNT, 1992). A sequência de carregamento da betoneira, no caso da espuma pré-formada, deve ser:

- 1º) agregado miúdo (areia média de rio);
- 2º) fibras (considerando nesse caso as adições de cinza e cal);
- 3º) cimento;
- 4º) água;
- 5º) espuma.

Depois de dosados os materiais a serem utilizados, seguiu-se a confecção do concreto em betoneira da forma convencional, a fim de obter uma mistura homogênea, adicionando por último a espuma pré-formada, gerada por um agitador mecânico (Figuras 9 e 10). Ainda foi retirada uma amostra da mistura para medir o seu peso específico, para atestar que havia chegado ao almejado, de cerca de 1600 kg/m^3 .

Figura 9 – Agitador mecânico



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 10 – Geração de espuma e sua adição ao concreto



Fonte: Arquivo pessoal.

Em seguida, a moldagem dos corpos de prova foi executada em moldes cilíndricos de dimensões 10x20cm (Figura 11), desmoldados após 24h (Figura 12). Todo o procedimento de moldagem, adensamento manual, desmoldagem e cura foram feitos como recomendado pela NBR 5738 (ABNT, 2015) Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.

Figura 11 – Corpos de prova moldados



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 12 – Corpos de prova desenformados



Fonte: Arquivo pessoal.

Quanto aos procedimentos de cura descritos na NBR 5738 (ABNT, 2015, p. 8), deve-se atentar principalmente ao item 8.2.5, que discorre sobre os procedimentos de cura, onde preconiza que “Os corpos-de-prova preparados com concreto leve devem ser retirados da câmara de cura aos sete dias e conservados ao ar a $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e a uma umidade relativa de $(50 \pm 15)\%$ até o momento do ensaio.”.

Portanto, os corpos de prova foram colocados em caixas d’água utilizadas como câmara de cura até os sete dias, como apresentado na Figura 13, e depois foram passados para sacos plásticos para continuar o processo de cura, mantendo a umidade no local com auxílio de recipientes com água, até o momento da realização dos ensaios.

Figura 13 – Cura do Concreto



Fonte: Arquivo pessoal.

4.2.3 Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos

Este ensaio foi feito em uma prensa hidráulica, como exposto na Figura 14, seguindo as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 1996) Cimento Portland – Determinação da Resistência a Compressão, e da NBR 5739 (ABNT, 2018) Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos. Ainda, foram utilizados discos de neoprene e as bases metálicas com anel de retenção para regularização da superfície dos corpos-de-prova no ato do rompimento. Todos os traços foram rompidos nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias, sendo utilizadas 3 corpos de prova a cada rompimento, a fim de obter uma média da resistência à compressão.

Figura 14 – Ensaio de Compressão em prensa hidráulica



Fonte: Arquivo pessoal.

4.2.4 Ensaio de absorção de água por imersão

Já o ensaio de absorção foi feito conforme as prescrições presentes na NBR 9778 (ABNT, 1987) Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica, atentando-se ao fato de que a saturação do corpo de prova, disposto no item 3.2.2, seguiu apenas uma das condições descritas, a de imersão em água à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$. A outra condição, de imersão em água à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, seguida de conservação em água em ebulição durante 5 h, não foi possível devido à falta de equipamentos específicos no local.

Foi utilizada a balança para medir a massa específica (saturada e seca) das amostras, a estufa a 105°C para a secagem e dessecadores para resfriamento ao ar seco à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ (Figura 15). Completada a secagem e resfriamento, os corpos de prova foram colocados em recipientes para manter a saturação, como observado na Figura 16.

Figura 15 – Dessecadores para resfriamento



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 16 – Saturação das amostras



Fonte: Arquivo pessoal.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise do Ensaio de Compressão Axial

Inicialmente foram analisados os resultados dos ensaios de compressão dos corpos de prova referentes aos traços de concreto celular, consoante NBR 5739:2018.

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios obtidos a cada ensaio. Baseado nestes resultados se pode definir qual ou quais dos cinco traços poderiam ser utilizados na execução de paredes de concreto celular moldados no local.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de compressão dos corpos de prova

