

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA - PROACAD
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS – PPGCEM
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

FERNANDA CRISTINA RESTELATTO

**ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO *PORTLAND* POR
RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS NA FABRICAÇÃO DE
CONCRETO CELULAR AUTOCLAVADO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: prof. Dr. Michael Peterson
Coorientador: prof. Dr. Fabiano Raupp-Pereira

**CRICIÚMA
2019**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

R436e Restelatto, Fernanda Cristina.

Estudo da substituição de cimento Portland por resíduos sólidos industriais na fabricação de concreto celular autoclavado / Fernanda Cristina Restelatto. - 2019.

99 p. : il. ; 21 cm.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2019.

Orientação: Michael Peterson.

Coorientação: Fabiano Raupp-Pereira.

1. Cimento Portland. 2. Concreto celular autoclavado. 3. Resíduos industriais - Reutilização. 4. Materiais pozolânicos. I. Título.

CDD. 22. ed. 620.136

Fernanda Cristina Restelatto

Estudo da substituição de cimento *Portland* por resíduos sólidos industriais na fabricação de concreto celular autoclavado.

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre (a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 30 de abril de 2019.

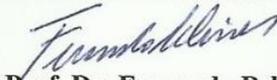
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof.ª Dr.ª Sabrina Arcaro
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Fernando Pelisser
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Aos meus pais, Leni e Olacir.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar e abençoar minha caminhada.

Aos meus pais e minhas irmãs, por todo amor, carinho e incentivo incondicional em todas as etapas da minha vida e na busca desta conquista.

Ao Guilherme, por toda a colaboração e incentivo fazendo com que eu nunca deixasse de acreditar em meu potencial.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Michael Peterson pela confiança, oportunidade, apoio e dedicação durante o decorrer de todo este trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira, pelo apoio, incentivo e conhecimento repassado.

À CAPES pelo apoio financeiro aos meus estudos e à UNESCO por disponibilizar toda a estrutura para a realização da pesquisa.

Às empresas parceiras pelo fornecimento dos resíduos e, principalmente, à empresa Celucon, em especial ao Daniel e ao Murilo pela disponibilização de materiais e da autoclave e por toda a orientação.

Aos professores e colaboradores do PPGCEM pelo conhecimento, auxílio e experiência repassada durante estes dois anos.

Aos colegas de laboratório, em especial ao Fábio, ao Tchesare e à Jordana por toda a ajuda na realização de ensaios nesta pesquisa.

E aos amigos de mestrado, em especial à Aline, Angélica, Camila, Gabriela, Gisela e Iara, que tornaram cada dia desta etapa uma experiência leve, gratificante e enriquecedora, e que se tornaram amigas para a vida.

“Uma jornada de mil milhas
começa com um único passo”.

(Lao Tzu)

RESUMO

O setor industrial gera por ano mais de 78,4 milhões de toneladas de resíduos, destes, 6,8 milhões de toneladas não possuem destinação adequada. Entre estes resíduos estão a cinza de atomizador (C.A.) e a cinza de biomassa (C.B.), geradas pela indústria cerâmica e pela indústria de papel e celulose, respectivamente. Diante disto este trabalho teve como objetivo a substituição do cimento *Portland* em concretos celulares autoclavado (CCA) visando a valorização destes resíduos e a diminuição do consumo de cimento *Portland*, cujo processo de fabricação é um dos grandes emissores de CO₂ para atmosfera. Os resíduos foram caracterizados quanto às suas propriedades físicas e químicas e concluiu-se que necessitam passar por uma preparação prévia antes de serem empregados no CCA. C.A. pode ser classificada como material pozolânico após moagem, atingindo os requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014a), já C.B. deve ser moída e queimada para adquirir características próximas às pozolanas. Após a caracterização dos resíduos foram elaboradas, através de um planejamento de misturas, 7 formulações diferentes de CCA admitindo-se um valor máximo de 15 % para a substituição do cimento. A confecção das misturas seguiu a metodologia sugerida por Rostirola (2013) e os corpos de prova foram analisados quanto à sua resistência à compressão, densidade aparente seca, características mineralógicas e térmicas. As composições obtiveram valores de resistência à compressão entre 1,21 e 1,35 MPa, densidades entre 633,59 e 650,70 kg/m³ e as análises mineralógicas indicaram a presença de quartzo, calcita e etringita. Observou-se que, para a resistência à compressão, os resultados apresentaram-se melhores para as formulações com maior substituição do cimento por C.A. moída, enquanto a substituição por C.B. queimada e moída conferiu uma piora aos resultados. Para a densidade, quanto maiores as quantidades de cimento, mais pesado se torna o material, enquanto a adição de cinzas tende a tornar o material mais leve. Dentre todas as formulações, a que obteve melhores resultados foi a que substituiu o cimento em 15 % por C.A. moída.

Palavras chaves: Concreto celular autoclavado. Cimento. Valorização de resíduos. Materiais pozolânicos.

ABSTRACT

The industrial sector generates more than 78.4 million tons of waste per year, of which 6.8 million tons do not have adequate disposal. Among these residues there are the spray dryer ash (S.D.A.) and biomass ash (B.A.), which are generated by the tile ceramics industry and the pulp and paper industry, respectively. In face of that, the aim of this study was to replace *Portland* cement in autoclaved aerated concretes (AAC), aiming the valorization of these residues and reducing the consumption of *Portland* cement, whose manufacturing process is one of the great emitters of CO₂ to the atmosphere. The residues were characterized for their physical and chemical properties and as a conclusion they need to undergo prior preparation before being employed in the AAC. S.D.A. can be classified as pozzolanic material after milling, meeting the requirements of NBR 12653 (ABNT, 2014a), and B.A. must be milled and burned to acquire characteristics close to pozzolans. After the characterization of the residues, 7 different AAC formulations were prepared using a mixture design, assuming a maximum value of 15 % for cement replacement. The preparation of the blends followed the methodology suggested by Rostirola (2013) and the test specimens were analyzed for their compressive strength, dry apparent density, mineralogical and thermal characteristics. The compositions obtained values of compressive strength between 1.21 and 1.35 MPa, densities between 633.59 and 650.70 kg/m³ and mineralogical analyzes indicated the presence of quartz, calcite and ettringite. It was observed that, for the compressive strength, the results were better for the formulations containing higher cement replacement by milled S.D.A., while the replacement by burned and milled B.A. worsened the results. For density, the higher the amount of cement, the heavier the material becomes, while the addition of ashes tends to make the material lighter. Among all formulations, the one that obtained the best results was the one that replaced the cement in 15% with milled S.D.A.

Key words: Autoclaved aerated concrete. Cement. Waste valorization. Pozzolanic materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo <i>Kraft</i> e resíduos gerados.	31
Figura 2 – Fluxograma do processo de fabricação de revestimentos cerâmicos por via úmida.	33
Figura 3 – Esquema de atomização de pós cerâmicos	34
Figura 4 – Fluxograma do processo produtivo dos blocos de CCA.	36
Figura 5 – Esquema de distribuição de partículas de uma mistura de 100 % de cimento <i>Portland</i> com fator água/cimento de 0,4 (esquerda) e o mesmo sistema com a substituição de 40 % do clínquer por <i>fillers</i>	44
Figura 6 – Análise mineralógica do Pó de Alumínio	47
Figura 7 – Resíduos <i>in natura</i> , a) cinza de atomizador b) cinza de biomassa.	48
Figura 8 – Fluxograma da metodologia de pesquisa	49
Figura 9 – Corpos de prova confeccionados para determinar o índice de pozolanicidade com cal aos 7 dias	54
Figura 10 – Corpos de prova após cura para ensaio de “Índice de Desempenho com cimento <i>Portland</i> aos 28 dias”	55
Figura 11 – Moldagem dos corpos de prova de CCA.	58
Figura 12 – Processo de expansão do CCA durante 1 hora após a moldagem.	59
Figura 13 – Corpos de prova de CCA retificados com fio de <i>nylon</i>	59
Figura 14 – Corpo de prova de CCA após desmoldagem	60
Figura 15 – Fotografias de ensaio de resistência à compressão antes (a) e após (b) a ruptura do corpo de prova.	61
Figura 16 – Análise mineralógica (DRX) da cinza A <i>in natura</i>	64
Figura 17 – Análise mineralógica (DRX) da cinza B <i>in natura</i>	64
Figura 18 – Análise mineralógica (DRX) da cinza B queimada.	65
Figura 19 – Análise DTA/TG para a Cinza A.	66
Figura 20 – Análise DTA/TG para a Cinza B.	67
Figura 21 – Curva granulométrica da cinza A <i>in natura</i> e após moagem	68
Figura 22 – Curva granulométrica da cinza B <i>in natura</i> e após queima e moagem.	69
Figura 23 – Comparação entre a R.C. das formulações de CCA	72
Figura 24 – Gráfico de Pareto dos componentes para R.C.	75
Figura 25 – Gráfico de probabilidade de distribuição normal para R.C.	76
Figura 26 – Análise dos resíduos para R.C.	76
Figura 27 – Superfície de resposta para R.C.	77
Figura 28 – Comparação entre a D.A.S. das formulações de CCA.	78

Figura 29 – Gráfico de Pareto dos componentes para D.A.S.	80
Figura 30 – Gráfico de probabilidade de distribuição normal para D.A.S.	80
Figura 31 – Análise dos resíduos para D.A.S.....	81
Figura 32 – Superfície de resposta para a D.A.S.....	82
Figura 33 – Análise DRX para as formulações de CCA	83
Figura 34 – Análise TG para as formulações de CCA	85
Figura 35 – Análise DTA para as formulações de CCA	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais processos para produção de celulose.	29
Tabela 2 – Requisitos físicos dos blocos de concreto celular autoclavado	37
Tabela 3 – Requisitos químicos de materiais pozolânicos.	42
Tabela 4 – Requisitos físicos de materiais pozolânicos.	42
Tabela 5 – Caracterização do CP V-ARI.	45
Tabela 6 – Caracterização da cal calcítica.....	46
Tabela 7 – Caracterização do Pó de Alumínio.....	46
Tabela 8 – Caracterização da Areia normal nº 100.....	47
Tabela 9 – Quantitativo de materiais para a determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias.....	53
Tabela 10 – Formulação das misturas.....	56
Tabela 11 – Traço referência utilizado para a produção de CCA.	56
Tabela 12 – Dosagem dos materiais para cada formulação de CCA.....	57
Tabela 13 – Composição química dos resíduos estudados.....	63
Tabela 14 – Resultados de resistência à compressão para o ensaio de Atividade Pozolânica com cal aos 7 dias.....	70
Tabela 15 – Resultados de resistência à compressão para o ensaio de Índice de Desempenho com Cimento aos 28 dias.....	71
Tabela 16 – Análise de variância dos modelos de regressão para R.C. com $\alpha=0,05$	73
Tabela 17 – Análise do modelo quadrático de regressão para R.C. com $\alpha=0,05$	73
Tabela 18 – Análise de variância dos modelos de regressão para R.C. com $\alpha=0,05$ e ignorando-se os fatores AC e BC.....	74
Tabela 19 – Análise de variância dos modelos de regressão para R.C. com $\alpha=0,15$	74
Tabela 20 – Análise do modelo quadrático de regressão para R.C. com $\alpha=0,15$	74
Tabela 21 – Análise de variância dos modelos de regressão para D.A.S. com $\alpha=0,10$	79
Tabela 22 – Análise do modelo linear de regressão para D.A.S. com $\alpha=0,10$	79

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
2 OBJETIVOS	27
2.1 OBJETIVO GERAL	27
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
3.1 INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE	29
3.1.1 Processo Kraft	30
3.2 INDÚSTRIA DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS	32
3.2.1 Processo produtivo	32
3.3 CONCRETO CELULAR AUTOCLAVADO	35
3.3.1 Agente expansor	37
3.3.2 Cimento	37
3.3.2.1 Hidratação do Cimento.....	39
3.3.3 Materiais Pozolânicos	41
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	45
4.1 MATERIAIS	45
4.1.1 Cimento	45
4.1.2 Cal	45
4.1.3 Pó de Alumínio	46
4.1.4 Areia	47
4.1.5 Resíduos Industriais	48
4.2 MÉTODOS	48
4.2.1 Caracterização dos resíduos	49
4.2.1.1 Análise Química (FRX).....	49
4.2.1.2 Análise Mineralógica (DRX)	50
4.2.1.3 Análise Térmica (DTA/TG).....	50
4.2.1.4 Teor de umidade.....	50
4.2.1.5 Perda ao fogo.....	51
4.2.1.5.1 <i>Queima dos resíduos</i>	51
4.2.1.6 Granulometria.....	52
4.2.1.6.1 <i>Moagem dos resíduos</i>	52
4.2.1.7 Massa Específica.....	52
4.2.1.8 Atividade pozolânica com cal aos 7 dias.....	53
4.2.1.9 Índice de Desempenho com cimento <i>Portland</i> aos 28 dias.....	54
4.2.2 Planejamento experimental	55
4.2.2.1 Planejamento estatístico	55
4.2.2.2 Determinação do traço do concreto celular autoclavado.....	56
4.2.3 Obtenção dos corpos de prova	57
4.2.4 Caracterização dos corpos de prova	60

4.2.4.1 Resistência à compressão	61
4.2.4.2 Densidade de Massa Aparente Seca	62
4.2.4.3 Análise Mineralógica (DRX)	62
4.2.4.4 Análise Térmica (DTA/TG)	62
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS	63
5.1.1 Análise Química (FRX)	63
5.1.2 Análise Mineralógica (DRX)	64
5.1.3 Análise Térmica (DTA/TG)	65
5.1.4 Teor de Umidade	67
5.1.5 Perda ao Fogo	68
5.1.6 Granulometria	68
5.1.7 Massa Específica	70
5.1.8 Atividade pozolânica com cal aos 7 dias	70
5.1.9 Índice de Desempenho com cimento aos 28 dias	71
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FORMULAÇÕES DE CCA DESENVOLVIDAS	72
5.2.1 Resistência à compressão	72
5.2.2 Densidade de Massa Aparente Seca	78
5.2.3 Análise Mineralógica (DRX)	82
5.2.4 Análise Térmica (DTA/TG)	84
6. CONCLUSÃO	87
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

Recursos naturais estão sendo consumidos de forma crescente pelos diversos setores econômicos para a produção dos mais variados tipos de bens e serviços. Segundo Pereira (2006), a grande preocupação está no fato de que, entre os processos de extração, produção, fabricação, reciclagem e disposição final, os resíduos gerados acabam sendo depositados no meio ambiente.

O setor industrial é atualmente gerador dos mais diferentes tipos de resíduos em quantidades alarmantes, sejam eles líquidos ou sólidos. Dados da ABRELPE (2019) mostram que no ano de 2018 foram geradas 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos no Brasil sendo que, deste total, 6,3 milhões de toneladas não foram coletadas e tiveram destino impróprio. Em vista deste agravante, legislações ambientais têm se tornado mais rígidas quanto ao tratamento e disposição final dos resíduos, assim como o aparecimento de políticas lixo zero (PINHEIRO, 2008; SANTOS e VILLAC, 2019).

Dentre as técnicas que buscam o uso alternativo e viável destes materiais, a valorização de resíduos vem sendo cada vez mais utilizada. Esta metodologia permite que uma grande variedade de resíduos gerados seja reaproveitada. Desta forma, os resíduos de uma indústria são utilizados como substitutos de matérias-primas virgens de outros setores, reduzindo o impacto ambiental (SIMÃO, 2016).

No setor de produção de papel e celulose Modolo *et al.* (2011) afirmam que, para cada 5,5 toneladas de papel e celulose fabricados, cerca de 1 tonelada de resíduo é gerada. Este tipo de resíduo pode ser reaproveitado na agricultura, na construção civil, em materiais cerâmicos, como matéria-prima para a produção do clínquer (SIMÃO, 2016) bem como na geração de energia.

Dentre as pesquisas sobre a utilização destes resíduos na construção civil pode-se citar os estudos de Nagrockienė e Daugėla (2018) que encontrou melhoras nas propriedades do concreto com a substituição do cimento em 15 % pela cinza de biomassa, a pesquisa de Hauser, Eggenberger e Mumenthaler (1999) que indica melhoras na resistência à compressão de concreto celular autoclavado (CCA) com a substituição total da cal da mistura pela mesma cinza e ainda o estudo de Bello *et al.* (2016) onde o cimento foi substituído em 10 % pelos resíduos *dregs* e observou-se um aumento na resistência mecânica do concreto de 4,24 %.

Já a indústria cerâmica gera, em resíduos, de 1,0 a 10 % da sua produção total no Brasil (MORAIS, 2002). Este valor pode chegar a 68

milhões de toneladas em um ano. Deste total, 85% de resíduos gerados retornam ao processo de beneficiamento da argila, 1% é destinado à reciclagem e 14% são encaminhados para unidades receptoras de resíduos para que possam ser coprocessados (DALFRÉ, 2012).

Também tendo em vista a valorização destes resíduos no âmbito da construção civil, estudos como o de Sharifi *et al.* (2019), Riley *et al.* (2011) e Namagga e Atadero (2011) mostram resultados favoráveis à utilização de resíduos da indústria cerâmica (como por exemplo as cinzas de atomizador) nas propriedades mecânicas do concreto.

Principal componente do concreto, o processo de fabricação do cimento gera grandes impactos ambientais. Segundo o SNIC (2019), nos primeiros quatro meses do ano de 2018 foram produzidas 17,1 milhões de toneladas de cimento, sendo que para cada tonelada produzida, 610 kg de gás carbônico (CO₂) são liberados na atmosfera.

É necessário que se busquem alternativas para a substituição do cimento nos diferentes âmbitos da construção civil para que os danos ao meio ambiente sejam diminuídos.

