

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RENATA BORGES JACÓE

**INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA EM AUTOCLAVE (CONDIÇÕES DE
PRESSÃO E TEMPERATURA ELEVADAS) EM BLOCOS SÍLICO-CALCÁRIOS**

BELO HORIZONTE

2014

RENATA BORGES JACÓE

INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA EM AUTOCLAVE (CONDIÇÕES DE PRESSÃO E TEMPERATURA ELEVADAS) EM BLOCOS SÍLICO-CALCÁRIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Conrado de Souza Rodrigues

BELO HORIZONTE

2014

RENATA BORGES JACÓE

INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA EM AUTOCLAVE (CONDIÇÕES DE PRESSÃO E TEMPERATURA ELEVADAS) EM BLOCOS SÍLICO-CALCÁRIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Conrado de Souza Rodrigues – Orientador

Prof. Nilton da Silva Maia

Prof. Sidney Nicodemos da Silva

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sua infinita bondade e misericórdia, por ter me capacitado para chegar até aqui.

Agradeço a toda a minha família pelo apoio.

Agradeço ao meu orientador, Professor Conrado, por todo apoio e incentivo dado não somente na realização deste trabalho, mas no intercâmbio, no estágio e na área acadêmica.

A todos os integrantes e ex-integrantes do grupo de pesquisa “Desenvolvimento de materiais de construção sustentáveis”: Fernanda, Ana Flávia, Mariana, Luciana, Vitor, Taciana, Christiano, e Prof. Dr. Paulo Borges por todo apoio durante a pesquisa, em especial ao Stefan, por toda ajuda dispensada na realização e análise dos ensaios.

Agradeço as indústrias: Holcim, Saint-Gobain, Ical, Altom Metalurgia pelo fornecimento das matérias-primas empregadas neste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Materiais, que contribuíram para a minha formação.

Muito obrigada.

“Não permita que sua felicidade dependa
de algo que você possa perder.”

C.S. Lewis

RESUMO

Blocos sílico-calcários são utilizados na construção civil, em substituição aos blocos de concreto convencionais. Constituído por uma suspensão de cálcio (fornecida pela cal, cimento Portland e gesso), sílica e água. Uma estrutura celular é criada ao se incorporar um agente expensor, como pó de alumínio, que reage e libera gás hidrogênio, gerando poros. Denominado concreto celular autoclavado (AAC), possui propriedades intrínsecas como leveza e isolamento, que o diferencia dos demais materiais de construção. Devido ao seu alto teor de poros, a produção do AAC requer um processo de cura especial, para o desenvolvimento da força compatível com aplicações de engenharia civil. Desta forma, a cura é realizada em autoclave, a uma temperatura de 184°C e pressão de vapor d'água de 1MPa, durante 12 horas. Sob esta condição especial, a combinação entre o cálcio e a sílica resulta em produtos de hidratação com uma estrutura cristalina (tobermorita) que é responsável pela melhoria da resistência do AAC. Considerado um material de construção sustentável, garante uma economia de energia com condicionamento térmico dos ambientes construídos. Por outro lado, o processo de cura é o principal responsável pela alta energia incorporada ao material, levando a uma alta demanda de energia inicial e custo. Neste contexto, o objetivo é analisar a influência do tempo de autoclavagem na resistência e microestrutura do material, a fim de reduzir o tempo em autoclave. Sendo assim, o material foi caracterizado a partir das análises de resistência mecânica, densidade, composição química e mineralógica. Os resultados revelam que a autoclavagem aumenta a resistência à compressão do material. A formação de tobermorita durante o processo de cura em autoclave foi comprovada nas análises de difração de raios-X (DRX) e das curvas termogravimétricas (TG). O estudo indica que para tempos menores de cura em autoclave o material apresenta resultados satisfatórios em relação às propriedades, devendo ser melhorada apenas a estrutura e distribuição de poros.

Palavras-chave

Blocos silico-calcarios; Concreto Celular Autoclavado; Autoclave; Tobermorita.

ABSTRACT

Sand-lime bricks are used in civil construction, to substitute the conventional concrete blocks. The components are composed by slurry mix of calcium (provided by lime, gypsum and ordinary Portland cement), silica and water. The cellular structure results from air incorporation agents, such as aluminum powder, which reacts and releasing hydrogen gas, creating pores. Denominated autoclaved aerated concrete (AAC), has intrinsic properties such as light weight and insulation, which differentiates it from other construction materials. Due to its high porous content, AAC production requires special currying process for strength development compatible to civil engineering applications. Therefore, curing is carried out in an autoclave at a temperature of 184 ° C and water vapor pressure of 1 MPa during 12 hours. Under this special condition, the combination of calcium and silica results in hydration products with a crystal structure (tobermorita) which are responsible for improving the strength of the AAC. Considered a sustainable building material, ensures energy savings with thermal conditioning of built environments. Moreover, the curing process is the main responsible for high embodied energy of a material, leading to a high initial energy demand and cost. In this context, the objective is to analyze the influence of duration of autoclaving on the strength and microstructure of the material in order to reduce the autoclaving time during the curing process. Thus, the material was characterized from the analysis of mechanical strength, density and chemical and mineralogical composition. The results showed that autoclaving increase the strength of the material. Tobermorita formation during the autoclave curing was confirmed in the analysis of X-ray diffraction and thermogravimetric (TG). The study shows that for during autoclave times smaller the material exhibits satisfactory results in relation to properties and should only improve the structure and pore distribution.

Keywords

Sand-lime bricks; Autoclaved Cellular Concrete; Autoclave; Tobermorita.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos concretos celulares	12
Figura 2 – Utilização 1m ³ de matérias primas, podem ser produzidos 5 m ³ de AAC [16].	16
Figura 3 - Distribuição granulométrica das matérias-primas	22
Figura 4 - Esquema representativo das etapas de trabalho	23
Figura 5 - Fases do processo de produção do AAC [26].....	24
Figura 6 - Dosagem das matérias-primas	24
Figura 7 – Homogeneização	24
Figura 8 – Molde	25
Figura 9 - Pré-cura das amostras	25
Figura 10 - Desmolde e corte	26
Figura 11 - Cura em autoclave	26
Figura 12 - Relação resistência à compressão/densidade em AAC comerciais [2].....	28
Figura 13 - Densidade do AAC	31
Figura 14 – Estrutura celular do AAC.....	32
Figura 15 - Resistência à compressão do AAC	33
Figura 16 - Relação específica.....	33
Figura 17 - Difração de raios-X para AAC	34
Figura 18 - Comparação termogravimétrica.....	37
Figura 19 - Derivada de primeira ordem (DTG)	38
Figura 20 - Microscopia eletrônica de varredura.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 # Características do Concreto Celular Autoclavado [18]	16
Tabela 2 # Composição (% de massa) do cimento [23]	18
Tabela 3 # Composição das matérias-primas empregadas na produção do AAC	21
Tabela 4 # Especificação das amostras.....	27

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	SISTEMAS SÍLICO-CALCÁRIOS	11
<i>1.1.1</i>	<i>Sistemas Sílico-Calcários Celulares.....</i>	<i>11</i>
1.2	OBJETIVOS GERAIS	13
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	HISTÓRICO	14
2.2	PROPRIEDADES.....	15
2.3	DURABILIDADE.....	17
2.4	MATÉRIAS-PRIMAS	17
<i>2.4.1</i>	<i>Fontes de Cal</i>	<i>18</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Fonte de Sílica</i>	<i>19</i>
<i>2.4.3</i>	<i>Agente expensor</i>	<i>19</i>
2.5	TOBERMORITA	20
<i>2.5.1</i>	<i>Cura em autoclave</i>	<i>20</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1	CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	21
3.2	COMPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS.....	22
3.3	ETAPAS DE TRABALHO	23
3.4	MOLDAGEM.....	24
3.5	ENSAIOS.....	27
<i>3.5.1</i>	<i>Densidade e Resistência Mecânica</i>	<i>27</i>
<i>3.5.2</i>	<i>Difração de raios-X (DRX).....</i>	<i>29</i>
<i>3.5.3</i>	<i>Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Derivativa (DTG)</i>	<i>29</i>
<i>3.5.4</i>	<i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....</i>	<i>30</i>
4	RESULTADOS	31
4.1	COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO	31
4.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	33
4.3	TG E DTG	37
4.4	MEV	38

5	CONCLUSÃO.....	39
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
	ANEXO 1.....	43

1 INTRODUÇÃO

1.1 Sistemas sílico-calcários

Materiais sílico-calcários, segundo a norma NBR- 14974-1/2003, são fabricados com cal e agregados finos, geralmente quartzo, e que depois de moldados passam por cura sob ação de altas temperaturas e pressão [1].

Os blocos sílico-calcários (BSC) surgiram no início da década de 40, desenvolvidos para uso em alvenaria estrutural possuindo assim alta resistência. Podem ser utilizados em substituição aos blocos de concreto convencional, exclusivamente para construção de alvenarias, pois seu processo de manufatura é relativamente mais simples e possui boa uniformidade. Podem ser utilizados de várias formas e tamanhos, de acordo com o mercado e com os padrões específicos [2].

1.1.1 *Sistemas Sílico-Calcários Celulares*

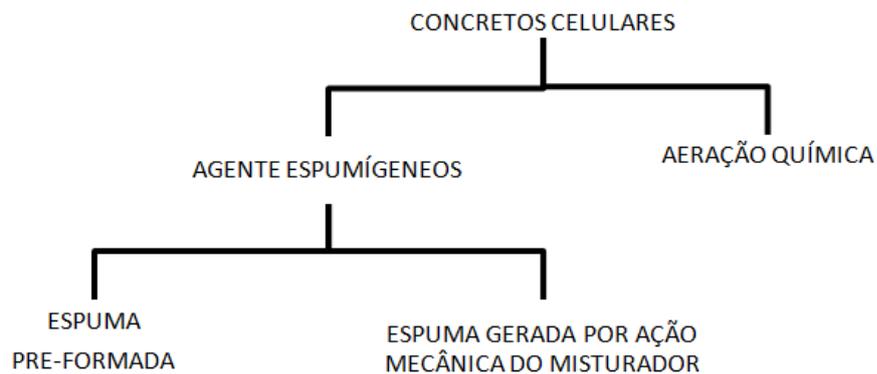
Os blocos sílico-calcários celulares resultam da mistura de materiais calcáreos, de um agregado fino silicoso e um agente incorporador de ar, comumente utiliza-se o pó de alumínio, onde por meio de processos químicos liberam gás hidrogênio, formando bolhas no material. Sendo assim, o nome “celular” deriva do fato deste concreto possuir diversos poros em sua superfície. Este material tem o seu processo de cura realizado dentro de uma autoclave, sob alta pressão e temperatura. Uma vez que a incorporação de ar torna o concreto menos resistente, a autoclave altera as reações químicas que ocorrem neste material, o que confere uma maior resistência.

A norma NBR 13438/1995 [3], define o concreto autoclavado como:

É um concreto leve obtido através de um processo industrial, constituído de materiais calcários (cimento, cal ou ambos) e materiais ricos em sílica, granulados finamente. Esta mistura é expandida através da utilização de produtos formadores de gases, água e aditivos, se for o caso, sendo submetidos à pressão e temperatura através de vapor saturado. O concreto celular autoclavado contém células fechadas, aeradas, uniformemente distribuídas.

Os concretos celulares possuem diversas classificações, a Figura 1 apresenta a classificação em relação ao método de formação de poros, que é influenciado pelo aglomerante e o processo de cura utilizados.

