

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIAS DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M

RUDIMAR PEDRO

**PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO CELULAR USANDO
ESPUMÍGENO DE ÁCIDOS GRAXOS DE COCO E RESÍDUOS DE PEDRAS
ROLADAS DE ÁGATA**

Porto Alegre

2017

RUDIMAR PEDRO

**PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO CELULAR USANDO ESPUMÍGENO
DE ACIDOS GRAXOS DE COCO E RESÍDUOS DE PEDRAS ROLADAS DE
ÁGATA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção de título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientador: REJANE MARIA CANDIOTA TUBINO
Co-orientador: RODRIGO DE ALMEIDA SILVA

Porto Alegre

2017

Folha de Aprovação

Este trabalho de Conclusão foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de Mestrado em ENGENHARIA e aprovado em sua forma final pelo orientador e pelo coordenador do Programa em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dra. REJANE MARIA CANDIOTA TUBINO

Orientador

RODRIGO DE ALMEIDA SILVA

Co-orientador

Escola de Engenharia

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Dr. Alexandre Knop- UNILASALLE

Prof. Dra. Francieli Tiecher Bonsembiante-
CIENTEC

Prof. Dr. Gerson Miltzarek- UFRGS

Prof. Dr. Jean Carlo Salomé dos Santos
Menezes- UNOESC

**A MINHA MÃE ANTONIA.
AO MEU PAI CONSTANTE.
AOS MEUS FILHOS.
AOS MEUS IRMÃOS.**

AGRADECIMENTOS

À Prof. Dra. Rejane Maria Candiota Tubino..

Ao co-orientador Rodrigo de Almeida Silva.

Ao Alessandro, grande amigo e parceiro de estudos.

À Fernanda, da terra das jóias e gemas uma amiga preciosa.

Ao CT-Pedras Soledade e a UPF.

À IMED e funcionários dos laboratórios.

Ao PPGE3M, a todos seus funcionários e professores.

Ao PPGE0-UFRGS na pessoa da Prof. Dra. Lauren Duarte.

À Instituição UFRGS, pela oportunidade única de usufruir do seu ensino e estrutura.
É PÚBLICA, É GRATUITA, É DE EXCELENCIA.

RESUMO

O estado do Rio Grande do Sul é o terceiro maior produtor de pedras preciosas do Brasil, atrás apenas de Minas Gerais e da Bahia, destacando-se a produção de ágatas na região de Salto do Jacuí. Na lavra e beneficiamento são produzidos grandes quantidades de resíduos que estão a espera de destino e utilização ambientalmente correta. De modo específico, este trabalho avaliou a possibilidade de utilização do resíduo de ágata rolada na fabricação de blocos de concreto celular espumígeno (BCCE), utilizados como blocos de vedação na construção civil. Adicionalmente, desenvolveu-se uma mistura de dois agentes espumígenos provenientes de ácidos graxos de coco, como agente incorporador de ar, pela adição de espuma pré-formada. A metodologia de produção foi baseada no modelo de produção dos blocos de uma pequena indústria na Região de Passo Fundo/RS, que produz e comercializa BCCE. Em um estudo prévio de bancada, foram estudadas a composição da espuma, a granulometria do resíduo, o teor de água e o tempo de mistura. Os materiais componentes do BCCE são resíduo de sílica de pedras roladas de ágatas (SiO_2 - 92,5%), espuma preparada com ácidos graxos de coco, água de qualidade potável e cimento como agente aglomerante. Nos testes de bancada, foram confeccionados 36 corpos de prova, em forma cilíndrica, de tamanho 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, com diferentes volumes de ar incorporado, divididos em três grupos. As amostras foram deixadas durante 28 dias à temperatura ambiente, em processo de cura, e após foram analisados quanto à resistência à compressão, densidade e distribuição das bolhas de ar. Os resultados foram avaliados pela Análise de Variância e demonstraram que o Grupo II apresentou densidade de 430 Kg/m^3 , e resistência de 0,92 MPa. Este resultado está próximo do atendimento aos requisitos da norma para classe de resistência de $< 400 \text{ Kg/cm}^3$ (NBR 13438, 2013).

Palavras-chave: Bloco de concreto celular, pó de ágata, agente espumígeno

ABSTRACT

The state of Rio Grande do Sul is the third largest producer of gemstones in Brazil, only losing to the states of Minas Gerais and Bahia, and agate production stands out in the region of Salto do Jacuí. Great amounts of waste, which are waiting for environmentally correct destination and use, are produced in mining and processing. Particularly, this study assessed the potential use of rolling waste of agates in civil construction, and the manufacturing of foam concrete blocks as a full substitute for sand. Additionally, a mixture was made of two foaming agents derived from coconut fatty acids as air-developer agent, and as hydraulic binder the Portland CP V ARI-RS cement. The production methodology was based on the production model of the blocks in a small industry, which produces and sells foam concrete blocks in the region of Passo Fundo, RS, Brazil. In a previous bench study the parameters foam composition, residue granulometry, water content, and mix time were adequate and later replicated industrially. The materials composing foam concrete blocks are rolled agate stones silica ($\text{SiO}_2 - 92.5\%$), foam from coconut fatty acids, fresh water, and cement as binder. In bench tests, 36 cylindrical specimens were produced, with 50 mm of diameter and 100 mm of height, with different volumes of incorporated air, divided into three groups. The samples were kept at room temperature for 28 days with healing process, and after that, the resistance to compression, density, and air bubbles distribution were analyzed. Results were assessed by Analysis of Variance, and showed that Group II presented density of 430 Kg/m^3 and resistance of 0.92 MPa. This result is close to meeting the requirements of the norm for resistance class of $< 400 \text{ Kg/cm}^3$ (NBR 13438, 2013).

Keywords: Foam cellular concrete, agate powder, foaming agent.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação do concreto celular.....	23
Figura 2 – Mapa Gemológico da região sul do Brasil.....	24
Figura 3 – Teoria da formação da estrutura e estabilidade de poros.	28
Figura 4 – Fluxograma de caracterização dos materiais.....	29
Figura 5 – Equipamento de desbaste.....	31
Figura 6 – Fórmula química dos agentes espumígenos.....	32
Figura 7 – Frente de extração de Ágata em Garimpo de Salto do Jacuí/RS.....	34
Figura 8 – Lotes de classificação de geodos de Ágata.	35
Figura 9 – Fluxograma do processo de produção da pedra ágata e resíduos gerados	36
Figura 10 – Fluxograma da produção de pedras roladas de ágatas na indústria.....	37
Figura 11 – Britadeira presente na indústria de pedras roladas de ágatas.	38
Figura 12 – Equipamento utilizado para dar forma às pedras roladas de ágatas.....	38
Figura 13 – Equipamentos em funcionamento na indústria de pedras roladas de ágatas	39
Figura 14 – Local onde é realizado o tingimento das pedras roladas de ágatas.....	40
Figura 15 – Etapas finais de acabamento das pedras roladas de ágatas	40
Figura 16 – Principais componentes de um Micro tomógrafo de Raios-X.....	45
Figura 17 – Fluxograma de produção dos BCCE.....	47
Figura 18 – Corpos de prova do BCCE.....	49
Figura 19 – Geração de espuma em agitação mecânica e espuma acabada.....	50
Figura 20 – Curva granulométrica e resíduos de sílica	54
Figura 21 – (a) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do resíduo, aumento de 4000 X e (b) Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) do resíduo.....	55
Figura 22 – Densidade de espuma em agitação mecânica.....	57

Figura 23 – Teste de estabilidade e viscosidade do espumígeno.	59
Figura 24 – Relação entre densidade e massa de espuma.	60
Figura 25 - Volume gerado em função da relação água/cimento e massa de espuma adicionada.	61
Figura 26 – Relação resistência mecânica dos BCCE e massa de espuma.....	62
Figura 27 – Gráfico com o comportamento da resistência à compressão em relação a densidade e volume de espuma adicionado.	63
Figura 28 – Relação de densidade e resistência para teste industrial.	64
Figura 29 – Micro tomografia do BCCE.....	66
Figura 30 – Tomografia realizada nos traços estudados por Melo.....	67
Figura 31 – Imagem do BCCE tratada.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes, resistência à compressão e densidade de massa aparente.	22
Tabela 2 - Ensaio realizados na análise da água utilizada no experimento.	31
Tabela 3 - Equipamentos utilizados para a realização dos ensaios da pesquisa.	33
Tabela 4 - Parâmetros usados nos ensaios de bancada dos BCCE, utilizando resíduos de pedras roladas de ágatas.	48
Tabela 5 - Características físicas, químicas do resíduo de sílica.	52
Tabela 6 - Quantificação das fases do resíduo de ágata.	56
Tabela 7 - Análise da variância para resistência a compressão.	65
Tabela 8 - Análise da variância para a densidade.	65
Tabela 9 - Comparação das características dos BCCE industrial e de estudo	69
Tabela 10 - Comparativo de custos do BCCE industrial e de estudo.	70

LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS

AAC - Concreto Auto Clavado

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

BCCA - Bloco de Concreto BCCE-

BCC - Bloco de Concreto Celular

BCCE - Bloco Cimento Celular Espumígeno

CAS - Abreviação de Chemical Abstract Service. O número CAS representa o registro de substâncias químicas registradas no sistema.

C C A - Cinza de Casca de Arroz

CH - Hidróxido de Cálcio

C S H - Silicato Cálcio Hidratado

C 3 S - Silicato de Cálcio Tri hidratado

C 3 A - Aluminato Tri cálcico

LAS - Surfactante derivado de Alquil sulfato, ou alquil benzeno sulfonado linear

INCI – Internacional Nomenclature off Cosmetic Ingredient é um sistema internacional de codificação da nomenclatura de ingredientes cosméticos

NAAC - Concreto Não Auto Clavado

RAA - Reação álcali agregado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 JUSTIFICATIVA e OBJETIVOS.....	13
1.2 OBJETIVO GERAL.....	13
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1 CONCRETO E ARGAMASSA.....	14
2.2 ADIÇÕES MINERAIS NO CONCRETO E ARGAMASSA.....	15
2.3 USO DO RESÍDUO DE ÁGATA EM CONCRETO E ARGAMASSA.....	18
2.4 BLOCOS DE CONCRETO CELULAR.....	20
2.5 RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE ÁGATAS.....	23
2.5.1 Geologia e Gênese das Ágatas no Rio Grande do Sul.....	23
2.5.2 Agentes Espumígenos.....	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 MATERIAIS.....	30
3.1.1 Cimento.....	30
3.1.2 Resíduo de Pedras Roladas de Ágatas.....	30
3.1.3 Água.....	31
3.1.4 Agente Espumígeno.....	32
3.1.5 Equipamentos.....	33
3.2 METODOLOGIA.....	33
3.2.1 Caracterização dos Materiais.....	33
3.2.2 Beneficiamento das Ágatas.....	34
3.2.3 Resíduos de Pedras Roladas de Ágatas.....	37

3.2.4	Distribuição Granulométrica.....	41
3.2.5	Massa Específica e Área Superficial.....	41
3.2.6	Composição Química Elementar.....	42
3.2.7	Mineralogia e Morfologia das Partículas.....	42
3.3	AGENTE ESPUMÍGENO.....	43
3.4	BLOCOS DE CONCRETO CELULAR ESPUMÍGENO.....	44
3.4.1	Densidade.....	44
3.4.2	Resistência à Compressão.....	44
3.4.3	Distribuição das Bolhas de Ar no BCCE.....	45
3.4.4	Absorção de Água.....	45
3.4.5	Preparação dos Blocos de Concreto Celular.....	46
3.5	PREPARAÇÃO DA ESPUMA.....	49
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PROCESSO (ANOVA).....	50
3.7	COMPARAÇÃO ENTRE BCCE DE RESÍDUO E BCCE DE AREIA NATURAL.....	51
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
4.1	RESÍDUOS DE PEDRAS ROLADAS DE ÁGATAS.....	52
4.1.1	Características Físicas e Químicas do Resíduo de Pedras Roladas de Ágata.....	52
4.1.2	Granulometria do Resíduo de Pedras Roladas de Ágata.....	53
4.1.3	Morfologia e Mineralogia do Resíduo de Pedras Roladas de Ágata.....	54
4.2	AGENTE ESPUMÍGENO.....	57
4.3	BLOCOS DE CONCRETO CELULAR ESPUMÍGENO.....	59
4.3.1	Densidade, Resistência à Compressão e Absorção de Água.....	59
4.3.2	Distribuição das Bolhas de Ar.....	66
4.3.3	Comparação dos Blocos Industrial e Laboratorial.....	68
5.	CONCLUSÕES.....	71

6. TRABALHOS FUTUROS.....	73
7. REFÊRENCIAS.....	74

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland, os materiais construtivos à base de cimento Portland compõem a classe de materiais mais utilizados no mundo, atrás apenas ao uso de água potável. Ao mesmo tempo em que se ampliam as atividades econômicas da sociedade, resultam em grande consumo de insumos, aumentando drasticamente a utilização de recursos naturais (ABPC, 2002).