Em luz da temática de valorização de resíduos e com o auxílio financeiro da Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), esta pesquisa teve como objetivo estudar a possibilidade da substituição do cimento *Portland* na composição do concreto celular autoclavado por resíduos da indústria de celulose e da indústria cerâmica, as cinzas de biomassa e cinzas de atomizadores, respectivamente.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a substituição parcial do cimento *Portland* por resíduos sólidos industriais na fabricação de Concreto Celular Autoclavado.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar os resíduos utilizados (cinza de biomassa e cinza de atomizadores) para a sua aplicação como pozolanas;
- Avaliar a adequabilidade de diferentes traços de composição entre resíduos e cimento *Portland* para verificar seu desempenho requerido quanto às suas propriedades mecânicas e físicas;
- Analisar os resultados obtidos e avaliar a viabilidade técnica do produto.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

As indústrias de papel e celulose brasileiras encontram-se, respectivamente, na 9ª e 4ª posição no ranking mundial de volume de produção. No ano de 2017, o setor produziu um total de 21 milhões de toneladas de celulose e 10,4 milhões de toneladas de papel (ABTCP, 2019; IBÁ, 2019).

Segundo Amaral (2008), a principal matéria-prima para a produção de papel são as fibras de celulose que, quando adicionadas a diferentes constituintes e processadas, formam o produto final. Estas fibras são originadas principalmente da madeira que possui, em sua composição natural 50 % de água e outros 50 % de fração sólida, que corresponde à 45 % de celulose, 25 % de hemicelulose, 25 % de lignina e 5 % de outros materiais orgânicos e inorgânicos.

A fabricação de celulose e papel pode ser feita através de processos puramente mecânicos, puramente químicos ou da combinação deles, conforme Tabela 1. No Brasil, o processo mais utilizado é o Processo *Kraft* (sulfato) (AMARAL, 2008; BARRETTO, 2008).

Tabela 1 – Principais processos para produção de celulose.

Processo	Sistema	Tipo de papel
Mecânico (MP)	Prensagem a úmido contra rolo giratório	Jornal, revistas, embrulhos
Termomecânico (TMP)	Aquecimento dos cavacos com vapor, seguido de desfibramento em refinador de disco	Melhor qualidade em relação a MP
Processo Semiquímico	Acréscimo de produtos químicos antes da desfibragem	-
Processo Químico	Cozimento em digestores com licor ácido	Impressão e escrita
Processo Químico (Sulfato)	Cozimento em digestores com soda cáustica e sulfeto de sódio	Embalagens de papelão (alta resistência) e papéis para impressão

Fonte: Adaptado de Amaral, 2008.

3.1.1 Processo *Kraft*

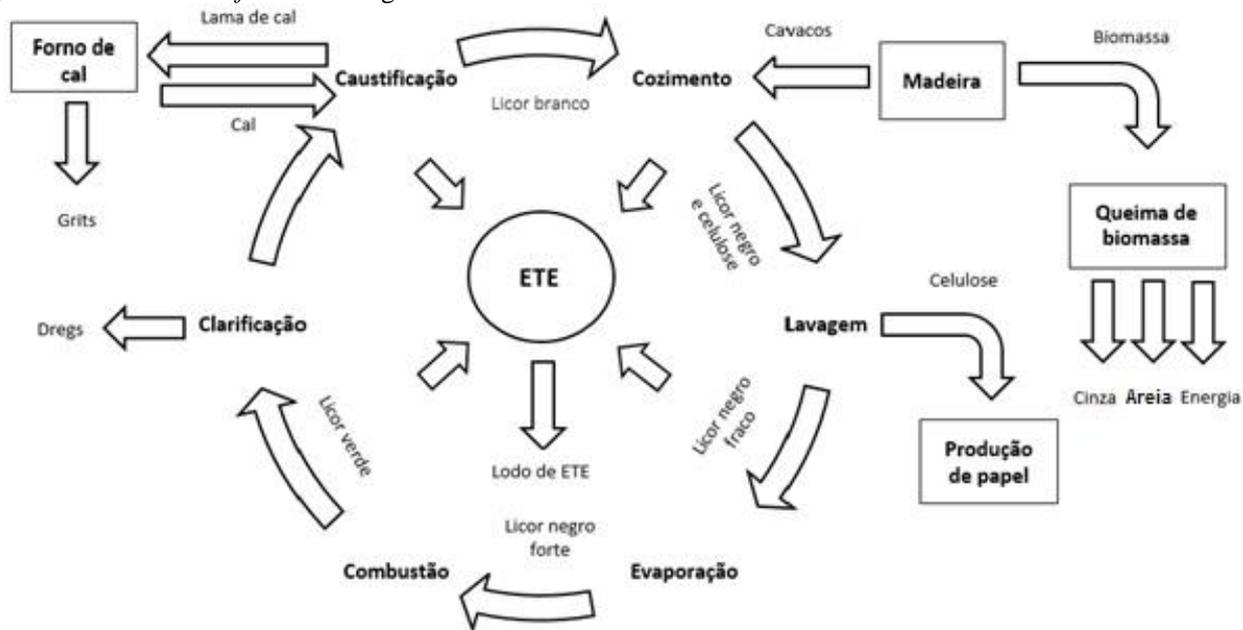
Segundo Simão (2016), o processo *Kraft* (ou Sulfato) é dividido em 6 etapas distintas: cozimento, lavagem, evaporação, combustão, clarificação e caustificação, conforme ilustra a Figura 1.

Neste processo, a madeira que se encontra em forma de cavacos passa por um tratamento em vasos de pressão (cozimento) com soda cáustica (licor branco) e sulfeto de sódio, gerando assim o chamado licor negro e a celulose. Tem como objetivo a dissolução da lignina juntamente com a preservação da resistência das fibras, formando uma pasta branqueável e com boas propriedades físico-mecânicas (AMARAL, 2008; BARRETTO, 2008).

A principal característica do processo é a recuperação dos produtos químicos, tornando o sistema rotativo contínuo. Após o cozimento, é feita a lavagem da massa, onde é feita a separação entre o licor negro e a celulose. Ocorre então a evaporação do licor negro até uma concentração suficiente que permita a sua queima. O material é queimado, gerando assim o licor verde que passa então por um processo de clarificação e caustificação. O licor branco é regenerado e utilizado em novo cozimento, fechando-se o ciclo (AMARAL, 2008; BARRETTO, 2008; SIMÃO, 2016).

Segundo Barreto (2008) e Simão (2016), os resíduos gerados durante este processo são a casca, a lama de cal, os *dregs*, os *grits*, os lodos das estações de tratamento de esgoto (ETE) e as cinzas e areia provenientes da queima de biomassa nas caldeiras. Em quantidades, as cascas compreendem 24 % dos resíduos, seguidas pela lama de cal com 22 %, lodos de ETE com 17 %, *dregs* e *grits* com 14 %, cinzas de biomassa com 11 % e a areia 12 %.

Figura 1 – Processo *Kraft* e resíduos gerados.



Fonte: Simão, 2016.

O foco desta pesquisa está nas cinzas de biomassa. Este resíduo é gerado nas caldeiras através da queima dos cavacos de madeira juntamente com carvão mineral. São geradas diariamente, em indústrias com capacidade produtiva de 1000 t de celulose por dia, cerca de 80 t de cinzas (BARRETO, 2018 *apud* NOLASCO *et al.*, 2000).

A caracterização das cinzas geradas pode ser afetada pela espécie e parte da árvore utilizada na queima, o grau do processo de combustão e do processamento da madeira, o tipo de filtros usados no sistema e a temperatura de combustão dos cavacos (OLIVEIRA, 2009).

3.2 INDÚSTRIA DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS

Segundo a ANFACER (2019), o Brasil ocupa o terceiro lugar em âmbito comercial mundial para a produção e consumo de revestimentos cerâmicos. O setor possui 93 unidades fabris distribuídas em 8 estados do país, sendo a maioria delas situadas nas regiões Sul e Sudeste e, no ano de 2017 produziu 790 milhões de metros quadrados do material.

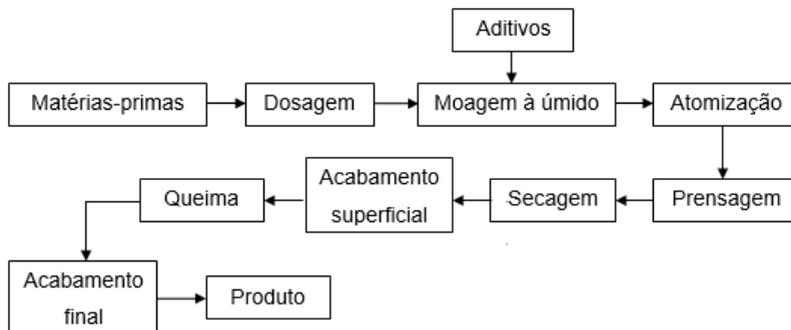
Os revestimentos cerâmicos são muito utilizados na construção civil e são produzidos a partir da mistura de argilas e outros materiais inorgânicos e não metálicos, como por exemplo os feldspatos e carbonatos (CIACCO, ROCHA e COUTINHO, 2017).

3.2.1 Processo produtivo

O processo de fabricação de revestimentos cerâmicos pode ser dividido em dois devido ao tipo de moagem: via seca ou via úmida (ANFACER, 2019). No processo por via seca a argila é a principal matéria-prima. O material é cominuído até a granulação desejada sem o auxílio da água, para então ser encaminhado para a etapa de prensagem. Já no processo a úmido, as matérias-primas são moídas com o auxílio da água que é posteriormente retirada da mistura por atomização, para então serem prensadas (CIACCO, ROCHA e COUTINHO, 2017; MEZQUITA *et al.*, 2017).

Nesta pesquisa utilizaram-se resíduos provenientes do processo de atomização, ou seja, provenientes de moagem por via úmida. As etapas da fabricação de revestimentos cerâmicos através deste método podem ser visualizadas na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma do processo de fabricação de revestimentos cerâmicos por via úmida.



Fonte: Adaptado de Oliveira e Hotza, 2011.

A escolha das matérias primas e a sua dosagem são os fatores determinantes do tipo de cerâmica que se deseja produzir. Este processo é desenvolvido previamente em laboratório para depois ser aplicado nos chãos-de-fábrica. Os sistemas de dosagem utilizam máquinas e instalações com diferentes tipos de automação, a critério do fabricante (OLIVEIRA e HOTZA, 2011).

Segundo Oliveira e Hotza (2011), o processo de moagem é realizado para reduzir o tamanho das partículas e homogeneizar a mistura após a dosagem. A moagem por via úmida da massa pode ser realizada de forma contínua ou descontínua, a depender das características das matérias-primas, da qualificação da equipe envolvida e das instalações fabris. No Brasil, o processo descontínuo é o mais comumente empregado.

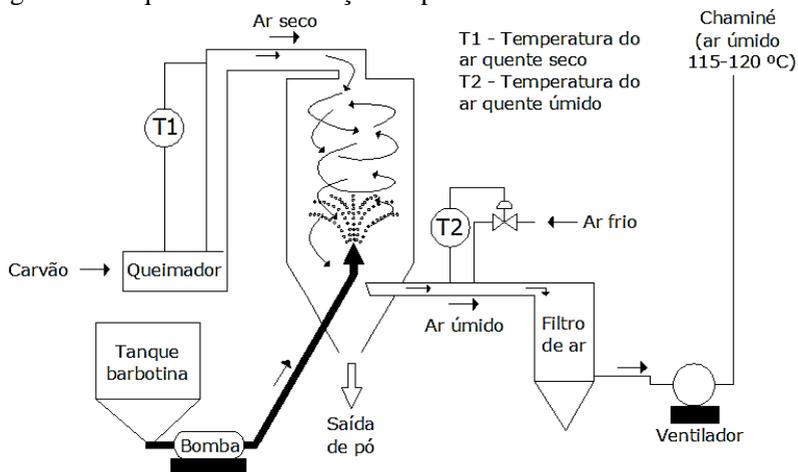
Na moagem intermitente, a mistura é introduzida no moinho juntamente com a água e dispersantes especificados. Após esta etapa, o material - que passa a se chamar barbotina - é encaminhado para o atomizador (OLIVEIRA e HOTZA, 2011).

A atomização consiste na transformação da massa de barbotina em partículas secas através da pulverização da suspensão no interior de uma câmara aquecida (atomizador) (RIBEIRO, VENTURA e LABRINCHA, 2001). A temperatura de atomização pode chegar a no máximo 350 °C. Neste processo, a remoção de água não é total, visto que uma quantidade residual deve permanecer nos grãos para lhes conferir plasticidade. Esta quantidade de água residual varia entre 4 e 8 %, a depender das matérias-primas utilizadas (OLIVEIRA e HOTZA, 2011).

Detalhadamente, a barbotina é bombeada para o interior de uma câmara cilíndrica de secagem, onde ocorre a pulverização do material. A massa entra em contato com o vapor gerado por queimadores auxiliares a gás a uma temperatura entre 650 e 750 °C. A troca térmica entre os dois sistemas ocorre em direção contrária à injeção da barbotina. Este sistema é chamado de contracorrente (OLIVEIRA; HOTZA, 2011; RIBEIRO; VENTURA; LABRINCHA, 2001).

O ar úmido sai pela lateral do atomizador, que é dotada de filtro para que resíduos do processo não sejam liberados para o meio ambiente através da chaminé. Já o pó cerâmico atomizado é retirado do sistema através de uma abertura inferior na câmara cilíndrica, conforme mostra a Figura 3 (OLIVEIRA e HOTZA, 2011).

Figura 3 – Esquema de atomização de pós cerâmicos



Fonte: Adaptado de Ribeiro, Ventura e Labrincha, 2001.

As cinzas de atomizador (C.A.), objeto deste estudo, são os resíduos armazenados no filtro de ar deste sistema. O percentual de material retido varia de acordo com a empresa, porém é de cerca de 2 % da produção atomizada, o que gera uma média anual de 110.000 t de resíduos (PUREZA, 2004).

Em sequência ao processo de atomização ocorre a prensagem que tem como objetivo principal a conformação do material para a obtenção da forma desejada. Nesta etapa, o pó cerâmico é colocado em prensas hidráulicas onde é submetido a diferentes pressões para que atinja a

densidade esperada. Este tipo de prensa é muito utilizado devido à sua grande confiabilidade mecânica associada à mínima absorção de energia (OLIVEIRA e HOTZA, 2011).

Segundo Oliveira e Hotza (2011), para eliminar a umidade residual do produto antes de receber um acabamento inicial, o mesmo deve passar por uma secagem. Este processo pode ser realizado através de secadores verticais ou horizontais.

Normalmente, os revestimentos cerâmicos recebem um acabamento inicial, como é o caso da esmaltação, antes de serem sinterizados. A queima ocorre em ciclos de 30 e 60 minutos e em temperaturas de 1100 e 1200 °C. Esta etapa confere ao material suas propriedades mecânicas e estéticas dependendo das reações químicas e físicas que ocorrem na peça durante o tratamento térmico (MEZQUITA *et al.*, 2017; OLIVEIRA e HOTZA, 2011).

O produto então recebe seu acabamento final para poder, posteriormente, ser introduzido no mercado (MEZQUITA *et al.*, 2017).

3.3 CONCRETO CELULAR AUTOCLAVADO

Desenvolvido na Suécia em 1924, o concreto celular autoclavado (CCA) surgiu da pesquisa de um produto semelhante à madeira em termos de estrutura, isolamento térmico e facilidade de trabalho e manuseio. Sua produção em escala industrial teve início em 1929 na Escandinávia (FERRAZ, 2011).

De forma geral, o concreto celular é um material resultante da mistura de materiais calcários (cimento, cal ou ambos) e materiais ricos em sílica (granulados finamente), água, aditivos e um agente expansor. Este agente expansor pode ser tanto pós metálicos (como por exemplo o alumínio e o zinco), ou agentes espumantes (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000).

Ainda segundo Narayanan e Ramamurthy (2000), a alta porosidade do material formado o torna um material muito leve, com valores de densidade até 7 vezes menores que o concreto tradicional (2300 kg/m³). Além disso, é um ótimo isolante térmico e acústico devido a sua estrutura de poros fechados. Estes fatores, no entanto, fazem com que a resistência mecânica do material diminua.

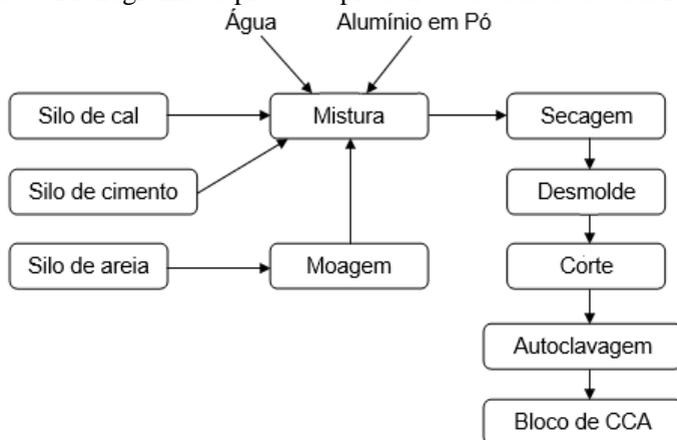
Muito utilizado na construção civil como elementos de vedação e componentes de lajes nervuradas, o CCA leva este nome devido às suas condições de cura que, ao contrário dos demais concretos celulares, é feita sob pressão em autoclaves.

Wongkeo *et al.* (2012) afirma que a principal vantagem deste processo de cura para os concretos reside no fato de o produto encontrar-se pronto para utilização em 24 horas, com o equivalente em resistência a um concreto com 28 dias de cura ambiente. No final, tem-se um material com menos fissuras e menor teor de umidade incorporada.

Na região sul do Brasil, a empresa Celucon, localizada na cidade de Morro da Fumaça – SC, é a principal fabricante de blocos de CCA. Todo o processo produtivo é patenteado e tratado como segredo industrial (ROSTIROLA, 2013).

Em estudo, Bonotto (2005) teve acesso à fábrica e descreveu o processo produtivo dos blocos de CCA conforme a Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma do processo produtivo dos blocos de CCA.



Fonte: Bonotto, 2005.

Os Blocos de CCA produzidos possuem dimensões variadas segundo o seu tipo de utilização e atendem aos predispostos na NBR 13438 (ABNT, 2013a) em relação à sua resistência mecânica e densidade massa aparente seca, conforme mostra a Tabela 2 (BONOTTO, 2005).

Tabela 2 – Requisitos físicos dos blocos de concreto celular autoclavado

Classe	Resistência à compressão (seca)		Densidade aparente seca
	Valor médio mínimo (MPa)	Menor valor isolado (MPa)	Média (kg/m ³)
C12	1,2	1,0	< 450
C15	1,5	1,2	<500
C25	2,5	2,0	<550
C45	4,5	3,6	<650

Fonte: ABNT, 2013a.