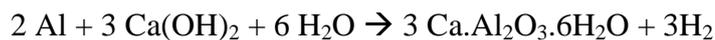
Figura 1 - Classificação dos concretos celulares



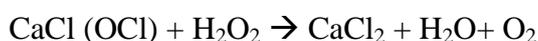
Fonte: 4 modificado

Segundo TEIXEIRA FILHO [4] a aeração química é resultado da reação de uma substância química com outros componentes presentes da mistura, gerando poros e consequentemente aumentando o volume do material [4, 5, 6]. Os principais incorporadores de gás, de acordo com CORTELESSI [6] são:

- **Pó de alumínio:** o pó de alumínio é finamente dividido e ao reagir com a cal libera hidrogênio, gerando assim os macro-poros.



- **Água oxigenada e cloreto de cal:** a reação entre a água oxigenada e o cloreto de cal forma cloreto de cálcio e libera oxigênio.



- **Carbureto de cálcio:** o carbureto de cálcio reage com a água formando gás acetileno,

de acordo com a reação abaixo:



No processo por agente espumígeneos a introdução de poros é obtida por meios mecânicos ou de uma espuma pré-formada. Como não há reações químicas envolvidas é um processo mais econômico e com maior controle na formação de poros [4, 5].

1.2 Objetivos gerais

Este trabalho visa estabelecer, em escala laboratorial, o processo produtivo do Concreto Celular Autoclavado nos laboratórios do CEFET-MG.

1.3 Objetivos específicos

Avaliar a influência do tempo de autoclavagem na resistência e a evolução da microestrutura do material, ou seja, verificar se com diferentes tempos há a formação de compostos diferentes e/ou em quantidades diferentes. Para tanto, foram analisadas amostras com uma mesma formulação com diferentes tempos de cura em autoclave (12 horas, 8 horas, 4 horas), além de amostras não autoclavadas e comerciais. Com isso tem-se o objetivo de reduzir o tempo de cura em autoclave, para assim reduzir custos na produção, visto que esta é a etapa mais dispendiosa do processo de produção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico

O Concreto Celular Autoclavado (AAC – Autoclaved Aerated Concrete) foi desenvolvido e patenteado em 1924 pelo Dr. Johan Axel Eriksson, na Suécia, e começou a ser fabricado comercialmente em 1929 [7]. O objetivo era substituir as construções convencionais da época (de pedra, madeira e outros concretos), por um material que além de mais prático, auxiliaria na economia de energia para calefação, devido as suas propriedades de isolamento [8].

A preparação desse novo concreto baseava-se em uma mistura à base de água, calcário e silício, que juntamente com o pó de alumínio forma uma estrutura celular devido à liberação de gás hidrogênio [7].

A partir da Segunda Guerra Mundial a produção expandiu na Europa, principalmente devido à escassez de materiais de construção. O Reino Unido a partir de 1948 interessou-se pelo material e passou a produzi-lo substituindo o quartzo por PFA (cinzas de termoelétricas), em 2003, 12% (843 mil toneladas) do PFA no Reino Unido são utilizados na fabricação de AAC por ano, produzindo cerca de dois milhões de metros cúbicos de blocos de concreto celular [7].

Ultimamente o AAC tornou-se um dos materiais de construção mais utilizados na Europa [9]. Na Ásia o mercado é crescente; no Japão o AAC é desenvolvido para aplicações em construções capazes de resistir à ação sísmica. Após o desastre do terremoto de Hanshin-Awaji em 1995 a demanda por alta resistência em construções cresceu, o país desenvolveu painéis reforçados de AAC que são resistentes a terremotos, devido a sua capacidade de deslocamento, vertical e horizontal, quando sob abalos sísmicos [10, 11]. Desde a sua introdução no país em 1962 até 2003 cerca de 84 milhões de m³ de AAC foram utilizados no Japão [11]. Dados de 2005 revelam que mais de 30 milhões de m³ de AAC são produzidos anualmente [12].

No Brasil a primeira fábrica implantada foi em 1957, denominada “Pumex”, de origem sueca. Em 1978 passou a ser dirigida por brasileiros, com o nome “Siporex”. Outra empresa

fabricante de concreto celular, “Sical”, se instalou no Brasil em 1983. O mercado atual é constituído por essas duas empresas. Utilizado em paredes de alvenaria, a tecnologia empregada não sofreu adaptações à cultura construtiva encontrada no Brasil, resultando diversos problemas, que prejudicaram a sua comercialização no mercado nacional [13, 14]. Assim, a utilização do AAC é pouco difundida no Brasil, mas devido a suas propriedades térmicas possui um grande potencial para redução do gasto de energia para condicionamento térmico.

2.2 Propriedades

O concreto celular autoclavado apresenta varias propriedades associadas ao seu uso que tornam interessante sua utilização. Sua baixa densidade, devido a sua estrutura leve e porosa, pesando aproximadamente 50% menos do que outros produtos de construção, resulta em alta razão resistência/peso e menor solicitação das estruturas e fundações, levando a uma economia de material na construção civil [5, 9, 15]. Seu desempenho estrutural é excelente, possui resistência mecânica compatível com diversas aplicações, incluindo zonas sísmicas [9, 16, 17].

É um material que possui elevada trabalhabilidade e altamente funcional, podendo ser cortado, perfurado, serrado e pregado como a madeira, porém em contraste a madeira possui resistência térmita, ou seja, cupins e insetos não podem danifica-lo. Devido a sua ótima relação tamanho/peso o AAC pode ser produzido em diversos tamanhos, sendo fácil de transportar e acelerando a velocidade de uma construção, inclusive fundações [4, 9, 12, 16].

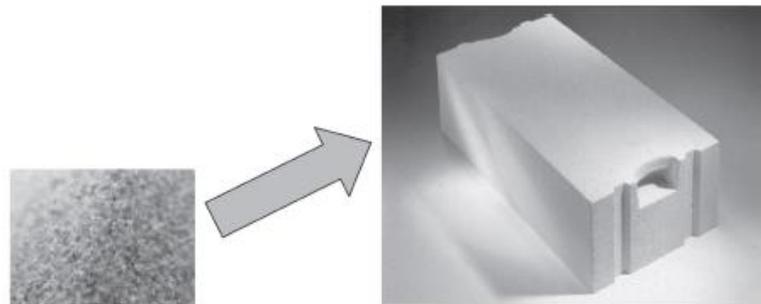
Sua estrutura celular também garante o isolamento térmico e acústico. A eficiência térmica do AAC é 10 vezes maior que a dos concretos convencionais, uma vez que possuem condutividade térmica muito baixa, resultando na diminuição da necessidade de utilização de aquecimento ou ar condicionado, consequentemente reduzindo o gasto energético, principalmente em países de estações bem definidas [4, 9, 12, 15, 16, 17].

Oferece alta resistência ao fogo devido a sua composição mineralógica, garantindo o máximo de segurança contra incêndios, podendo resistir no mínimo 6 horas ao fogo até 1200°C e o calor intenso. Além do mais, o AAC não emite fumaça ou gases tóxicos [4, 9, 17].

Do ponto de vista ambiental o AAC produz pouco impacto em todas as etapas do seu ciclo de

vida, desde a transformação de matérias primas até a eliminação de resíduos. Ele é produzido a partir de matérias primas naturais e abundantes, para a produção de 5m³ de AAC, são necessárias apenas 1m³ de matéria prima (Figura 2), além do mais os resíduos produzidos podem ser reciclados ou reaproveitados [16, 17].

Figura 2 – Utilização 1m³ de matérias primas, podem ser produzidos 5 m³ de AAC [16].



Em comparação com outros materiais de construção (tijolos e blocos vazados, por exemplo), AAC é um material homogêneo e isotrópico, cujas propriedades são as mesmas em todas as direções espaciais [16].

A Tabela 1 apresenta algumas das propriedades do AAC:

Tabela 1 # Características do Concreto Celular Autoclavado [18]

Características físicas do Concreto Celular Autoclavado (CCA)	VALOR
Resistência mínima em MPa	2,5
Calor específico em W.h/kg°K	0,28
Condutibilidade Térmica W/m°k	0,13
Dilatação Térmica mm/m	3,2 - 3,8 x 10 ⁻⁶
Ponto de Fusão em °C	1.100 a 1.200
Modulo de elasticidade (E) em kg/cm ²	14.000 a 30.000
Absorção de água máxima em 24 horas, em g/dm ²	210
Retração em mm/m	0,15 a 0,45
Ph	9 a 10
Densidade em kg/m ³	400 a 800
Resistência ao fogo em horas (painéis 200 mm espessura)	< 8

Referencia: Sterling e Garcia, 2.001.

2.3 Durabilidade

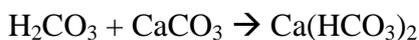
Os blocos de concreto celular autoclavado possuem boa durabilidade, mantendo suas propriedades durante longos tempos. É um material resistente à umidade, formação de fungos, ataque de insetos e ação de elementos químicos, não se deteriora ou apodrece [17, 18].

Devido ao processo de autoclavagem, o AAC é constituído principalmente de tobermorita ($5\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$), que é muito mais estável do que outros produtos formados normalmente, garantindo a sua durabilidade. Entretanto, em decorrência da alta porosidade a há penetração de líquidos e gases, podendo levar a danos na matriz. A difusão esta relacionada principalmente a microporosidade/ microfissuração comum a materiais cimentícios, onde os poros são interconectados, formando uma rede.

Em ambientes onde há a variação de umidade e temperatura, pode ocorrer um aumento na densidade do AAC com o tempo, devido à carbonatação. A carbonatação esta relacionada à taxa de difusão de CO_2 no material, ocorrendo a modificação dos minerais e da microestrutura. No AAC esta reação é grave apenas quando a exposição ao CO_2 é intensa [5], originando carbonato de cálcio e sílica gel, como observado na equação abaixo [19, 20, 21].



Na presença de umidade, o CO_2 converte-se em ácido carbônico, que ataca a calcita (CaCO_3) resultando em bicarbonato de cálcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), que é solúvel. Esta sequência é responsável pela erosão sucessiva do material.



Métodos para estudos dos mecanismos de degradação empregam ensaios de envelhecimento acelerado. Câmaras climáticas podem ainda simular a presença de diferentes gases na atmosfera, em variadas concentrações.

2.4 Matérias-primas

Como definido anteriormente este é um material à base de cal e sílica que apresenta estrutura

celular (macro poros) obtida pela expansão resultante da reação química entre a cal e o pó de alumínio. Então, podemos dividir as matérias-primas entre fontes de cal, fontes de sílica e agentes expansores.

2.4.1 Fontes de Cal

Cimento portland - OPC

O cimento portland é um aglomerante hidráulico, ou seja, é moldável quando misturado com água, desenvolvendo elevada resistência mecânica ao longo do tempo. É constituído basicamente de silicatos e aluminatos de cálcio. Para o AAC, o cimento portland mais recomendado é o de alta resistência inicial (CPV ARI – Tabela 2), isto porque este tipo de cimento não possui aditivos em sua composição (como escória e materiais pozolânicos), que podem influenciar em suas propriedades finais. [22]

Tabela 2 # Composição (% de massa) do cimento [23]

<i>Tipo</i>	<i>Sigla</i>	<i>Clínquer</i>	<i>Escória</i>	<i>Pozolana</i>	<i>Materiais carbonáticos*</i>
CP Alta Resistência Inicial	CP V ARI	95 – 100	0	0	0 - 5

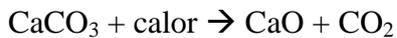
*Materiais carbonáticos são minerais moídos, que tornam as argamassas e concretos mais trabalháveis, tais como o próprio calcário, que então é conhecido como filer calcário. Filer é a denominação genérica que se dá aos materiais finos que passam na peneira ABNT 0,075 mm.