Além do cimento, na elaboração de concretos e argamassas, um dos principais componentes é a areia natural, que se refere a um material granular, com tamanho em um intervalo definido (de 2 a 0,06 mm de diâmetro), de composição silicosa, com predominância do mineral quartzo, usado essencialmente na indústria da construção civil, como agregado miúdo. Em 2013, a produção Brasileira foi de 377 milhões de m³ de areia natural, e no Rio Grande do Sul, a produção de areia natural está estimada entre 7 a 9 milhões de toneladas/ano (DNPM, 2013). Deste montante, cerca de 36 % é utilizado na construção civil. Entretanto, o estado tem enfrentado um desafio na extração de areia, visto que, o processo de produção é altamente impactante, principalmente quando se refere à extração nos leitos dos rios (ZANETTE, 2007).

Os agregados utilizados na construção civil são os insumos mais consumidos no mundo, ocupam cerca de $\frac{3}{4}$ do volume do concreto e podem ser classificados levando-se em conta a origem, a densidade e o tamanho dos fragmentos (ABNT NBR 9935, 2011). Segundo Neto (2005), os agregados podem ser classificados como: (i) agregado natural - encontrados na natureza, já na forma de uso, (ii) britados - material submetido ao processo de cominuição para adequar seu tamanho ao uso, (iii) artificiais derivados de processos industriais, (iv) reciclados – resíduos industriais granulares que tenham propriedades adequadas ao uso como agregado.

Na indústria da construção civil, o concreto ocupa um lugar de grande relevância. Dentro da classe dos concretos, podem-se destacar os concretos leves, que devido às suas características físicas e químicas (densidade entre 1.600 a 400 kg/m³, isolamento térmico, isolamento acústico, trabalhabilidade, entre outras) vem

ganhado espaço nos processos construtivos (FERREIRA, 1987). Mais especificamente, para Narayanan e Rhamamurthy (2000) o concreto aerado é um material formado por argamassa que contém pequenas bolhas de ar, formadas por agente químico ou agente espumígeno aprisionadas em sua matriz, com distribuição homogênea.

1.1 Justificativa e Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo estudar a viabilidade de substituição total da areia natural em Blocos de Concreto Celular Espumígeno (BCCE) pelo resíduo de pedras roladas de ágatas, oriundo do beneficiamento de ágatas, e utilizando espuma proveniente de ácidos graxos de coco. O trabalho vem ao encontro de conceitos modernos de tecnologias mais limpas de produção.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral da presente pesquisa é apresentar um estudo que encaminhe uma possibilidade de uso dos resíduos gerados pela indústria de transformação de pedras preciosas, mais precisamente os resíduos de pedras roladas de ágata, como substituto da areia natural na fabricação de BCCE, conjuntamente com espumígenos provenientes de ácidos graxos de coco.

1.3 Objetivos Específicos

- Caracterização do pó de pedras roladas de ágatas
- Verificar a viabilidade técnica e econômica de confecção de BCCE utilizando resíduos de ágatas;
- Estabelecer um processo de produção do BCCE, sem autoclave, em escala de bancada e determinar os parâmetros de produção da espuma utilizada;
- Realizar uma avaliação preliminar da viabilidade econômica destes blocos em escala industrial.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentada a revisão teórica sobre os temas desenvolvidos neste trabalho.

2.1 Concreto e Argamassa

O cimento Portland, insumo base para a construção civil, foi patenteado no ano de 1824 por Josep Aspdin, atualmente tem ampla utilização na fabricação de concretos, porém seu uso está associado a elevado custo ao meio ambiente. Para sua produção, são extraídos bilhões de toneladas de recursos naturais acarretando alto impacto ambiental. O calcário e a argila, matérias primas do cimento, componente responsável pela propriedade de resistência do concreto, estão disponíveis em qualquer lugar do mundo. No entanto, a fabricação de cimento libera grande quantidade de CO₂ (HELENE e ANDRADE, 2007).

Segundo Helene e Andrade (2007) o concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural de construção civil na atualidade. Na mistura do concreto, o Cimento Portland e a água formam uma mistura com fluidez relacionada ao percentual de água. Esta pasta envolve as partículas de agregados, que nas primeiras horas se apresenta em um estado capaz de ser moldado nas mais diversas formas. Com o passar do tempo, iniciam-se uma série de reações irreversíveis entre a água e o cimento, produzindo uma estrutura cristalina de excelente desempenho estrutural.

Assim, basicamente os elementos que compõem o concreto são: cimento Portland; agregado miúdo (areia media) e graúdo (brita); água, além de outros materiais eventuais, os aditivos e as adições.

A adição da água na fabricação do concreto contribui para a reação química que transforma o cimento Portland em uma pasta aglomerante (PETRUCCI, 1998), se essa quantidade de água for pequena, a reação não ocorrerá por completo e também a facilidade de se adaptar às formas ficará prejudicada (redução da trabalhabilidade), se a quantidade for superior à ideal, ocorrerá à diminuição da resistência, em razão do surgimento de poros recorrentes da evaporação do

excesso da água. A porosidade, por sua vez, tem influência na permeabilidade e na durabilidade das estruturas confeccionadas em concreto. Dessa maneira, a proporção entre a água e o cimento influencia diretamente na trabalhabilidade, porosidade, permeabilidade, resistência à compressão e durabilidade dos concretos e argamassas.

O concreto em sua natureza plástica da pasta, no estado fresco, é facilmente moldado de maneira a adquirir e se adaptar à forma desejada, antes que desenvolva um processo de endurecimento, adquirindo resistência suficiente para suportar, sozinho, aos esforços que o solicitam, como a compressão e tração. Apesar de muito usado atualmente na construção civil, foi descoberto desde os primórdios das civilizações (KAEFER, 1998).

Da mesma forma, as argamassas são materiais de construção com propriedades de aderência e endurecimento, obtidos a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo (areia) e água, podendo conter ainda aditivos e adições minerais (CARASEK, 2007).

2.2 Adições Minerais no Concreto e Argamassa

As adições minerais e os aditivos químicos são as substâncias que são adicionadas intencionalmente ao concreto ou argamassa, com o fim de reforçar ou melhorar certas características, inclusive facilitando seu preparo e utilização (PETRUCCI, 1998). Segundo a norma NBR 12655 (ABNT, 2006) aditivos são materiais adicionados ao concreto durante o processo de mistura em uma quantidade não superior aos 5% sobre a massa do cimento contido no concreto, para modificar as propriedades da mistura no estado fresco e/ou no estado endurecido. Os aditivos químicos agem basicamente na forma de dispersão das partículas no meio pastoso e na ação da água sobre os materiais, alterando a reologia do sistema. Eles alteram a tensão superficial da água, aumentando a capacidade de “*molhabilidade*”, modificam as cargas superficiais aumentando a repulsão eletrostática entre as partículas, favorecendo a defloculação e ainda pela separação causada por cadeias carbônicas longas. (SANTOS, 2011).

Já as adições minerais possuem um forte apelo ambiental. Isso se deve à procedência de muitas das adições minerais, como os resíduos de vários processos produtivos, tais como: escória de alto-forno, cinza volante, sílica ativa, etc. Esses resíduos são incorporados aos materiais cimentícios, melhorando suas propriedades, e ainda reduzindo o impacto ambiental e a pressão sobre os recursos naturais. As adições minerais ainda podem apresentar efeitos distintos, tais como efeito *filler*, cimentante, pozolânico, e reações álcali-agregado (SANTOS, 2011).

Segundo Kihara e Centurione (2005), as adições minerais podem produzir efeitos químicos e físicos na microestrutura do concreto. Como efeito químico das adições minerais, tem-se a sua capacidade de reação com o hidróxido de cálcio, produzido pela hidratação do cimento Portland, na formação adicional do C-S-H (silicato de cálcio hidratado), que é o responsável principal pela resistência das pastas de cimento hidratadas.

A utilização de resíduos minerais vem sendo empregada na indústria do concreto e traz vantagens em âmbitos técnicos, econômicos e ambientais. Ao substituir o cimento por esses resíduos, há a redução do consumo de energia, da poluição do ar gerados por sua produção, e ainda contribui na busca por concretos de alto desempenho (RABELO e GARCIA, 2013).

A incorporação de adições minerais permite a produção de materiais cimentícios com melhores características técnicas, pois provocam mudanças na estrutura interna da pasta de cimento hidratada. Dentre os principais benefícios decorrentes das adições minerais estão à redução na porosidade capilar do concreto responsável pelas trocas de umidade, íons e gases com o meio e a diminuição das fissuras de origem térmica em função da redução do calor de hidratação (DAL MOLIN, 2005).

As heterogeneidades na microestrutura da pasta de cimento hidratada, especialmente a existência de grandes poros e cristais na zona de transição, podem ser consideravelmente reduzidas com a introdução das partículas finas presentes nas adições minerais. À medida que as reações pozolânicas e cimentícias estão em curso, ocorre um declínio gradual no tamanho dos poros e dos produtos cristalinos de hidratação. O efeito físico (efeito microfíler) acontece pelo reduzido tamanho das partículas (~ 0,1 µm), que se introduzem entre os grãos de cimento e se alojam nos interstícios da pasta, reduzindo o espaço disponível para a água e atuando como

pontos de nucleação dos produtos de hidratação, o que proporciona um refinamento da estrutura de poros (NEVILLE, 1997).

A utilização da sílica ativa no concreto modifica suas propriedades tanto no estado fresco (trabalhabilidade, coesão, estabilidade, etc.) como no estado endurecido (resistência mecânica e durabilidade). O seu efeito microfíler e pozolânico resulta em mudanças consideráveis na microestrutura e nas propriedades macroscópicas do concreto. É consenso, no meio científico, que a adição de sílica ativa ao concreto causa uma melhora notável na resistência à compressão do mesmo.

Mehta e Monteiro (2008) ressaltam que as adições minerais podem certamente melhorar as propriedades do concreto, no entanto não se deve esperar que venham compensar a baixa qualidade dos constituintes do concreto ou de um traço pobre. Também se deve atentar para as reações álcali agregado resultante das diferentes adições no concreto e que podem afetar a durabilidade das mesmas. Várias propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto endurecido, são afetadas positivamente com o uso das adições minerais. A eficiência de uma adição mineral no comportamento do concreto pode variar em função da quantidade utilizada e das condições de cura, bem como em função da sua composição química, mineralógica, granulométrica. Porém, de uma maneira geral, os mecanismos pelos quais as adições minerais influenciam as propriedades do concreto fresco e endurecido dependem mais do tamanho, forma e textura das partículas do que da sua composição química.

As adições minerais podem certamente melhorar as propriedades do concreto, no entanto não se deve esperar que venham compensar a baixa qualidade dos constituintes do concreto ou de um traço pobre. Também se deve atentar para as reações álcali agregado resultante das diferentes adições no concreto e que podem afetar a durabilidade do mesmo (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Neville (1997) existem grandes benefícios em relação à introdução de adições minerais em substituição ao cimento Portland, pois economizam energia e preservam recursos naturais. Isso é efetivamente correto, mas, na verdade, o argumento mais poderoso a favor do uso desses materiais são as vantagens técnicas de sua inclusão no concreto. Na realidade, em muitos casos é preferível o

uso desses materiais no lugar do cimento Portland puro, independentemente de considerações econômicas ou ambientais.

Dentre os diversos efeitos físicos decorrentes das adições minerais ao concreto, tem-se o efeito filler (aumento da densidade da mistura em função do preenchimento dos vazios pelas partículas das adições inferiores às partículas do cimento), o refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento, alteração da microestrutura da zona de transição (redução da exsudação, com diminuição da espessura da zona de transição e interferência no crescimento dos cristais), com conseqüente aumento de desempenho do concreto em termos de resistência mecânica e durabilidade. A resistência a ataques químicos e à fissuração térmica são aspectos da durabilidade do concreto que melhoram significativamente devido à incorporação das adições minerais.

Ainda como vantagem da incorporação de adições minerais ao cimento, Aïtcin (2000) afirma que a substituição parcial do cimento Portland por um ou uma combinação de dois ou três materiais cimentícios, quando disponíveis a preços competitivos, pode ser vantajosa não apenas do ponto de vista econômico, mas também do ponto de vista reológico, e, algumas vezes, do ponto de vista de resistência.

2.3 Uso do Resíduo de Ágata em Concreto e Argamassa

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas para incorporar os resíduos do beneficiamento de gemas, que atuam como possíveis agregados (gráudo e miúdo) e alternativamente como materiais pozolânicos. Dentre os resíduos do setor de beneficiamento de gemas estão os resíduos de pedras roladas de ágatas, descritos no capítulo 2.5. desse trabalho. Recentemente, Petry (2015) estudou o efeito álcali agregado em barras de argamassa, utilizando como agregado miúdo, na granulometria de areia, somente resíduos de ágata.

Nesse contexto, seus resultados demonstraram que o agregado miúdo preparado a partir da ágata provoca reações deletérias álcali agregados (RAA). Outro aspecto, com relação a seus experimentos foi que a incorporação do resíduo do pó da ágata rolada com intenção de verificar a ocorrência ou não da mitigação

dos efeitos deletérios. Os resultados indicam que o resíduo da ágata rolada em forma de pó apresenta características mitigadoras da reação álcali agregado. A autora avalia ainda que seus resultados indicam uma possível atividade pozolânica no pó de ágata rolada.