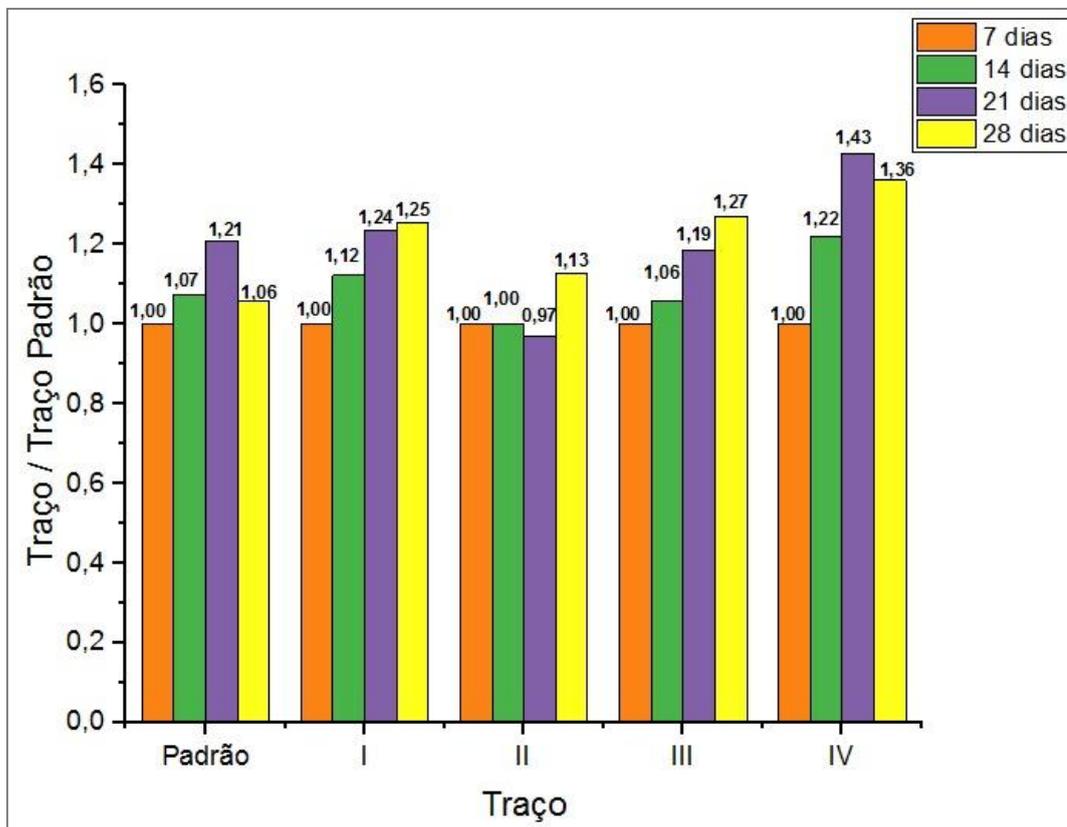
Resistências médias (MPa)					
Tempo	Padrão	I	II	III	IV
7 dias	4,99	6,56	5,47	8,28	4,30
14 dias	5,36	7,36	5,47	8,78	5,25
21 dias	6,04	8,11	5,31	9,83	6,14
28 dias	5,29	8,23	6,16	10,53	5,85

Fonte: Elaborada pelos autores.

Quando se adicionou a cal à mistura observou-se uma melhoria em relação à trabalhabilidade e, conseqüentemente, um melhor adensamento, e por fim obteve-se uma maior resistência. Por outro lado, a incorporação de cinza ao concreto evidenciou a grande absorção de água pela mistura, cabendo à cal tentar minimizar essa característica.

Em contrapartida, o traço de cinza com teor de 25% apresentou uma grande redução na resistência. Segundo Pinto (1971), o acréscimo de resistência é maior quando entre os teores de 10% a 17,5%. O autor relata ainda que teores de 17,5% a 25% de cinza tendem a ter redução no acréscimo de resistência. A Figura 17 mostra a tendência de crescimento ou declínio de resistência com o passar dos dias.