3.3.1 Agente expensor

O agente expensor mais comumente utilizado no CCA é o pó de alumínio. Sua eficiência no processo depende da sua finura e pureza além da alcalinidade do cimento. Nos casos em que são utilizados cimento *Portland* de baixa alcalinidade, é comum a adição de hidróxido de cálcio ou cal para impedir que o gás expensor se perca antes do endurecimento da mistura (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000).

É da interação entre a cal e o alumínio que o gás H₂ é gerado, conforme Equação 1 apresentada por Jacóe e Rodrigues (2014).



Devido à formação de bolhas na mistura, o produto final chega a um teor de vazio de 80 % do seu volume total, onde 50 % correspondem à porosidade incorporada e 30% são microporos (JACOÉ e RODRIGUES, 2014).

3.3.2 Cimento

Material seco e finamente pulverizado, o cimento não é, por si só, um aglomerante, porém adquire propriedades aglomerantes ao entrar em contato com a água. Quando os produtos dessa hidratação ficam estáveis em meio aquoso, o mesmo passa a ser denominado cimento hidráulico. O cimento hidráulico mais comum para a produção do concreto é o cimento *Portland* (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Battagin (2011), o cimento *Portland* é composto principalmente por clínquer *Portland*, material esférico resultante da

queima a cerca de 1450 °C de argila e calcário com eventuais adições de materiais silicosos, aluminosos ou ferríferos.

O clínquer possui como matérias primas mais comuns o calcário e argila, ambos correspondem à 75 % e 25 % de sua composição, respectivamente. Os principais óxidos necessários para a fabricação do clínquer são o óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃). Estes componentes raramente serão encontrados em uma mesma rocha na proporções corretas, por este motivo, são necessárias dois ou mais tipos de rochas para a formação da mistura (BATTAGIN, 2011).

Após o processo de calcinação das rochas e formação do clínquer, o mesmo é resfriado e recebe a adição de um pequeno teor de sulfato de cálcio sendo então moído até se tornar um pó bastante fino (NEVILLE, 2016).

Neville (2016) afirma que normalmente quatro compostos são considerados como os principais constituintes do cimento, são eles: silicato tricálcico (C₃S), silicato dicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) e ferroaluminato tetracálcico (C₄AF).

O Brasil possui, comercialmente, 8 tipos diferentes de cimento *Portland* normalizados. Cada tipo de cimento pode possuir subtipos e classes de resistência individuais, chegando a mais de 20 tipos disponíveis para as mais diversas aplicações (BATTAGIN, 2011). Os mais comuns no mercado são:

- 1) Cimento *Portland* Comum (CP I);
 - a) CP I – Cimento *Portland* Comum;
 - b) CP I-S – Cimento *Portland* Comum com adição;
- 2) Cimento *Portland* Comum (CP II);
 - a) CP II-E – Cimento *Portland* Composto com Escória;
 - b) CP II-Z – Cimento *Portland* Composto com Pozzolana;
 - c) CP II-E – Cimento *Portland* Composto com Fíler;
- 3) Cimento *Portland* de Alto-Forno (CP III);
- 4) Cimento *Portland* Pozolânico (CP IV);
- 5) Cimento *Portland* de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI);
- 6) Cimento *Portland* Resistente a Sulfatos (RS);
- 7) Cimento *Portland* de Baixo Calor de Hidratação (BC);
- 8) Cimento *Portland* Branco (CPB).

Para a produção de blocos de CCA, o cimento *Portland* utilizado com maior frequência é o de alta resistência inicial (CP V-ARI) (ROBALDO *et al.*, 2014). Este tipo de cimento não possui nenhum tipo

de adições, apesar de poder conter uma pequena quantidade (até 5 % em massa) de material carbonático (MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014).

Devido a uma dosagem diferente de calcário e argila na etapa de produção do clínquer, são formadas maiores quantidades de alita (C_3S) e C_3A , fazendo com que, após hidratado, o cimento adquira resistências elevadas com maior velocidade (26 MPa em apenas 1 dia) podendo ser deformado mais rapidamente (BATTAGIN, 2011; MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014).

3.3.2.1 Hidratação do Cimento

Por definição, dá-se o nome de hidratação ao conjunto de reações químicas de um determinado material com a água convertendo-se em hidratos. A hidratação do cimento diz respeito ao conjunto de mudanças que ocorrem quando o cimento anidro é misturado com a água (QUARCIONI, 2008).

Gonçalves, Toledo Filho e Fairbairn (2006) afirmam que, basicamente, a reação de hidratação consiste na formação de minerais como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o aluminato de cálcio (C-A-H) hidratado, a etringita, o monossulfatoaluminato de cálcio hidratado e o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), através da reação dos compostos do cimento (C_2S , C_3S , C_3A e C_4AF) com a água.

Em estudo, Schreiner *et al.* (2018) provaram que os primeiros minutos de hidratação da mistura de CCA (antes da autoclavagem) são dominados pela hidratação do cimento bem como pela reação da cal livre (CaO), resultando na formação da portlandita e em seguida da etringita e da fase C-S-H.

A hidratação do CaO formando etringita começa rapidamente após a adição de água na mistura, e a cal é totalmente consumida durante a primeira hora do processo de hidratação, o que se traduz em um rápido calor de hidratação, acelerando a hidratação do cimento (SCHREINER *et al.*, 2018).

Em condições favoráveis, os sulfatos solúveis presentes no clínquer (alcalinos) e no gesso adicionado durante a fabricação do cimento (sulfatos de cálcio) dissolvem-se rapidamente e reagem com o aluminato tricálcico (C_3A), formando após algumas horas a etringita. De composição química $C_3Al_3CaSO_4 \cdot 32H_2O$, ela é a responsável pelo enrijecimento, pega e resistência inicial da pasta (LIMA, 2005; MELO, 2010; SCHREINER *et al.*, 2018).

No CCA, além do aluminato tricálcico presente no cimento, há a formação de aluminato tricálcico hidratado proveniente da reação do

alumínio com o hidróxido de cálcio e a água, vista na Equação 1, favorecendo-se ainda mais a formação de cristais de etringita (JACOÉ e RODRIGUES, 2014).

Segundo Melo (2010), em casos onde a cura do concreto acontece de forma forçada a grandes temperaturas, como é o caso do CCA, durante as análises mineralógicas os picos de etringita tendem a desaparecer visto que a fase perde água com facilidade e torna-se, amorfa. Quando a cura ocorre em condições normais, este mineral começa a desidratar-se em temperaturas superiores a 50 °C.

Após algumas horas, grandes cristais de hidróxido de cálcio começam a aparecer juntamente com pequenos cristais de C-S-H (LIMA, 2005).

Em condições de alta temperatura e pressão (como é o caso da cura em autoclave), a química de hidratação é modificada. O C-S-H é formado porém converte-se em um produto cristalino α -silicato de cálcio hidratado (α -C₂SH), resultando em uma diminuição da resistência mecânica em comparação com o concreto comum. Entretanto, na presença de sílica, α -C₂SH é convertido em tobermorita conforme o produto continua sendo aquecido, o que pode gerar um aumento de resistência do produto final (CHEN *et al.*, 2017; WONGKEO *et al.*, 2012).

Segundo Galvánkóvá *et al.* (2016), a tobermorita é um silicato de cálcio hidratado de origem natural formado em ambientes alcalinos sob condições hidrotermais. Este mineral pode ser sintetizado através da reação no sistema CaO-SiO₂-H₂O.

Até o presente momento, três fases de tobermorita puderam ser distintas na base do seu espaçamento basal: a tobermorita 14 Å (Ca₅Si₆O₁₆(OH)₂·7H₂O), forma mais hidratada, tobermorita 11 Å (Ca₅Si₆O₁₆(OH)₂·5H₂O), e a tobermorita 9 Å (Ca₅Si₆O₁₆(OH)₂), livre de água. (GALVÁNKOVÁ *et al.*, 2016).

Para Chen *et al.* (2017), a tobermorita 11 Å é o tipo mais importante por ser a principal fase encontrada no concreto celular autoclavado. Ela apresenta características de baixa densidade e melhoras nas propriedades de isolamento térmico, sendo, por este motivo, muito utilizada no campo dos materiais de construção civil e na indústria química.

A química do processo de formação da tobermorita fundamenta-se na reação proveniente da hidratação dos silicatos de cálcio do cimento, juntamente com a adição de cal e material silicoso no sistema. A cinética da reação depende da reação molar CaO/SiO₂, da finura dos materiais de

partida, do tempo de cristalização, do tipo de material silicoso utilizado e das condições de autoclavagem (CHEN *et al.*, 2017; KIHARA, 1991).

Em seu estudo, Isu, Ishida e Mitsuda (1995) comprovaram que, quanto menor as partículas de quartzo utilizadas na mistura do CCA, menor o tempo de autoclavagem para a formação da tobermorita. Porém, para partículas de quartzo maiores, a tobermorita tornou-se mais cristalina.

3.3.3 Materiais Pozolânicos

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014a, p.2), materiais pozolânicos são:

Materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando propriedades ligantes.

A NBR 12653 (ABNT, 2014a) divide os materiais pozolânicos em três classes:

- a) Classe N: englobam as pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos da norma, como, por exemplo, materiais vulcânicos, *cherts* silicosos e argilas calcinadas;
- b) Classe C: inclui as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas;
- c) Classe E: esta classe diz respeito à quaisquer pozolanas que não estão contempladas nas classes anteriores e que atendem aos requisitos da norma.

Para que um material seja considerado pozolânico, ele deve atender a alguns requisitos químicos e físicos definidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014a), conforme as Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Requisitos químicos de materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico (%)			Método de Ensaio (*)
	N	C	E	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70	≥ 70	≥ 50	Análise química (FRX)
SO ₃	≤ 4	≤ 5	≤ 5	Análise química (FRX)
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	ABNT NBR NM 24:2003a
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	ABNT NBR NM 18:2012
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	ABNT NBR NM 25:2003b

(*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento *Portland* pelo material pozolânico.

Fonte: ABNT, 2014a.

Tabela 4 – Requisitos físicos de materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de Ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45 µm	< 20 %	< 20 %	< 20 %	ABNT NBR 15984-3: 2010a(*)
Índice de desempenho com cimento <i>Portland</i> aos 28 dias	≥ 90 %	≥ 90 %	≥ 90 %	ABNT NBR 5752:2014b
Atividade pozolânica com cal aos sete dias (MPa)	≥ 6	≥ 6	≥ 6	ABNT NBR 5751:2015

(*) Este método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico.

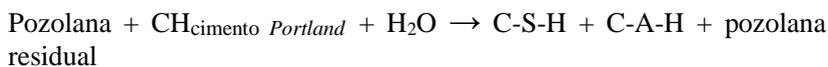
Fonte: ABNT, 2014a.

A utilização de pozolanas em elementos compostos por cimento se deve à reação formada pela interação destes materiais com o hidróxido de cálcio Ca(OH)₂ presente no cimento, gerando produtos resistentes de hidratação como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), componente indispensável para a formação da tobermorita, o aluminato de cálcio hidratado e/ou o silico-aluminato de cálcio hidratado. Para este conjunto

de reações dá-se o nome de atividade pozolânica (CORDEIRO, 2009; ROMANO *et al.*, 2006; CHEN *et al.*, 2017).

A atividade pozolânica depende de fatores como a natureza da pozolana, bem como sua qualidade e quantidade de fases amorfas. Estes materiais são aptos a reagir com o hidróxido de cálcio (e então formarem compostos de propriedades aglomerantes) devido ao fato de o silício e o alumínio presentes em sua composição encontrarem-se em estruturas desordenadas atômicamente ou amorfas (FARIAS FILHO, ROLIM e TOLETO, 2000).

A reação pozolânica caracteriza-se pelo consumo lento do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ livre na mistura pelo material pozolânico, gerando C-S-H adicional, e pode ser representada pela Equação 2 (CORDEIRO, 2009).



Equação 2

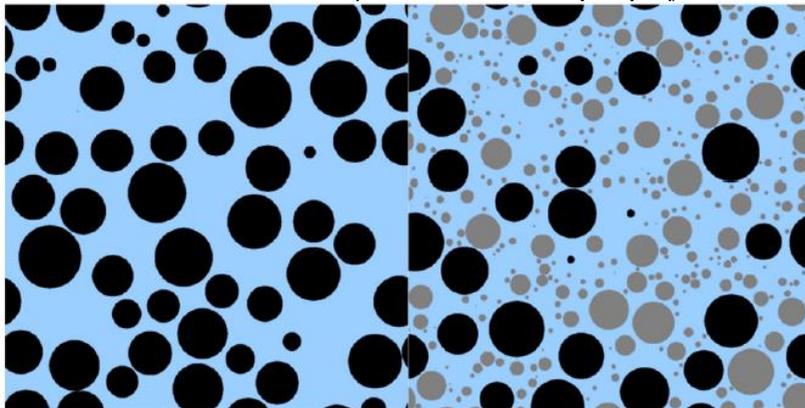
onde $\text{CH}_{\text{cimento Portland}}$: Hidróxido de cálcio do cimento *Portland*

Ainda segundo Cordeiro (2009, p.25): “As partículas finamente divididas da pozolana residual (que não reagem com os produtos de hidratação do cimento) e outros compostos formados durante a reação pozolânica, como os aluminato de cálcio hidratados (C-A-H), atuam apenas como *filler*, reduzindo a porosidade da estrutura resultante”.

O efeito *filler* pode ser atribuído a dois fatores: primeiro, quando os grãos de materiais suplementares (como por exemplo as pozolanas) substituem os grãos de clínquer (Figura 5), geram-se relativamente mais espaços para as fases de hidratos do clínquer formarem-se e, segundo, a superfície dos grãos complementares atuam como locais para a precipitação heterogênea e crescimento de hidratos (SCRIVENER, JUILLAND e MONTEIRO, 2015).

Wongkeo *et al.* (2012) afirmam que a adição de materiais pozolânicos no cimento ou no concreto mostra-se proveitosa pois pode resultar em diminuição do calor de hidratação do cimento, menor permeabilidade do material e resistência ao ataque de sulfatos.

Figura 5 – Esquema de distribuição de partículas de uma mistura de 100 % de cimento *Portland* com fator água/cimento de 0,4 (esquerda) e o mesmo sistema com a substituição de 40 % do clínquer por *fillers*.



Fonte: Scrivener, Juilland e Monteiro, 2015.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental visou a produção de concreto celular autoclavado utilizando resíduos industriais em substituição ao cimento *Portland* em sua composição. São apresentados nos tópicos subsequentes os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Cimento

Conforme a produção de blocos de CCA comerciais e o estudo de Rostirola (2016), utilizou-se também nesta pesquisa cimento *Portland* do tipo CP V-ARI, de alta resistência inicial.

O cimento adquirido foi da marca Itambé e suas propriedades químicas e físicas disponibilizadas pelo fabricante podem ser visualizadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização do CP V-ARI.

Características	CP V-ARI
CaO (%)	60,14
SiO ₂ (%)	18,85
Al ₂ O ₃ (%)	4,30
Fe ₂ O ₃ (%)	2,63
SO ₃ (%)	2,95
Perda ao fogo (%)	3,31
Resíduo insolúvel (%)	0,96
Equivalente alcalino (%)	0,73
Massa específica (g/cm ³)	3,09
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	52,1

Fonte: Do fabricante, 2018.

4.1.2 Cal

A cal utilizada nesta pesquisa foi a cal virgem micro calcítica, produzida pela empresa Cal Arco Íris Ltda. localizada em Formiga, MG. Devido sua maior pureza, altos teores de CaO e baixos teores de MgO, este é o tipo de cal mais indicado para a produção de CCA. Quanto maior a quantidade de óxido de cálcio na mistura, mais oxigênio será liberado

na reação química com o alumínio em pó facilitando o processo de expansão do concreto.

As propriedades físicas e químicas da cal utilizada são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Caracterização da cal calcítica

Características	Cal calcítica
CaO	92,89 %
MgO	1,95 %
SO ₃	0,27%
CO ₂	1,90 %
Reatividade em 2 min	44 °C
Reatividade em 20 min	70 °C
Reatividade em 40 min	73 °C
Massa retida em peneira de 150 µm	3,60 %

Fonte: Do fabricante, 2019.

4.1.3 Pó de Alumínio

O pó de alumínio empregado, de nome comercial STANLUX FLAKE CL4030, foi fabricado pela empresa Aldoro Indústria de Pó e Pigmentos Metálicos Ltda., localizada na cidade de Rio Claro, SP. A Tabela 7 apresenta suas características físicas e químicas.

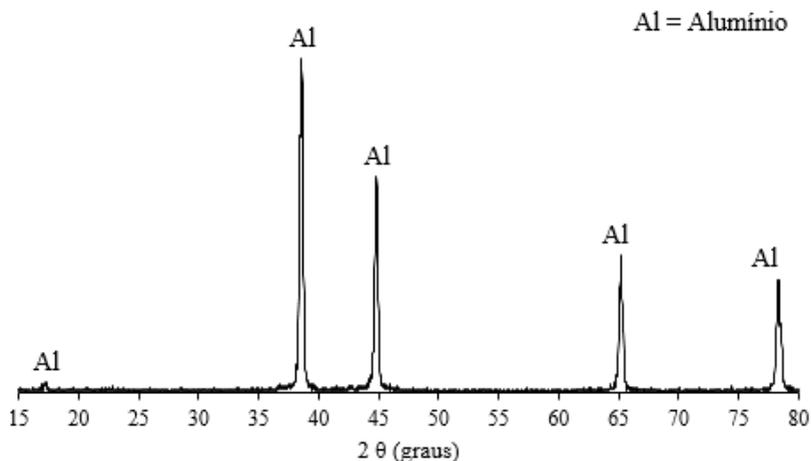
Tabela 7 – Caracterização do Pó de Alumínio

Características	Requisitos	Resultados
Metal ativo (alumínio)	≥ 92,00 %	97,91 %
Densidade (g/cm ³)	0,18–0,22	0,19
Massa retida em peneira de 45 µm	≤ 20 %	9,66 %
Distribuição média de partículas (µm)	(25 ± 3)	23,1

Fonte: Do fabricante, 2019.