Gesso - CaSO₄

É um aglomerante hidráulico obtido a partir da calcinação da gipsita (CaSO₄.2H₂O), constituída predominantemente de sulfato de cálcio. A função do gesso na composição do AAC é a de retardar a hidratação da cal, logo o endurecimento da mistura. O gesso mantém a mistura fluida por mais tempo, permitindo a criação e a distribuição dos macroporos resultantes da reação entre a cal e o alumínio, com a consequente expansão do AAC.

Cal virgem - CaO

Aglomerante obtido a partir da calcinação de rochas calcárias, que contém basicamente carbonatos de cálcio (CaCO₃). A calcinação é representada abaixo:



CaO: cal viva/ cal virgem

Este material quando aplicado no concreto celular aumenta a reatividade, em relação a cal hidratada, acelerando o processo de expansão e formação de bolhas. Outra função da cal é a ação ligante, quando reagida com a sílica.

2.4.2 Fonte de Sílica

Quartzo moído

O quartzo é a forma estável encontrada da sílica em areias, argilas e rochas sedimentares. Usado como agregado no concreto convencional, no Concreto Celular Autoclavado, a sílica reage com o pó de alumínio e os outros componentes dando origem a tobermorita, responsável pela resistência do material. Sua granulometria influencia na reação, de acordo com ISU e ISHIDA, quanto maior a granulometria, maior a cristalinidade da tobermorita formada, entretanto maior o tempo de processamento e menor o grau de reação, devido a menor área superficial [24, 25].

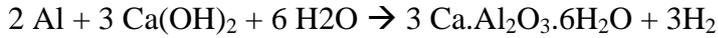
2.4.3 Agente expensor

Pó de alumínio - Al

Agente expensor ou agente incorporador de ar é a substância química responsável pela formação de bolhas, e conseqüentemente a expansão do AAC. O pó de alumínio é o mais utilizado, sendo ele finamente dividido. Também é utilizado pela indústria de tintas, refratários, explosivos, combustíveis sólidos, entre outros setores.

Ao reagir com a cal, forma produtos de hidratação que são responsáveis pela resistência

mecânica do AAC e desprende hidrôgenio que promove a estrutura porosa do material, como pode se ver na equação abaixo [6, 15, 26].



2.5 Tobermorita

Em seu estado natural tobermorita ($\text{Ca}_5(\text{OH})_2\text{Si}_6\text{O}_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) é um mineral, que foi descrito por Hendley (1880) em Tobermory, Escócia [13, 27].

O produto da reação entre o cálcio e a sílica, em condições de cura em autoclave, é o silicato de cálcio hidratado, este possui uma estrutura análoga ao mineral tobermorita [13, 27].

A tobermorita é responsável pela melhor resistência mecânica e estabilidade do que o silicato de cal hidratado (C-S-H) de um concreto convencional, devido ao fato de possuir maior organização cristalográfica em decorrência da hidratação acelerada do cimento [13, 27].

A cinética da reação depende da relação molar CaO/SiO_2 , da granulometria dos materiais, do tempo de reação e das condições de cura [27].

2.5.1 Cura em autoclave

A cura em autoclave, também denominada cura higrotérmica, consiste na utilização de altas pressões e temperaturas, aliado a um ambiente saturado de umidade.

Responsável pelo ganho de resistência do material, devido à presença de cristais de tobermorita, originados da reação entre a cal e a sílica. A tobermorita possui uma maior organização cristalográfica, resistência mecânica e estabilidade que o C-S-H (silicato de cal hidratado), formado na cura convencional do concreto. Essas condições são necessárias para ativação da sílica, uma vez que no estado cristalino é inerte a temperatura ambiente [24, 25].

É a etapa mais dispendiosa, requerendo alto consumo energético para manutenção da temperatura elevada por longos intervalos de tempo (184 °C por até 24 horas).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização das matérias-primas

Para a confecção dos corpos de prova foram utilizados os seguintes materiais: cal virgem (CaO) fornecida pela ICAL, cimento portland CPV fornecido pela Holcim S.A., gesso adquirido em lojas de materiais de construção, sílica moída (quartzo) fornecida pela Saint Gobain Grains & Powders e pó de alumínio fornecido pela Altom Metalurgia S.A..

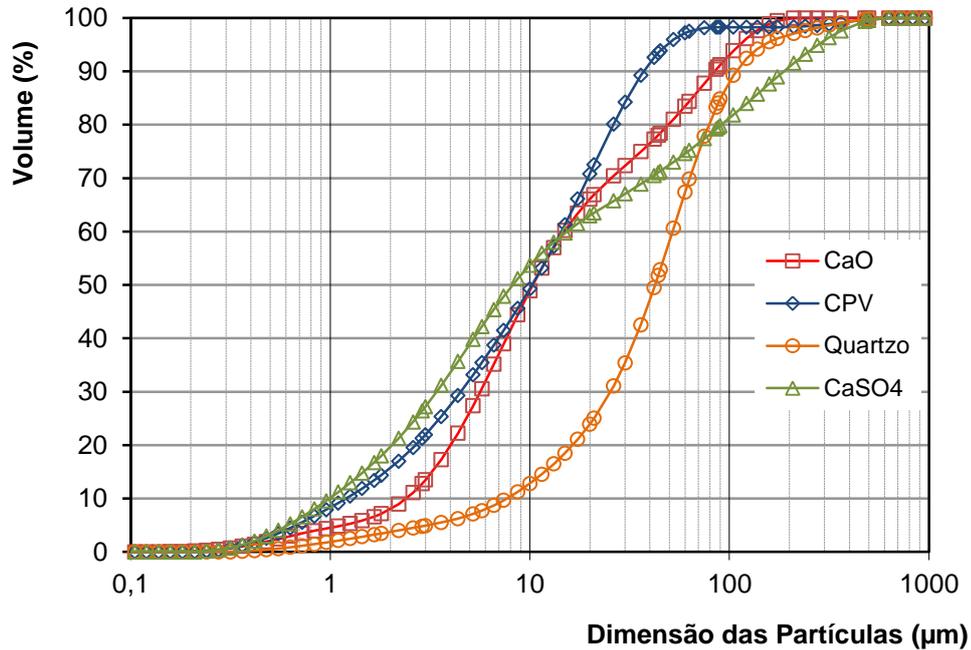
Os materiais foram analisados segundo suas características químicas e físicas e estas são apresentadas na Tabela 3 e Figura 3, respectivamente. A análise química dos materiais é resultante de ensaios de fluorescência de raios-X realizados nos laboratórios da empresa Holcim S.A., unidade Pedro Leopoldo – MG (exceto o pó de alumínio, cuja composição foi fornecida pelo fabricante, Altom Metalurgia S.A.). Assim como a composição química, a distribuição granulométrica influencia no comportamento do AAC. Como as partículas das matérias-primas possuem dimensões microscópicas, foi utilizada a técnica de difração laser, também realizado nos laboratórios da Holcim S.A..

Tabela 3 # Composição das matérias-primas empregadas na produção do AAC

Material	PF 1000°C	Teor H ₂ O 225°C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Alumínio	-	-	0,316	99,29	0,391	-	-	-	-	-
CaO	6,94	-	2,02	0,77	0,32	89,77	0,29	0,58	-	-
Cimento CPV	3,60	-	18,86	5,29	2,91	63,44	0,63	3,06	0,15	0,68
Gesso	-	16,88	2,30	0,23	0,16	45,06	0,49	32,40	0,02	0,02
Sílica	1,38	-	97,32	1,41	0,26	1,35	0,08	0,02	-	-

Fonte: Próprio autor

Figura 3 - Distribuição granulométrica das matérias-primas



Fonte: Próprio autor

A classificação granulométrica ao pó de alumínio empregado se dá em relação ao material passante na peneira #325, com partículas de dimensões inferiores a $45\mu\text{m}$.

3.2 Composição das amostras

O concreto celular autoclavado desenvolveu-se, essencialmente, em ambiente industrial. Sua composição é, portanto, mantida restrita às indústrias produtoras. Sendo assim, a divulgação na literatura científica quanto à composição exata e propriedades das matérias-primas empregadas não ocorrem de maneira ampla.

A patente do material, disponível no anexo I, não oferece parâmetros suficientes para a reprodução do material. A composição é descrita em grandes faixas de variação em peso, e como observado anteriormente em laboratório, com pequenas variações na formulação do AAC resultados discrepantes são obtido; desta forma a patente é irreprodutível [35].

Para estabelecer uma formulação para o trabalho, dados esparsos encontrados na literatura foram analisados juntamente com boletins técnicos fornecidos por fabricantes. A partir desses dados foi definida uma formulação inicial que aprimorada levou a um material com

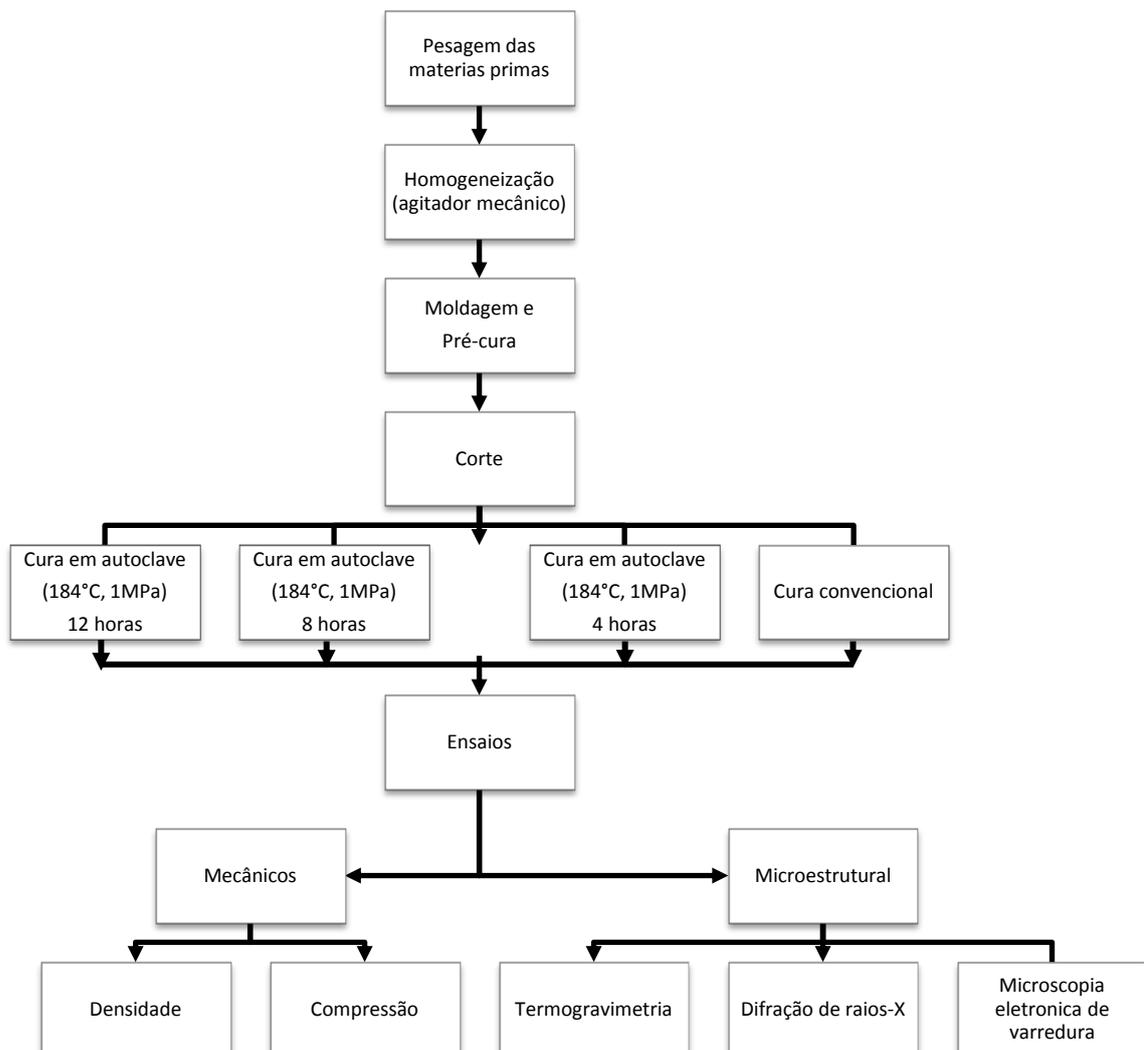
características compatíveis com as dos produtos comerciais [24, 26, 28, 29].