Anteriormente, diversas pesquisas foram realizadas para buscar a incorporação dos resíduos do beneficiamento de gemas, dentre os resíduos estão os rejeitos gemológicos de ágata. Os estudos realizados por Paulon (1981) mostraram que as rochas desencadeantes da reação deletéria possuem formas definidas de sílica metaestável, sílica microcristalina amorfa como a opala, e sílica em forma de quartzo criptocristalino como a ágata, sendo esta última a forma mais desordenada e reativa classificada como rocha de alta acidez. Outro exemplo de mineral reativo, presente em rochas chamadas ácidas é o vidro natural vulcânico, composto de grandes quantidades de quartzo. O mesmo autor, ainda, analisando microscopicamente o gel exsudado, composto basicamente de sílica e álcalis, verificou que sua estrutura interna possui propriedades bem definidas em todas as direções (isotropismo), podendo se apresentar algumas vezes, como estrutura anisotrópica, devido às cristalizações parciais e à presença de pequenas inclusões.

O pó de ágata, isento de óleo, pode ser empregado na estabilização geomecânica de solos (CONSOLI et al., 2002), como material de preenchimento em concretos, em materiais cimentícios (TRAMONTINA et al., 1997; VENQUIARUTO et al., 2014) e na construção de pavimentos urbanos (DALLA ROSA et al., 2014).

Com baixas concentrações de óleos, os resíduos da etapa de beneficiamento da serragem de ágatas podem ser incorporados em materiais cerâmicos, na produção de tijolos, telhas e agregados leves (BRUXEL, 2011; MORAES e REOLON, 2013). Bruxel et al. (2012), testaram a incorporação do lodo oleoso na massa cerâmica. Isso é possível pelas características em comum apresentadas pelo lodo e pela argila, visto que ambos possuem em sua composição grande quantidade de sílica, possibilitando a obtenção de resultados mais confiáveis, sendo o melhor resultado obtido a partir da incorporação de 5% de lodo à massa cerâmica.

O uso do resíduo de rolagem de pedras preciosas foi testado como material alternativo na execução de pavimentação urbana. Os autores identificaram que a mistura do resíduo com quantidades adequadas de cal hidratada permite que o

material, depois de compactado, tenha ganhado de resistência apropriada para estruturas de pavimentos com baixo volume de tráfego (DALLA ROSA et al., 2014).

Chiaro et al. (2013), utilizou rejeitos geológicos de ágata moídos para obtenção de produtos cimentícios pré-moldados, que no geral apresentaram potencial para os padrões de durabilidade e resistência requeridos. De acordo com os resultados obtidos por Betat et al. (2009), os concretos com 50% de resíduos de ágata, embora com maior relação água/cimento, apresentaram maior resistência à compressão em comparação aos demais concretos com resíduos reciclados e também ao concreto de referência, composto exclusivamente de agregado graúdo natural. Foi observado um aumento da resistência à compressão em relação ao concreto de referência de 12% para os traços e para os concretos com 75% de resíduos de ágatas um aumento de resistência de até 17% para os traços testados.

2.4 Blocos de Concreto Celular

Uma variante da adição de agente incorporador de ar em pasta cimentícia são Blocos de Concreto Celular (BCC), que é um material mais leve, utilizado como blocos de vedação, com boa capacidade de isolamento térmico e acústico, como consequência das bolhas de ar, uniformemente distribuídas pela massa do bloco, reduzindo o peso específico do componente (RAMAMURTHY et al., 2009). O BCC um material amplamente utilizado como blocos de vedação para escadas, antecâmaras, apresentando também resistência contra o fogo. O volume de ar incorporado fica ao redor de 60 a 90%, produzindo uma densidade que pode variar de 300 à 1800 Kg/m³ (KADASHEVICH, 2005; GOUAL et al., 2006).

Geralmente, as alvenarias de concretos incorporados com ar apresentam baixo peso específico trazendo uma vantagem importante, pois necessitam de um suporte estrutural menor, incluindo fundações e paredes estruturais, além do conforto térmico e acústico superior as alvenarias convencionais, reduzem em cerca de 7% o uso da energia residencial, além de ser mais seguro ambientalmente, pela grande redução de CO₂ durante o tempo de vida da construção, com a diminuição de uso de energia (RAMAMURTHY et al., 2009)

Os Blocos de Concretos Celulares (BCC) podem apresentar duas variações no processo de fabricação. Os BCCA (Blocos de Concreto Celular Autoclavados), e os BCCE (Blocos de Concreto Celular Espumígenos), ambos descritos por Ferreira (1987). O autor descreve que para os BCCA, no processo de cura por autoclave, os valores de temperatura fiquem na faixa de 160 a 190°C e as pressões estejam na ordem de 0,6 a 1,2 Kgf/cm². O processo de autoclave dura cerca de 5 horas, sob pressão saturada de vapor e temperatura, produzem reações que levam a compostos com maior resistência, razão pela qual o BCCA tem resistência à compressão na ordem do dobro e uma retração de cerca da metade, em comparação com os BCCE que são curados ao ar livre, sem custos energéticos adicionais. Não obstante, os BCC são considerados ambientalmente menos impactantes, além dos ganhos energéticos e o melhoramento do conforto térmico e acústico das edificações (FERREIRA, 1987; GOUAL et al, 2006).

A NBR13438 (ABNT, 2013), determina os requisitos mínimos para os Blocos de Concreto Celular Autoclavado (BCCA) e o define como 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 e uniformemente distribuídas. Neste ponto, cabe ressaltar que não há norma brasileira vigente para Blocos de Concreto Celular Espumígeno (BCCE).

A normatização dos BCCA apresenta característica geométrica recomendada nas dimensões nominais de espessura ≥ 75 mm, altura ≥ 200 mm e comprimento ≥ 200 mm com tolerâncias de ± 3 mm. Apesar da norma estabelecida, a maioria dos blocos fabricados e existentes no mercado possuem um tamanho diferente, 300 mm de altura 100mm de espessura e comprimento de 600 mm. Já para sua classe, resistência à compressão e densidade de massa aparente seca, são apresentados na Tabela 1, segundo NBR 13438 (ABNT, 2013).

Tabela 1 - Classes, resistência à compressão e densidade de massa aparente.

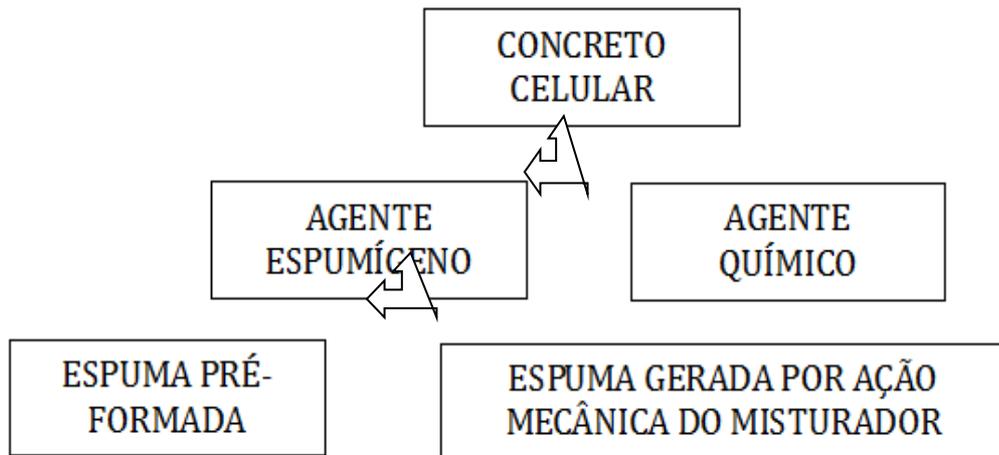
Classe	Resistência à compressão (seca)		Densidade aparente seca
	Valor médio	Menor valor	Média (kg/m ³)
	Mínimo (Mpa)	isolado (Mpa)	
C12	1,2	1,0	<400
C15	1,5	1,2	<500
C25	2,5	2,0	<550
C45	4,5	3,6	<650

Fonte: ABNT NBR 13438, 2013.

Existem diferenças importantes na obtenção dos Blocos de Concreto Aerado, em referência à incorporação das bolhas na argamassa. De acordo com Legatski (1994), a geração das bolhas de ar pode ocorrer por dois processos: (i) - formação das bolhas e gás por reação química dentro do material no estado fresco; e, (ii)- incorporação de ar por adição de espuma à argamassa. Esse último consiste na geração de espuma a ser adicionada à argamassa por agitação vigorosa ou pressão pneumática sobre o agente espumígeno, que pode ser um surfactante ou uma proteína. Assim, o volume de ar incorporado depende do tempo e regime de mistura, concentração do reagente, temperatura do processo, volume de água adicionada e características dos materiais.

Para Kurugol et al. (2008), os concretos leves podem ser classificados como não-auto clavado (NAAC) ou auto clavado (AAC), baseado nos métodos de cura. Já para Melo (2009), a classificação dos concretos celulares em dois grupos, os aerados com agente espumígeno (espuma pré-formada) e os aerados quimicamente (também chamados de gasosos). A figura 1 apresenta o organograma da classificação do BCC (BCCA e BCCE).

Figura 1 - Classificação do concreto celular.



Fonte: Melo (2009).

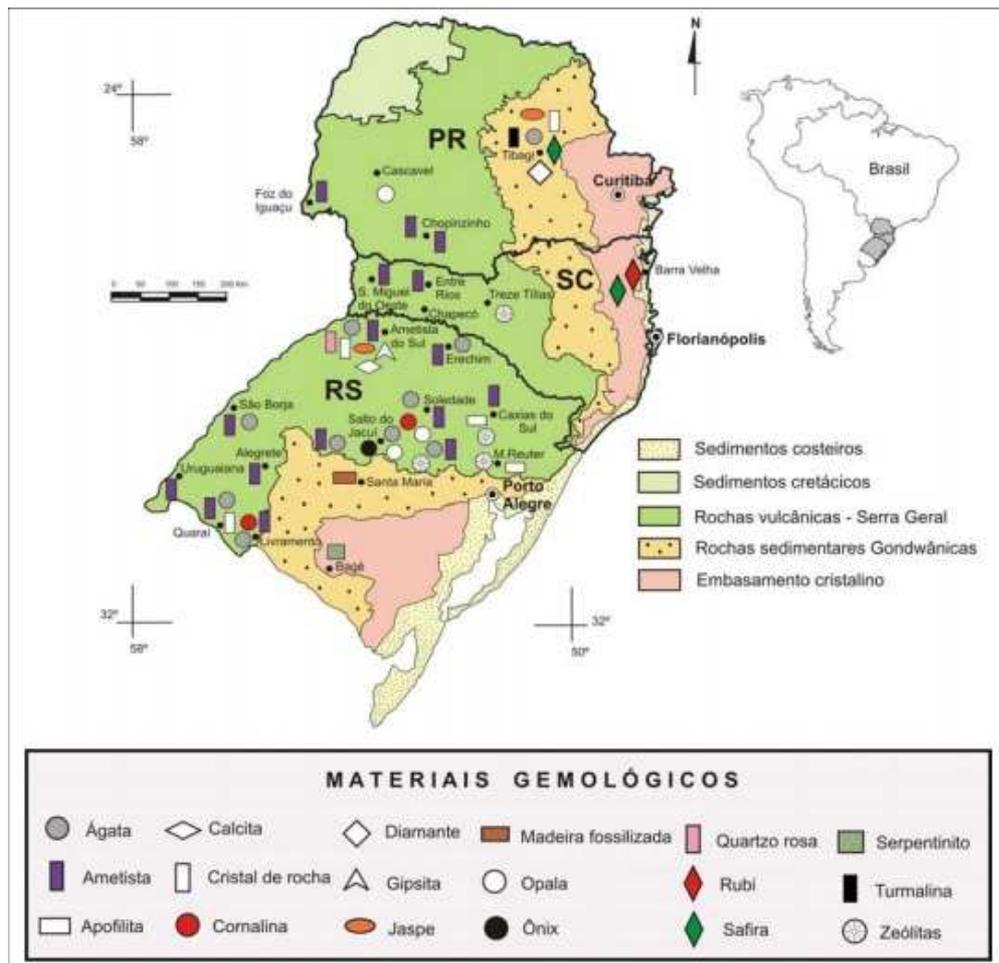
2.5. Resíduos da Produção de Ágatas

Neste capítulo serão abordados a ocorrência de ágatas no Rio Grande do Sul, algumas de suas peculiaridades geológicas e a localização de suas jazidas, além do uso de seus resíduos.

2.5.1 Geologia e Gênese das Ágatas no Rio Grande do Sul

A ágata e a ametista ocorrem em depósitos do tipo “geodo em basalto” (BOSSI; CAGIANO, 1974; DUARTE; HARTMANN, 2008), cristalizadas em cavidades dessimétricas a métricas nas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (Bacia do Paraná). Os geodos são cavidades ou sedimentares, preenchidos por agregados de minerais, de forma abaulada, mas outras formas também se apresentam, como tubulares e bolsões irregulares. Nos mesmos depósitos encontram-se também o quartzo, cristal de rocha, quartzo róseo, calcita, apofilita, zeolitas, ônix, jaspe, opala, gipsita (variedade selenita) e barita. Os principais depósitos de materiais gemológicos no Sul do país podem ser visualizados na figura 2.

Figura 2 - Mapa Gemológico da região sul do Brasil.



Fonte: Juchem et al. (2008).

A Bacia do Paraná é constituída por um espesso manto de rochas sedimentares, depositadas sobre a Plataforma Sul-Americana durante o Paleozoico e Mesozoico, e pelas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. A evolução geológica da Bacia do Paraná foi moldada pelo clima e eventos tectônicos relacionados com a ruptura do supercontinente Gondwana (MINIOLI, 1971; PETRI e FÚLFARO, 1983; ZALÁN et al., 1990; MILANI, 1997).