Figura 17 – Análise comparativa de resistência à compressão entre os traços

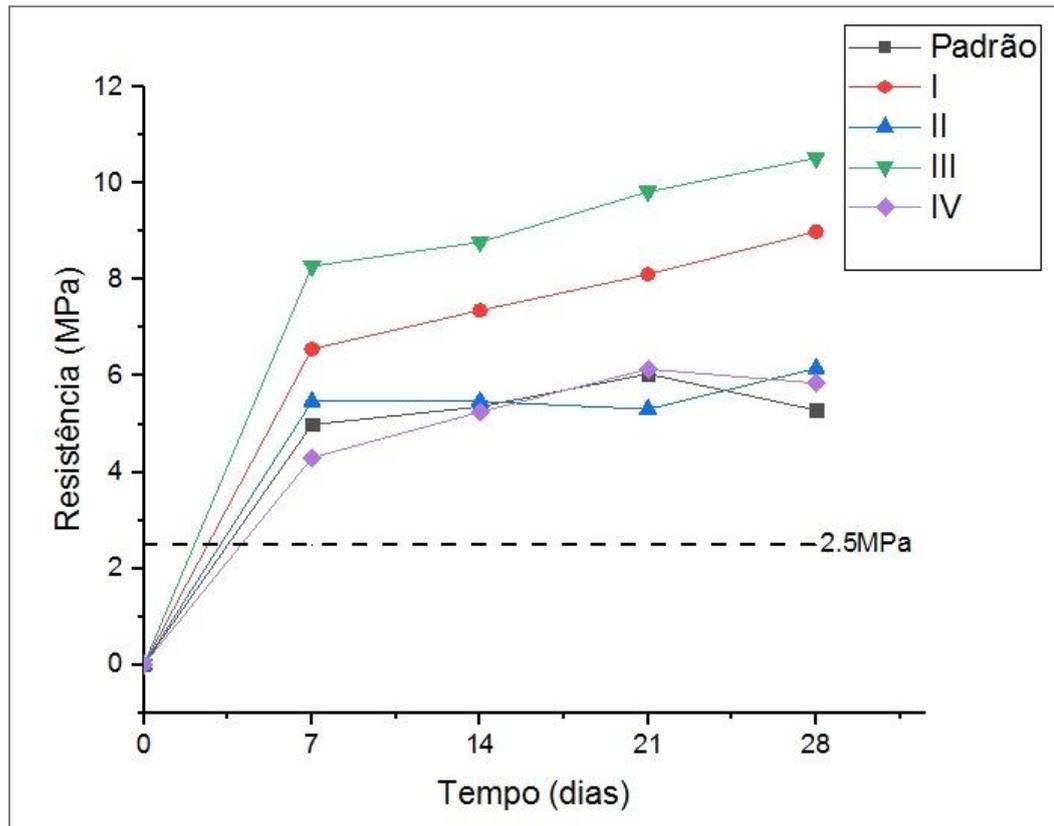


Fonte: Elaborada pelos autores.

Segundo Silva (2015), apenas três normas brasileiras regulamentam a execução e utilização do concreto celular para fins de alvenaria estrutural, a NBR 12644:2014, NBR 12645:1992 e NBR 12646:1992, entretanto nenhuma delas dedica-se ao projeto. Partindo dessa premissa, para suprir esta etapa há um projeto de norma, ABNT/CEE 185:000.01-001-1 (ABNT, 2013), que trata sobre o projeto, controle e execução de paredes de concreto celular moldados no local, que também será usado de base nesta pesquisa.

Em conformidade com a NBR 12646:1992, o concreto celular espumoso deve apresentar $f_{ck} \geq 2,5$ MPa aos 28 dias de idade para utilização em paredes de edificações térreas. A Figura 18 evidencia os resultados obtidos relacionados com os limites estabelecidos pela norma.

Figura 18 – Análise comparativa entre os resultados do ensaio de compressão e a NBR 12646 (ABNT, 1992)



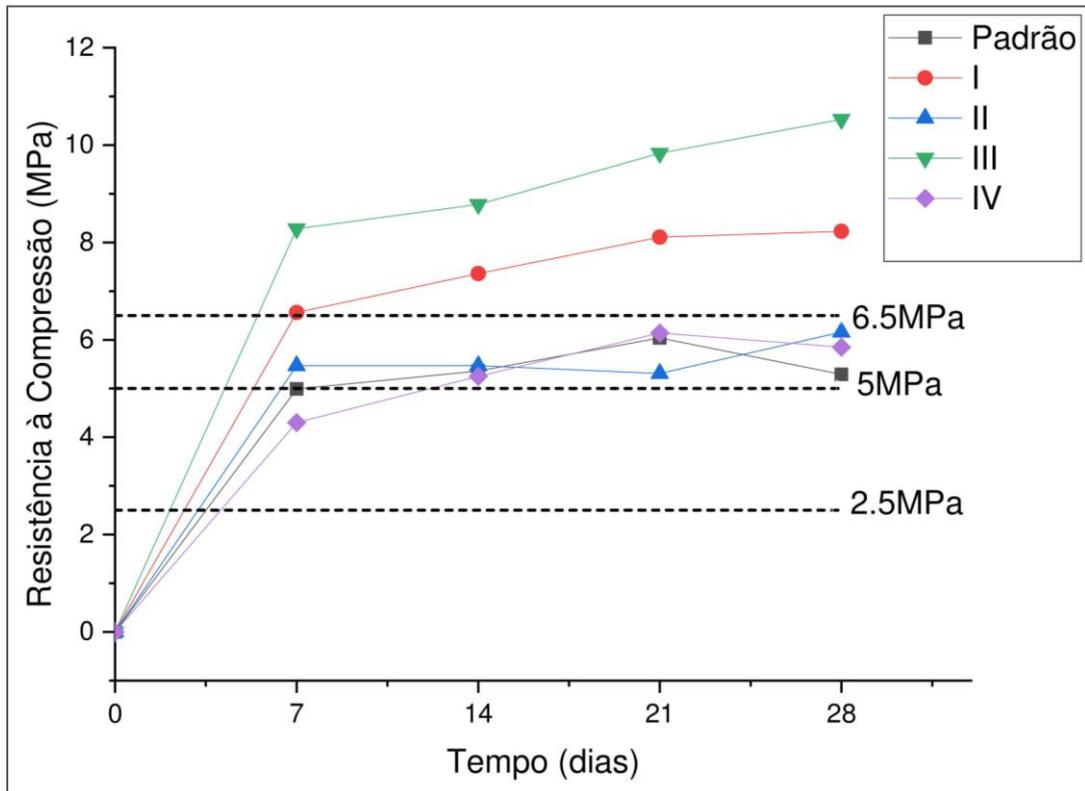
Fonte: Elaborada pelos autores.