Foi adotada uma matriz composta de 30% de cimento, 8% de cal, 7% de gesso e 55% de quartzo, e uma relação de água/sólidos de 0,55. A quantidade de alumínio empregada obedece a relação $Al/ CaO = 1,9\%$. Esta formulação foi utilizada para as quatro amostras produzidas (A, B, C e D) que se diferenciam no processo de produção, apenas pelo tempo de autoclave na cura (0 a 12 horas).

3.3 Etapas de trabalho

A figura 4 apresenta o esquema das etapas de trabalho realizadas.

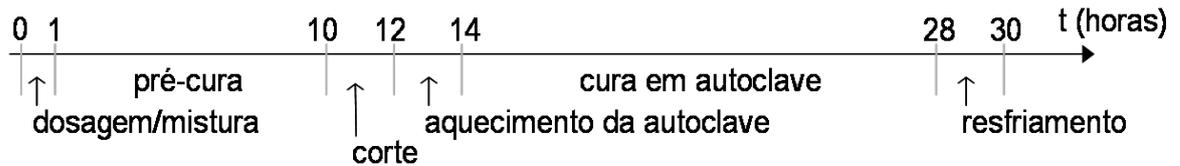
Figura 4 - Esquema representativo das etapas de trabalho



3.4 Moldagem

O processo de moldagem do Concreto Celular Autoclavado em laboratório segue o mesmo princípio utilizado para a produção em grande escala (Figura 5).

Figura 5 - Fases do processo de produção do AAC [26]



Consiste em inicialmente dosar as matérias-primas (Figura 6), em seguida misturá-las com o auxílio de um agitador mecânico (Figura 7). A seguir a mistura é levada ao molde cúbico – 50 x 50 mm (Figura 8), logo após ela passa pelo processo de pré-cura durante 24 horas (Figura 9). Seguida do desmolde e corte (Figura 10) e por fim a cura em autoclave. No caso uma autoclave foi projetada e adaptada ao laboratório (Figura 11), no uso neste trabalho.

Figura 6 - Dosagem das matérias-primas



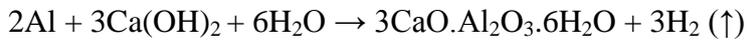
Fonte: Próprio autor

Figura 7 – Homogeneização



Fonte: Próprio autor

A pré-cura tem como objetivo a expansão da mistura por meio da reação entre o alumínio e a cal que tem como um de seus produtos a liberação de gases H_2 , como apresentado na equação abaixo.



Essa expansão da mistura (Figura 9), devido a formação de bolhas, resulta em um produto com cerca de 80% de teor de vazios em seu volume total [5]. Da porosidade total de 80% do volume de AAC, cerca de 30% são microporos e 50% correspondem à porosidade incorporada [13, 30].

O período de pré-cura é também responsável pelo ganho de resistência inicial para que os blocos de AAC sejam cortados nas dimensões pretendidas, como observado na figura 10. Porém a resistência adquirida é muito baixa, necessitando assim passar pelo processo de cura em autoclave.

Figura 8 – Molde



Fonte: Próprio autor

Figura 9 - Pré-cura das amostras



Fonte: Próprio autor

Figura 10 - Desmolde e corte

Fonte: Próprio autor

Figura 11 - Cura em autoclave

Fonte: Próprio autor

A cura em autoclave se dá a uma temperatura de 184°C e uma pressão de cerca de 1MPa. Nestas condições, a reação entre a sílica e a cal dá origem a cristais de tobermorita ($5\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$), responsável pela resistência mecânica final.

A metodologia utilizada foi diferenciada apenas no tempo de cura em autoclave. A amostra A foi submetida ao processo comumente utilizado de 12 horas de autoclavagem. As amostras B e D foram autoclavadas durante 8 e 4 horas, respectivamente. A amostra D não passou pela autoclavagem, sua cura foi realizada pelo processo convencional, à temperatura ambiente. Para nível de comparação, foi utilizada uma amostra do material vendido comercialmente, denominado de amostra E (Tabela 4).

Tabela 4 # Especificação das amostras

<i>Amostra</i>	<i>Tempo de cura em autoclave</i>
A	12 horas
B	8 horas
C	4 horas
D	0 horas
E	Comercial

Fonte: Próprio autor

3.5 Ensaios

3.5.1 Densidade e Resistência Mecânica

Após o processo de cura em autoclave, todas as amostras são preparadas para o ensaio de compressão, as amostras já cortadas logo após o período de pré-cura são lixadas, para que a superfície que entra em contato com a máquina de ensaios mecânicos tenha todas as tensões aplicadas uniformemente distribuídas e o resultado seja o mais real possível. Para determinar a resistência mecânica foi realizado o ensaio de compressão, anteriormente fez-se a determinação da densidade seca do material.

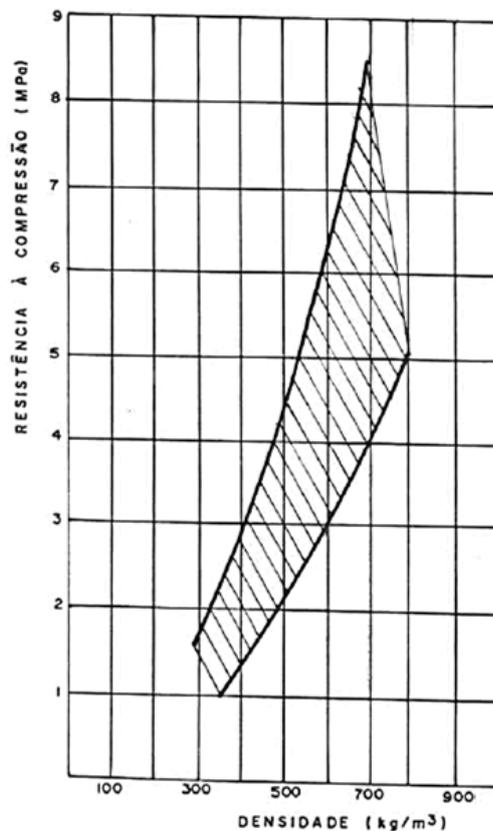
A densidade é medida segundo a norma NBR 13440, calculada por meio da razão entre a massa e o volume da amostra seca (obtida por meio das médias das dimensões) [31].

Os ensaios de compressão ocorreram no Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG

na Máquina Universal de Ensaio Mecânicos - Emic modelo DL30000. Para este ensaio adotou-se a velocidade de 0,5 mm/min, utilizada para compressão de materiais frágeis.

A resistência mecânica depende diretamente da densidade, que é controlada pela quantidade de macroporos gerados durante o processo de expansão. Além disso, influi decisivamente na resistência o processo de cura acelerada em autoclave, cujos produtos de hidratação resultantes diferem substancialmente daqueles dos materiais à base de cimento produzidos sob cura úmida convencional. A maior organização cristalina obtida nas condições de alta pressão e temperatura confere ao AAC resistência compatível com os produtos de uso estrutural, apesar do grande volume de poros dos componentes. Uma relação genérica entre resistência à compressão e densidade em AAC comerciais é apresentada na Figura 12 [2].

Figura 12 - Relação resistência à compressão/densidade em AAC comerciais [2]



3.5.2 Difração de raios-X (DRX)

A difração de raios-X é a técnica mais indicada na determinação das fases cristalinas presentes em materiais cerâmicos. Isto é possível porque na maior parte dos sólidos (cristalinos), os átomos se ordenam em planos de empilhamento separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios-X. A técnica possibilita a identificação dos minerais presentes, e também permite estudar as características cristalográficas destes minerais [13].

O método de difração de raios-X em relação a outros métodos físicos como a análise térmica diferencial, ou químicos, como a análise química, oferece a vantagem de que o difratograma apresenta um número grande de picos, o que facilita a identificação, principalmente no caso de misturas, onde pode haver superposição de alguns picos, mas nunca de todos [28]. Ao incidir um feixe de raios-X em um cristal, o mesmo interage com os átomos presentes, originando o fenômeno de difração, obedecendo a Lei de Bragg para difrações construtivas.

Os resultados obtidos devem ser comparados com bibliografias para se determinar qual o ângulo representa determinada fase ou conjunto de fases.

O ensaio foi realizado no Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, no equipamento Shimadzu XRD 7000. Foram analisados os picos variando de 20 a 80°, com uma taxa de 2 °/min. A corrente utilizada foi de 30,0mA, com uma tensão de 30,0kV, em um tubo de cobre ($\lambda = 1,54060\text{Å}$). Para a análise dos dados obtidos do ensaio, foi utilizado o software “Match!”.

3.5.3 Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Derivativa (DTG)

A análise térmica é uma técnica utilizada para a caracterização do material em relação a sua estrutura mineralógica, é composta pela análise termogravimétrica (TG) e a derivada termogravimétrica (DTG). A TG analisa a perda de massa com o aumento da taxa de temperatura, que é constante. A DTG consiste na derivada da massa em função da temperatura (dm/dT) ou do tempo (dm/dt), calculada a partir dos dados da curva TG, facilitando a visualização da perda/ganho de massa da amostra analisada.

Por meio dos gráficos é possível identificar para quais temperaturas o material perde massa, e

correlaciona-las as faixas de temperatura em que ocorrem reações químicas dos materiais presentes nas amostras. Desta forma podemos caracterizar as amostras, no caso do concreto celular, quanto, por exemplo, a presença de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio [32].

Os ensaios de TG foram realizados pelo Departamento de Química do CEFET-MG, no aparelho TGA da Shimadzu, modelo DTG-60H. Com a variação de temperatura até 1400°C e uma taxa de aquecimento de 10°C/min.

3.5.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A análise de microscopia eletrônica de varredura permite o estudo da morfologia e microestrutura auxiliando na determinação das estruturas de compostos formados após a autoclavagem [5, 27].

Baseia-se em observações detalhadas dos minerais que compõem a microestrutura do material, podendo ser possível fazer caracterizações mais detalhadas do mesmo. O seu mecanismo de funcionamento consiste na emissão de feixe de elétrons sobre a peça, onde parte dos elétrons é absorvida e parte é refletida, gerando a imagem na tela do computador, relacionados ao tipo de material analisado. Anteriormente a amostra deve ser preparada para a análise, neste caso, através da metalização com ouro. O recobrimento é necessário, uma vez que a amostra não é metálica, para que haja interação entre os elétrons da amostra e os elétrons fornecidos pelo feixe de elétrons irradiado sob a peça [5, 13].

A análise foi realizada no Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, utilizando um microscópio da marca Shimadzu modelo SSX-550. A tensão de aceleração do feixe de elétrons foi de 7 kV.