A Formação Botucatu constitui-se por arenitos quartzosos, médios a grossos, com estratificados tangencial de grande porte, cruzada acanalada e estratificados plano-paralela, típicas de depósitos de dunas (MILANI., 1997) associados à desertificação da Bacia do Paraná (ZALÁN et al., 1990; MILANI, 1997; SCHERER et al, 2000).

Juchem et al. (2008) destacam que a gênese das ágatas e ametistas ainda é bastante pesquisada, no entanto existe uma certeza geral que ocorrem posteriormente ao resfriamento primário dos derrames, a temperaturas hidrotermais de até 30 a 40^o C, com a participação de águas ricas em sílica.

As ocorrências principais de ágata no RS localizam-se na região central do Rio Grande do Sul, denominada de Distrito Mineiro de Salto do Jacuí (DMSJ), (SANTOS et al.,1998). Os depósitos são explorados através de garimpo nas margens dos rios Jacuí e Ivaí, em área de aproximadamente 100 km², onde grande número de lavras ativas, a céu aberto e em galerias subterrâneas extraem os geodos.

A ágata de Salto do Jacuí é constituída de quartzo microcristalino, granular e fibroso (calcedônia), em agregados paralelos e esferulíticos. Pode ocorrer quartzo fibroso com alongação positiva (quartzino) e criptocristais dos polimorfos de sílica, moganita e cristobalita de temperaturas baixas (BRUM et al., 2000).

As ágatas podem ser encontradas nas bandas horizontais ou concêntricas, em relação às paredes dos geodos, algumas vezes aparentam padrões de deposição e geram peças exóticas muito valorizadas no comércio mundial de gemas (DNPM, 1998). As cores em suas bandas são cinza, cinza-azulado, azul fraco, castanho, vermelho, preto e branco. A variedade de cores e de padrões de deposição das bandas gera um grande número de tipos de ágata, que são designados como “variedades” na literatura gemológica, no Rio Grande do Sul a cornalina, o ônix, a ágata dendrítica, a ágata orbicular e a ágata cênica, são os destaques.

Schumann (2002) cita que a estrutura microcristalina da ágata origina grande número de micros poros, que permitem o seu tingimento. O referido processo é feito através de tratamento químico e/ou térmico que alteram ou acentuam suas cores, dando vida a cores, como vermelho, o azul intenso, o rosa, o violeta, o verde e o preto.

Schumann (2002) também afirma que as jazidas podem ser classificadas como primárias (quando a gema se encontra junto da rocha originária), e

secundárias (quando as gemas são transportadas do lugar de formação para outro, onde voltam a se sedimentar).

A gênese e preenchimento de geodos são investigados cientificamente desde o início do século passado e segundo (KYLE e MISI,1997) há quatro teorias singenéticas para a gênese de geodos em rochas ígneas: (1) propõe que a expansão e a formação da cavidade do geodo aconteceram a partir de vapor produzida durante a cristalização da rocha hospedeira. Esta teoria defende que a cristalização de minerais anidros (piroxênio e plagioclásio) propiciaram o acúmulo de soluções aquosas residuais no sistema magmático, induzindo o aumento da pressão de vapor e formação de bolhas coalescentes; (2) a teoria do encolhimento/infiltração, relaciona a formação de cavidades ao resfriamento e desvitrificação da rocha hospedeira, possibilitando assim que vapor d'água migre para cavidades produzidas pelo encolhimento, provocada durante o resfriamento da lava. Os argilominerais teriam precipitado vapor, que acompanhados de resfriamento perderiam volume durante secagem e fraturamento. (3) A tese da deformação, relacionando formação das cavidades pela tensão e deformação durante a cristalização da rocha hospedeira. (4) A alta temperatura, forçaria coloides de sílica a se infiltrarem em planos de cisalhamento e cristalizando em cavidades da rocha durante o resfriamento. Segundo a hipótese epigenética hidrotermal, conhecida como teoria de infiltração de sílica a baixa temperatura, os geodos foram formados devido a infiltração de fluidos supersaturados de sílica, em condições de baixa pressão e temperatura inferior a 300 °C, provenientes de fluidos hidrotermais da rocha hospedeira com águas subterrâneas (KYLE e MISI,1997). A origem epigenética da abertura das cavidades e do seu preenchimento com ágata e ametista foi proposta por Duarte e Hartmann (2008) para os geodos em basaltos da Formação Serra Geral do sul do Brasil e Uruguai.

2.5.2 Agentes Espumígenos

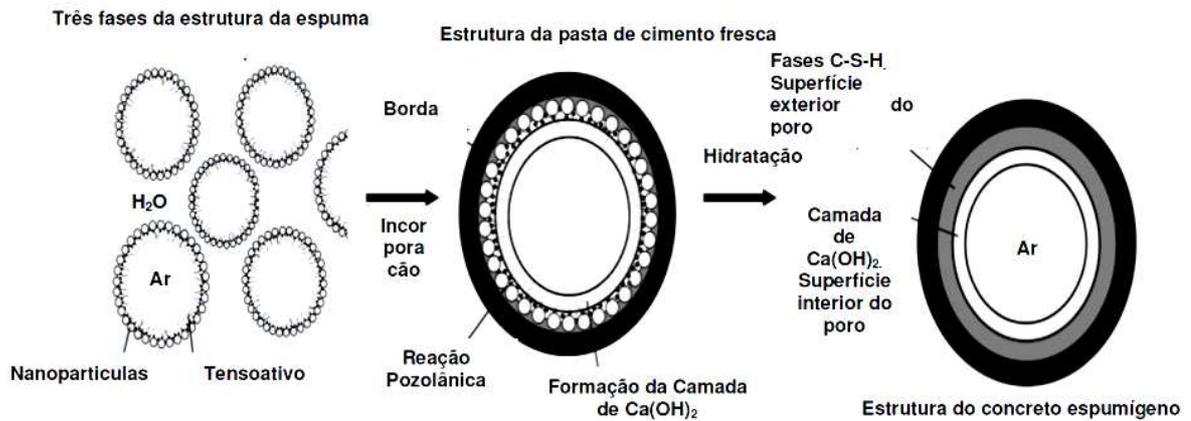
Agentes formadores de espuma são substâncias que, quando presentes em pequenas quantidades na água, facilitam a formação de espuma, garantindo a estabilidade e prevenindo o colapso das bolhas de ar aprisionadas (RAMAMURTHY et al., 2009). Segundo Ferreira (1987), existe dois tipos de agentes formadores de

espuma, naturais, a base de proteína animal hidrolisada, e os sintéticos, provenientes das sínteses orgânicas. O primeiro apresenta melhor controle tecnológico na formação e incorporação das bolhas na argamassa, porém o segundo apresenta maior facilidade operacional e é economicamente mais vantajoso.

A formação da espuma resulta de sistemas coloidais formados por bolhas de gás separadas por filmes líquidos, composto de uma estrutura regular de moléculas de tensoativos (substâncias que contém uma parte (lipofílica/hidrofóbica), responsáveis pelo aprisionamento das bolhas de gás na interface líquido-gás, líquido-líquido ou líquido-sólido de um determinado sistema. São de grande importância em diversos processos industriais, desde a indústria de cosmético até a indústria petrolífera. A formação e a estabilidade da espuma é uma característica que depende das propriedades dos grupos polar e apolar dos tenso-ativos. Segundo Ferreira (1987), a incorporação de ar na argamassa por agente espumígeno deve ser feita quando a densidade da espuma atingir o mínimo $0,085 \text{ g/cm}^3$.

Segundo Krämer et al (2015) a grande dificuldade é manter o controle sobre o tamanho e a estabilidade das bolhas formadas dentro do sistema, pois isso, a distribuição e tamanho das bolhas de ar interferem grandemente na resistência a compressão, retração, isolamento térmico e cáustico do material produzido. O autor ainda relata que a adição de nano partículas de sílica, durante a pré-formação da espuma, produz microbolhas com alta estabilidade mecânica, gerada pela formação de três fases na interface da água/ar/espumígeno. Isso se deve pela incorporação das nano partículas entre a camada lipofílica/água, formando um filme mais resistente à ação mecânica do meio. Esta descrição está apresentada na Figura 12.

Figura 3 - Teoria da formação da estrutura e estabilidade de poros.



Fonte: Adaptado de Krämer et al (2015).

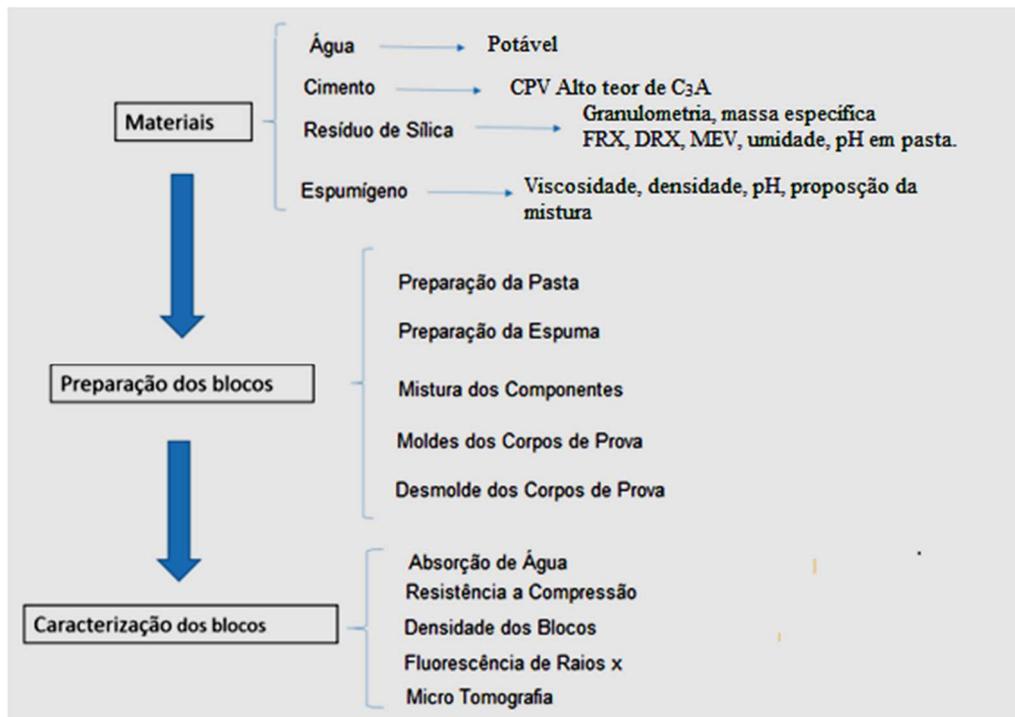
Ramamurthy et al, (2009) testaram vários surfactantes sintéticos para determinar qual apresentava melhor densidade da espuma pré-formada, em seu estudo, foi avaliado o Lauril sulfato de sódio, Lauril éter sulfato de sódio, Sulfanol e Dietanolamina de ácido graxo de coco. Neste estudo a Dietanolamina de ácido Graxo de coco (DEA) mostrou-se superior na densidade da espuma formada. A (DEA) é um surfactante não-iônico também muito utilizado na indústria e na fabricação de xampus, detergentes, sabões, géis, além de ser utilizado como anticorrosivo (OLIVEIRA et al, 2005).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo é descrita a metodologia de pesquisa em escala de bancada para a produção dos BCCE. Essa pesquisa pretende avaliar a utilização de um resíduo e um espumígeno com características diferentes dos usados no processo industrial. Contudo, a metodologia de obtenção dos blocos baseou-se no processo de produção de uma indústria que produz e comercializa BCCE na Região de Passo Fundo/RS.

As etapas gerais do trabalho, com relação à caracterização dos materiais utilizados, bem como dos BCCE obtidos estão descritos na figura 4.

Figura 4 - Fluxograma de caracterização dos materiais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento

Como aglomerante hidráulico foi utilizado o Cimento Portland CPV ARI-RS, que segundo os ensaios de caracterização do seu fabricante (ITAMBÉ, 2016), este cimento possui alto teor de Alita e Aluminato tricálcio (C3A), apresenta uma moagem mais fina, conferindo elevada resistência em um menor tempo de pega. O Cimento CPV ARI foi adquirido na Distribuidora de Cimento Cimpasso na cidade de Passo Fundo, RS, em embalagem própria. Após aberto no laboratório, acondicionou-se 30 Kg do material em saco plástico duplo e a embalagem foi colocada em um recipiente plástico de alta densidade (PEAD) com fechamento hermético. Segundo laudo do fabricante, material apresenta massa específica média de $3,09 \text{ g/cm}^3$, superfície específica Blaine média $4.723 \text{ cm}^2/\text{g}$. Cabe salientar ainda que o tempo de pega inicia em 3h e 31 min e finaliza com 4h e 08 min. Resistência à compressão aos 28 dias de 52,9 Mpa. Além dos ensaios de caracterização fornecidos pelo laudo técnico, foi realizado a medição do pH em pasta, de 12,8, essa alcalinidade pode favorecer a formação e estabilidade das bolhas.