A Figura 6 ilustra a análise mineralógica do pó. Como não foram encontrados picos de alumina (óxido de alumínio) no gráfico, comprova-se então a pureza do alumínio utilizado e que o material encontra-se em condições de ser empregado na produção do CCA.

Figura 6 – Análise mineralógica do Pó de Alumínio



Fonte: Autor, 2019.

4.1.4 Areia

A fim de se padronizar o ensaio, optou-se por utilizar areia normalizada adquirida junto ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). A areia normal brasileira, como é conhecida, divide-se em 4 frações granulométricas diferentes. Como, para a produção de CCA, quanto mais fina a areia, menor a sua densidade, nesta pesquisa fez-se uso da areia normal fina (n° 100), cujos tamanhos de grãos limitam-se entre 0,3 e 0,15 mm.

Empregou-se na mistura o lote 02/2016 e suas características químicas e físicas são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Caracterização da Areia normal n° 100

Características	Requisitos	Resultados
Teor de Sílica	≥ 95,0 %	96,7 %
Teor de Umidade	≤ 0,2 %	0,0 %
Massa retida entre as peneiras 0,3 e 0,15 mm	≥ 95,0 %	97,0 %
Matéria orgânica	≤ 100 ppm	< 100 ppm

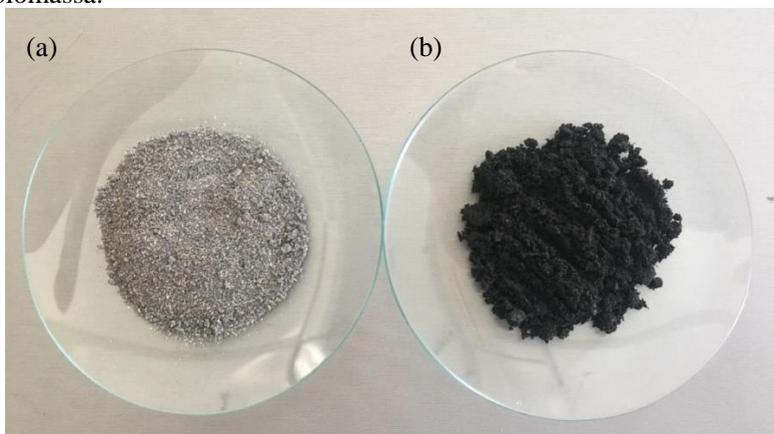
Fonte: Do fabricante, 2019.

4.1.5 Resíduos Industriais

Os resíduos industriais utilizados nesta pesquisa são a cinza de atomizador e a cinza de biomassa. A cinza de atomizador (cinza A) foi fornecida por indústria cerâmica localizada no extremo sul catarinense e a cinza de biomassa (cinza B) por indústria de papel e celulose do planalto serrano catarinense.

Estes resíduos podem ser visualizados na Figura 7 e suas características físicas e químicas são apresentadas no item 5.1 deste estudo, conforme ensaios indicados no item 4.2.1.

Figura 7 – Resíduos *in natura*, a) cinza de atomizador b) cinza de biomassa.



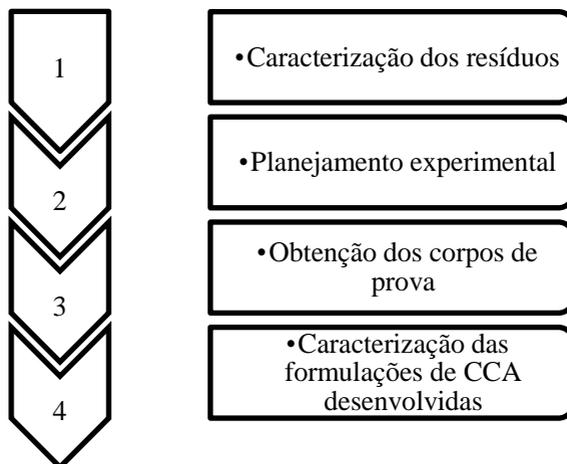
Fonte: Autor, 2019.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014a), devido a origem das cinzas, ambas enquadram-se na Classe E de materiais pozolânicos.

4.2 MÉTODOS

O fluxograma da Figura 8 apresenta a metodologia seguida nesta pesquisa.

Figura 8 – Fluxograma da metodologia de pesquisa



Fonte: Autor, 2019.

4.2.1 Caracterização dos resíduos

Para avaliar as características pozolânicas e tentar enquadrá-los nos requisitos químicos e físicos da NBR 12653 (2014a), os resíduos foram ensaiados para as suas propriedades químicas (FRX), mineralógicas (DRX) e termogravimétricas (DTA/TG), seu teor de umidade, perda ao fogo, massa específica, granulometria, atividade pozolânica com cal aos 7 dias e índice de desempenho com cimento *Portland* aos 28 dias. A metodologia destes ensaios é apresentada nos itens subsequentes.

4.2.1.1 Análise Química (FRX)

Para a determinação da composição química dos resíduos foi realizado o ensaio de espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX). Neste ensaio, são induzidas transições eletrônicas entre os orbitais mais internos dos átomos através de radiações eletromagnéticas. Estas transições resultam na emissão de raios X que permitem a identificação do elemento atômico bem como a mensuração da sua quantidade na amostra analisada (FERRETI, 2008).

Este ensaio foi feito em equipamento da marca Panalytical, modelo WRFDX AXIOS MAX, no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais do Senai em Criciúma, SC.

4.2.1.2 Análise Mineralógica (DRX)

Com o intuito de se identificar as fases cristalinas dos resíduos, utilizou-se a técnica de difração de raios-X (DRX). Este ensaio consiste na incidência de um feixe de raios X sobre o material ensaiado, segundo um ângulo θ . Cada plano cristalográfico se comporta como um espelho semitransparente nos materiais cristalinos, refletindo parte dos raios e transmitindo a outra parte. A interferência construtiva entre os raios refletidos é o que origina os picos padrões de difração, tornando possível a identificação da fase (EPP, 2016).

Utilizou-se um difratômetro da marca SHIMADZU, modelo XRD 6000, com radiação incidente $\text{CuK}\alpha$ (1,5406 Å), em um intervalo de leitura de 3 ° a 80 ° (2 θ) e velocidade de 2 °/min. Os ensaios foram executados no Laboratório de Caracterização de Materiais do Instituto de Engenharia e Tecnologia (IDT) da UNESC.

4.2.1.3 Análise Térmica (DTA/TG)

Realizada através de sistema de análise térmica resultante em equipamento da marca Netzsch, modelo STA 449 B-15 Jupiter, a análise térmica diferencial (DTA) é universalmente utilizada para se definir o comportamento térmico de um material conforme a amostra é aquecida. Juntamente com a análise termogravimétrica (TG) é possível determinar a perda de massa do material e a quantidade de calor liberado ou absorvido conforme o aumento da temperatura (KISSINGER, 1956).

Para esta pesquisa, os resíduos foram submetidos a um aumento de temperatura de 10 °C/min até atingir temperatura máxima de 1000 °C em atmosfera ar. O ensaio foi realizado no Laboratório de Valorização de Resíduos – LabValora pertencente ao IDT/UNESC.

4.2.1.4 Teor de umidade

Para a determinação do teor de umidade das amostras, foi utilizada a NBR NM 24 (ABNT, 2003a) como referência. Neste ensaio, cerca de 1 grama do material pozolânico foi pesado previamente em um cadinho de massa conhecida, e então colocado em estufa a temperatura de (105 \pm 5) °C para secagem.

A amostra foi seca por um período inicial de 30 minutos e então pesada. Após a primeira pesagem, o cadinho voltou para a estufa, onde foi pesado em intervalos de 10 minutos até que a diferença entre as massas não fosse maior que 0,001 gramas (ABNT, 2003a).

Ainda segundo a NBR NM 24 (ABNT, 2003a), para que não haja alterações nos resultados devido à massa do cadinho, o mesmo também passou por este processo de secagem (sem a amostra) previamente.

O teor de umidade do material foi determinado então através da Equação 3.

$$U = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \cdot 100 \quad \text{Equação 3}$$

Onde U é a umidade da amostra em porcentagem, m_1 é a massa da amostra antes da secagem e m_2 é a massa da amostra após secagem, ambas medidas em gramas (ABNT, 2003a).

Este ensaio também foi realizado no LabValora do IDT/UNESC.

4.2.1.5 Perda ao fogo

Apesar de a NBR 12653 (ABNT, 2014a) sugerir o uso do método apresentado pela NBR NM 18 (ABNT, 2012) para a determinação da porcentagem em massa de perda ao fogo dos materiais pozolânicos, optou-se neste estudo por utilizar o valor proveniente do ensaio de análise química (FRX) para os resíduos estudados.

Para que sejam enquadrados como materiais pozolânicos, os materiais devem apresentar perda ao fogo menor que 6 %, como mostrou a Tabela 3. Valores de perda ao fogo superiores a 6 % sugerem grande presença de matéria orgânica (carbono) nos materiais.

Conforme Tafarel *et al.* (2016) a presença de matéria orgânica incorporada ao concreto influencia diretamente na etapa de hidratação de cimento, comprometendo assim a resistência mecânica do produto final. Desta forma, para estes casos, mostrou-se necessária a queima dos resíduos para a eliminação do excesso de carbono.

4.2.1.5.1 Queima dos resíduos

O processo de calcinação (queima) dos resíduos que apresentaram perda ao fogo maior do que a permitida pela NBR 12653 (ABNT, 2014a) foi realizado em forno de queima rápida da marca Fortelab de 15 litros no Laboratório de Cerâmica do IDT/UNESC. A temperatura de queima foi

determinada com o auxílio dos resultados obtidos na análise termogravimétrica e em 900 °C de patamar durante um período de duas horas contínuas. A taxa de aumento de temperatura foi de 10 °C/min e para agilizar o processo optou-se por forçar o resfriamento em 20 °C/min, totalizando 4 horas e 15 minutos para todo o procedimento.

4.2.1.6 Granulometria

Para a determinação do “Material retido na peneira de 45 µm” adaptou-se o método de ensaio sugerido pela NBR 12653 (ABNT, 2014a) para a análise granulométrica por difração a laser em analisador de tamanho de partículas da marca Cilas, modelo PSA 1064. As análises foram executadas no Laboratório de Caracterização de Materiais pertencente ao IDT/UNESC.

A NBR 12653 (ABNT, 2014a) exige que, para que os materiais sejam classificados como pozolanas, a quantidade de material retida na peneira de 45 µm seja menor que 20 %. Nos resultados em que este valor não é atingido, optou-se por cominuir os resíduos antes de emprega-los ao concreto.

4.2.1.6.1 Moagem dos resíduos

Vaske (2012) afirma que as cinzas, em sua maioria, necessitam passar por um processo de moagem antes de serem adicionadas à massa de concreto. Desta forma espera-se encontrar resistências mecânicas semelhantes às do concreto sem adição.

Assim sendo, as cinzas foram colocadas em jarros de porcelana, juntamente com 650 g bolas de alta alumina, e submetidas à moagem a seco durante 5 minutos. O moinho utilizado foi do tipo excêntrico da marca Servitech, modelo CT-242 e o ensaio foi realizado no Laboratório de Cerâmica pertencente ao IDT/UNESC.

4.2.1.7 Massa Específica

A determinação da massa específica dos resíduos foi necessária para uso posterior no ensaio de “Atividade pozolânica com cal aos 7 dias”. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica Técnica - CerTec da UNESC através de picnômetro da marca Quantachrome Instruments, modelo ULTRAPYC 1200e.

4.2.1.8 Atividade pozolânica com cal aos 7 dias

Seguindo as premissas da NBR 5751 (ABNT, 2015), foram confeccionados 3 corpos de prova cilíndricos de argamassa de cal com medidas de 5 cm x 10 cm para cada cinza a ser analisada. O ensaio foi realizado para as cinzas que obtiveram melhores resultados nos ensaios anteriores e o quantitativo dos materiais foi determinado segundo a massa específica das mesmas, como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Quantitativo de materiais para a determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias

Tipo de Resíduo	Materiais (g)			
	Hidróxido de cálcio	Areia normal	Cinza	Água
C.A.M.	104,0	1872,0	466,488	262,62
C.B.M.Q.	104,0	1872,0	492,419	238,07

Fonte: Autor, 2019.

A cura das misturas foi feita nos próprios moldes que foram vedados para se evitar a perda de umidade. Durante as primeiras 24 horas os corpos de prova foram mantidos em temperatura ambiente e nas 144 horas posteriores em estufa a uma temperatura de 55 °C.

Após este período os corpos de prova foram retirados da estufa (Figura 9), capeados com enxofre e submetidos ao ensaio de resistência a compressão no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC da UNESC.

Figura 9 – Corpos de prova confeccionados para determinar o índice de pozolanicidade com cal aos 7 dias



Fonte: Autor, 2019

4.2.1.9 Índice de Desempenho com cimento *Portland* aos 28 dias

O Índice de Desempenho com Cimento aos 28 dias foi determinado através da NBR 5752 (ABNT, 2014b). Foram confeccionados 4 corpos de prova de argamassa cilindros de dimensões 5 cm x 10 cm para cada resíduo e também para a argamassa de referência (confeccionada com cimento *Portland* CP II-F-32, conforme pede a norma, por não possuir adições pozolânicas em sua fabricação).

Os corpos de prova passaram por um processo de cura inicial em temperatura ambiente (23 ± 2 °C) durante as primeiras 24 horas e após este período foram desmoldados e colocados submersos em tanque de água saturada com cal para a cura.

Após 28 dias da moldagem (Figura 10), as superfícies foram capeadas com enxofre e os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão no LMCC/IDT/UNESC.

Figura 10 – Corpos de prova após cura para ensaio de “Índice de Desempenho com cimento *Portland* aos 28 dias”.



Fonte: Autor 2019.

4.2.2 Planejamento experimental

4.2.2.1 Planejamento estatístico

As composições entre cimento e resíduos estudadas foram definidas através de um design experimental de misturas com fatores restritos e um ponto central, onde a quantidade máxima da massa de cimento a ser substituída foi limitada em 15 %. Desta forma, foram feitas 7 formulações diferentes, conforme mostra a Tabela 10.

Tabela 10 – Formulação das misturas

Formulação	Cimento (%)	Cinza de Atomizador (%)	Cinza de Biomassa (%)
A-15	85,0	15,0	0,0
AB-7,5	85,0	7,5	7,5
B-15	85,0	0,0	15,0
AB-5	90,0	5,0	5,0
A-7,5	92,5	7,5	0,0
B-7,5	92,5	0,0	7,5
C-100	100,0	0,0	0,0

Fonte: Autor, 2019.

4.2.2.2 Determinação do traço do concreto celular autoclavado

A dosagem do concreto é o procedimento realizado para a obtenção da melhor combinação de materiais para a produção de um concreto com as especificações desejadas. Estas especificações dizem respeito à resistência mecânica desejada, à trabalhabilidade do concreto no estado fresco, ao menor custo de produção, dentre outros (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Tutikian e Helene (2011), esta proporção ideal pode ser expressa em volume ou em massa, sendo preferível a determinação em unidades de massa seca de materiais por ser mais rigorosa e exata.

Utilizou-se, neste estudo, a dosagem sugerida por Rostirola (2013), onde o agregado e o cimento correspondem a 100 % e as quantidades de cal, alumínio em pó e água são proporcionais sobre os 100 % composto por agregado e cimento, conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11 – Traço referência utilizado para a produção de CCA.

Agregado	Cimento	Cal	Alumínio	Água
67 %	33 %	0,41 %	0,3 %	32 %

Fonte: Rostirola, 2013.

Adicionaram-se às composições as cinzas que obtiveram melhores resultados durante a etapa de caracterização e, portanto, possuem melhores características pozolânicas.

Para a produção de 10 corpos de prova por formulação, as quantidades de materiais necessárias estão descritas na Tabela 12.

Tabela 12 – Dosagem dos materiais para cada formulação de CCA.

Form.	Material (g)						
	Cimento	C.A.M	C.B.M.Q.	Areia	Cal	Alumínio	Água
A-15	718,08	126,72	-	1715,2	10,52	7,68	819,2
AB-7,5	718,08	63,36	63,36	1715,2	10,52	7,68	819,2
B-15	718,08	-	126,72	1715,2	10,52	7,68	819,2
AB-5	760,32	42,24	42,24	1715,2	10,52	7,68	819,2
A-7,5	781,44	63,36	-	1715,2	10,52	7,68	819,2
B-7,5	781,44	-	63,36	1715,2	10,52	7,68	819,2
C-100	844,80	-	-	1715,2	10,52	7,68	819,2

Fonte: Autor, 2019.

Em sua pesquisa, Rostirola (2013) estudou a estequiometria de cal e alumínio para a determinação da proporção necessária de CaO livre para o melhor rendimento da reação com o pó de alumínio. Definiu-se então, através do balanço de massas, que para cada 54 g de pó de alumínio são necessários 74 g de CaO na mistura.

4.2.3 Obtenção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados no LabValora/IDT/UNESC com o auxílio de Argamassadeira Mecânica de 5 litros da marca SoloCap. A mistura foi feita seguindo a metodologia proposta por Rostirola (2013), em velocidade baixa, na seguinte sequência:

- 1 – Homogeneização do cimento, cal e alumínio por 60 segundos;
- 2 – Adição da água durante 30 segundos;
- 3 – Mistura durante 30 segundos;
- 4 – Adição da areia durante 30 segundos;
- 5 – Homogeneização por 30 segundos.

Após a mistura, depositou-se o concreto fresco em moldes metálicos cilindros de 5 cm x 10 cm a uma altura de 9 cm da base para padronização, conforme Figura 11. Durante o período de uma hora esperou-se a mistura expandir (Figura 12) e então, com o auxílio de um fio de *nylon* nivelou-se o topo das amostras que ficaram então em repouso em temperatura ambiente por mais 23 horas, conforme Figura 13.

Figura 11 – Moldagem dos corpos de prova de CCA.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 12 – Processo de expansão do CCA durante 1 hora após a moldagem.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 13 – Corpos de prova de CCA retificados com fio de *nylon*



Fonte: Autor, 2019.

Em sequência ao período de secagem, realizou-se o desmolde dos corpos de prova (Figura 14) que foram então encaminhados para a autoclave emprestada pela indústria de Blocos de CCA da cidade de Morro da Fumaça, SC. O tempo de autoclavagem foi de 12 horas em temperatura de 187 °C e pressão de 12 kgf/cm².