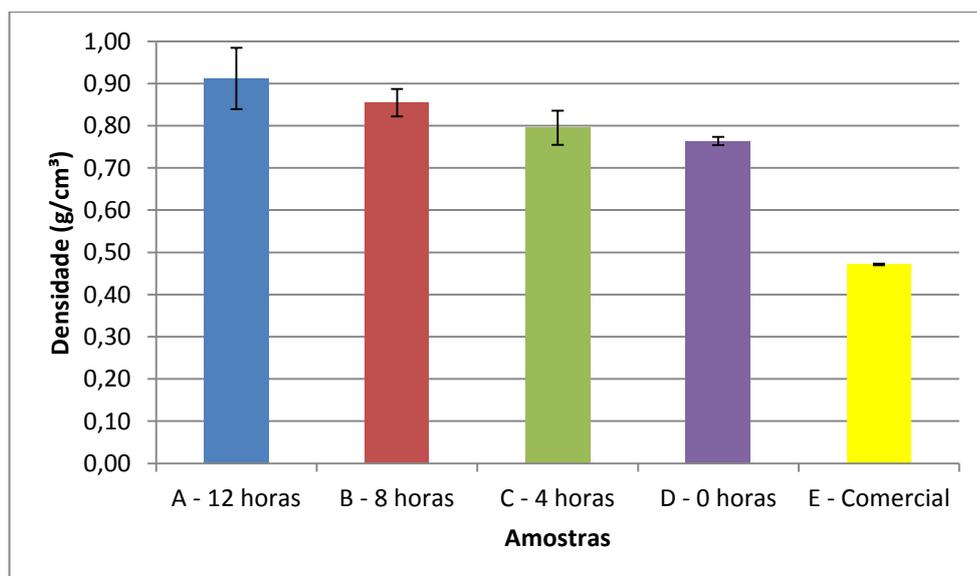
4 RESULTADOS

4.1 Comportamento físico e mecânico

Os resultados obtidos da densidade do AAC são apresentados na figura 13. A baixa densidade do material é resultante da estrutura porosa. Pode-se observar que a amostra comercial possui densidade inferior a das amostras produzidas em laboratório, indicando que a estrutura e distribuição de poros, durante a pré-cura, deve ser melhorada. Na figura 14 a estrutura celular da amostra autoclavada por 12 horas é comparada a estrutura ideal, onde há uma uniformidade no tamanho e distribuição de poros.

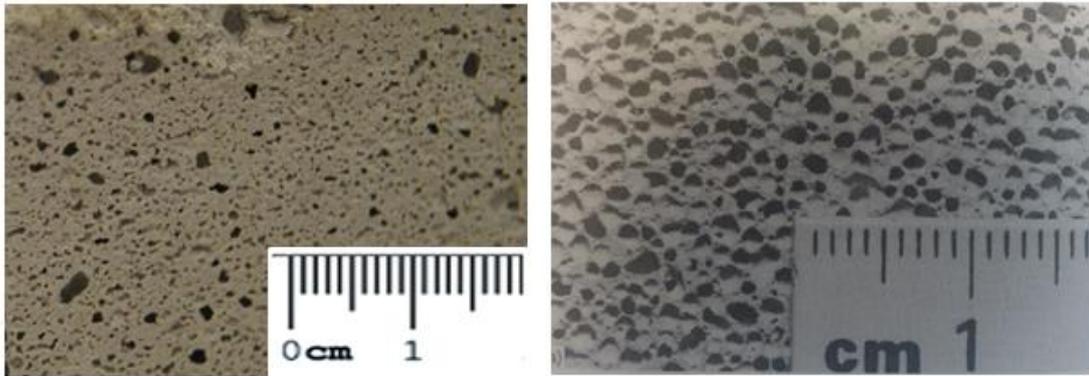
Observa-se um desvio quase nulo na amostra comercial-E, que pode ser justificado pelo fato de que as amostras foram retiradas de uma única placa, logo, não houve variação de lotes, possuindo assim uma homogeneidade nas amostras.

Figura 13 - Densidade do AAC



Fonte: Próprio autor

Figura 14 – Estrutura celular do AAC



Amostra A (esquerda); Estrutura padrão (direita)
 Fonte: Próprio autor; [34]

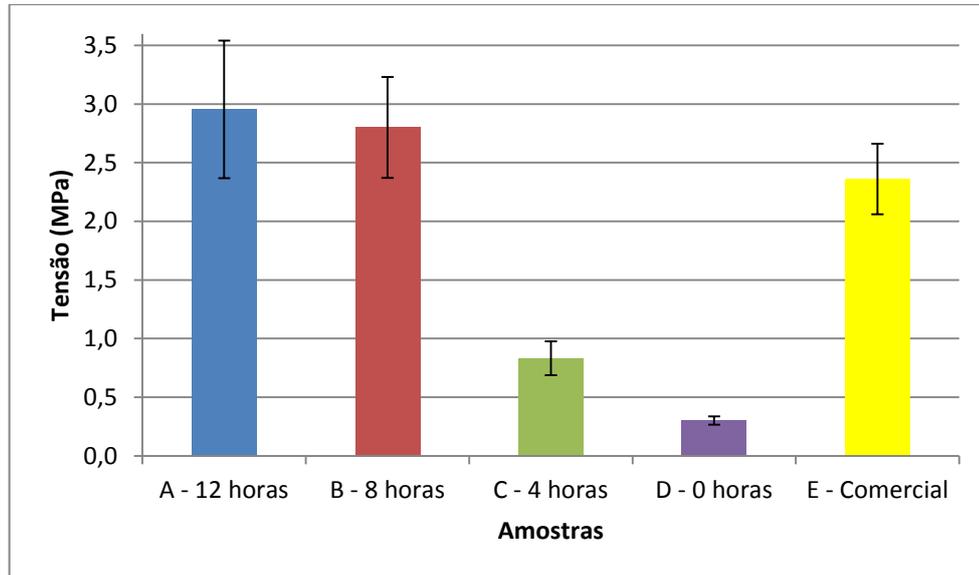
Em relação à resistência mecânica obtida pelo ensaio de compressão (figura 15) os resultados apresentam a influência do tempo de autoclavagem, onde a diferença de resistência da amostra A para a amostra D é de aproximadamente 2,65 MPa. De acordo com a literatura essa diferença se deve ao fato de que quando autoclavada a sílica e o cálcio formam uma estrutura mais organizada (tobermorita), logo mais resistente, necessária para cumprir as exigências de carga para blocos de alvenaria estrutural. Quanto maior o tempo em autoclave, mais tobermorita será formada, portanto maior a resistência mecânica do material [24], que foi observado nas amostras realizadas neste trabalho (figura 15).

Durante a cura em autoclave, pode ocorrer a microfissuração das amostras, devido à elevação de temperatura, uma vez que a resistência mecânica obtida pela pré-cura pode não ser suficiente para suportar a dilatação do material. Este fato pode ser a causa do aumento do desvio padrão com o aumento do tempo de autoclavagem, observados nas figuras 13 e 15.

Quando analisadas densidade e resistência notamos que a resistência da amostra A – 12 horas de autoclavagem é próxima da amostra E - comercial, porém a densidade ainda deixa a desejar, pois possui valores altos, que devem ser melhorados.

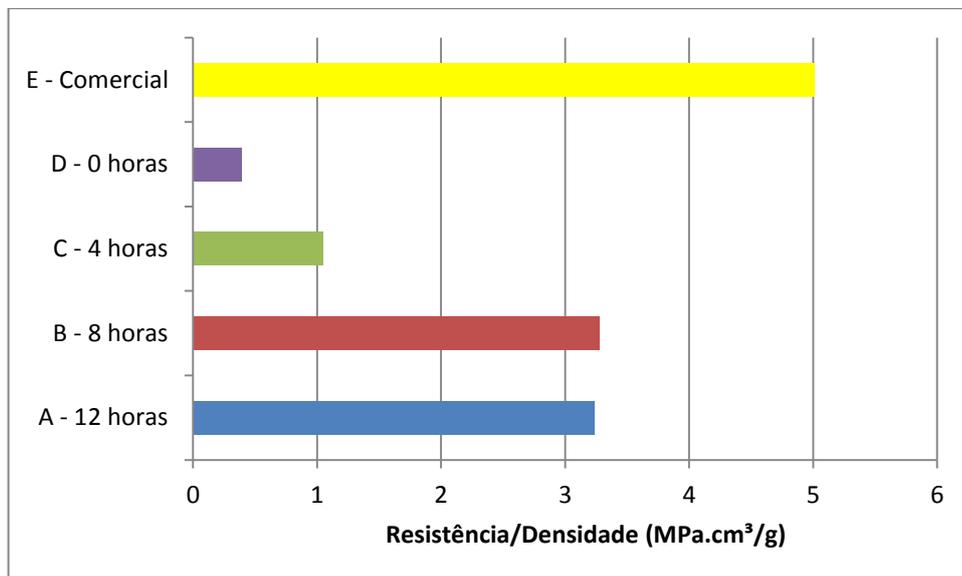
Ao se comparar as amostras autoclavadas de 12 e 8 horas (A e B), observa-se que os valores de resistência específica (Figura 16) são bem próximos, portanto a utilização de um tempo de autoclavagem de 8 horas é vista como uma alternativa à produção de AAC.