3.1.2 Resíduo de Pedras Roladas de ágatas

Os resíduos estudados são gerados por processo industrial do beneficiamento dos geodos e rejeitos de ágatas. Procedeu-se a coleta de 100 kg de resíduo de pedras roladas de ágatas e quarteado, uma fração de 20 kg foi reservada para os ensaios de bancada, os procedimentos de coleta e quarteamento foram norteados pela NBR 10.007 (ABNT, 2004). As amostras foram acondicionadas em recipiente plástico de alta densidade e conduzidas ao laboratório de Engenharia da Escola de Engenharia de IMED-Passo Fundo/RS.

A quantidade de resíduo gerado na indústria de pedras roladas de ágatas é de aproximadamente 100.000 Kg mês, na forma de pó, finamente dividido, formado majoritariamente por óxido de silício, como mostram os ensaios de difração de raio e fluorescência de raios-X. A Figura 14 apresenta o equipamento de desbaste, no qual

é produzido o resíduo (a) tambor de rolagem, e (b) aspecto visual do pó de pedras roladas de ágatas.

Figura 5 - Equipamento de desbaste das pedras roladas de ágatas.



(a) Batedeira -Tambor de rolagem



(b)Aspecto visual do pó de pedras roladas de ágata rolada

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3 Água

A água utilizada foi de qualidade potável fornecida pela Corsan - Passo Fundo/RS, apresentando como características principais o pH com valor de 7,5 e condutividade de 2000 $\mu\text{s}/\text{cm}^2$. Os demais parâmetros de potabilidade estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Ensaio realizados na análise da água utilizada no experimento.

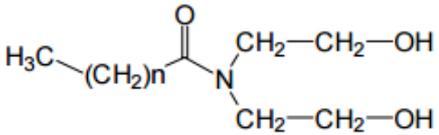
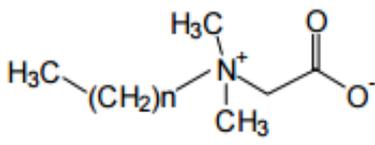
Parâmetro	Padrão de Qualidade	Média	
		01/2015	02/2015
Turbidez	0,0 a 5,0 UT	0,7UT	0,6UT
pH*	6,0 a 9,5	-	-
Cor	0 a 15 UH	2UH	2UH
Cloro Livre Residual	0,20 a 5,00 mg/L	1,01mg/L	0,9mg/L
Fluoretos*	0,6 a 0,9 mg/L	-	-
Coliformes Totais	Ausente em 100mL	Ausente	Ausente
<i>E.Coli</i>	Ausente em 100mL	Ausente	Ausente

Fonte: Corsan (2015).

3.1.4 Agente Espumígeno

O agente incorporador de ar foi obtido a partir de uma mistura de dois espumígenos, derivados do fruto do coco. A Dietanolamida de Ácidos Graxos de Coco, o primeiro componente da mistura em maior quantidade (duas partes de três) é um tenso ativo não iônico, na forma de líquido viscoso e de cor âmbar, e quando em solução aquosa não sofre ionização. O segundo componente, utilizado em menor quantidade (uma parte de três) foi o Coco Amida Propil Betaina, cuja natureza química é a Alcanolamidas de Ácidos Graxos de Coco. Esse se apresenta como um líquido límpido de cor amarela, obtido pela reação de condensação do óleo de coco com a dimetilpropilamina, um surfactante anfótero, sendo que seus componentes ativos atraem tanto cargas positivas quanto negativas e conforme o pH do meio. Em pH alcalino, comportam-se como aniônicos, em pH ácido como catiônicos. Para formulação da espuma foi utilizado a mistura de 2 partes da Dietanolamina de Ácido Graxo de Coco e uma parte da Coco Amino Propil Betaina (1:3) Na Figura 15 são apresentadas as fórmulas químicas dos agentes espumígenos e suas principais características.

Figura 6 - Fórmula química dos agentes espumígenos.

	
<p>Nome INCI: Cocamide DEA Natureza Química: Alcanolamidas de Ácidos Graxos de Coco Ingredientes: Alcanolamidas N° CAS: 68603-42-9 Estado Físico (25°C°) Líquido viscoso - Cor: Amarelo Odor: Característico pH (sol. 1 %): 8,5 - 10,5 e Amina Livre: Max 5,0. – Ativo: Min. 89%</p>	<p>Estado físico: Líquido Ponto de ebulição: ± 100°C Cor: Cor Amarela Palha Odor: característico. pH: 3-5 (20 ° C). Ponto de fusão: < 0 Oc Densidade: 1,02-1,03 g/cm3 (20 ° C / 68 ° F) CAS: 61789-40-0 INCI: Cocamidopropylbetaine Solubilidade: Miscível em água</p>
(a) dietanolamina de ácidos graxos de coco	(b) Coco amino propil betaina

Fonte: Adaptado de British Pharmacopeia (1999).

3.1.5 Equipamentos

Os equipamentos utilizados nos experimentos estão listados na Tabela 3.

Tabela 3 - Equipamentos utilizados para a realização dos ensaios da pesquisa.

Equipamento	Marca	Modelo
Balança	Gehaka	BK
Conjunto de peneiras	Bertel	
Agitador de peneiras	Bertel	Bertel
Corpos de prova cilíndricos	Solotes	-
Agitador mecânico	Fisaton	Modelo 713
Prensa hidráulica	EMIC	Modelo PC 200C
Micro tomógrafo	Shimadzu	Raios-XInspe Xio 90CT
pHmetro	Quimis	Bancada
Estufa	Quimis	-
Equipamento	Marca	Modelo
Espectrômetro de Fluorescência de Raios x	Panalytical	Minipal 4
Microscópio Eletrônico de Varredura	Tescan	Veja 3 SBH

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Caracterização dos Materiais

A descrição da água e cimento já foram contemplados nos tópicos 4.1.1 (Cimento CP V ARI – Alto teor de Alita e Alumínio tricálcio,C3A) e 4.1.2. (Água Potável), pois são materiais comuns, amplamente conhecidos e bem caracterizados. Logo, neste tópico será dada atenção especial ao resíduo de pedras roladas de ágatas, ao agente incorporador de ar e aos blocos de concreto celular, objetos de estudo deste trabalho.

O resíduo de pedras roladas de ágatas utilizadas foi amostrado segundo a NBR 10.007 (ABNT, 2004) e acondicionado para evitar que suas características físico-químicas fossem alteradas durante o trabalho. O material coletado foi avaliado

quanto à distribuição granulometria raios laser, à morfologia das partículas por microscopia de varredura eletrônica, às fases cristalinas por difratometria de raios X, composição química por fluorescência de raios X, massa específica e umidade por gravimetria direta. A seguir estão descritos os princípios dos analíticos de cada técnica utilizada e a descrição do beneficiamento e formação do resíduo de pedras roladas de ágatas.

3.2.2 Beneficiamento das Ágatas

A cidade de Soledade, RS, abriga aproximadamente 180 empresas em seu Arranjo Produtivo Local (APL) de pedras, gemas e joias, cujas técnicas de beneficiamento são muitas vezes primitivas (MARTINS, 2009). O mesmo gera uma quantidade expressiva de resíduos sólidos, iniciando no garimpo, com solos e rochas revolvidas e em alguns casos remoção de vegetação e na industrialização com refugos, peças semiacabadas, pouco beneficiadas, que por conterem impurezas ou apenas defeitos de formação natural e de fabricação, não representam grande valor comercial (PICOLOTTO, 2013).

Figura 7 - Frente de extração de Ágata em Garimpo de Salto do Jacuí/RS.



Fonte: IPAR et al., 2012.

Na Figura 3 observam-se algumas operações realizadas no garimpo e extração dos geodos de ágatas. Primeiramente, utilizam-se os garfos da retroescavadeira (Figura 3 b), para que a terra fique mais solta e possibilite erodir o

solo. Em seguida, utiliza-se a pá do equipamento (Figura 3a) para empurrar o solo, enquanto os garimpeiros fazem a procura dos geodos. Quando algum deles avista um geodo ou um grupo destes, comunica ao operador.

Figura 8 - Lotes de classificação de geodos de Ágata.



(a) Lote por Classificar

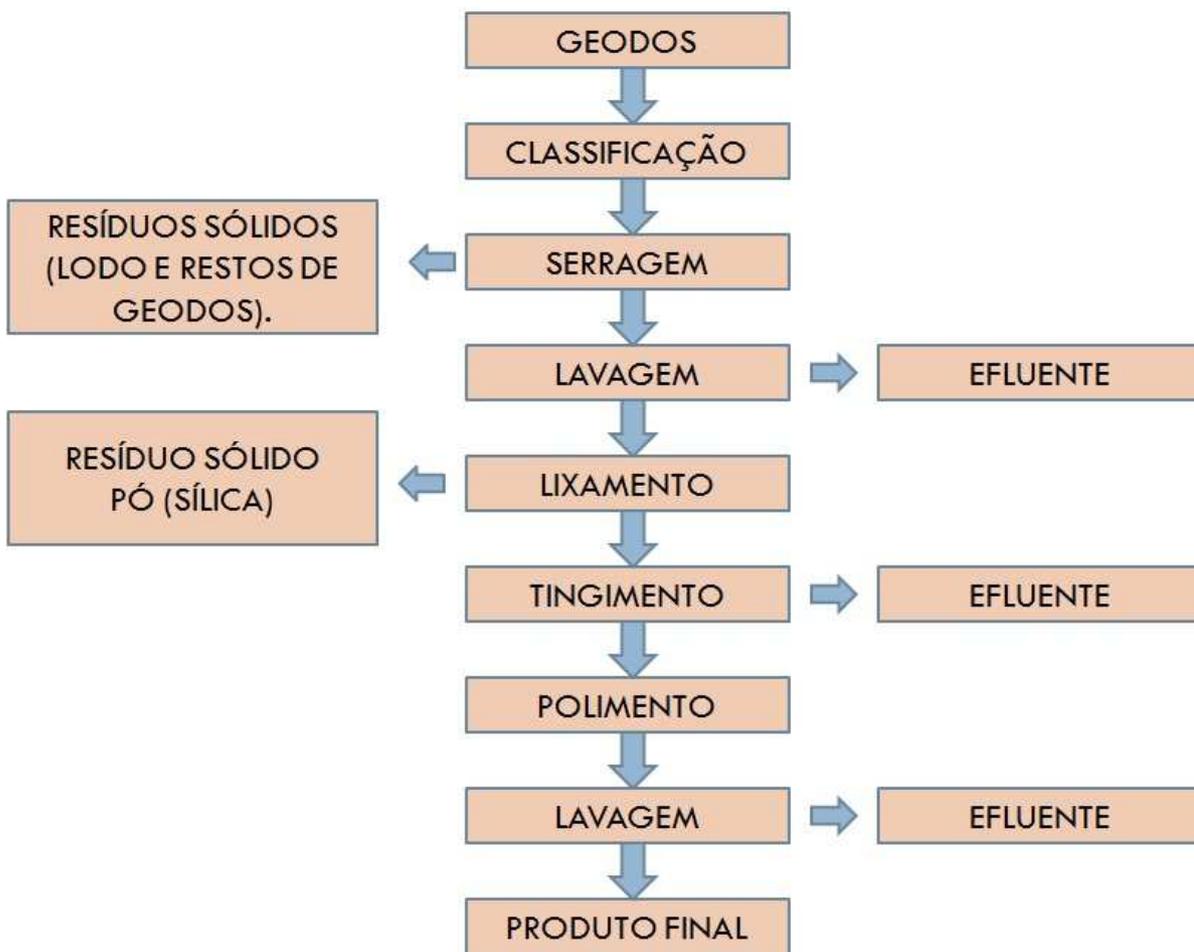


(b) Pilha de Rejeitos

Fonte: IPAR et al., 2012.

As empresas industrializam as ágatas usando como método de produção, tingimento, lixamento e polimento, serragem e como produto final artefatos dos mais variados tipos. Nos mesmos processos, segundo Consoli et al. (2002), grande quantidade de pó de pedra é gerada, juntamente com lodo e restos de pedra. Embalagens de papel, metais, que são utilizados nas empresas, são observadas em menor escala. A Figura 5 mostra o fluxograma geral das etapas do processo produtivo das ágatas e seus resíduos.

Figura 9 - Fluxograma do processo de produção da pedra ágata e resíduos gerados.



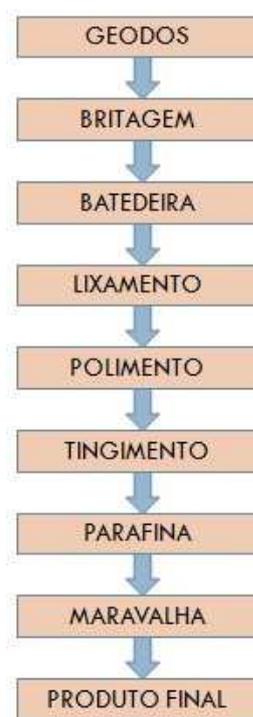
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Resíduos de Pedras Roladas de Ágatas

Foram estudados os processos produtivos de uma indústria do município de Soledade-RS, que beneficia em média 350.000 Kg/mês de matéria prima bruta, oriundos de diversos materiais gemológicos, como pedras preciosas britadas e pedras preciosas roladas, como ágatas, cristal de rocha, quartzo rosa, quartzo verde, ametista, citrino. Esses materiais gemológicos são obtidos nos municípios de Teotônia, Lajeado e Salto do Jacuí.