Figura 14 – Corpo de prova de CCA após desmoldagem



Fonte: Autor, 2019.

Após o período de autoclavagem as formulações foram colocadas em estufa a 100 °C durante 7 dias para a perda total da umidade.

4.2.4 Caracterização dos corpos de prova

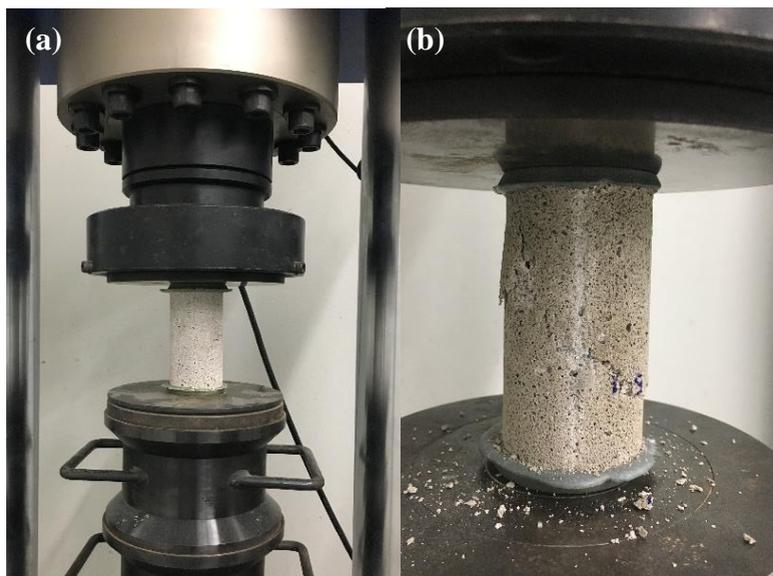
As diferentes formulações de CCA criadas foram caracterizadas quanto a sua resistência à compressão, sua densidade de massa aparente seca, suas características mineralógicas (fases cristalinas) e características termogravimétricas. Os métodos utilizados para determinar estas propriedades estão relacionados nos itens a seguir.

4.2.4.1 Resistência à compressão

Apesar de a norma indicada para a medição da resistência à compressão (R.C.) de blocos de concreto celular autoclavado ser a NBR 13440 (ABNT, 2013b), optou-se por utilizar a NBR 5739 (ABNT, 2007) devido ao formato dos corpos de prova confeccionados.

Após serem retirados da estufa, 5 corpos de prova de cada formulação foram capeados com enxofre e então submetidos ao ensaio de resistência à compressão. Este ensaio (Figura 15) foi realizado em máquina universal de ensaios mecânicos modelo PC200 da marca Emic no LMCC/IDT/UNESC. A idade em que os corpos de prova foram ensaiados é de 7 dias após saírem da autoclave e a taxa de incremento de tensão utilizada foi de 0,55 MPa/s.

Figura 15 – Fotografias de ensaio de resistência à compressão antes (a) e após (b) a ruptura do corpo de prova



Fonte: Autor, 2019.

A resistência à compressão de cada formulação é definida pela média aritmética das resistências à compressão atingidas por seus corpos de prova individualmente.

4.2.4.2 Densidade de Massa Aparente Seca

A densidade é a principal característica do concreto celular autoclavado pois influencia diretamente na maioria das propriedades do material, principalmente na sua resistência à compressão. Valores menores de densidade resultam em menores resistências mecânicas (BARRETO, 2012).

Determinada conforme pede a NBR 13440 (ABNT, 2013b), 5 corpos de prova de cada formulação foram separados para este ensaio. A densidade de massa aparente (ρ_a) foi definida pela média aritmética do resultado obtido por cada corpo de prova.

O cálculo de “ ρ_a ” para cada corpo de prova é definido pela Equação 3.

$$\rho_a = \frac{m}{V} \quad \text{Equação 3}$$

Onde “ ρ_a ” é a densidade de massa aparente seca de cada corpo de prova, “ m ” é a massa do corpo de prova, em kg, e “ V ” é o volume do corpo de prova, em m^3 .

4.2.4.3 Análise Mineralógica (DRX)

Com a finalidade de se identificar as fases cristalinas responsáveis pela resistência mecânica do CCA, principalmente a tobermorita, a análise mineralógica das 7 formulações seguiu a mesma metodologia utilizada na análise dos resíduos (item 4.2.1.2). Utilizou-se de gral e pistilo para moer as amostras a fim de serem colocadas no equipamento.

4.2.4.4 Análise Térmica (DTA/TG)

Para se corroborar os resultados da análise mineralógica, realizou-se análise térmica (DTA/TG) para as formulações de CCA através da mesma metodologia utilizada para a caracterização dos resíduos no item 4.2.1.3. Os corpos de prova também foram cominuídos com o auxílio de gral e pistilo para a realização deste ensaio.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

5.1.1 Análise Química (FRX)

Os resultados da análise química para o cimento e para as cinzas de atomizador (C.A.) e de biomassa *in natura* (C.B.) e queimada (C.B.Q.) estão descritos na Tabela 13.

Tabela 13 – Composição química dos resíduos estudados.

Elementos	Composição química das cinzas (% em massa)		
	C.A.	C.B.	C.B.Q.
SiO ₂	63,70	49,65	66,53
Al ₂ O ₃	22,04	9,94	14,20
Fe ₂ O ₃	3,25	4,07	6,54
K ₂ O	1,72	3,14	3,72
Na ₂ O	0,30	0,33	0,67
CaO	5,04	2,10	3,02
MgO	0,29	1,25	1,69
MnO	< 0,05	0,24	0,36
P ₂ O ₅	0,08	0,65	0,78
TiO ₂	0,92	0,95	1,58
SO ₃	Não consta	Não consta	Não consta
Perda ao fogo	2,39	26,97	< 0,39

Fonte: Autor, 2019.

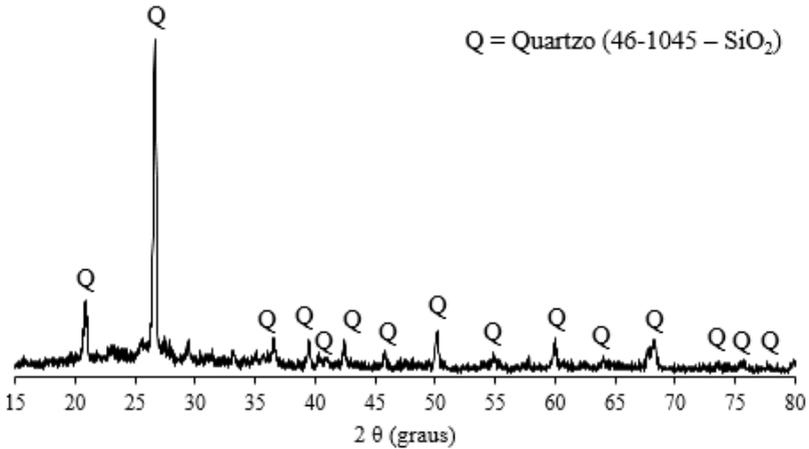
Conforme exigência da NBR 12653 (ABNT, 2014a), para que os resíduos da Classe E sejam classificados como materiais pozolânicos, a soma entre os óxidos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ deve ser maior que 50%, requisito atingido tanto para a cinza de atomizador quanto para a cinza de biomassa *in natura* e calcinada, cujas somas correspondem à 88,99 %, 63,66 % e 87,27 %, respectivamente.

Já para a presença de SO₃, não foram encontrados traços do componente em ambas as cinzas.

5.1.2 Análise Mineralógica (DRX)

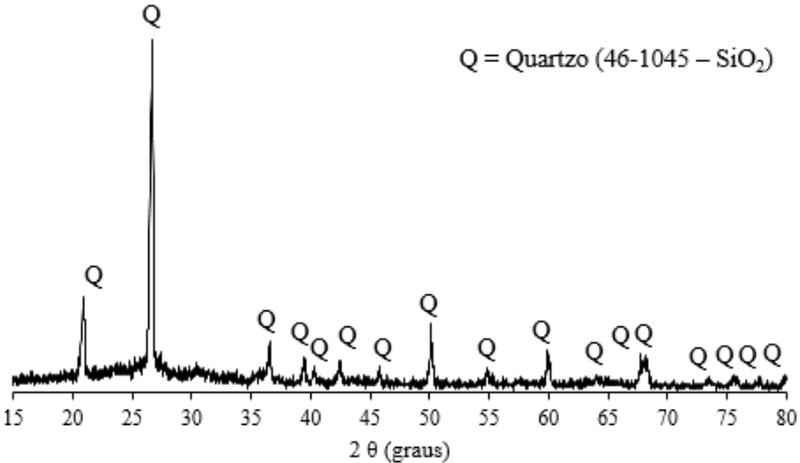
Os resultados das análises mineralógicas da cinza A *in natura*, da cinza B *in natura* e da cinza B queimada são apresentadas nas Figuras 16, 17 e 18, respectivamente.

Figura 16 – Análise mineralógica (DRX) da cinza A *in natura*



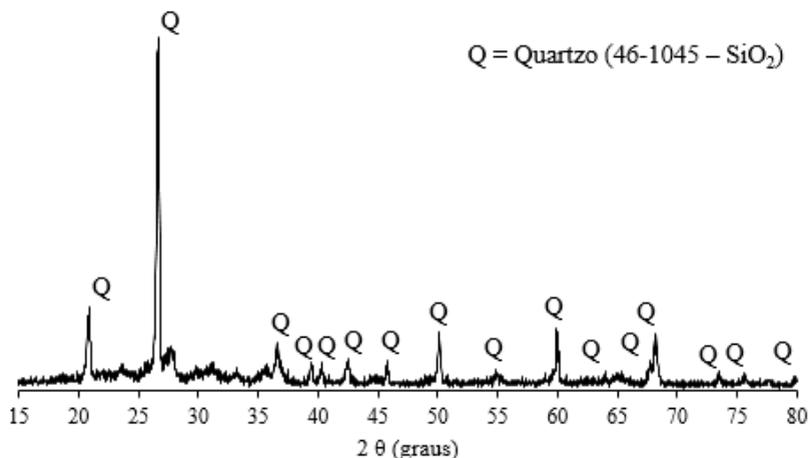
Fonte: Autor, 2019.

Figura 17 – Análise mineralógica (DRX) da cinza B *in natura*



Fonte: Autor, 2019.

Figura 18 – Análise mineralógica (DRX) da cinza B queimada.



Fonte: Autor, 2019.

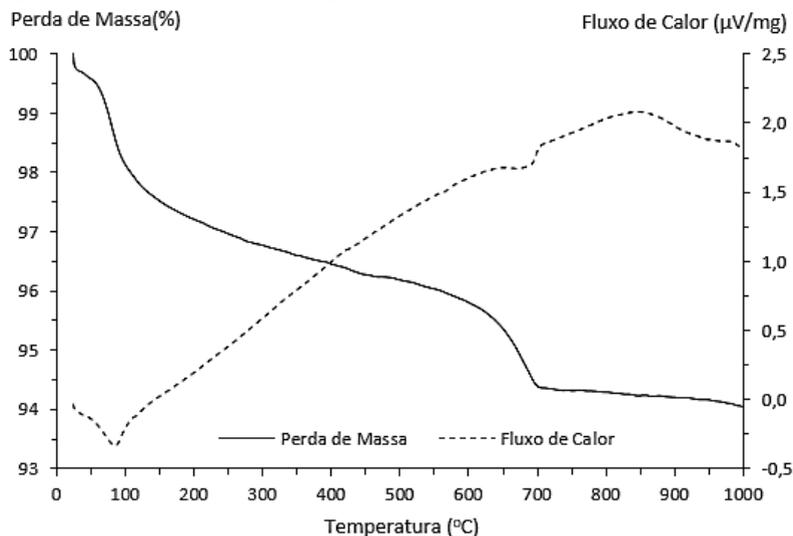
As análises mostraram que ambas as cinzas, tanto *in natura* como queimada (no caso da cinza B) possuem como principal fase cristalina o quartzo, corroborando a análise química apresentada no item 5.1.2.

A presença de quartzo (SiO_2) é de extrema importância na produção de CCA pois influencia diretamente na formação da tobermorita, responsável pelo ganho de resistência do concreto. Desta forma, as cinzas mostram-se então favoráveis à mistura neste quesito.

5.1.3 Análise Térmica (DTA/TG)

O comportamento térmico da cinza A é apresentado através das curvas DTA/TG da Figura 19.

Figura 19 – Análise DTA/TG para a Cinza A

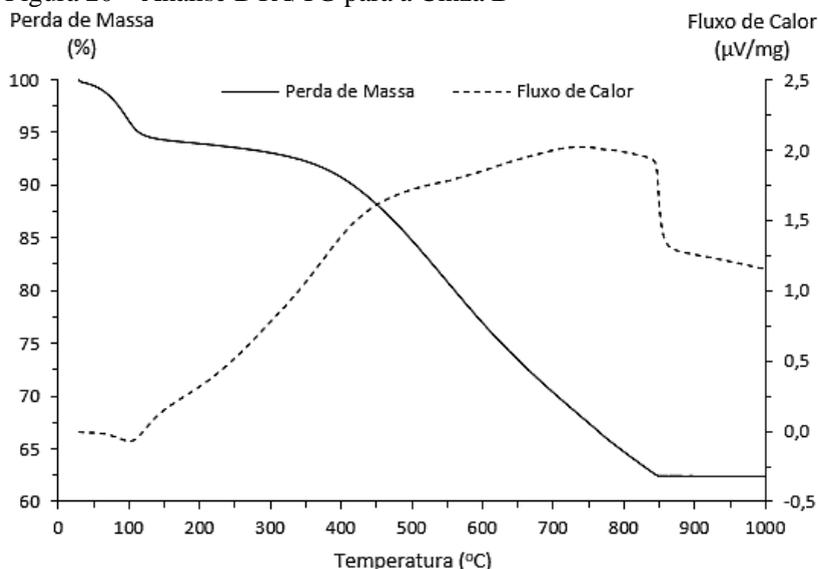


Fonte: Autor, 2019.

A análise térmica diferencial e termogravimétrica apresentou um resultado compatível com os resultados obtidos na análise química (FRX) para a cinza A. Através do gráfico DTA observa-se um pico endotérmico próximo aos 100 °C referente à perda de água (umidade) do material. Em torno de 700 °C o gráfico mostra outro evento endotérmico relativo à decomposição do carbonato de cálcio em gás carbônico. A perda de massa correspondente a este processo é menor do que a quantidade de cálcio apresentada na análise química indicando que parte deste componente já havia sido calcinado previamente. A perda de massa do material da temperatura ambiente até a temperatura de 1000 °C foi de 5,95 %. Esta perda de massa contínua está possivelmente ligada à saída de água adsorvida na amostra e à oxidação da matéria orgânica e decomposição dos hidróxidos.

Para a cinza B, os resultados na análise térmica são apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Análise DTA/TG para a Cinza B



Fonte: Autor, 2019.

Observa-se próximo dos 100 °C um evento endotérmico referente à saída de água incorporada no material em forma de umidade. A partir dos 300 °C até 850 °C ocorre o processo de queima do carbono. Durante este período ocorre liberação de calor, atingindo um pico máximo de 2,02 μV/mg em 738 °C. Acima 850 °C este processo termina resultando em uma massa residual de 62,43 %.

Através desta análise conclui-se que, para a eliminação de toda a matéria orgânica da cinza B, a temperatura de calcinação deve ser de no mínimo 850 °C. Optou-se então por fazer a queima em 900 °C para garantir que não haja resquícios deste componente no material.

5.1.4 Teor de Umidade

As cinzas de atomizador e as cinzas de biomassa apresentaram, respectivamente, teor médio de umidade de 3,560% e 49,489%. Ambas não se enquadram no requisito químico estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014a) que afirma que o mesmo deve ser menor que 3%, porém a cinza de atomizador chega muito próximo.

Para que possam ser utilizadas como materiais pozolânicos na substituição do cimento, sem nenhum tipo de tratamento prévio - como

por exemplo a calcinação - é necessário que ambos os resíduos passem por estufa à 100 °C para a retirada do excesso de água.

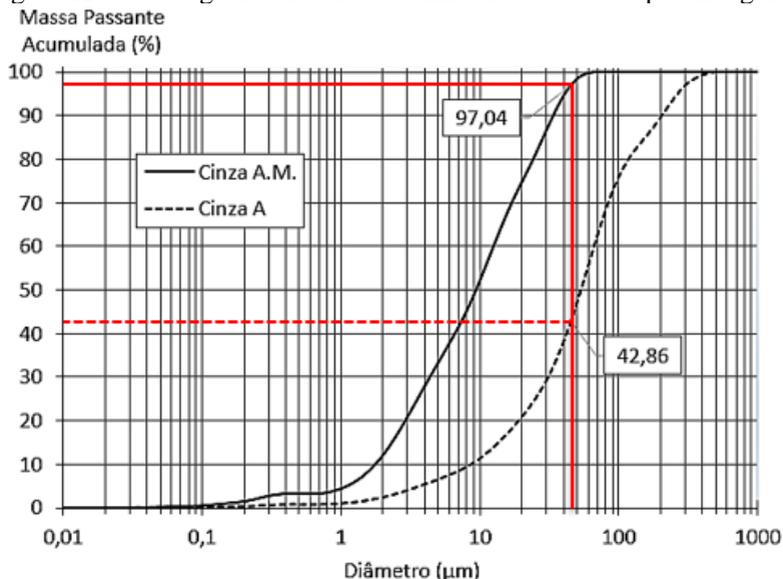
5.1.5 Perda ao Fogo

Devido à presença de matéria orgânica, apenas a cinza de biomassa (C.B.) não passou no requisito da NBR 12653 (ABNT, 2014a) para a perda ao fogo. A cinza de atomizador *in natura* apresentou perda ao fogo de 2,39 %, enquanto à cinza de biomassa *in natura* atingiu 26,97 %. A cinza B só pode ser classificada como pozolana, segundo o requisito de perda ao fogo, após sua queima já que apresenta então perda de massa de 0,39 %, valor menor que os 6 % permitidos pela norma.