Figura 15 - Resistência à compressão do AAC



Fonte: Próprio autor

Figura 16 - Relação específica



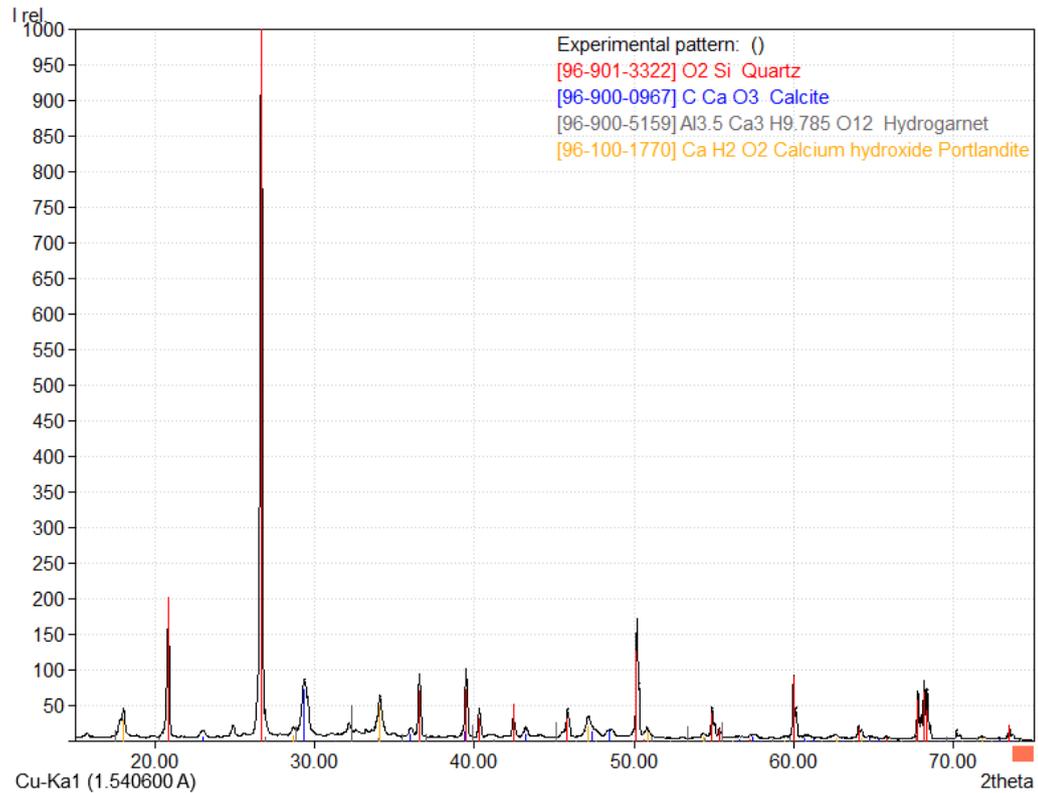
Fonte: Próprio autor

4.2 Difração de raios-X

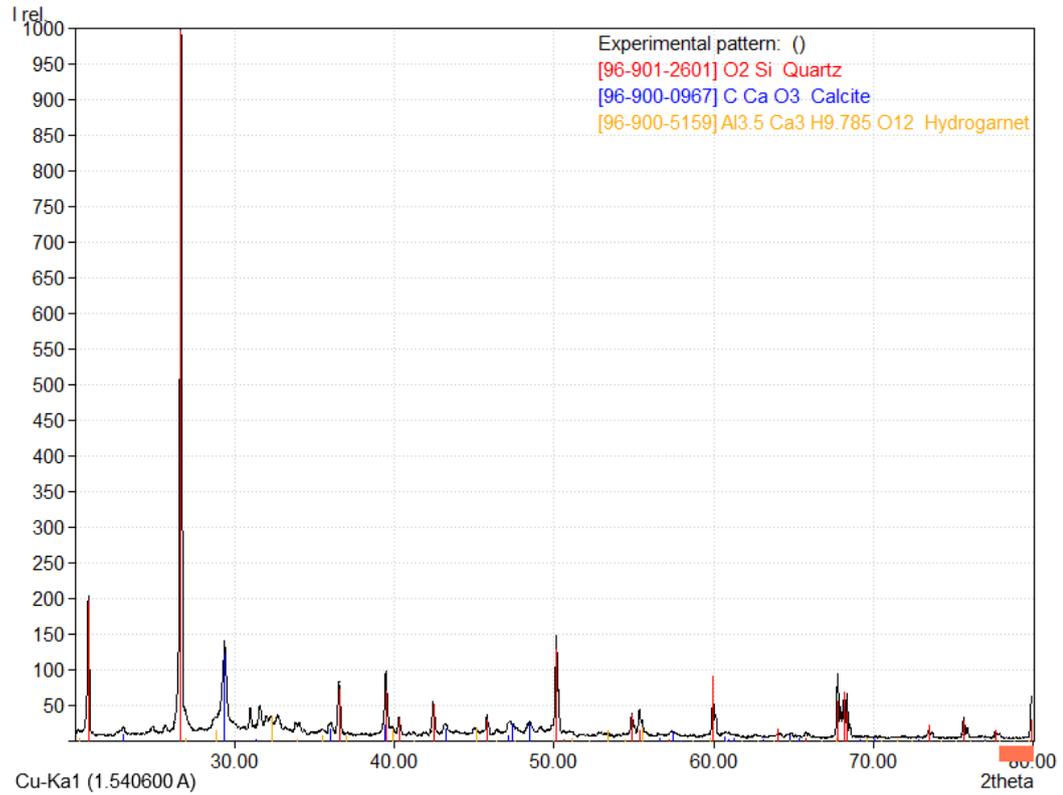
O resultado mineralógico (Figura 17) apresenta o desenvolvimento da estrutura cristalina. Os picos mais importantes no AAC são referentes ao quartzo ($2\theta \approx 27^\circ$) e da tobermorita em ($2\theta \approx 30^\circ$) [33]. Na amostra não autoclavada e autoclavada durante 4 horas, não há formação de

tobermorita (Figura 17 – A e B). Portanto os resultados comprovam que durante a cura em autoclave há a reação entre quartzo (sílica) e cálcio formando tobermorita, e esta reação esta diretamente relacionada com o tempo de autoclavagem [13, 27, 33].

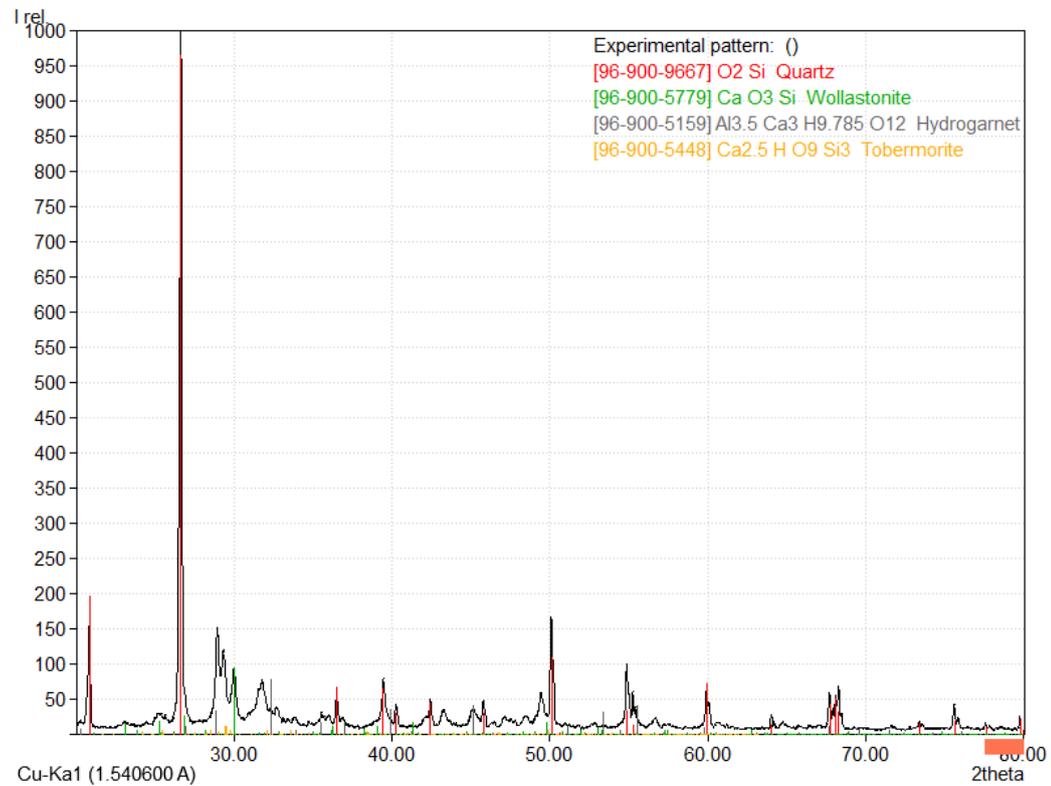
Figura 17 - Difração de raios-X para AAC