Analisando a Figura 18 é possível ver que todos os traços atingiram, de forma satisfatória, resistências superiores aos 2,5 MPa, exigidos pela NBR 12646:1992. Desta forma, visando a redução nos custos com a areia, a redução dos impactos ambientais, a incorporação e aceitação da cinza como componente do concreto celular espumoso, o Traço IV (6% de cal + 25% de cinza) representa uma alternativa viável.

Complementarmente, a ABNT/CEE 185:000.01-001-1 preconiza que os concretos produzidos com espuma pré-formada podem ser aplicados com fins de alvenaria estrutural em paredes de edificações moldadas in loco, desde que apresentem $f_{ck} \geq 5,0$ MPa aos 28 dias de idade. Ainda cita que os concretos que apresentem $f_{ck} \geq 6,5$ MPa podem ser utilizados com fins de alvenaria estrutural em paredes de edificações com até dois pavimentos, em que a

classe de agressividade local seja I. A Figura 17 mostra os traços que atendem ou não os requisitos estabelecidos pelo projeto de norma.

Figura 19 – Análise comparativa dos resultados do ensaio de compressão e a ABNT/CEE 185:000.01-001-1

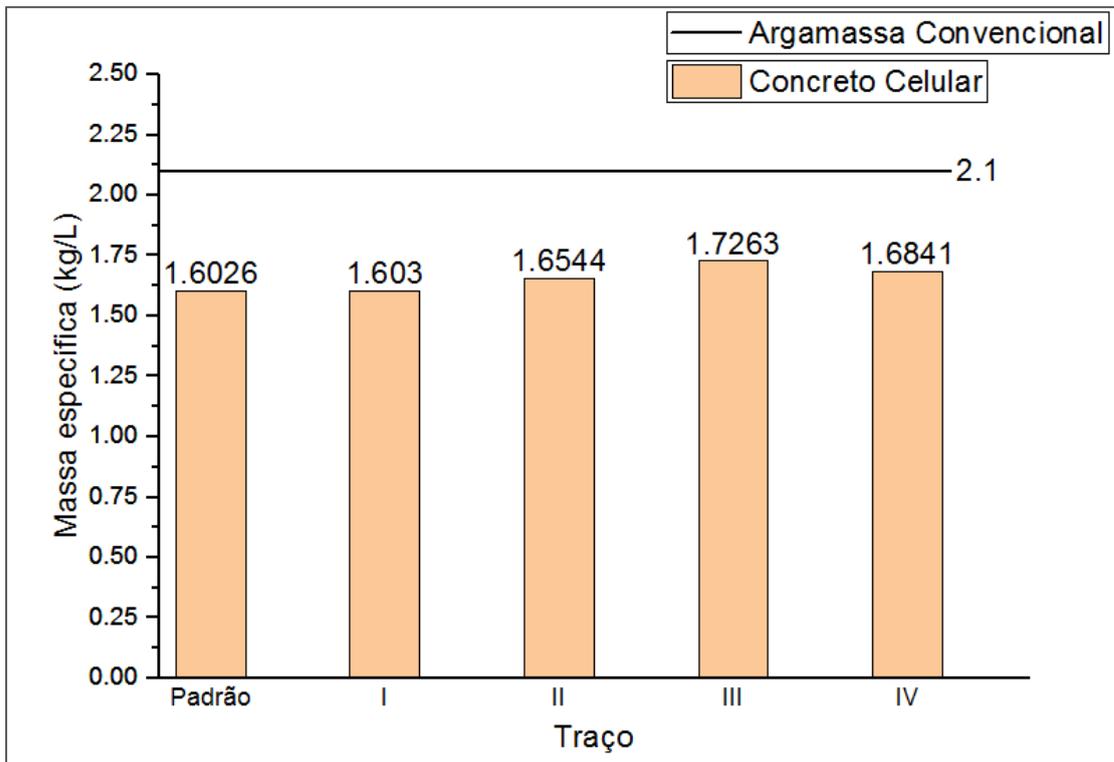


Fonte: Elaborada pelos autores.

Observando a Figura 19 é possível ver que todos os traços alcançaram resistências superiores aos 5,0 MPa exigidos pela ABNT/CEE 185:000.01-001-1. Desta forma, todos os traços poderiam ser aplicados em paredes de concreto celular moldadas in loco com função estrutural em edificações térreas. Ainda é possível observar que apenas os traços I (6% cal + 0% cinza) e III (6% cal + 17,5% cinza), atingiram os requisitos estabelecidos pela comissão de estudos especiais.