5.1.6 Granulometria

Para que possam ser consideradas como materiais pozolânicos, a NBR 12653 (ABNT, 2014a) exige que a porcentagem de massa retida na peneira de 45 µm seja de no máximo 20 %. A Figura 21 apresenta os resultados da análise granulométrica para a Cinza A *in natura* e após passar pelo processo de cominuição.

Figura 21 – Curva granulométrica da cinza A *in natura* e após moagem

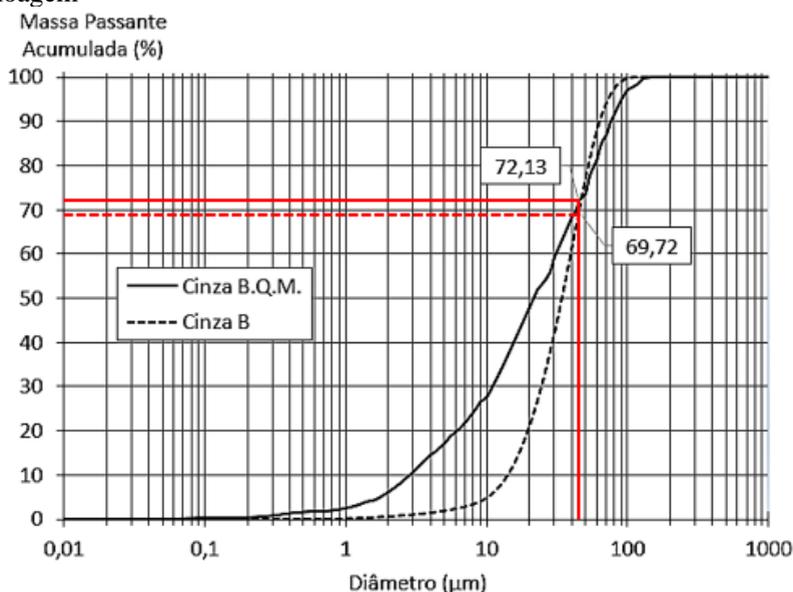


Fonte: Autor, 2019.

As curvas granulométricas da Figura 21 destacam os valores de massa passante acumulada na peneira de 45 μm . A porcentagem de massa retida nesta peneira é de 57,14 % para a cinza *in natura* (C.A.), valor 185,7 % maior que o admitido pela NBR 12653 (ABNT, 2014a). Este resultado mostra a necessidade da cominuição desta cinza que, após a moagem obteve apenas 2,96 % de massa retida.

Os resultados da análise granulométrica da cinza B *in natura* e moída após o processo de queima são apresentados na Figura 22.

Figura 22 – Curva granulométrica da cinza B *in natura* e após queima e moagem



Fonte: Autor, 2019.

Antes da moagem, a cinza B *in natura* mostrou-se mais fina que a cinza A *in natura*, apresentando 30,28 % de material retido na peneira de 45 μm . Novamente observou-se a necessidade de moagem do resíduo e, após este processo, ainda ficaram retidos na peneira 27,87 % de material. Apesar de este resultado ser 39,35 % maior do que o requerido pela NBR 12653 (ABNT, 2014a), optou-se por continuar a pesquisa com esta granulometria de C.B.M.Q. para se padronizar processo de moagem igual para C.A e C.B.

5.1.7 Massa Específica

A análise de massa específica foi feita para as cinzas após serem realizados os tratamentos que se mostraram necessários nos outros ensaios de caracterização de materiais pozzolânicos, ou seja, a moagem de ambos os resíduos e a queima de C.B. Para a cinza A moída (C.A.M.), o valor da massa específica resultou em 2,54 g/cm³, enquanto a cinza B moída e queimada (C.B.M.Q) obteve 2,69 g/cm³. Em comparação com a massa específica do cimento CP V-ARI de 3,09 g/cm³ (Tabela 5), nota-se que os valores são menores, indicando que são mais leves.

5.1.8 Atividade pozzolânica com cal aos 7 dias

Conforme os resultados obtidos nas análises granulométricas, conclui-se que as cinzas necessitariam passar por cominuição para ser utilizadas nas misturas de CCA como agente de pozzolanicidade. Desta forma, o ensaio de atividade pozzolânica com cal aos 7 dias foi realizado apenas para as cinzas A e B moídas e para a cinza B moída e queimada.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados de resistência à compressão para o ensaio de Atividade Pozzolânica com cal aos 7 dias

	Resistência à Compressão (MPa)		
	C.A.M.	C.B.M.	C.B.M.Q.
CP1	8,22	0,75	5,37
CP2	7,38	0,75	5,42
CP3	7,94	0,78	4,96
Média	7,85	0,76	5,25
Desvio Padrão	0,43	0,02	0,25

Fonte: Autor, 2019.

A NBR 12653 (ABNT, 2014a) exige que, para que possam ser considerados pozzolânicos, os materiais devem atingir resistência mínima de 6 MPa quando misturados em argamassa de cal. A cinza A moída (C.A.M) atingiu este requisito ultrapassando este valor em 30,78 %. Já a cinza B não atingiu o resultado esperado nem quando apenas moída (C.B.M.) ou quando moída e queimada (C.B.M.Q).

Apesar de não ter atingido o valor mínimo de resistência, a C.B.M.Q chega muito próximo, atingindo um valor apenas 12,50 % menor que o esperado. Isto indica que, apesar de não poder ser

classificada como pozolana, esta cinza, após tratamento térmico e físico, apresenta características próximas a este tipo de material.

Nota-se também através da Tabela 13 como a presença de matéria orgânica afeta significativamente a resistência da mistura, conforme citado por Tafarel *et al.* (2016).

5.1.9 Índice de Desempenho com cimento aos 28 dias

Como os resultados para o ensaio de atividade pozolânica com cal já não se mostraram bons para a cinza C.B.M., o ensaio para a determinação do índice de desempenho com cimento aos 28 dias foi realizado apenas com as cinzas C.A.M e C.B.M.Q. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão para a argamassa de referência e para a argamassa com adição de cinzas são mostrados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados de resistência à compressão para o ensaio de Índice de Desempenho com Cimento aos 28 dias

	Resistência à Compressão (MPa)		
	Ref.	C.A.M.	C.B.M.Q.
CP1	30,66	26,26	24,45
CP2	32,29	29,28	20,51
CP3	24,88	35,10	21,83
CP4	30,09	30,73	21,86
Média	29,48	30,34	22,16
Desvio Padrão	3,21	3,68	1,65

Fonte: Autor, 2019.

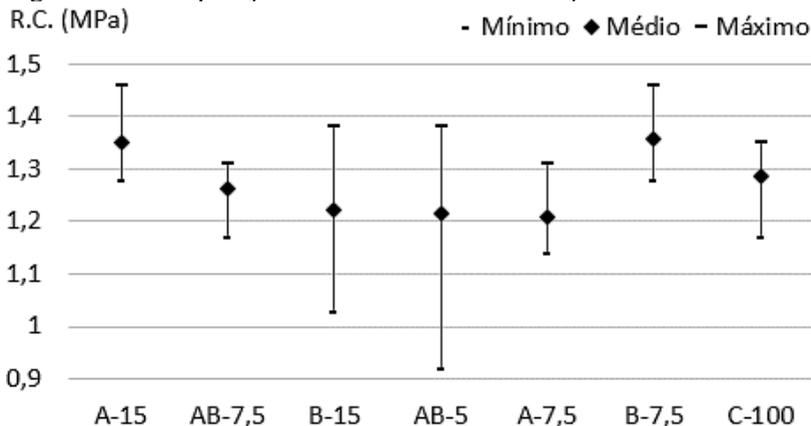
Para serem considerados como pozolanas, a NBR12653 (ABNT, 2014a) diz que a resistência à compressão das argamassas com cinzas deve ser maior ou igual a 90 % do valor de resistência obtido para a argamassa referência. A C.A.M. superou em 2,92 % a resistência referência, podendo novamente ser classificada como material pozolânico. Já C.B.M.Q. obteve apenas 75,17 % do valor necessário. Este resultado mostra que, assim como no ensaio de atividade pozolânica com cal, apesar de possuir características de materiais pozolânicos, não podemos enquadrar esta cinza como tal.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FORMULAÇÕES DE CCA DESENVOLVIDAS

5.2.1 Resistência à compressão

A Figura 23 apresenta os resultados médios de resistência à compressão (R.C.) das formulações de CCA elaboradas e seus respectivos desvios padrões.

Figura 23 – Comparação entre a R.C. das formulações de CCA



Fonte: Autor, 2019.

Dentre todas as formulações, a que apresentou melhor resistência foi a formulação B-7,5, sendo que as formulações A-15 e B-7,5 apresentaram resistência maior (na ordem de +4,98 % e +5,53 %, respectivamente) enquanto as formulações AB-7,5, B-15, AB-5 e A-7,5 apresentaram resistências menores (até -5,469%).

A formulação A-15 substitui o cimento em 15 % por C.A.M. e a formulação B-7,5 em 7,5 % por C.B.M.Q, isto indica que o tipo de cinza utilizada não influencia diretamente dos resultados, porém consegue-se substituir maior quantidade de cimento quando se utiliza C.A.M. Possivelmente isto se deve ao fato de a cinza A moída se enquadrar nos requisitos químicos e físicos da NBR 12653 (ABNT, 2014a) e desta forma poder ser considerada um material pozolânico.

Todas as formulações obtiveram valor médio de resistência suficiente para serem enquadradas na classe comercial C12 que, conforme a Tabela 2, exige um valor mínimo de 1,2 MPa. No entanto, a formulação

AB-5 não obteve o valor mínimo isolado de 1 MPa para se encaixar nesta categoria.

Efetuuou-se análise estatística através do *software* “Statística 7” com o intuito de identificar se os resultados são estatisticamente diferentes entre si, conforme a Tabela 16.

Tabela 16 – Análise de variância dos modelos de regressão para R.C. com $\alpha=0,05$

Modelo	SQ	GL	MQ	F	p	R²
Linear	0,0012	2	0,0006	0,1071	0,9009	0,0508
Quadrático	0,0201	3	0,0067	3,2414	0,3827	0,9115

SQ: soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: médias quadráticas; F: fator de Fisher; p: teste de confiabilidade; R²: coeficiente de determinação.

Fonte: Autor, 2019.

A análise de variância dos modelos de regressão para a variável R.C. indicou que, para um nível de confiança de 95 % ($\alpha=0,05$), nenhum modelo mostra-se válido. No entanto, o alto valor do fator de Fisher (F) indica que há, sim, diferenças estatísticas entre os resultados de resistência.

Analisando-se a princípio o modelo quadrático, e buscando-se melhorar a significância do modelo (valor “p”), com o auxílio da Tabela 17 observa-se que os fatores que possuem menor significância sobre os resultados são os fatores AC e BC.

Tabela 17 – Análise do modelo quadrático de regressão para R.C. com $\alpha=0,05$

Fator	Coefficiente	Erro Padrão	t	p
(A) Cimento	1,2890	0,0453	28,4234	0,0224
(B) Cinza A	1,3530	0,0453	29,8347	0,0213
(C) Cinza B	1,2250	0,0453	27,0122	0,0236
AB	-0,5192	0,2084	-2,4909	0,2430
AC	0,3328	0,2084	1,5963	0,3563
BC	-0,1672	0,2084	0,8023	0,5696

t: estatística de teste de hipóteses; p: teste de confiabilidade.

Fonte: Autor, 2019.

Ao se ignorar os fatores AC e BC e refazer a análise de variância (Tabela 18) nota-se que o valor de “p” para o modelo quadrático obteve uma melhora, porém ainda não atinge 95 % de significância.

Tabela 18 – Análise de variância dos modelos de regressão para R.C. com $\alpha=0,05$ e ignorando-se os fatores AC e BC.

Modelo	SQ	GL	MQ	F	p	R ²
Linear	0,0012	2	0,0006	0,1071	0,9009	0,0508
Quadrático	0,0133	1	0,0133	4,4519	0,1254	0,6179

SQ: soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: médias quadráticas; F: fator de Fisher; p: teste de confiabilidade; R²: coeficiente de determinação.

Fonte: Autor, 2019.

Admitindo-se 85 % de confiabilidade para os resultados ($\alpha=0,15$), o modelo quadrático mostra-se o ideal e assim todos os fatores analisados tornam-se significativos, conforme Tabelas 19 e 20. Ainda conforme Tabela 19, o valor de R² para o modelo quadrático indica que o modelo matemático concorda com os valores experimentais para a análise de RC em 61,79 % dos casos.

Tabela 19 – Análise de variância dos modelos de regressão para R.C. com $\alpha=0,15$.

Modelo	SQ	GL	MQ	F	p	R ²
Linear	0,0012	2	0,0006	0,1071	0,9009	0,0508
Quadrático	0,0133	1	0,0133	4,4519	0,1254	0,6179

SQ: soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: médias quadráticas; F: fator de Fisher; p: teste de confiabilidade; R²: coeficiente de determinação.

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 20 – Análise do modelo quadrático de regressão para R.C. com $\alpha=0,15$

Fator	Coefficiente	Erro Padrão	t	p
(A) Cimento	1,3204	0,0496	26,5906	0,0001
(B) Cinza A	1,3344	0,0496	26,8725	0,0001
(C) Cinza B	1,2389	0,0451	27,4927	0,0001
AB	-0,5266	0,2496	-2,1099	0,1254

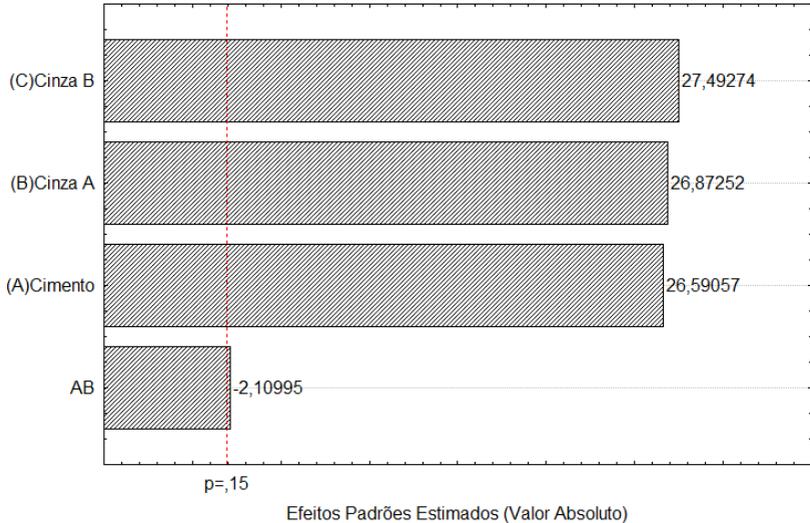
t: estatística de teste de hipóteses; p: teste de confiabilidade.

Fonte: Autor, 2019.

Utilizado para quantificar e qualificar quais os componentes significativos na análise estatística de um certo parâmetro (LINS, 1993), o gráfico de Pareto indicou que os três componentes (cimento, cinza A e cinza B) possuem igual importância na determinação da resistência à

compressão, e a combinação entre cimento e a cinza A (fator AB) apesar de influenciar menos, também é significativa, conforme mostra a Figura 24.

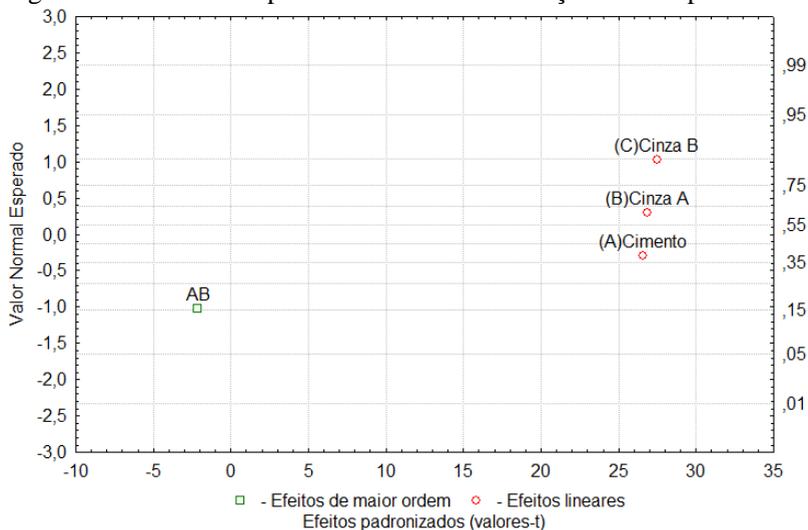
Figura 24 – Gráfico de Pareto dos componentes para R.C.



Fonte: Autor, 2019.

A Figura 25 ilustra o gráfico de probabilidade de distribuição normal (*P-plot*) dos componentes sobre a variável R.C. Nela observa-se que o cimento e as cinzas A e B comportam-se de forma linear na análise, já o fator AB apresenta-se como efeito de ordem maior e faz com que o modelo não se enquadre como uma distribuição normal.

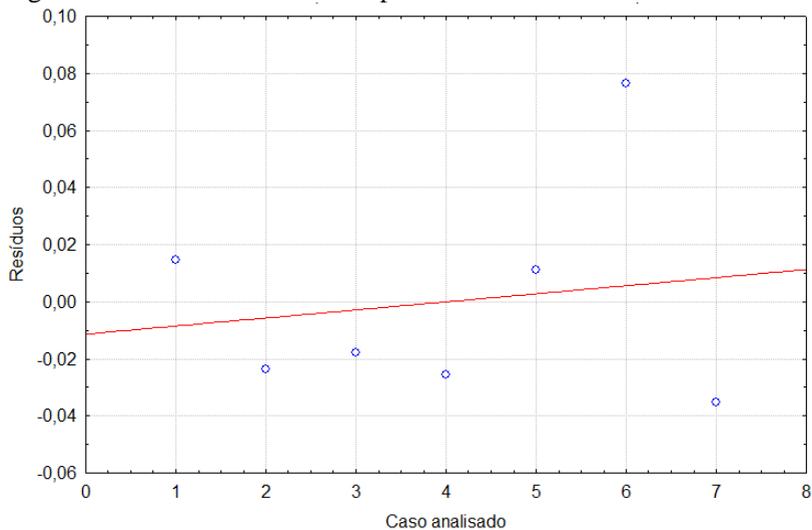
Figura 25 – Gráfico de probabilidade de distribuição normal para R.C.



Fonte: Autor, 2019.