No fluxograma da Figura 5, são mostrados os passos dos processos de beneficiamento de gemas, realizados na empresa: Britagem; Formação da Pedra/Batedeira; Lixadeira; Polimento; Tingimento; Parafina, Maravalha e Produto Final.

Figura 10 - Fluxograma da produção de pedras roladas de ágatas na indústria.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No processo de obtenção das pedras roladas, as ágatas são submetidas à britagem e separadas em cinco tamanhos (Figura 7). Após separação são

encaminhadas para a bateadeira, onde são ‘roladas’ em grandes “ tambores” O equipamento pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 11 - Britadeira presente na indústria de pedras roladas de ágatas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nessas bateadeiras as pedras permanecem por aproximadamente três horas, onde as arestas são aparadas por atrito e as pedras ganham sua forma final. Esse processo gera grandes quantidades de resíduos de pó de pedras roladas de ágatas.

Figura 12 - Equipamento utilizado para dar forma às pedras roladas de ágatas.



(a) Bateadeira



(b) Detalhe da formação das pedras roladas de ágatas na Bateadeira.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O próximo passo é a lixadeira, para onde são encaminhadas, permanecendo neste processo entre 30 a 60 horas, dependendo da capacidade da máquina. Depois de retiradas são polidas por aproximadamente 20 horas (Figura 9).

Figura 13 - Equipamentos em funcionamento na indústria de pedras roladas de ágatas.



(a) Lixadeiras



(b) Máquinas de polimento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No tingimento são utilizadas anilinas de cor azul, rosa, vermelho, verde, preto, amarelo e roxo. A solução tingidora é um mistura de anilina e álcool combustível (etanol) e para a impregnação das cores nas gemas, as mesmas permanecem imersas na solução por 2 a 3 dias, aquecidas (fogo a lenha) por cerca de 24 horas (Figura 10). Vencida essa etapa as pedras roladas são retiradas da solução de tingimento e colocadas para secar ao sol. Os efluentes dessa etapa são depositados em tanques de armazenamento, após são recolhidos e encaminhados para empresa especializada em tratamento de águas industriais.

Figura 14 - Local onde é realizado o tingimento das pedras roladas de ágatas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No acabamento final, as ágatas são imersas em parafina e em seguida passam na maravalha para retirada de excesso. Na última etapa as ágatas roladas são classificadas e separadas, por cores, tamanhos, formas e qualidade e embaladas para a venda (Figura 11).

Figura 15 - Etapas finais de acabamento das pedras roladas de ágatas.



(a) Imersão na parafina.



(b) Acabamento com a maravalha.



(c) Classificação para a venda.

Fonte:Elaborado pelo autor.

3.2.4 Distribuição Granulométrica

A granulometria a laser baseia-se no espalhamento de luz pelas partículas, utiliza como princípio a interação de um feixe de raios laser de baixa potência com as partículas em suspensão em um líquido, resultando na difração do feixe de luz. O tamanho das partículas determina a distribuição da energia difratada, de forma que, o diâmetro das partículas é inversamente proporcional à energia, um conjunto de lentes, detectores fotoelétricos e um microprocessador captam a intensidade da energia espalhada e transformam-na em distribuição volumétrica das partículas, assumindo-se, que as partículas têm formato esférico. Esta técnica é amplamente utilizada devido à grande flexibilidade de uso, grande amplitude de análise, rapidez e reprodutibilidade (CILAS, 1992).

As amostras do resíduo de pedras roladas de ágata foram enviadas para o Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM – UFRGS), para determinação do tamanho das partículas em um Granulômetro CILAS modelo 1190.

3.2.5 Massa Específica e Área Superficial

A massa específica foi determinada por gravimetria direta, através de picnometria, segundo NBR NM 52 (ABNT, 2009), que consiste em relacionar a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. Esse ensaio foi realizado no laboratório da Escola de Engenharia da IMED.

A área superficial foi determinada pelo método de adsorção do azul de metileno, onde utiliza os conceitos da adsorção isotérmica em equilíbrio para determinar a área de recobrimento sobre a superfície do grão do adsorvente (FABBRI e SÓRIA, 1994).

3.2.6 Composição Química Elementar

A composição química elementar foi analisada por fluorescência de raios X, no equipamento modelo Panalytical-MiniPal 4, no Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental (LTM-UFRGS). Esta técnica permite determinar a composição elementar pela energia de decaimento dos elétrons de maior energia para um nível menor energia, este decaimento é causado pela liberação da energia absorvida, em comprimento de onda característico de cada elemento, permitindo sua identificação e quantificação.

3.2.7 Mineralogia e Morfologia das Partículas

A mineralogia (compostos presentes) pode ser identificada pela técnica analítica de Difração de Raios X, essa técnica envolve interações da radiação eletromagnéticas com comprimento de onda ao redor de 0,1 nm e a amostra no estado sólido. Quando as distâncias entre os átomos na estrutura cristalina são compatíveis com o comprimento de onda da radiação, os cristais podem difratar a radiação, em certas direções (no ângulo de incidência, Θ) ocorre uma interferência construtiva no espalhamento da onda eletromagnética, conduzindo a um aumento da intensidade. No ângulo onde ocorre o espalhamento é possível determinar uma série de parâmetros pela equação de Bragg (Equação 1). Cada composto tem próprios parâmetros de rede (d_{hkl}) e intensidades que podem ser identificados, a partir destas informações é possível obter a natureza do óxido, sua quantidade (em uma mistura), seus parâmetros de rede e sua cristalinidade.

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin\Theta$$

(Equação 1: equação de Bragg)

Desta forma, amostras do resíduo de pedras roladas de ágatas foram encaminhadas para o Laboratório de Difractometria de Raios no Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde a análise foi efetuada em um difratômetro SIEMENS modelo D 500.

A morfologia das partículas foi efetuada por Microscopia Eletrônica de Varredura, que é uma técnica de rotina para investigar a morfologia dos minerais por imagens nas três dimensões. As imagens são geradas por um feixe de elétrons, que é desmagnificado por um conjunto de lentes eletromagnéticas agindo como condensadores. Este feixe é direcionado sobre a amostra, varrendo uma pequena área. Como consequência, vários sinais são emitidos, sendo que os sinais mais importantes são os secundários e os retroespalhados. À medida que os feixes de elétrons primários varrem a amostra, os sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagens de alta resolução. Já os retroespalhados fornecem dados da composição (SCHWERTMAN e CORNELL, 2000).

As análises de microscopia eletrônica de varredura foram realizadas no Laboratório de Materiais e Processos, Escola de Engenharia da Universidade de Passo Fundo, em um equipamento Philips modelo XL20.

3.3 Agente Espumígeno

O agente espumígeno foi avaliado quanto à viscosidade, densidade e estabilidade da espuma. A viscosidade é medida pelo tempo que um volume fixo de líquido gasta para escoar através de um orifício existente no fundo de um recipiente, no caso um Copo Ford número 5. O viscosímetro foi nivelado, ajustando os pés niveladores. O orifício foi fechado e o Copo Ford preenchido com a amostra até o nível mais elevado, derramando as amostras lentamente para que não surgissem bolhas. O excesso foi removido com uma placa de vidro, fazendo com que ela corresse pela boca do Copo e retendo a amostra dentro. Colocou-se um béquer entre os pés do viscosímetro, removeu-se a placa de vidro e foi liberado o orifício.

Para a determinação da estabilidade da espuma utilizou-se o teste adaptado de Ross-Milles (VAN ROOSMALEN et al., 2004). Preparou-se a dispersão em água potável a 20% (p/p) dos agentes espumígenos a serem comparados. A metodologia consistiu em verter-se 100 ml da solução para uma proveta de boca fechada, agitando manualmente cinco vezes por inversão. O volume de espuma formado foi

medido após decorridos cinco minutos e finalizada a agitação, objetivando avaliar a manutenção da mesma.

A diluição do agente espumígeno foi determinada pela densidade da espuma formada. Assim, empregou-se uma série de diluições, desde 1:10 até 1:90, para avaliar qual relação apresentava melhor densidade e maior estabilidade. A espuma foi formada por agitação mecânica, com tempo estabelecido em 2 minutos de forte agitação.

3.4 Blocos de Concreto Celular Espumígeno

3.4.1 Densidade

A determinação da densidade foi efetuada por relação direta entre a massa e volume. Após os 28 dias de cura, os blocos cilíndricos foram retificados, calculado seu volume e aferida sua massa. O volume foi calculado utilizando a equação do volume do cilindro (equação 2) e a massa foi determinada em uma balança Gehaka, com resolução de 0,1 mg.

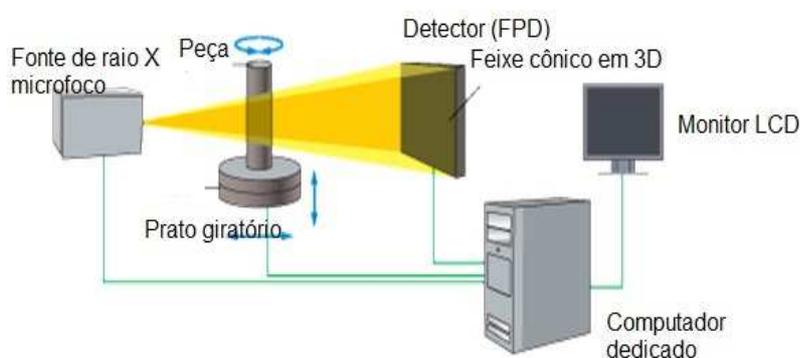
3.4.2 Resistência à Compressão

Utilizou-se uma prensa hidráulica de acionamento elétrico, modelo PC200C marca EMIC, com capacidade máxima 200 toneladas (2MN) com unidade hidráulica de comando manual de velocidade. A resolução de leitura é de 0,1 kN (10kgf, com a precisão garantida de $\pm 1\%$ de carga lida, com Classe de Medição de Força: Classe 1, segundo a Norma (NM-ISO 7500-1:2004). Para o processo de ruptura dos blocos, os mesmos foram colocados individualmente na prensa, tendo o cuidado de ajustar a altura do cursor, através do módulo eletrônico foi ajustado o tipo de ensaio (ensaio em corpo cilíndrico), e a velocidade de ensaio (0,4MPa/s). Para regular imperfeições foram utilizados pratos de aço e discos de Neoprene. A Figura 19 apresenta a imagem dos testes executados.

3.4.3 Distribuição das Bolhas de Ar no BCCE

A distribuição das bolhas de ar nos Blocos de Concreto Celular Espumígeno foi avaliada em ensaio de micro tomografia computadorizada de raios-X e foi realizado no Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do RS. O equipamento utilizado neste ensaio foi o Micro tomógrafo de Raios-X InSpe Xio 90CT da marca Shimadzu, com o auxílio do software VG Studio3D®. O mecanismo do ensaio é demonstrado na Figura 16.

Figura 16 - Principais componentes de um Micro tomógrafo de Raios-X.



Fonte: Shimadzu, 2014.

Para a obtenção dos dados, as imagens foram adquiridas com tensão de 90kV, corrente de $110\mu\text{A}$, 3.000 projeções. Utilizou-se número de fatias 1, que permite especificar o número de linhas de detectores para incluir no cálculo da média para cada fatia, o tratamento das imagens foi feito através do *software ImagemJ*.

3.4.4 Absorção de Água

A absorção de água foi determinada baseada na NBR 13818 (ABTN 2013), onde os corpos-de-prova são submetidos a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ até atingir massa constante. Após os corpos-de-prova são resfriados até atingir a temperatura ambiente. A seguir, determina-se a massa de cada corpo de prova.

A Equação 3 apresenta o cálculo normatizado.

$$Abs = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$$

onde:

m_1 = é a massa seca em gramas

m_2 = é a massa saturada em gramas

(Equação 3)

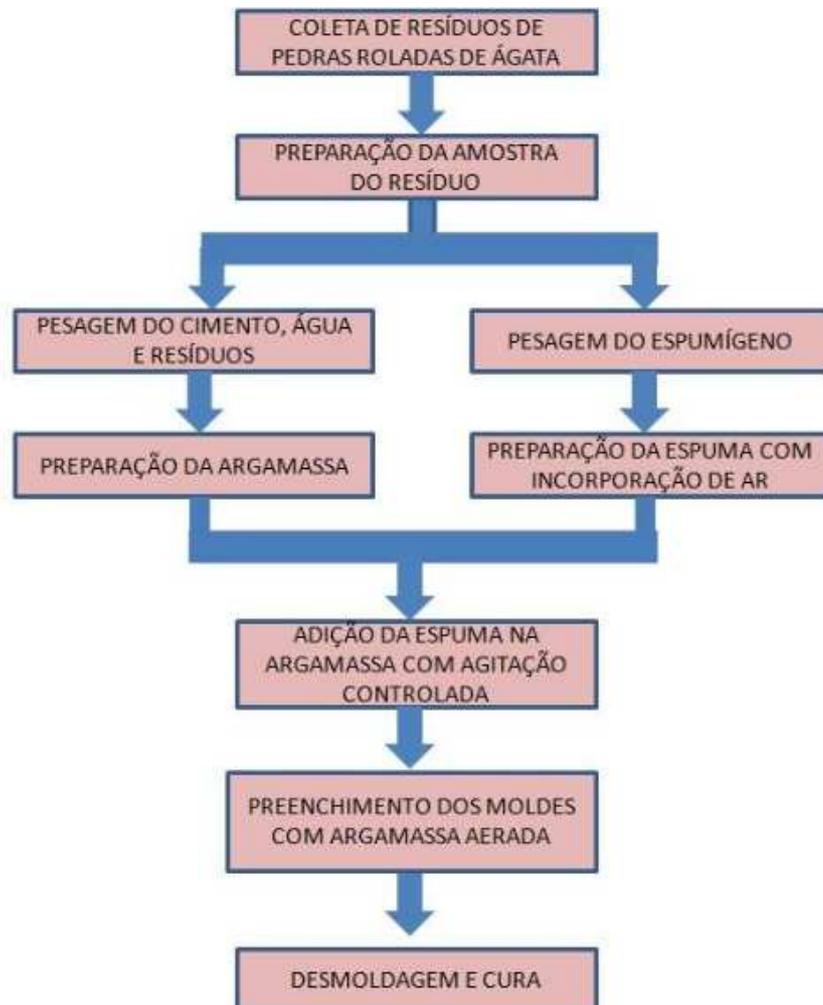
Fonte: ABNT NBR 13818, 2013

3.4.5 Preparação dos Blocos de Concreto Celular

A produção dos blocos de concreto celular foi realizada no Laboratório de Materiais da Faculdade Meridional-IMED. A metodologia de produção foi baseada na experiência de uma indústria que produz e comercializa blocos de concreto celular espumígenos (BCCE) na Região de Passo Fundo/RS.