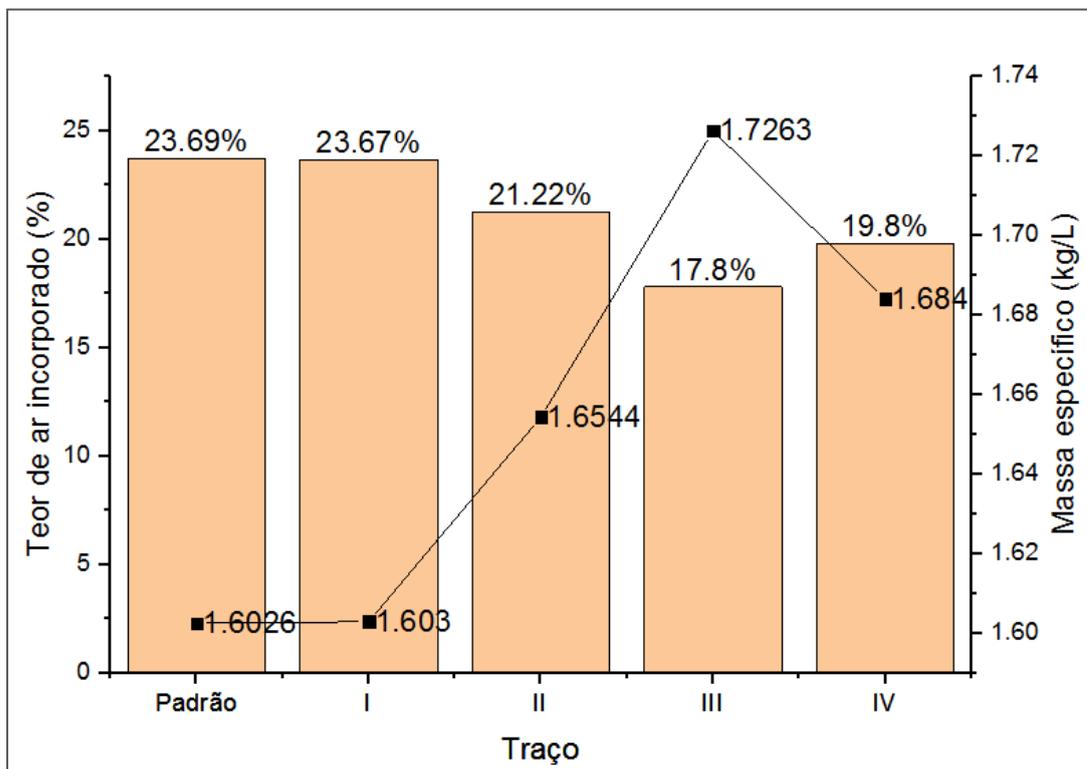
Outro fator importante a ser analisado quando se fala em concreto celular é a massa específica da mistura em estado fresco e o teor de incorporação de ar. Segundo o Sistema de Custos de Obras e Serviços de Engenharia, fornecido pela Prefeitura de Rio de Janeiro (s.d), as argamassas convencionais tem massa específica em torno de 2100 kg/m³. As Figuras 20 e 21 fazem o comparativo entre a argamassa convencional e o concreto celular espumoso.

Figura 20 – Argamassa Convencional X Concreto Celular



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 21 – Teor de ar incorporado



Fonte: Elaborada pelos autores.

Como principal característica do concreto celular, à medida que o teor de ar incorporado aumenta, sua massa específica diminui. Observa-se, portanto, que à medida que foi adicionada a cinza, menores foram os teores de incorporação de ar. Pela granulometria bastante reduzida, a cinza tende a ocupar os vazios promovendo uma estrutura mais compacta.

Outro ponto a ser observado após o ensaio de compressão é a forma com que o corpo de prova rompeu. Na maioria das amostras ocorreu a ruptura cisalhada lateral, com um ângulo de 45° (Figura 22). O cisalhamento acontece em planos inclinados em relação à direção da força cortante que o origina, e por esse motivo a linha de fratura atravessa a diagonal do corpo de prova. Um ensaio que resulte nesse tipo de ruptura pode ser considerado normal e aceitável.

Figura 22 – Ruptura cisalhada lateral, ângulo de 45°



Fonte: Arquivo pessoal.