Analisaram-se os resíduos em função do número de casos para verificar a independência das observações do modelo, conforme Figura 26.

Figura 26 – Análise dos resíduos para R.C.

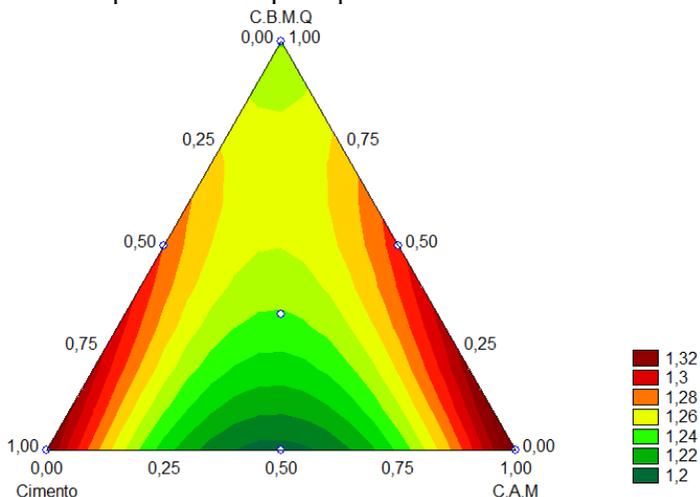


Fonte: Autor, 2019.

O comportamento disperso e homogêneo dos resíduos em torno da linha de erro zero indica que não há correlação entre os erros da metodologia, mostrando que o modelo quadrático mantém-se válido para a análise de R.C.

A Figura 27 apresenta a superfície de resposta para a variável analisada.

Figura 27 – Superfície de resposta para R.C.



Fonte: Autor, 2019.

A superfície de resposta para R.C. indica que, maiores valores de resistência à compressão são obtidos conforme aumenta-se a quantidade de cimento nas misturas ou de C.A.M. A cinza de biomassa (C.B.M.Q) tende a diminuir os valores de resistência a compressão do CCA.

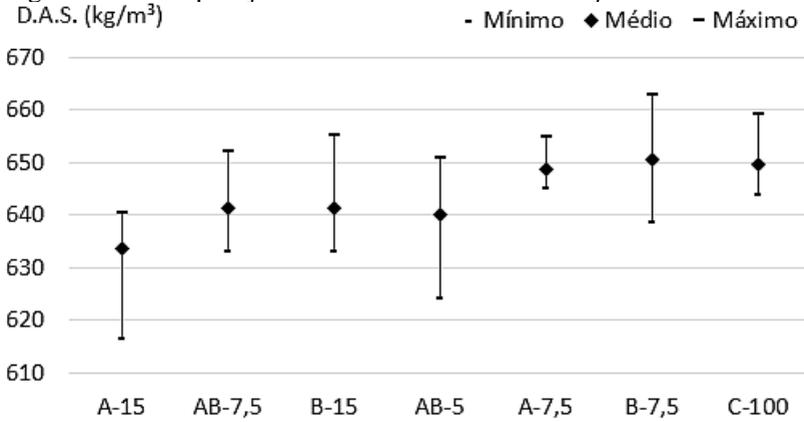
A Equação 4 representa a Resistência à Compressão (R.C.) em 61,79 % dos casos.

$$\text{R.C.} = 1,320 * \text{Cimento} + 1,334 * \text{C.A.M.} + 1,239 * \text{C.B.M.Q.} - 0,527 * \text{Cimento} * \text{C.A.M.} \quad \text{Equação 4}$$

5.2.2 Densidade de Massa Aparente Seca

Os resultados obtidos no ensaio de Densidade Aparente Seca (D.A.S.) estão apresentados na Figura 28. Nela podem se observar a densidade média de cada formulação juntamente com seu desvio padrão.

Figura 28 – Comparação entre a D.A.S. das formulações de CCA



Fonte: Autor, 2019.

Através dos resultados nota-se que a formulação que apresentou melhor densidade (tratando-se de um concreto leve) foi a formulação A-15. Em comparação com a formulação de referência C-100, pode-se que notar que a substituição do cimento pelas cinzas é favorável pois diminuiu a densidade do concreto para a maioria das formulações (exceto B-7,5). Os valores de densidade encontrados permitem classificar as formulações na classe comercial C45 com densidade menor que 650 kg/m³. Esta classificação, porém, não confere com a classificação das formulações para a resistência à compressão. A granulometria da areia utilizada é a principal culpada pelos valores maiores de densidade aparente seca.

Realizou-se análise estatística também através do *software* “Statistica 7” e a Tabela 21 mostra que o modelo de regressão que mais consegue representar os resultados é o modelo linear, adotando-se nível de significância de 90 % ($\alpha=0,10$). O valor de R² indica que, matematicamente, o modelo quadrático é compatível com 75,48 % dos casos.

Tabela 21 – Análise de variância dos modelos de regressão para D.A.S. com $\alpha=0,10$.

Modelo	SQ	GL	MQ	F	p	R²
Linear	152,1320	2	76,0660	6,1575	0,0601	0,7548
Quadrático	17,9266	3	5,9755	0,1898	0,8946	0,8438
Cúbico	31,4868	1	0,0000	-	-	1,0000

SQ: soma quadrática; GQ: graus de liberdade; MS: médias quadráticas; F: fator de Fisher; p: teste de confiabilidade; R²: coeficiente de determinação.

Fonte: Autor, 2019.

Os coeficientes da equação que corresponde à D.A.S. do CCA estão ilustrados na Tabela 22 e são todos significativos para o modelo linear.

Tabela 22 – Análise do modelo linear de regressão para D.A.S. com $\alpha=0,10$

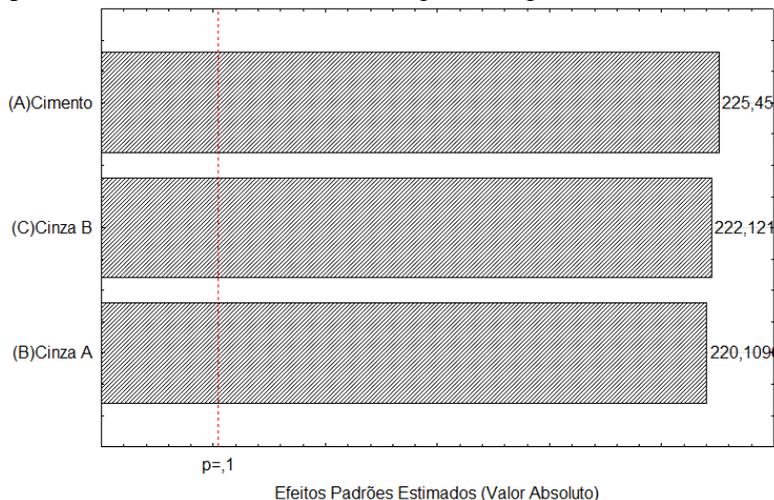
Fator	Coefficiente	Erro Padrão	t	p
(A) Cimento	652,6039	2,8902	225,4536	0,0000
(B) Cinza A	636,1587	2,8902	220,1096	0,0000
(C) Cinza B	641,9727	2,8902	222,1212	0,0000

t: estatística de teste de hipóteses; p: teste de confiabilidade.

Fonte: Autor, 2019.

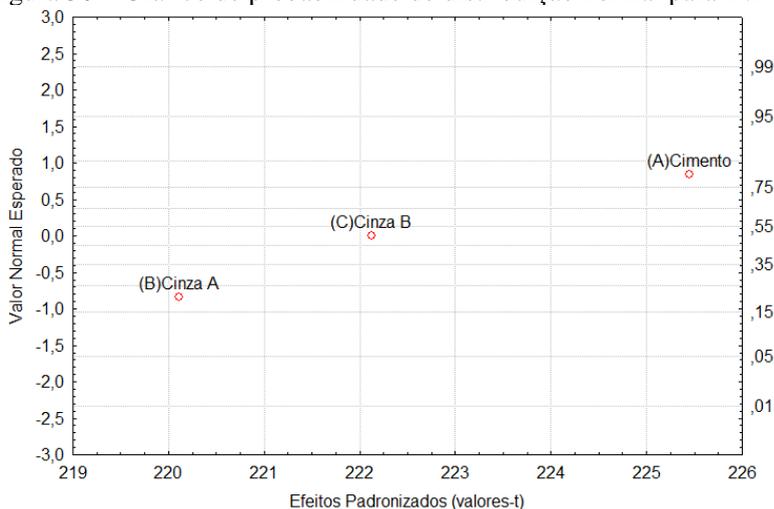
O gráfico de Pareto (Figura 29) indicou que os três elementos (cimento, cinza A e cinza B) possuem mesma grandeza de importância na determinação da densidade. E ainda, através do gráfico de probabilidade de distribuição normal (*P-plot*) dos componentes sobre a variável D.A.S. observa-se que, para o modelo linear, os componentes comportam-se como uma distribuição normal (Figura 30).

Figura 29 – Gráfico de Pareto dos componentes para D.A.S.



Fonte: Autor, 2019.

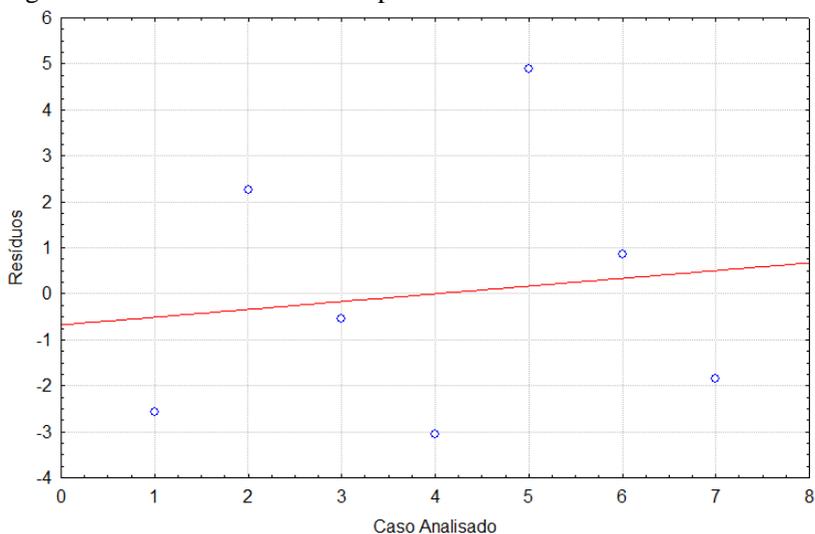
Figura 30 – Gráfico de probabilidade de distribuição normal para D.A.S.



Fonte: Autor, 2019.

Na Figura 31 observa-se a distribuição dos resíduos por caso analisado. A dispersão dos pontos ao redor da linha de erro zero indica que não há correlação entre os erros da metodologia, fator favorável para a análise estatística.

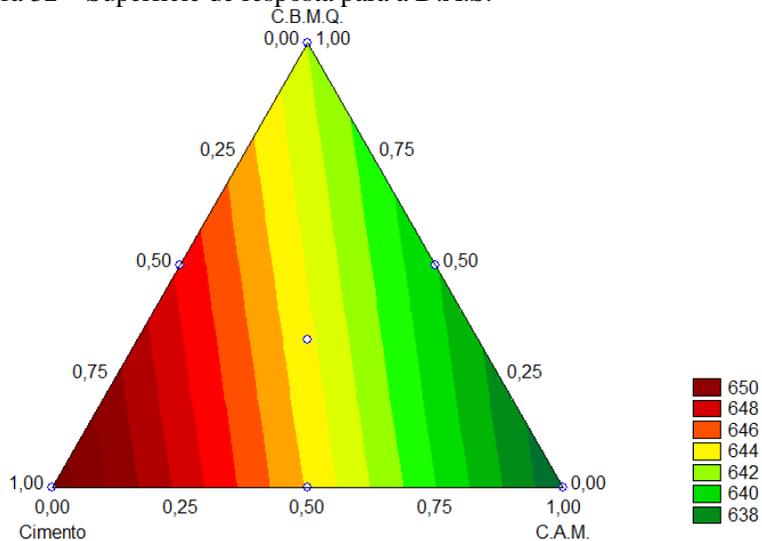
Figura 31 – Análise dos resíduos para D.A.S.



Fonte: Autor, 2019.

A superfície de resposta para a variável D.A.S. está ilustrada na Figura 32. A imagem indica que, quanto maior a quantidade de cimento nas composições, maior a densidade do CCA. O componente que em maiores quantidades ajuda na diminuição da densidade é a C.A.M, provavelmente devido a sua maior finura. De modo geral, a substituição do cimento por C.A.M. e C.B.M.Q. mostra-se favorável pois tende a reduzir a densidade aparente do material em estado seco.

Figura 32 – Superfície de resposta para a D.A.S.



Fonte: Autor, 2019.

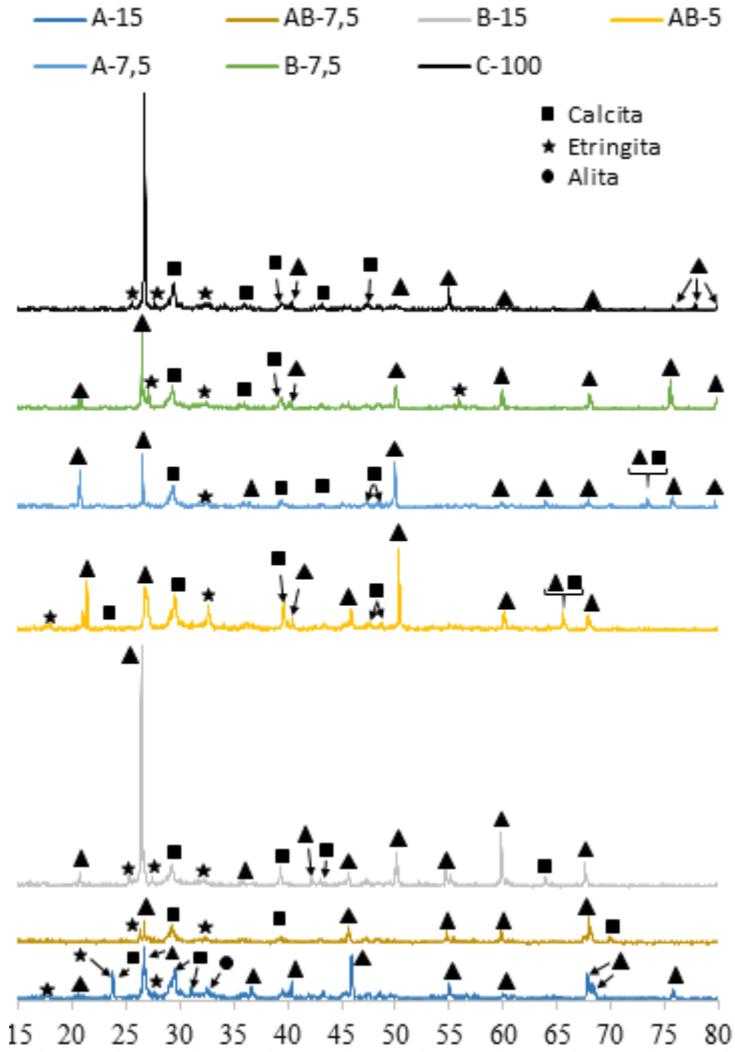
A equação que representa a Densidade Aparente Seca (D.A.S) das formulações é:

$$\text{D.A.S.} = 651,604 \cdot \text{Cimento} + 636,159 \cdot \text{C.A.M.} + 641,973 \cdot \text{C.B.M.Q.} \quad \text{Equação 5}$$

5.2.3 Análise Mineralógica (DRX)

A Figura 33 ilustra a análise DRX para as 7 formulações de CCA estudadas com as fases cristalinas formadas em cada uma delas.

Figura 33 – Análise DRX para as formulações de CCA



Fonte: Autor, 2019.

Observa-se que as principais fases encontradas em todas as formulações foram o quartzo (SiO_2) e a calcita (CaCO_3). Ambos os componentes são encontrados no cimento *Portland* antes de entrar em contato com a água.

Foi possível observar também em todas as formulações a presença da etringita. Conforme visto no item 3.3.2.1, a etringita é a fase cristalina que se forma nos minutos iniciais de hidratação do cimento. Como, no momento da análise das amostras de CCA todas as formulações já haviam passado pelo processo de cura, conclui-se que a formação da etringita ocorreu de forma tardia.

Segundo Melo (2010) e Barbarulo *et al.* (2005), a formação de etringita tardia costuma ocorrer em concretos curados termicamente a elevadas temperaturas (acima de 70 °C), como é o caso do CCA. Este processo pode causar expansão e fissuração no concreto e, no caso do CCA, possivelmente aumenta o tamanho dos seus poros.

A tobermorita, fase responsável pelo ganho de resistência do CCA, não foi encontrada em nenhuma das formulações. O motivo do não aparecimento destes cristais não é conclusivo, porém pode ser atribuído a alguns fatores.

Ishida, Ishida e Mitsuda (1995) afirmam que, quanto menores as partículas de areia, mais rápida é a formação da tobermorita. Como a areia utilizada (normal nº 100) é de granulometria maior que a usada na fabricação de blocos de CCA comerciais, poderia ser necessário maior tempo de autoclavagem para que este mineral fosse formado.

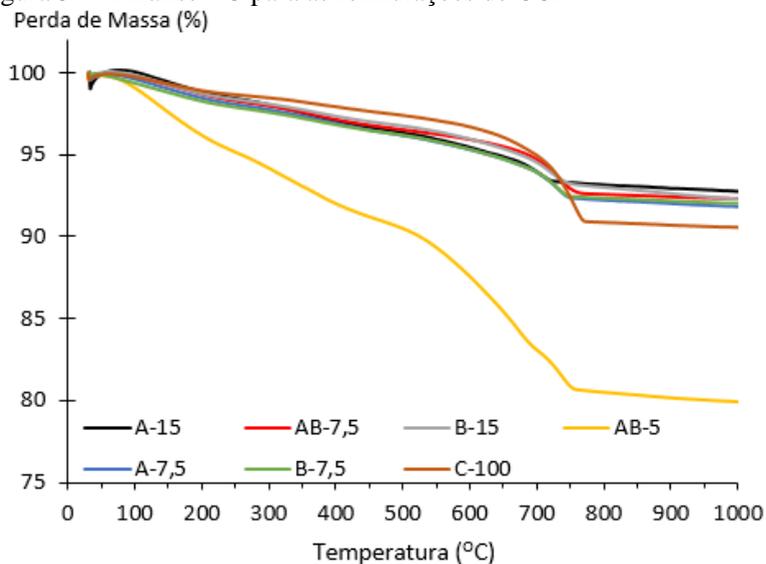
Já Melo (2010) e Mattonai *et al.* (2018) mencionam em seus estudos que a cristalinidade das fases formadas pode ser prejudicada devido a moagem do material durante a preparação da amostra para o ensaio.