A partir deste estudo inicial, foram estipulados os parâmetros de controle de processo e replicados industrialmente em um estudo piloto. Além disso, a partir dos dados coletados, iniciou-se a avaliação da possibilidade de substituição total do agregado miúdo por resíduo de sílica oriundo da rolagem de pedras de ágatas, conjuntamente com um agente espumígeno, produzido de forma exclusiva para os ensaios. Esta mistura de agentes espumígenos quebra a tensão superficial da água (HLB balanço hidrofílico-lipofílico), além de produzir uma espuma densa e altamente estável, com distribuição homogênea das bolhas de espuma, características fundamentais na fabricação de BCCE. A Figura 17 demonstra o fluxograma de produção dos BCCE.

Figura 17 - Fluxograma de produção dos BCCE.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para definir o melhor traço na composição do experimento, foram desenvolvidos vários ensaios preliminares. Observou-se que a água e a espuma têm uma grande influência na estabilidade, distribuição e tamanho das bolhas na pasta. Assim, definiu-se que o experimento seria feito mantendo as proporções de cimento e resíduo fixas, e variando a quantidade de água e massa de espuma, construindo uma matriz experimental com 36 amostras. Foi estabelecido um corte granulométrico em 1,18mm no resíduo de pedras roladas de ágatas, objetivando estabelecer agranulometria fixa e mais adequada à obtenção de densidades menores, conforme indicado por Ferreira (1987).

Cada grupo de amostras foi executado em triplicata, mantendo a relação de A/C constante no grupo e variando a composição máxima de água e espuma. A mistura foi efetuada manualmente em recipiente plástico até que a massa apresentasse aspecto homogêneo. A argamassa foi composta de 25g de cimento, 25g de resíduos. As quantidades de água e espuma foram ajustadas para manter a relação água/cimento (a/c) fixas em cada grupo. A composição do traço com relação às quantidades percentuais de cimento, resíduo de sílica, relação água/cimento e espuma são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros usados nos ensaios de bancada dos BCCE, utilizando resíduos de pedras roladas de ágatas.

Ensaio	% Cimento	% Resíduo	Relação a/c	% Água	% Espuma	% Total
Grupo I	32,5	32,5	1,08	26,0	9,1	100,0
				23,4	11,7	
				19,5	15,6	
				16,9	18,2	
Grupo II	32,5	32,5	1,28	30,5	8,5	100,0
				28,0	11,0	
				24,4	14,6	
				22,0	17,1	
Grupo III	32,5	32,5	1,48	34,5	8,0	100,0
				32,2	10,3	
				28,7	13,8	
				26,4	16,1	

Fonte; Elaborado pelo autor.

Após a preparação da pasta, foi adicionado espuma para incorporação do ar, formando uma argamassa aerada. Diante a mistura completa da espuma pré-formada, foram moldados os corpos de prova cilíndrico com dimensões de 10 cm \varnothing x 20 cm altura. Decorrido 24 horas de cura, os blocos foram desmoldados, envolvidos em plástico filme de PVC, e acondicionados em prateleira durante 28 dias para o processo de cura. Uma imagem dos corpos de prova após a cura de 24 horas pode ser visualizada na Figura 18.

Figura 18 – Corpos de prova do BCCE.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Complementarmente foi preparado um lote de corpos de prova segundo NBR 5738 (ABNT, 2008) para verificar as condições industriais de produção do traço estudado. Nestas condições, a espuma é pré-formada por ação pneumática e a mistura dos constituintes foi efetuado em uma betoneira de 200 litros.

3.5 Preparação da Espuma

Para a preparação da espuma, utilizou-se uma mistura de dois espumígenos, na proporção de duas partes de Dietanolamida de Ácidos Graxos de Coco e uma parte de Coco Amino Propil Betaina, com diluição de 1:70 em água potável, resultando em uma espuma com densidade de $0,085 \text{ g/cm}^3$, ficando próximo aos valores descritos por Ferreira (1987). Assim, a espuma preparada apresenta 12 ml de espuma por grama. A Figura 19 apresenta uma imagem da preparação da espuma e da espuma pré-formada.

Figura 19 - Geração da espuma em agitação mecânica e espuma acabada.



Produção da espuma



Espuma pronta

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 Análise Estatística do processo (*One-Way Analysis of Variance*)

Segundo Schlater et al. (2012), a análise de variância é a metodologia estatística que avalia a significância dos diversos fatores e interações, quando há suposições básicas para validar a análise de variância e a distribuição normal dos dados. Em raras situações a suposição de aditividade dos efeitos não é satisfeita. Assim, a homogeneidade das variâncias e a aditividade dos efeitos são observadas na independência estatística dos valores observados (sem correlação). Da mesma forma é possível quantificar a correlação e interação dos valores das variâncias quando os fatores sofrem interferência mútua.

Neste caso, o modelo estatístico é capaz de propiciar a análise estatística e definir se há significância ou não nos fatores e suas interações, conforme a equação 4.

4. Modelo Estatístico: $Y_{ij} = \mu + \tau_j + \varepsilon_{ij}$ (Equação 4)

onde: μ é a média geral;

τ_j é o efeito do grupo j;

ε_{ij} é um erro aleatório

3.7 Comparação entre BCCE de Resíduo e BCCE de Areia Natural

Uma comparação preliminar entre os BCCE produzidos com areia natural e espuma pré-forma com reagente comercial os BCCE obtidos com resíduo de ágata e a espuma pré-formada pela mistura Dietanolamina e Amino propil betaina foi estabelecido em relação à densidade de resistência à compressão. Ressalta-se que nesta comparação foram mantidas as mesmas relações percentuais dos componentes, bem como a relação de A/C.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resíduos de Pedras Roladas de Ágata

Estudos anteriores indicam que o uso de sílica, encontrado nos resíduos de pedras roladas de ágatas, muda substancialmente a relação água/cimento em função da sua capacidade hidrofílica/higroscópica, a relação de a/c foi elevada nos ensaios (1,09 – 1,48). Estes resultados coincidem com Venquiaruto et al. (2014) que relatam que o uso desses resíduos na granulometria de areia eleva a relação de água/ cimento. Neste estudo foi avaliado a substituição total da areia natural por agregado fino de ágata rolada, sendo que esse material pode ter alguma atividade pozolânica, como relata Petry (2015).

4.1.1 Características Físicas e Químicas do Resíduo de Pedras Roladas de Ágata

O resíduo de sílica, utilizado como fino agregado de ágata, foi caracterizado com relação distribuição de partículas, composição química, área superficial e massa específica. Estes resultados podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Características físicas e químicas do resíduo de pedras roladas de ágatas.

Propriedades Físicas	Massa específica g/cm ³		Tamanho de partícula					pH em pasta	Área superficial m ² /g	
			Passante em 75 µm	D _{10%} µm	D _{50%} µm	D _{90%} µm	D _{médio} µm			
	2,7		3,2 %	2,8	31,4	151,5	57,6	8,2	80,0	
Composição Química	Al ₂ O ₃	CaO	CdO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Outros	SO ₃	Outros	P.F
	1,24	0,40	0,08	92,18	1,06	0,10	0,06	-	0,06	4,81

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise química elementar, realizada pela técnica de FRX, revelou que este lote de resíduo apresenta aproximadamente 92,2 % é constituída por SiO₂, minoritariamente os outros elementos aparecem, sendo o Al₂O₃ com (1,24%), e o Fe₂O₃ (1,06%), com maior representatividade, todos os elementos constituintes

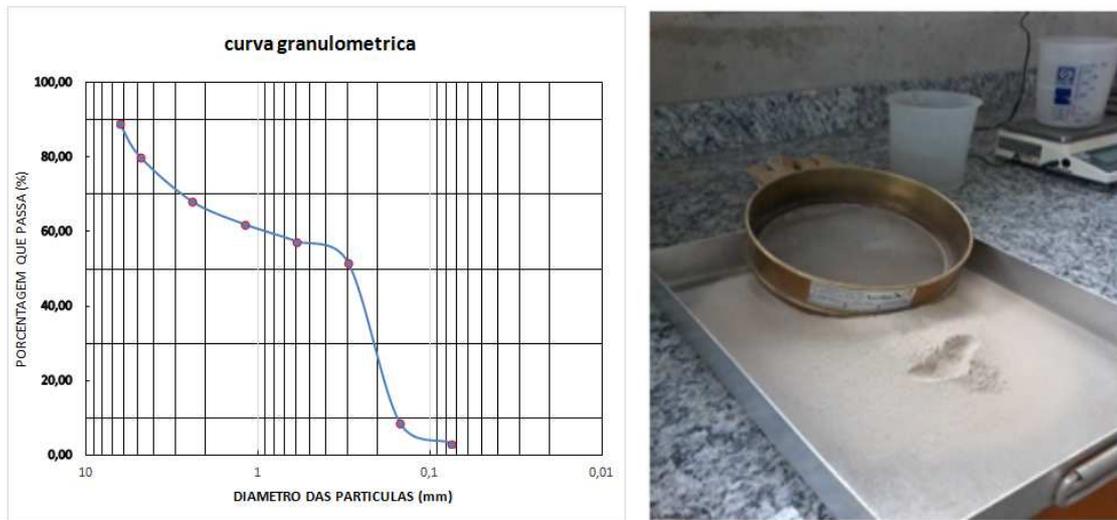
encontrados foram convertidos em percentual de óxidos pela relação estequiométrica. Quimicamente, o resíduo apresenta-se sem periculosidade, pois não há detecção de metais tóxicos, além disso, foi verificado o valor do pH em pasta é da ordem de 8,0, levemente alcalino, colaborando manutenção da alcalinidade do meio, importante para as reações de hidratação do aglomerante hidráulico.

4.1.2 Granulometria do Resíduo de Pedras Roladas de Ágata

O material bruto foi analisado em ensaio segundo a NM 46:2003, e o resultado encontrado foi mais de 60 % do material passante através da peneira de 2 mm. A partir desses resultados, e baseado nas informações de Ferreira (1987), foi estabelecido o corte granulométrico em 1,18 mm para utilização nos ensaios.

A análise granulométrica do material foi efetuada para avaliar a distribuição do tamanho dos grãos do resíduo. Este parâmetro é de fundamental importância, pois a distribuição e tamanho dos grãos influenciam diretamente na distribuição e estabilidade das bolhas incorporadas pelo agente espumígeno. Cabe também salientar que existe nesta amostra uma pequena fração que pode atuar como microsilica na estabilidade da espuma, durante a sua adição na argamassa. Além disso, nestas condições, mais de 60% do material pode ser utilizado sem que haja necessidade de processos adicionais de cominuição. A curva granulométrica e o aspecto visual do resíduo podem ser vistos na Figura 20.

Figura 20 - Curva granulométrica e resíduos de sílica.

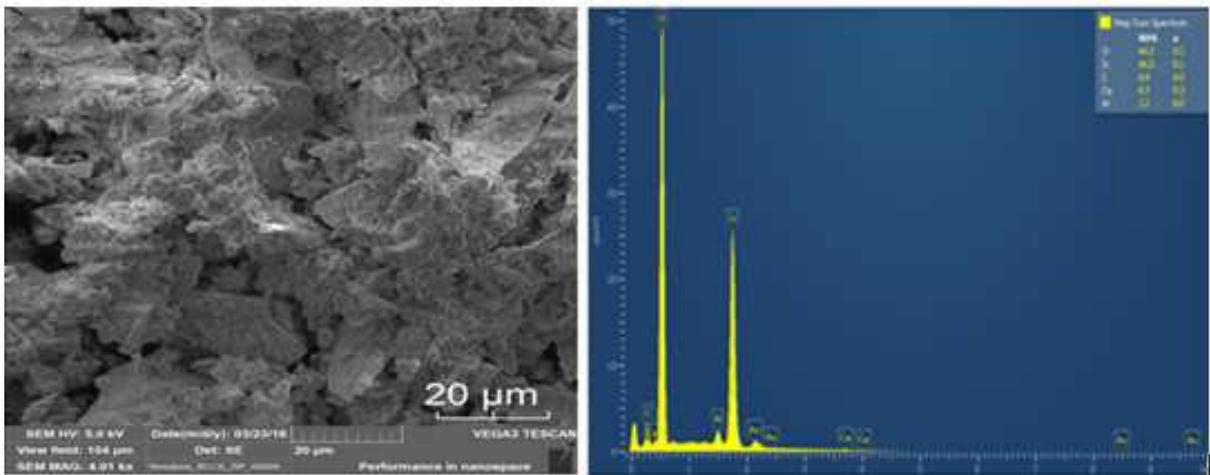


Fonte::Elaborado pelo autor.