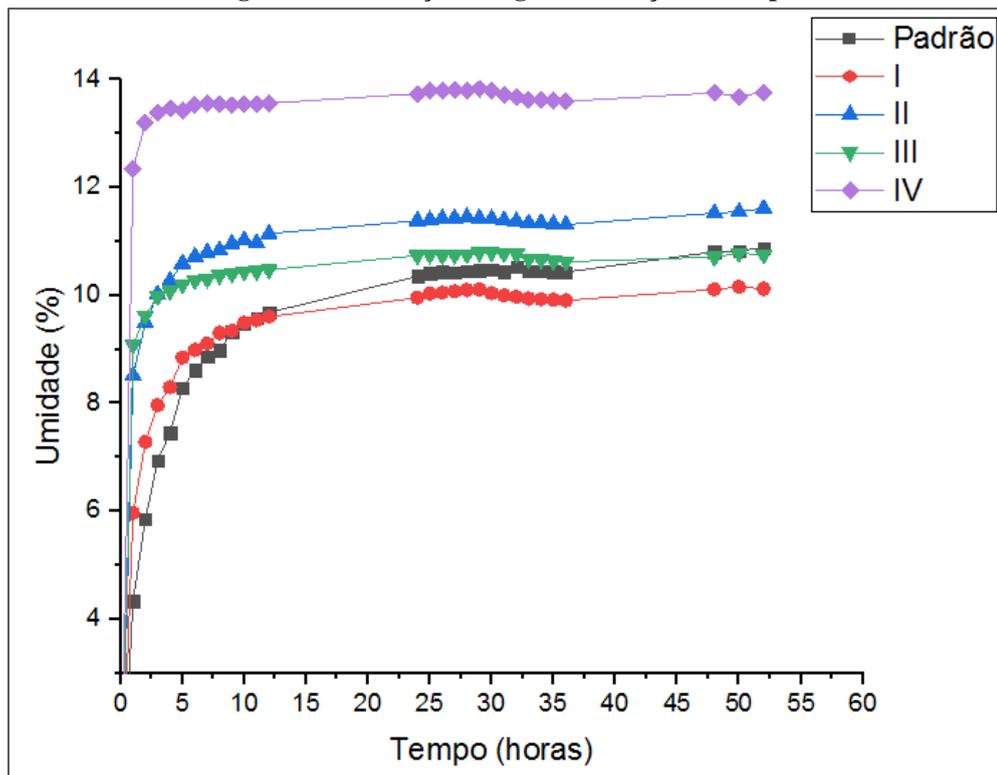
5.2 Análise do Ensaio de Absorção

Segundo Hewlett (1999), a água é um componente fundamental do concreto. Ela tem um papel importantíssimo, tanto positivamente, quando desencadeia as reações de hidratação do cimento e pelo papel essencial na cura do concreto, tanto negativamente, quando, muitas vezes, promove a degradação prematura da estrutura.

De acordo com Petry (2004), com o uso das cinzas há um refinamento dos poros e este propicia a redução da permeabilidade de água e outros fluidos que podem, frequentemente, transportar agentes deletérios ao concreto, criando-se um ciclo de processos que culminam no aumento da durabilidade do mesmo.

Por outro lado, Silva *et al.* (2015) diz que a adição de cinza resulta no aumento de até 15% na absorção de água e de até 12% do índice de vazios para as argamassas. Isto se deve geralmente pela maior rugosidade das cinzas, que conseqüentemente retém mais água na mistura, gerando maior quantidade de vazios na argamassa endurecida. Ainda segundo o autor, a massa específica pode apresentar uma variação máxima de até 3% com a adição do material. As premissas apontadas pelo autor foram verificadas nesta pesquisa. A Figura 23 aponta o aumento de absorção de água, à medida que se aumenta o teor de cinza na mistura.

Figura 23 – Absorção de água em relação ao tempo



Fonte: Elaborada pelos autores.

Mediante ao exposto, o traço IV (6% cal, 25% cinza) apresentou o teor de absorção mais elevado, de 13,81%. Por outro lado, o traço I (6% cal, 0% cinza) apresentou os menores teores, o que já era esperado. A respeito disso, Silva *et al.* (2018), aponta que, ao se acrescentar cal na mistura, por consequência se eleva o consumo de água. Os vazios são preenchidos com partículas finas que, juntamente com a água, facilita o deslizamento das partículas, possibilitando um melhor encaixe, uma melhor aglutinação dos elementos do concreto. Conclui-se então que, com o aumento do teor de cal, diminui-se a porosidade.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho explorou a utilização da cinza proveniente da queima da biomassa de eucalipto, que é um resíduo geralmente rejeitado, em mistura com a cal, na dosagem padrão do concreto celular espumoso, alcançando êxito em relação aos objetivos propostos inicialmente.

Foi possível verificar a eficácia de todos os traços realizados, podendo ser aplicados em paredes de concreto celular moldadas in loco em edificações térreas, ao atingirem a resistência à compressão exigida por norma, de 2,5 MPa, e a resistência determinada pela comissão de estudos especiais, de 5,0 MPa.

O traço IV, produzido com maior teor de cinza (6% de cal + 25% de cinza), apesar dos seus resultados indicarem uma resistência reduzida em relação aos demais traços, identifica-se notoriamente suas vantagens no que tange a sustentabilidade ambiental e econômica, constatando sua efetividade. Já para paredes de edificações com até dois pavimentos, apenas os traços I (6% cal + 0% cinza) e III (6% cal + 17,5% cinza) atingiram os requisitos estabelecidos pela comissão de estudos especiais, que estabelece a resistência de 6,5 MPa.

Em virtude das análises feitas a cerca do ensaio de absorção, fica constatado que conforme é adicionada a cinza de eucalipto à mistura, maiores são os teores de absorção de água. Esta característica apresentada pela cinza é proveniente da sua alta rugosidade e porosidade. Fica evidente ainda que, ao se adicionar cal à mistura, os teores de absorção de água tendem a diminuir. Isso se verifica devido as suas propriedades de retenção de água nos interstícios do concreto apresentadas pela cal. Uma vez retida a água, esta por sua vez, diminui os espaços vazios no interior da amostra.