Ainda, Hauser, Eggenberger e Mumenthaler (1999) sugerem que a presença de cinzas no CCA é responsável por retardar a sequência da reação hidrotérmica, fazendo com que o C-S-H semicristalino formado não seja convertido em tobermorita bem cristalizada.

5.2.4 Análise Térmica (DTA/TG)

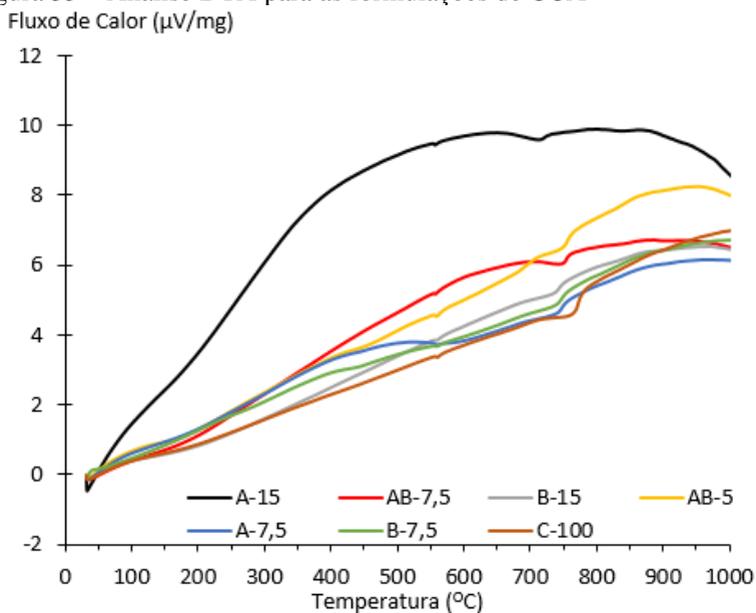
Os resultados de perda de massa (TG) e fluxo de calor (DTA) da análise térmica das formulações são apresentados nas Figuras 34 e 35 respectivamente.

Figura 34 – Análise TG para as formulações de CCA



Fonte: Autor, 2019.

Figura 35 – Análise DTA para as formulações de CCA



Fonte: Autor, 2019.

Através dos gráficos de DTA/TG observa-se que todas as formulações de CCA apresentam comportamentos térmicos semelhantes. Pode-se visualizar inicialmente uma pequena perda mássica e um pico endotérmico próximo aos 50 °C, referente à evaporação de água das amostras. Isto indica que, no intervalo de tempo entre a retirada dos corpos de prova da estufa, preparação das amostras e análise térmica, todas as formulações absorveram umidade. Em 573 °C nota-se um pico endotérmico referente a transformação de Quartzo- α em Quarto- β , corroborando os resultados encontrados na análise mineralógica.

Observa-se que a perda de massa é acentuada entre 675 e 800°C. Esta faixa de temperatura é típica da decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3), o que se comprova pela presença de calcita nas análises de DRX. Segundo Kohobhange *et al.* (2019), a conversão da calcita em óxido de cálcio inicia-se de forma lenta até atingir a temperatura de 750°C quando tem-se um pico de absorção de calor deste processo, que em sequência é encerrado.

6. CONCLUSÃO

Realizou-se nesta pesquisa um estudo sobre a possibilidade de substituição parcial do cimento *Portland* em concreto celular autoclavado (CCA) por resíduos sólidos industriais, sendo eles a cinza de atomizador (C.A.) e a cinza de biomassa (C.B.).

Inicialmente caracterizaram-se os resíduos quanto às suas propriedades químicas e físicas para enquadrá-los como pozolana. Em relação a esta caracterização conclui-se que ambas as cinzas possuem como constituinte principal a sílica e a alumina. Quanto aos parâmetros exigidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014a), nem C.A. nem C.B. podem ser consideradas pozolanas quando utilizadas *in natura*, necessitando serem moídas previamente e, no caso de C.B., queimada para a eliminação da matéria orgânica.

Após serem processadas e caracterizadas, apenas a cinza C.A.M. se enquadrou em todas as exigências da NBR 12653 (ABNT, 2014a) estudadas e pode, então, ser considerada uma pozolana. A cinza C.B.M.Q. obteve resultados muito próximos aos esperados, apenas não atendendo aos requisitos de granulometria, atividade pozolânica com cal aos 7 dias e índice de desempenho com cimento aos 28 dias. Optou-se por utilizá-la da mesma forma nas misturas de CCA pois, apesar de não ser um material pozolânico, possui características muito próximas a este tipo de material.

A substituição do cimento *Portland* pelas cinzas mostrou-se favorável para todas as formulações estudadas. Em relação à resistência à compressão (R.C.), comparadas com a formulação de referência, as misturas que obtiveram melhores resultados foram A-15 e B-7,5, com valores de resistência 4,98 % e 5,53 % maiores que C-100 (1,28 MPa), respectivamente. As formulações AB-7,5, B-15, AB-5 e A-7,5 resultaram em valores de resistência 4,30 % menores, em média, que C-100. O valor mínimo de resistência encontrado foi de 1,21 MPa para AB-5 e A-7,5 e, desta forma, todas as formulações obtiveram resistência mínima de 1,20 MPa exigida pela NBR 13438 (ABNT, 2013a) para a fabricação de blocos de CCA.

A análise estatística mostrou que os três fatores da mistura (cimento, C.A.M e C.B.M.Q) são igualmente relevantes para a resistência à compressão, e a interação entre o cimento e C.A.M. também é significativa. O modelo de regressão que melhor representa a variável é o modelo quadrático e os valores de resistência tendem a melhorar conforme o aumento da quantidade de cimento e de C.A.M. nas misturas.

A densidade de massa aparente seca (D.A.S.) diminui em praticamente todas as formulações estudadas em comparação com a

referência (C-100). Apenas B-7,5 obteve um valor 0,15 % maior. O menor valor de densidade foi alcançado por A-15 (633,59 kg/m³), resultado 2,49 % menor que a referência. Os resultados são menores que o máximo permitido pela NBR 13438 (ABNT, 2013a) que admite até 650 kg/m³ de densidade aparente seca para o CCA comercializado em forma de blocos.

A análise estatística mostrou que a variável D.S.A. comporta-se como uma distribuição normal e o modelo de regressão que melhor descreve os resultados é o modelo linear. Todos os componentes da mistura possuem relevância sendo que, quanto maiores as quantidades de cimento no CCA, maior tende a ser a densidade do material.

Em relação aos requisitos físicos de blocos de CCA comercializados, não foi possível enquadrar as formulações em nenhuma das classes existentes. Quanto à resistência à compressão, as formulações enquadram-se na classe C12 (> 1,2 MPa), já para a densidade aparente seca, na classe C45 (< 650 kg/m³). Para que sejam classificadas na classe C12, a densidade deveria ser menor que 450 kg/m³. Para a obtenção de menores valores de densidade é necessário que se utilizem tamanhos de grãos menores para a areia, como sugerem as bibliografias (BONOTTO, 2005; ROSTIROLA, 2013).

A análise mineralógica das formulações apontou como principais fases cristalinas o quartzo, a calcita e a etringita, resultados corroborados pela análise térmica.

De forma geral, conclui-se que a formulação que apresentou melhores resultados quanto à resistência à compressão e à densidade foi A-15, que substituiu em 15 % a massa de cimento *Portland* no CCA. Esta formulação também é a mais indicada para a fabricação comercial de blocos de CCA pois, além de substituir o cimento em maiores quantidades, utiliza a cinza de atomizador, que precisa ser apenas moída antes de ser adicionada à mistura, tornando o processo mais viável para os fabricantes.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da realização da presente pesquisa, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Utilizar granulometria menor de areia (passante na peneira de 150 μm) para tentar enquadrar as formulações nos critérios comerciais de resistência à compressão e densidade de massa aparente seca.
- Diminuir a granulometria da cinza de biomassa queimada a fim de tentar classifica-la como material pozolânico e analisar se as características do CCA melhoram para as formulações com C.B.M.Q.
- Analisar a condutividade térmica das formulações para determinar suas características como isolante térmico.

REFERÊNCIAS

AMARAL, K. J. do. **Uso de água em indústria de papel e celulose sob a ótica da gestão de recursos hídricos**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS ESPECIAIS, LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS - ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>>. Acesso em: 09 dez. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13438**: Blocos de concreto celular autoclavado - Requisitos. Rio de Janeiro, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13440**: Blocos de concreto celular autoclavado – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.
NBR 15894-3: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta
Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro, 2010b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.
NBR 15985: Materiais pozolânicos–Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.
NBR NM 18: Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.
NBR NM 24: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.
NBR NM 25: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de álcalis disponíveis. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES – ANFACER. **O mercado brasileiro.** Disponível em: <<https://www.anfacer.org.br/brasil>>. Acesso em: 7 abr. 2019.

ASSOCIAÇÃO TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL - ABTCP. **O setor.** Disponível em: <<https://abtcp.org.br/quem-somos/osetor/o-setor/>>. Acesso em: 5 mar. 2019.

BARBARULO, R.; PEYCELON, H.; PRENÉ, S.; MARCHAND, J. Delayed ettringite formation symptoms on mortars induced by high temperature due to cement heat of hydration or late thermal cycle. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 125-131, jan. 2005.

BARRETO, M. F. O. Análise microestrutural de blocos de concreto celular autoclavado (BCCA) com o auxílio de métodos instrumentais. **Conexão Ciência**, v. 7, n. 2, p. 38-63, jul./dez. 2012.

BARRETTO, V. C. de M. **Resíduos de indústria de celulose e papel**

na fertilidade do solo e no desenvolvimento de eucalipto. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2008.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: IBRACON, 2011.

BELLO, R. H. *et al.* Caracterização microestrutural de concretos com e sem resíduo da indústria de papel e celulose em substituição parcial ao cimento Portland. **Anais do 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica.** Águas de Lindóia: 2016.

BONOTTO, T. **Otimização do processo de fabricação de blocos de concreto celular autoclavado.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2005.

CHEN, M. *et al.* Investigation on the formation of tobermorite in calcium silicate board and its influence factors under autoclaved curing. **Construction and Building Materials**, v. 143, p. 280–288, 2017.

CIACCO, E. F. S.; ROCHA, J. R.; COUTINHO, A. R. The energy consumption in the ceramic tile industry in Brazil. **Engineering**, v. 113, p. 1283–1289, 2017.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DALFRÉ, R. R. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos em Indústria de Cerâmica - Estudo de Caso.** Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2012.

EPP, J. X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization. **Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods**, v. 1, n. 7, p. 81-124, 2016.

FARIAS FILHO, J.; 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, p. 437-444, 2000.

FERRAZ, F. de C. **Comparação dos sistemas de alvenaria de vedação: bloco autoclavado x bloco cerâmico**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

FERRETI, M. Princípios e aplicações de espectroscopia de fluorescência de Raios X (FRX) com instrumentação portátil para estudo de bens culturais. **Revista CPC**, v. 7, p. 74–98, 2008.

GALVÁNKOVÁ, L. *et al.* Tobermorite synthesis under hydrothermal conditions. **Procedia Engineering**, v. 151, p. 100–107, 2016.

GONÇALVES, J. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. **Ambiente Construído**, v. 6, n. 4, p. 83-94, out./dez. 2006.

HAUSER, A.; EGGENBERGER, U.; MUMENTHALER, T. Fly ash from cellulose industry as secondary raw material in autoclaved aerated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 297-302, nov. 1999.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Cenários Ibá: Estatísticas da Indústria Brasileira de Árvores - Fevereiro de 2019**. Disponível em: < https://iba.org/datafiles/e-mail-marketing/cenarios/56-cenarios_2.pdf>. Acesso em: 1 mar. 2019.

ISU, N.; ISHIDA, H.; MITSUDA, T. Influence of quartz particle size on the chemical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete (I) tobermorite formation. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 2, p. 243–248, 1995.

JACOÉ, R. B.; RODRIGUES, C. S. Influência do tempo de autoclavagem nas propriedades físicas do concreto celular autoclavado (AAC). **Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECIMat**, Cuiabá: 2014.

KIHARA, Y. A Síntese da Tobermorita e sua Aplicação na Engenharia de Materiais. **Boletim IG-USP. Série Científica**, v. 9, p. 177–180,

1991.

KISSINGER, H. E. Variation of Peak Temperatura With Heating Rate in Differential Thermal Analysis. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, v. 57, n. 4, p. 217-221, oct. 1956.

KOHOBHANGE, S. P K.; MANORATNE, C. H.; PITAWALA, H. M. T. G. A.; RAJAPAKSE, R. M. G. Thermal decomposition of calcium carbonate (calcite polymorph) as examined by in-situ high-temperature X-ray poder diffraction. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, v. 134, p. 21-28, may 2019.

LAUKAITIS, A. *et al.* Influence of mechanically treated carbon fibre additives on structure formation and properties of autoclaved aerated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 26, p. 362–371, 2012.

LIMA, R. C. A. DE. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

LINS, B. F. E. Ferramentas básicas de qualidade. **Ciência da Informação**, v. 22, n. 2, p-153-161, mai./ago. 1993.

MATTONAI, M.; PAWCENIS, D.; SEPPIA, S. D.; LOJEWSKA, J.; RIBECHINI, E. Effect of ball-milling on crystallinity index, degree of polymerization and thermal stability of cellulose. **Bioresource Technology**, v. 270, p. 270-277, sept. 2018.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A. *et al.* Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista ALCONPAT**, v. 4, n. 2, may./ago. 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO, S. K. de. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil). Universidade Federal de Goiás, 2010.

MEZQUITA, A. *et al.* How to reduce energy and water consumption in the preparation of raw materials for ceramic tile manufacturing : Dry versus wet route. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 1566–1570, 2017.

MODOLO, R. *et al.* Construction materials as a waste management solution for cellulose sludge. **Waste Management**, v. 31, n. 2, p. 370–377, 2011.

MORAIS, R. M. Reciclagem de Resíduos de Indústria de Placas Cerâmicas: um Estudo de Caso. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Departamento de Ciências e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

NAGROCKIENÉ, D.; DAUGELA, A. Investigation into the properties of concrete modified with biomass combustion fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 174, p. 369-375, jul. 2018.

NAMAGGA, C.; ATADERO, R. A. Valuable utilisation of spray dryer ash and its performance in structural concrete. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 4, n. 2, p. 153-163, jun. 2011.

NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K. Structure and properties of aerated concrete : a review. **Cement & Concrete Composites**, v. 22, p. 321–329, 2000.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NOLASCO, A. M.; GUERRINI, I. A.; BENEDETTI, V. Uso de resíduos urbanos e industriais como fontes de nutrientes e condicionadores de solos florestais. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, p. 386-414, 2000.

OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. Editora UFSC, 2011.

OLIVEIRA, V. F. DA S. **Valorização de Resíduos da Indústria da Pasta e Papel - Compostagem e Aplicação do composto no Solo**.

Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente). Universidade do Algarve. Faro, 2009.

PEREIRA, F. R. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral composições cerâmicas e cimentíceas**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de Aveiro. Aveiro, 2006.

PINHEIRO, M. R. **Reciclagem de lodo primário da estação de tratamento de efluentes da indústria de papel em cerâmica argilosa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense. Rio de Janeiro, 2008.

PUREZA, J. C. C. **Utilização de resíduos industriais de baixa granulometria em massas cerâmicas de argila vermelha: aspectos tecnológicos e ambientais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento portland: estudo em pasta**. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

RIBEIRO, M. J.; VENTURA, J. M.; LABRINCHA, J. A. A Atomização como Processo de Obtenção de Pós para a Indústria Cerâmica. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 5, p. 34–40, 2001.

RILEY, C. E. *et al.* Cementitious Spray Dryer Ash-Tire Fiber Material for Maximizing Waste Diversion. **Hindawi Publishing Corporation - Advances in Civil Engineering**, 2011.

ROBALDO, D. L. C. *et al.* Produção de Concreto Celular utilizando resíduo industrial. **Anais da VIII Mostra de Iniciação Científica - IMED**. Passo Fundo: 2014.

ROMANO, R. C. *et al.* Influência da condição de mistura na dispersão de sílica ativa. **Anais do 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECIMat**. Foz do Iguaçu: 2006.

ROSTIROLA, Â. C. F. **Estudo exploratório da produção de concreto celular autoclavado com o emprego de finos oriundos da reciclagem**

de concreto como agregados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2013.

SANTOS, M. C. L. dos; VILLAC, T. Law and Public Management of Solid Waste in Brazil: A Historical-Critical Analysis. *In*: TAHERZADEH, M. J.; BOLTON, K.; WONG, J. PANDEY, A. **Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2019. chap. 7, p. 101-103.

SCHREINER, J. et al. New analytical possibilities for monitoring the phase development during the production of autoclaved aerated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 107, p. 247-252, mar. 2018.

SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P. MONTEIRO, P. J. M. Advances in understanding hydration of Portland Cement. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 38-56, 2015.

SHARIFI, N. P. *et al.* The utilization of sulfite-rich Spray Dryer Absorber Material in portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, v. 213, p. 306-3012, apr. 2019.

SIMÃO, L. **Desenvolvimento e aplicação de ecoclinker obtido a partir de resíduos do setor de papel e celulose.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, 2016.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Produção Nacional de Cimento por Regiões e Estados - 2018.** Disponível em: < <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1549556310.pdf> >. Acesso em: 24 mar. 2019.

TAFAREL, N. F. *et al.* Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. **Revista Matéria**, v. 21, n. 04, p. 974-986, 2016.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. *In*: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 931.

VASKE, N. R. **Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão da lenha**

de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto.
2012. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

WONGKEO W. *et al.* Compressive strenght, flexural strenght and
termal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash
as cement replacement materials. **Materials and Design**, v. 35, p. 434-
439, 2012.