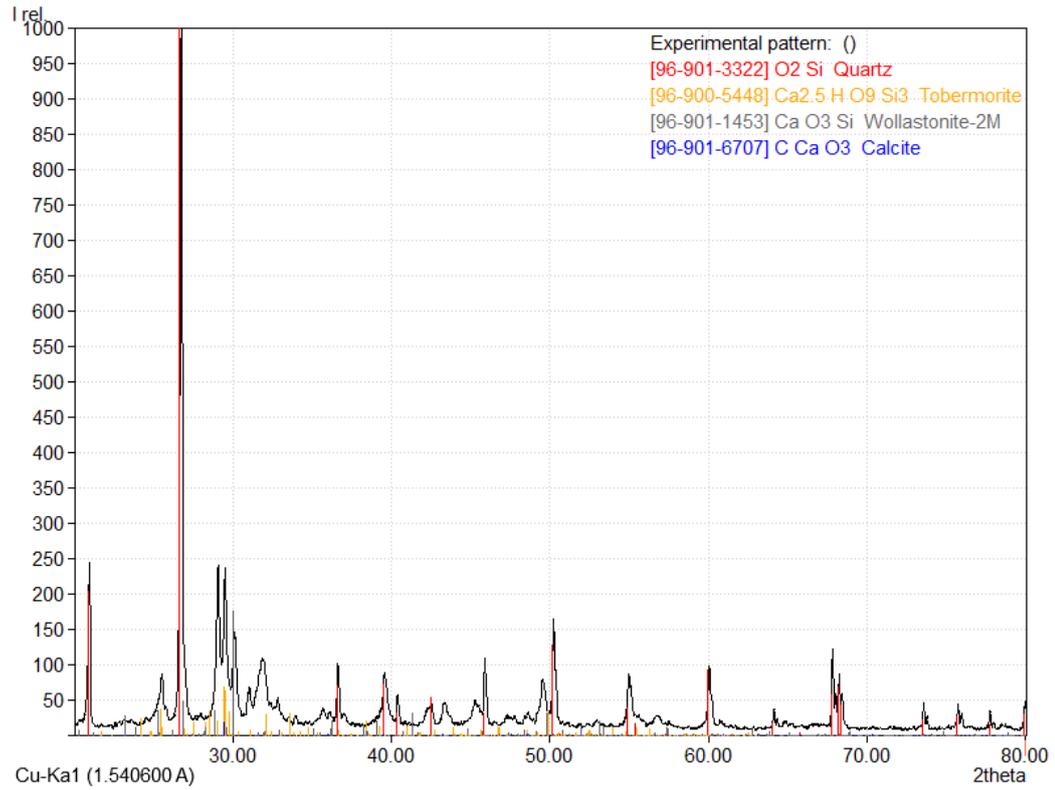
(A) Amostra não autoclavada – D



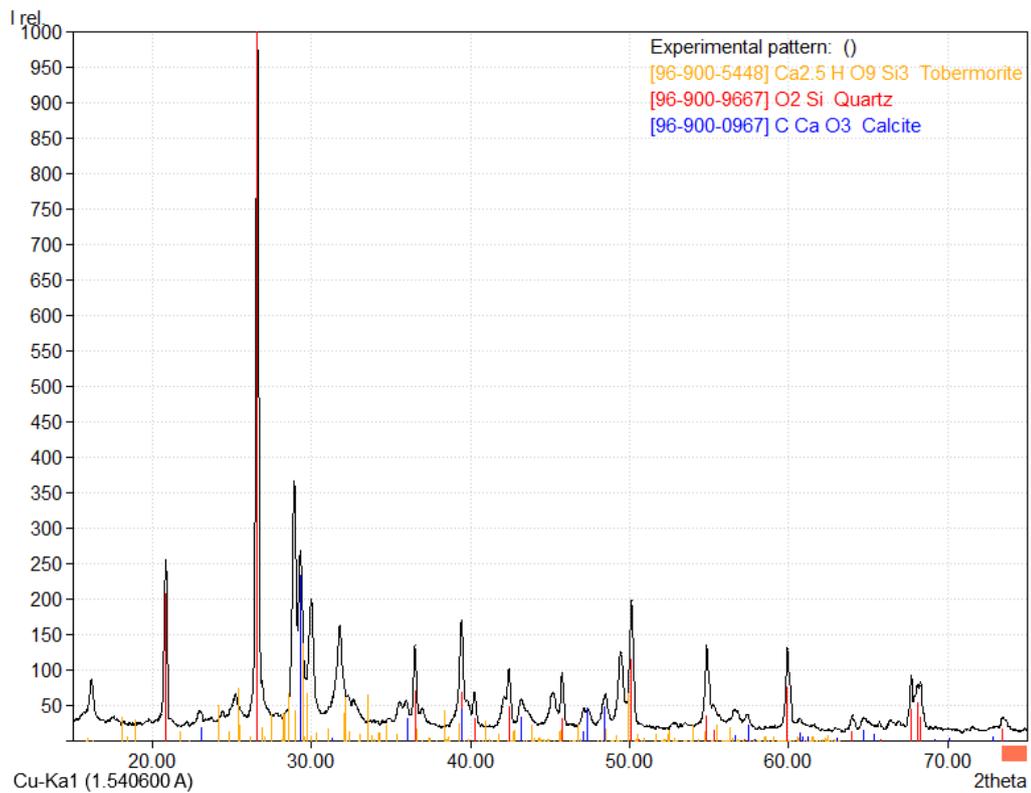
(B) Amostra autoclavada 4 horas – C



(C) Amostra autoclavada 8 horas - B



(D) Amostra autoclavada 12 horas - A



(E) Amostra comercial - E

Fonte: Próprio autor

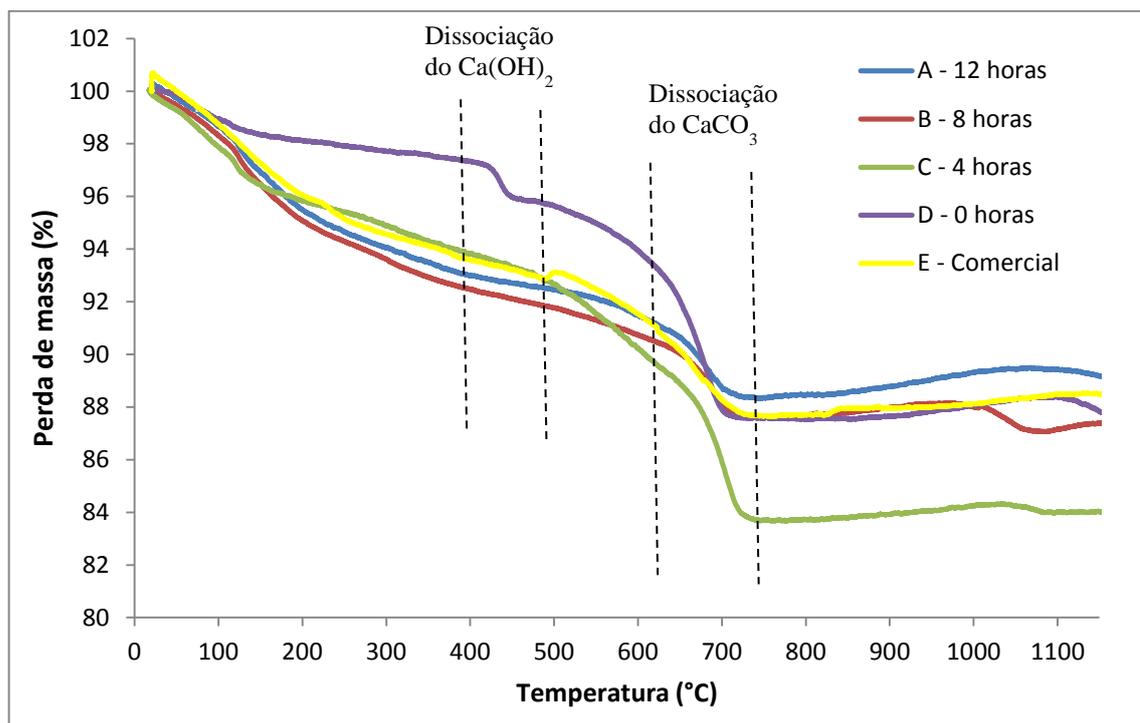
4.3 TG e DTG

Os ensaios térmicos são apresentados nas figuras 18 e 19.

Para uma temperatura entre 300 e 500°C ocorre a dissociação do hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 ($\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$) [32]. As amostras autoclavadas apresentam menor quantidade de Ca(OH)_2 , uma vez que o Ca é consumido na formação da tobermorita, assim sendo a perda mássica nessa faixa temperatura ocorre apenas na amostra não autoclavada – D.

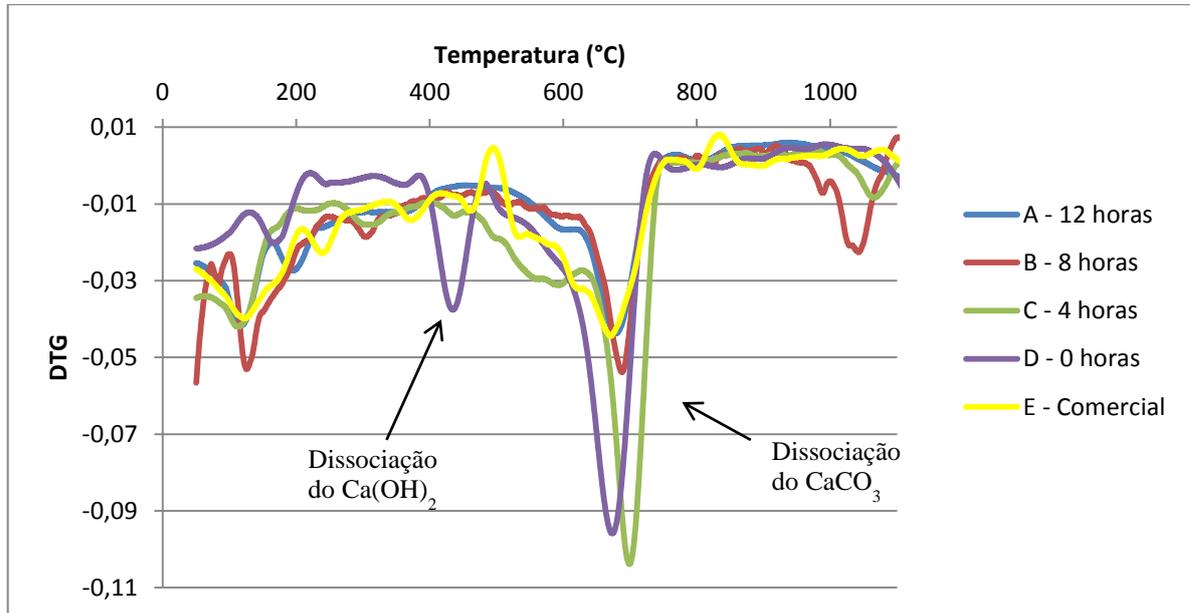
Observa-se que a perda mássica é acentuada entre 600 e 700°C. Essa faixa de temperatura é típica da degradação do carbonato de cálcio, CaCO_3 ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), que é comprovada pela presença de calcita nas análises de DRX [32].

Figura 18 - Comparação termogravimétrica



Fonte: Próprio autor

Figura 19 - Derivada de primeira ordem (DTG)

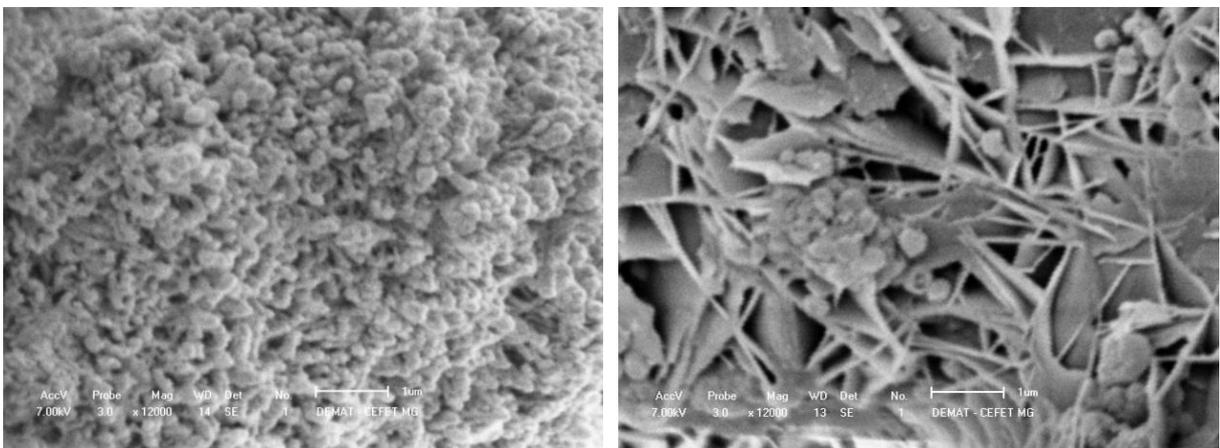


Fonte: Próprio autor

4.4 MEV

Nas imagens formadas na microscopia eletrônica de varredura é possível observar aspectos morfológicos do AAC, como a estrutura amorfa da amostra não autoclavada (Figura 21-esquerda) e a estrutura cristalina originária da tobermorita na amostra autoclavada (Figura 21-direita). De acordo com KIHARA, os cristais de tobermorita são preferencialmente tabulares e alongados, formando agregados cristalinos justapostos, sem orientação preferencial, como observado na figura 21- direita [5, 27, 34].

Figura 20 - Microscopia eletrônica de varredura



Amostra não autoclavada – D (esquerda); Amostra autoclavada 12 horas – A (direita)

Fonte: Próprio autor

5 CONCLUSÃO

A cura em autoclave no Concreto Celular é essencial para a obtenção da resistência mecânica necessária para aplicações em construção civil, uma vez que o material é poroso.

A microestrutura analisada, pelos ensaios de DRX e TG (Figuras 17 a 20), indicou que o tempo de autoclave interfere na formação de tobermorita, que é responsável pela resistência mecânica do material.

De acordo com a Figura 12, para uma resistência a compressão de aproximadamente 3MPa, a densidade do AAC comercial encontrar-se entre 400 e 600Kg/m³, porém para a mesma resistência mecânica as amostras realizadas em laboratório possuem densidade de aproximadamente 900Kg/m³, como observado na Figura 15. Indicando assim que a formulação necessita de ajustes para que, na fase de pré-cura, haja uma melhor formação e distribuição de poros.

A análise dos resultados obtidos das amostras autoclavadas por 12 horas (A) e 8 horas (B) demonstra que ambas possuem características similares, o que indica que a redução do tempo de autoclavagem de 12 para 8 horas é viável, reduzindo assim os custos na produção de ACC.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14974-1, Bloco silico-calcário para alvenaria. Parte 1: Requisitos, dimensões e métodos de ensaio. 2003.
- [2] ANDRADE, Jean Carlos Silva. Estudo e caracterização de matérias-primas para o desenvolvimento de blocos silico-calcários. 2009. 107f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13438, Blocos de concreto celular autoclavado – Especificação. 1995.
- [4] TEIXEIRA FILHO, Fernando José Considerações sobre algumas propriedades dos concretos celulares espumosos. Dissertação de Mestrado, Escola politécnica da USP, São Paulo, 1992, 112p.
- [5] NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K. Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement & Concrete Composites*. Índia, v.22, p. 321-329. 2000.
- [6] CORTEPASSI, Eduardo Mesquita. Avaliação do Comportamento de concretos celulares espumosos de alto desempenho. 2005. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2005.
- [7] GUEST, J; CARROLL, R.A. The use of pulverised fuel ash for the manufacture of Autoclaved Aerated Concrete. In: LINBACHIYA, Mukesh; ROBERTS, John. *Autoclaved Aerated Concrete: Innovation and Development*. London: Taylor & Francis Group, 2005, p. 49-57.
- [8] Blocos de concreto. Disponível em: <http://www.arq.ufsc.br/arq5661/trabalhos_2004-1/tijolos/bc_tipos.htm>. Acessado em: Junho, 2012.
- [9] BEIER, R.; VOS, R. A. de. The Keen-Crete plant, the Keen Way to produce aircrete. In: LINBACHIYA, Mukesh; ROBERTS, John. *Autoclaved Aerated Concrete: Innovation and Development*. London: Taylor & Francis Group, 2005, p. 109-114.
- [10] BOGGELEN, W. M. van. Developments and opportunities for AAC with modern production technology. In: LINBACHIYA, Mukesh; ROBERTS, John. *Autoclaved Aerated Concrete: Innovation and Development*. London: Taylor & Francis Group, 2005, p. 11-22.
- [11] HAMA, Y; SUZUKI, K.; SHIBATA, S.; AONO, Y. Standard installation methods in Japan for non-load-bearing walls made of AAC panels. In: LINBACHIYA, Mukesh; ROBERTS, John. *Autoclaved Aerated Concrete: Innovation and Development*. London: Taylor & Francis Group, 2005, p. 455-462.
- [12] AHMED, A.; FRIED, A. N.; LINBACHIYA, Mukesh C.; ROBERTS, John J. Flexural strength of low density blockwork. In: LINBACHIYA, Mukesh; ROBERTS, John.