Portanto, a partir dos resultados experimentais e comparações obtidas, foi possível comprovar a viabilidade técnica do emprego do concreto celular espumoso modificado, com adição de cinza da biomassa de eucalipto, em conjunto com a cal, para fins de alvenaria estrutural. Como a preocupação com a sustentabilidade ambiental é um dos assuntos mais discutidos atualmente, a reutilização desse resíduo tem impacto positivo, pois evita a poluição gerada pelo seu descarte, proporcionando benefícios não só ecológicos, mas também sociais e econômicos.

7 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo do comportamento de novos traços com aumento de porcentagem de cal, com os mesmos teores de cinzas, de 10, 17,5 e 25%;
- Estudo da influência da cal na resistência à compressão no traço original, variando a sua porcentagem de 0 a 90%;
- Estudo da influência do aditivo espumante na resistência à compressão no traço padrão, variando as proporções;
- Refazer os traços apresentados com adição de superplastificante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7. ed. São Paulo, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Parede de concreto: coletânea de ativos 2007/2008**. São Paulo, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12645**: Execução de paredes de concreto celular espumoso moldadas no local – Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12646**: Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12644**: Concreto Leve celular estrutural – Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concretos para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Proposta: **CEE-185:000.01-001-1**: parede de concreto celular estrutural moldada no local para a construção de edificações: projeto, execução e controle - Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção 1**. Rio de Janeiro: LTC, 1987.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**: Livros técnicos e científicos. 4ª edição. São Paulo: LTC, 1992.

BOCK, A. L. **Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

CASANOVA, F. J. **Estabilização de Solos**. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1988. Notas de aula.

CIENTEC - FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Projeto de pesquisa Cicasol**: pavimentos de solos estabilizados com cinza volante e cal. Relatório final. Porto Alegre, 1984. 295p.

COELHO A. Z. G.; TORRALBA F.P.; JALALI S. **A Cal na Construção**. TecMinho. Lisboa: Publidisa, 2009.

CORTELASSI, E. M. **Desenvolvimento e avaliação de concretos celulares espumosos de alto desempenho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2005.

DUBAJ, E. **Estudo comparativo entre traços de argamassa utilizadas em Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

ECOPORE. **ECOFOAM – Aditivo Espumante para Concreto Celular**. Disponível em: <<http://www.ecopore.com.br/ecofoam/>>. Acesso em 18 de setembro de 2018.

FOELKEL, C. **Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose Kraft de Eucalipto**: Resíduos Minerais. Eucalyptus Online Book. São Paulo, v. 25, n. 5, 2011.

FREITAS, I. **Produção e propriedades físicas e mecânicas do concreto celular espumoso**. 2004. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2004.

FU, X.; WANG, Z.; TAO, W.; YANG, C.; HOU, W.; DONG, Y.; WU, X. **Studies on**

blended cement with a large amount of fly ash. Cement and Concrete Research, Vol. 32, Issue 7, p. 1153 – 1159, July 2002.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil.** 2. ed, São Paulo, Pini, 2002.

HELENE, P. R. do L. **Vida útil das estruturas de concreto.** In: International Conference on HighPerformance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures, 1999. Gramado. **Anais...** Gramado, 1999.

HEWLETT, P. C. **The role of water in determining concrete performance.** In: Dhir, R. & McCarthy M. (eds). Concrete Durability and Repair Technology. International Congress Creating with Concrete, Dundee, 1999. Proceedings. London, Thomas Telford, 1999. p. 63-80.

KIHARA, Y. **O estudo mineralógico das cinzas volantes brasileiras: origem, características e qualidade.** São Paulo, 1983. 223 p.

LAWRENCE, K; LORDSLEEM JUNIOR, A. C.; BARROS, M. M. B. **A influência do teor de fibras e de cimento nas características do concreto celular espumoso para emprego em vedações verticais de edifícios.** In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO TECNOLOGIA E GESTÃO NA PRODUÇÃO DE EDIFÍCIOS: SOLUÇÕES PARA O TERCEIRO MILÊNIO, 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 1998. p. 143-150.

LORDSLEEM JUNIOR, A C; FONTENELLE, E. C.; BARROS, M. M. S. B.; SABBATINI, F. H. **Estágio atual do uso de paredes maciças moldadas no local em São Paulo.** **Anais..** São Paulo: Epusp/PCC, 1998.

MASSAZZA, F. **Pozzolana and pozzolanic cements.** In: Lea's chemistry of cement and concrete. Edited by Peter C. Hewlett. Fourth Edition. 1998.

MATEOS, M. **Physical and mineralogical factors in stabilization of Iowa soils with lime and fly ash.** PhD thesis. Iowa University, 1961.

MAYCÁ, J.; CREMONINI, R. A.; RECENA, F. A. **Contribuição ao estudo da argila expandida nacional como alternativa de agregado graúdo para concretos leves estruturais (CLE).** 2008. Curso de Especialização em Construção Civil (Especialização em Construção Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação, Porto Alegre, 2008.

MEHTA, P.K.; AÏTCIN, P.C. **Principles underlying production of High-Performance Concrete.** **Cement, Concrete e Aggregates, Philadelphia:** ASTM. v. 12, n. 2, p.70-78, 1990.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto, Estrutura, Propriedade e Materiais.** São Paulo, PINI, 1994. 573p.

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

- MINDESS, S.; YOUNG, J. F. **Concrete**. United States, Prentice-Hall, 1981.
- MISURELLI, H.; MASSUDA, C. Paredes de concreto. **Téchne**, São Paulo, n. 147, Jun/2009.
- MOHAN, D., DE, P.L., R A I , M. **New building materials**. Housing Science, v.3, n.6, p.431-436, 1979.
- MORAES, R da C.. **Efeito físico e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto**. 2001. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.
- NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K. Structure and properties of aerated concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 5, p. 321-329, 2000. ISSN 0008-8846.
- NARDI, J. V. **Estabilização de areia com cal e cinza volante; efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1975.
- NARDI , J.V. **Introdução à estabilização de solos com cinza volante e cal**. Florianópolis: Divido de Tecnologia do Departamento de Estradas de Rodagem, 1979.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**, 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 828p. 1997.
- PEDROSO, F. L. **Concreto: Material construtivo mais consumido no mundo**: Revista IBRACON, São Paulo, n. 53, jan./fev./mar. 2009. ISSN 1809-7197.
- PETRUCCI, E. G. R. **Concretos de Cimento Portland**. 5. ed. São Paulo: GLOBO, 1978.
- PETRY, S. B. **Estudo da Permeabilidade à Água na Camada de Cobrimento de Protótipos de Concretos com Altos Teores de Cinza Volante**. 2004. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia. Santa Maria. 2004.
- PINTO, S. **Estabilização de areia com cal e cinza volante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1971, 153p.
- RAMOS, T., MATOS, A. M., COUTINHO, J. S. **Mortar with wood waste ash: Mechanical strength carbonation resistance and ASR expansion**. LABEST-FEUP – Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal b FEUP – Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal, 2013.
- RECENA, Fernando A. P. **Conhecendo Argamassa**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- RIO DE JANEIRO. Prefeitura Municipal. **Pesos específicos das materiais de construção**. Sistema de Custos de Obras e Serviços de Engenharia. Disponível em: <www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/7257695/4198923/TabelasD.pdf>. Acesso em 11 de janeiro de 2019.
- ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M.V.C. **Concreto: Ensino, pesquisas e realizações: concreto estrutural leve**. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto Leve Estrutural. Produção, Propriedades Microestrutura e Aplicações**. São Paulo: Editora Pini, 2009.

SABBATINI, F. H. **Argamassas de Assentamento para Paredes de Alvenaria Resistente**. Boletim técnico 02/86. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1986.

SACHT, H. M. **Painéis de vedação de concreto moldados in loco: avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos**. 2008. 286 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SANTOS, C. C. N. **A influência das características da areia artificialmente britada nas propriedades do estado fresco do concreto**. 2008. 243 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil)-Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SILVA, C. A. O. **Estudo de dosagem e avaliação de concreto celular com fins estruturais**. 137 f. : il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2015.

SILVA, F.F; FIUZA, G.F.S; NEVES, L.H.S.B; GOMES, G.J.C. **Estudo da influência de cal hidratada na permeabilidade do concreto**. Revista Teccen. Jan/Jun. 2018.; 11 (1): 02-09.

SILVA, M. A. M. **Efeito da estabilização de solos mediante a adição de cal e cinza volante, visando a sua utilização em construção civil e em pavimentação**. Porto Alegre: CPGEC, 1982. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, UFRGS.

SILVA, R. B.; FONTES, C. M. A.; LIMA, P. R. L.; GOMES, O. da F. M.; LIMA, L. G. L. M.; MOURA, R. C. de A.; TOLEDO FILHO, R. D. **Cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 15, n. 4, p. 321-334, out./dez. 2015. ISSN 1678-8621.

SILVERIO, J.; HORN, P. A. **Determinação da composição química e aproveitamento de cinzas da queima da lenha de eucalipto para produção de água sanitária ecológica**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.

TEIXEIRA FILHO, F. J.; TEZUKA, Y. **Boletim técnico: considerações sobre algumas propriedades dos concretos celulares espumosos**. São Paulo: EPUSP, 1992.

TEZUKO, Y. Concretos especiais .In: **Simpósio de Desempenho de Materiais e Componentes de Construção Civil**. Florianópolis. Simpósio de Desempenho de Materiais e Componentes de Construção Civil, 1989.

TIKALSKY, P. J.; POSPISIL, J.; MACDONALD, W. **A method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete**. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 5, p. 889 -893, 2004. ISSN 0008-8846.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto com frente à penetração de íons cloreto**. Dissertação (Mestrado). Universidade do vale do rio dos sinos, Rio grande do Sul, 2010.

WENDLER FILHO, A. A. Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE). **Paredes de Concreto:** Cálculo para Construções Econômicas, 2008. Disponível em: < <http://site.abece.com.br/download/pdf/Eventos-Palestra-Wendler.pdf>>. Acesso em: 03 de Janeiro de 2019.