Autoclaved Aerated Concrete: Innovation and Development. London: Taylor & Francis Group, 2005, p. 405-414.

[13] BARRETO, Matheus de Faria et al. Análise microestrutural de blocos de concreto celular autoclavado (BCCA) com o auxílio de métodos instrumentais. *Conexão ciência (Online)*, v. 7, n. 2, p. 38-63, 2012.

[14] MOTA, Jacqueline Ávila Ribeiro. “Influência da Junta Vertical na Resistência à Compressão de Prismas em Alvenaria Estrutural de Blocos de Concreto e Blocos de Concreto Celular Autoclavado”. Belo Horizonte: UFMG, 2001. 223 p. Dissertação (Pós-Graduação) – Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

[15] MANSUR, A. A. P.; MANSUR, H. S. Caracterização de matérias-primas utilizadas na produção de concreto celular. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS, 17, 2006, Foz do Iguaçu. Anais. Foz do Iguaçu: 2006. p. 399-410.

[16] HAAS, M. The future of AAC – from a material scientist’s point of view. In: LINBACHIYA, Mukesh; ROBERTS, John. *Autoclaved Aerated Concrete: Innovation and Development*. London: Taylor & Francis Group, 2005, p. 187-194.

[17] European Autoclaved Aerated Concrete Association. Disponível em: <<http://www.eaaca.org/eaaca/>>. Acessado em: Junho, 2012.

[18] Blocos de concreto celular autoclavado. Disponível em: <<http://www.construpor.com/index.php?p=item2-1>>. Acessado em: Junho, 2012.

[19] SHIBATA, S.; AONO, Y.; MATSUSHITA, F. Carbonation of in-service Autoclaved Aerated Concrete. In: LINBACHIYA, Mukesh; ROBERTS, John. *Autoclaved Aerated Concrete: Innovation and Development*. London: Taylor & Francis Group, 2005, p. 180-185.

[20] SHIBATA, S.; AONO, Y.; MATSUSHITA, F. Carbonation shrinkage of Autoclaved Aerated Concrete. In: LINBACHIYA, Mukesh; ROBERTS, John. *Autoclaved Aerated Concrete: Innovation and Development*. London: Taylor & Francis Group, 2005, p. 195-202.

[21] HAAS, M. Carbonation of AAC. In: LINBACHIYA, Mukesh; ROBERTS, John. *Autoclaved Aerated Concrete: Innovation and Development*. London: Taylor & Francis Group, 2005, p. 265-270.

[22] TOLENTINO, Evandro. Notas de aula de Tecnologia de Materiais Cerâmicos. Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG. Belo Horizonte, 2010

[23] RIBEIRO, Carmen C.; PINTO, Joana Darc da S.; STARLING, Tadeu. *Materiais de Construção Civil*. 3. ed. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2011. p. 33, 37, 45, 46, 49.

[24] ISU, Norifumi; ISHIDA, Hideki; MITSUDA, Takeshi. Influence of Quartz Particle Size on the Chemical and Mechanical Properties of Autoclaved Aerated Concrete (I) Tobermorite Formation. *Cement and Concrete Research*. Japan, v.25, n.2, p. 243-248. 1995.

[25] ISU, Norifumi; TERAMURA, Satoshi; ISHIDA, Hideki; MITSUDA, Takeshi. Influence of Quartz Particle Size on the Chemical and Mechanical Properties of Autoclaved Aerated

Concrete (II) Fracture Toughness, Strength and Micropore. Cement and Concrete Research. Japan, v.25, n.2, p. 249-254. 1995.

[26] HOLT, Erika; RAIVIO, Paula. Use of gasification residues in aerated autoclaved concrete. Cement and Research. Finland, v.35, p. 796-802. 2005.

[27] KIHARA, Y. A síntese da tobermorita e sua aplicação na engenharia de materiais. Bol. IG-USP, Publ. espec. [online]. 1991, n.9, pp. 177-180.

[28] HAUSER, André; EGGENBERGER, Urs; MUMENTHALER, Thomas. Fly ash from cellulose industry as secondary raw material in autoclaved aerated concrete. Cement and Concrete Research. Switzerland, v.29, p. 297-302. 1999.

[29] LAUKAITIS, A.,FIKS, B. Acoustical properties of autoclaved aerated concrete. Applied Acoustics, 67, p.284-296, 2006

[30] KUS, H., CARLSSON, T. Microstructural investigations of naturally and artificially weathered autoclaved aerated concrete. Cement and Concrete Research, 33, p.1423-1432, 2003.

[31] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13440, Blocos de Concreto Celular Autoclavado – Verificação da Densidade de Massa Aparente Seca. 1995.

[32] DWECK, J.; PINTO, Carolina A.; BÜCHLER, P. M. Study of a Brazilian spent catalyst as cement aggregate by thermal and mechanical analysis. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 92, n. 1, p. 121-127, 2008.

[33] AL-WAKEEL, E. I.; EL-KORASHY, S. A. Reaction mechanism of the hydrothermally treated CaO-SiO₂-Al₂O₃ and CaO-SiO₂-Al₂O₃-CaSO₄ systems. Journal of materials science, v. 31, n. 7, p. 1909-1913, 1996.

[34] ARONI, in S. Autoclaved aerated concrete: properties, testing and design: RILEM recommended practice: RILEM Technical Committees 78-MCA and 51-ALC. CRC PressI Llc, 1993. 404 p.

[35] ERIKSSON, J. A. Method of manufacturing porous material from portland cement. United States patent US 1819018. 1931 Aug 18.

ANEXO 1

COATING OR PLASTIC.

106/57
Patented Aug. 18, 1931

1,819,018

UNITED STATES PATENT OFFICE

JOHAN AXEL ERIKSSON, OF STOCKHOLM, SWEDEN

METHOD OF MANUFACTURING POROUS MATERIAL FROM PORTLAND CEMENT

No Drawing. Application filed March 27, 1923, Serial No. 628,143, and in Sweden July 26, 1920.

It is previously known that a porous material can be manufactured from cement by mixing the same with a pulverous metal which is adapted to generate gas from cement in the presence of water, such as aluminium, zinc, etc. Hithertofore, such pulverous metal has been added to the cement mixed with a mortar which has been manufactured with sand.

However, it has been found that this addition of sand offers several inconveniences. In spite of the addition of sand the cement mortar will be so "fat" that salt eruptions will be formed on the surfaces of the bricks formed from such material, and moreover it has been impossible to obtain a uniform product since the heavy sand will sink to the bottom before the mass has hardened.

The method forming the object of this invention makes it possible to avoid these inconveniences. The method consists in adding to the cement a mixture of so called "shale-lime" or alum-shale lime and a pulverous metal which is adapted to develop gas from the cement in the presence of water, such as aluminium, zinc or magnesium. Bituminous or carboniferous shale-lime is an intimate finely divided mixture of shale ashes and lime and may contain different proportions of shale ashes and lime, for instance 50% by weight of each or 60% by weight of lime and 40% of weight of shale ashes. Shale ashes and lime should preferably first be finely pulverized separately and then be ground together.

When the gas generating metal powder is added to the cement together with shale-lime the product obtained will get a high degree of porosity and a uniform composition which is due to the fact that the whole mass consists of a finely divided binding agent and water. The mass will thus not contain any heavy coarse particles which will sink to the bottom but only very light and fine particles which will remain uniformly suspended in the liquid mass during the hardening of the same. Moreover, the shale-lime will not cause any salt eruptions on the surfaces of the bricks formed from the mass as the shale will bind the salts. Moreover, the addition of shale-

lime offers the advantage that the cement can be mixed with the same without the strength of the same being diminished.

A pulverous metal of the kind described is introduced into the mixture of raw materials in very small quantities, generally in quantities less than 1 per cent. The introduction of the same may be executed at any state of the manufacture of the mixture of raw materials but it ought to be ground together with the latter so that an intimate mixture is effected. When water is then added to the pulverous mixture a chemical reaction is effected due to which great quantities of gas are generated which causes an increase of the volume of the mass. This takes place before the "binding" begins and when the material then has hardened a porous stone-like material is obtained.

The water should preferably be added at a somewhat elevated temperature, say 25-40° C., in order that the reaction may take place more rapidly and a higher quantity of gas may be produced. In order to reduce the period for the "binding" of the mass it is convenient to add substances adapted for said purpose, such as sodium carbonate, gypsum and so called aluminat cement. The latter which causes a very rapid binding (hardening) should be added in minute quantities, for instance 2 to 5%.

Examples of the composition

① 70-85% by weight of shale-lime, 15-30% of Portland cement, 0,25% of zinc powder and 50-100% of water.

② 60-80% of cement, 40-20% of shale lime, 0,15% of aluminium powder and 40-80% of water.

The material manufactured according to the present invention will get a high degree of porosity and the pores will be fully separated from one another by means of partition walls. Due to this fact the air cannot circulate through the material since the different cells containing the generated gas are wholly closed. The material will get a very low specific gravity, for instance 0,5. Due to the high porosity of the product relatively small quantities of the raw materials are re-

*shale-lime**shale-lime*

2

1,819,018

quired for the manufacturing and, in addition, since the exterior walls, partition walls or other parts of buildings which are erected from the bricks in question become very light
 5 the further advantage is gained that simpler and cheaper building constructions than hithertofore can be used.

The material in question also has a high heat insulating power, wherefore it is very
 10 convenient to use the same for erecting exterior walls of buildings. It is also easily shapable so that it can be moulded to bricks, plates and the like, or even complete walls can be moulded by the same. Besides ex-
 15 terior walls or partition walls the material can be used for the construction of frame works so replacing hollow bricks. It has a high strength which may be increased by decreasing the degree of porosity.

20 The material can easily be sawed and cut, especially so just after having been manufactured, i. e. when the resistance is still rather low. Therefore it is convenient to manufacture bricks or plates from the material in question in such a manner that large
 25 blocks, for instance 10 x 10 x 0,5 meters, are first moulded, said blocks being then sawed or cut to bricks or plates of the desired size. Hereby the advantages are gained that the
 30 bricks or plates can be manufactured at a lower price than if they should be moulded directly, that their surfaces become very smooth and that they can be made of exact measures.

35 I claim:

1. A cementitious composition adapted to form a porous material on mixing with water and subsequent setting, comprising cement, shale ashes, lime, and a metal adapted to
 40 react with the other ingredients to generate a gas when the said composition is mixed with water.

2. A cementitious composition adapted to form a porous material on mixing with water and subsequent setting, comprising cement,
 45 an intimate mixture of shale ashes and lime, and a metal adapted to react with the other ingredients to generate a gas when the said composition is mixed with water.

3. A cementitious composition adapted to form a porous material on mixing with water and subsequent setting, comprising about
 50 60-85% cement, about 40-15% of an intimately ground mixture of shale ashes and
 55 lime, and a small amount of a metallic powder adapted to react with the other ingredients to generate a gas when the said composition is mixed with water.

In testimony whereof I have affixed my
 60 signature.

JOHAN AXEL ERIKSSON.

65