4.1.3 Morfologia e Mineralogia do Resíduo de Pedras Roladas de Ágata

A análise morfológica do resíduo foi realizada por Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV) acoplado a Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). A imagem revela que o resíduo apresenta duas fases, uma delas com característica regular, com superfície plana, permitindo a identificação das camadas cristalinas, características dos geodos de ágatas. Contudo, percebe-se também que há uma fração visualmente sem forma. Este certo grau de amorfismo (pobre cristalinidade) é confirmado pelo ensaio de DFX (Figura 21).

Figura 21 - (a) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do resíduo, aumento de 4000 X e (b) Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) do resíduo.



(a) Imagem do Resíduo de ágata

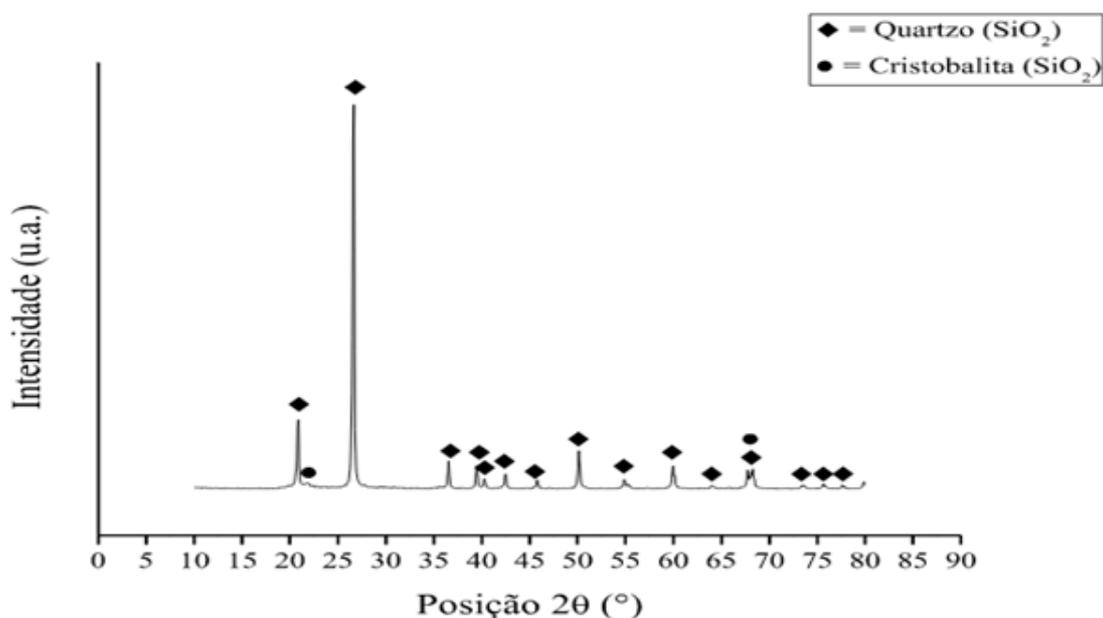
(b) Composição elementar do Resíduo por MEV-EDS

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para amplo conhecimento das propriedades mineralógicas da amostra utilizada neste trabalho foi realizado a análise de Difração de raios X, a qual permite a identificação das fases presentes na amostra. O tratamento do difratograma foi efetuado pelo método de Rietveld. Este procedimento, além de identificar as fases, é aceito na comunidade científica como capaz de quantificar as fases presentes em percentual mássico.

Tabela 6 - Quantificação das fases do resíduo de pedras roladas de ágata.

Fases Cristalinas (SiO ₂)
Quartzo: Fase cristalina majoritária, compondo aproximadamente 95,1 % da amostra;
Cristobalita: Fase cristalina minoritária, compondo aproximadamente 1,5 % da amostra;
Cristobalita (low): Fase cristalina pobre, compondo aproximadamente 1,9 % da amostra;
Tridimita (low): Fase cristalina pobre, compondo aproximadamente 1,5 % da amostra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

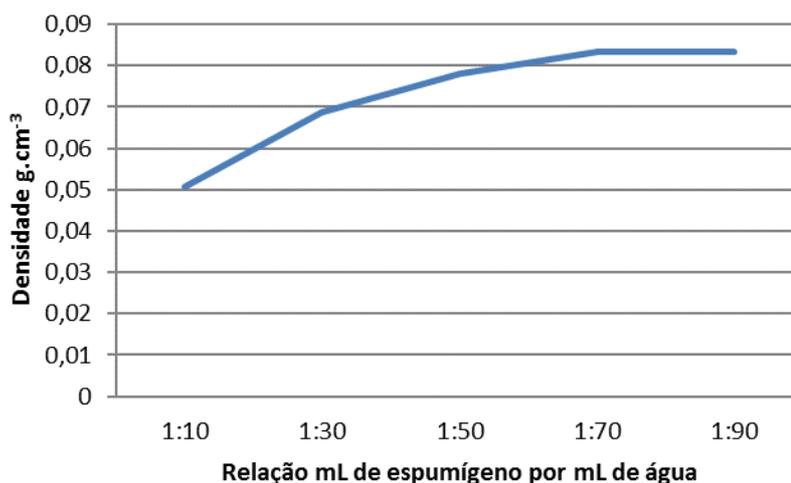
Foram identificadas as fases Quartzo, Cristobalita, Tridimita, estas últimas com variações com baixa cristalinidade, possivelmente ligada às pequenas frações sem forma definida como observado nas imagens de microscopia de varredura eletrônica. As fases minerais presentes foram determinadas por EDS, apresentando na composição do material a presença dos seguintes elementos: O, Si, C, Ca e Al. Este ensaio complementa as análises mineralógicas de difração de raios-X e fluorescência de raios-X.

4.2 Agente Espumígeno

A espuma foi formada pela mistura de dois espumígenos derivados de ácidos graxos de coco, desenvolvidos especificamente para essa pesquisa. A quantidade utilizada foi de duas partes de dietanolamina de ácido graxo de coco e uma parte de coco amino propil betaina. Complementarmente, a espuma foi caracterizada quanto à estabilidade, viscosidade e densidade, segundo metodologia adaptada do teste de Ross-Miles (VAN ROOSMALEN et al., 2004).

Após a escolha do espumígeno, foi efetuado um estudo para determinar a diluição ideal da espuma. Assim, empregou-se uma série de diluições desde 1:10 até 1:90, para avaliar qual a diluição que mais se aproximava do valor da densidade da ideal da espuma. Ressalta-se que os representantes comerciais dos agentes incorporadores de ar indicam a relação de 1:100 para a diluição (1 + 99). Para cada ponto foram feitos sete repetições. Os resultados indicam que a diluição apropriada é de 1:70 (espumígeno/água) gerando uma espuma com densidade de 0,085 g/cm³. A Figura 22 apresenta o resultado das diluições em comparação à densidade produzida.

Figura 22 - Densidade da espuma em agitação mecânica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O uso da mistura dos surfactantes, Dietanolamina de Ácidos Graxos de Coco e a Coco Amino Propil Betaina, atuam de forma importante no equilíbrio hidrofílico-

lipofílico, quebrando a tensão superficial da água e produzindo uma dispersão coloidal com pequenas bolhas, ou seja, uma espuma densa e altamente estável, com facilidade de incorporação a pasta cimentícia, ricas em carbonatos, e na distribuição das partículas de sílica. Ao contrário dos espumígenos comerciais que são compostos de LAS, (*Linear Alkylbenzene Sulphonate* ou alquilbenzeno sulfonado linear) que reagem com íons de cálcio e formam sais insolúveis, como o sulfonato de cálcio, que reduz a formação de espuma, fatores estes que ressaltam que o espumígeno estudado, derivado de ácidos graxos de coco, seja a melhor escolha na geração de espuma para fabricação do BCCE.

Para efeito de comparação, testou-se a viscosidade e a estabilidade da espuma formada pela mistura dos espumígenos Dietanolamida de ácido Graxos de Coco e Dimetil Propil Betaina e um espumígeno derivado LAS.

Como líquidos diferentes possuem propriedades diferentes, testou-se em bancada a viscosidade dos agentes espumígenos. A viscosidade é a resistência de um líquido ao escoamento, é uma propriedade reológica importante, pois um fluido mais viscoso, em sua maioria, possui uma maior estabilidade (PRISTA et al., 2002). O procedimento para determinação da viscosidade seguiu a metodologia descrita em Prista et al. (2002).

Os resultados apresentaram viscosidades distintas. O tempo de escoamento do LAS foi de aproximadamente 10 segundos. Em contrapartida, o tempo de escoamento da mistura de espumígenos, derivados de ácidos graxos de coco, foi de aproximadamente 30 segundos.

Verificou-se que a coluna com espuma dos agentes escolhidos, oriundos de ácido graxo de coco, drenavam lenta e suavemente, permanecendo com mais de 60% do volume de espuma formado. Ao contrário dos agentes comparados (LAS), cuja coluna de espuma diminuía drasticamente, restando aproximadamente 10% da espuma formada.

Todos os ensaios efetuados nos agentes espumígenos indicam que suas características físico-químicas especiais lhe conferem uma durabilidade que permite um controle na produção de BCCE, em suas mais variadas densidades e resistentes às múltiplas forças formadas durante a agitação do concreto. Sua densidade permite manter a estrutura das micro bolhas, responsáveis pela incorporação do ar na matriz cimentícia. O teste de estabilidade pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 - Teste de estabilidade e viscosidade do espumígeno.



(a) Estabilidade



(b) Viscosidade

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Blocos de Concreto Celular Espumígeno

A caracterização dos BCCE foi efetuada em dois momentos. Primeiro realizou-se a avaliação geral dos blocos construídos em escala de bancada e, posteriormente, avaliou-se somente a densidade, resistência à compressão e absorção de água para os blocos realizados, reproduzindo o processo industrial de produção.

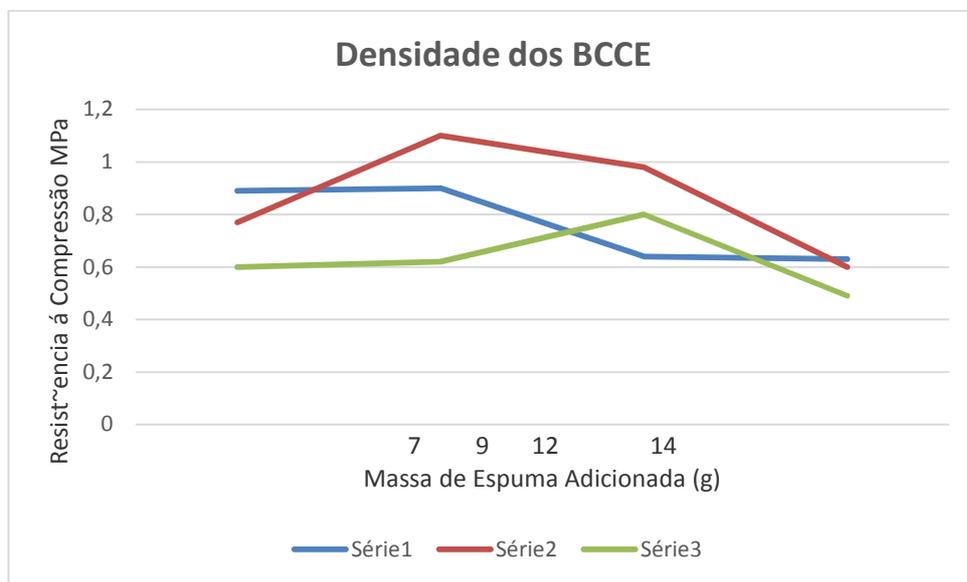
4.3.1 Densidade, Resistência à Compressão e Absorção de Água.

Densidade

A determinação da densidade foi efetuada por relação direta entre a massa e volume. Após os 28 dias de cura, os blocos cilíndricos foram retificados, calculado seu volume e aferida sua massa, pela simples relação da massa/volume. O valor da densidade é um parâmetro muito importante, pois está relacionado diretamente ao volume de ar incorporado na argamassa, e por consequência, tem grande influência no valor da resistência mecânica dos blocos. De forma geral, quanto menor a

densidade, menor é a resistência e maior é o volume de ar incorporado pelas bolhas de ar. A relação de água e espuma é interessante, pois um excesso de água causa o rompimento do filme que aprisiona o ar, ao mesmo tempo em que uma redução da quantidade de água também reduz a estabilidade das bolhas, pois, neste caso, os materiais que têm grande afinidade pela água, como a sílica e o cimento, usam a água de formação do filme para se hidratar. Assim, a melhor relação foi encontrada no Grupo II, com 28% de água e 11% de espuma (23 gramas de água e 9 gramas de espuma). Estes resultados podem ser vistos na Figura 24.

Figura 24 - Relação entre densidade e massa de espuma.



Fonte: Elaborado pelo autor.

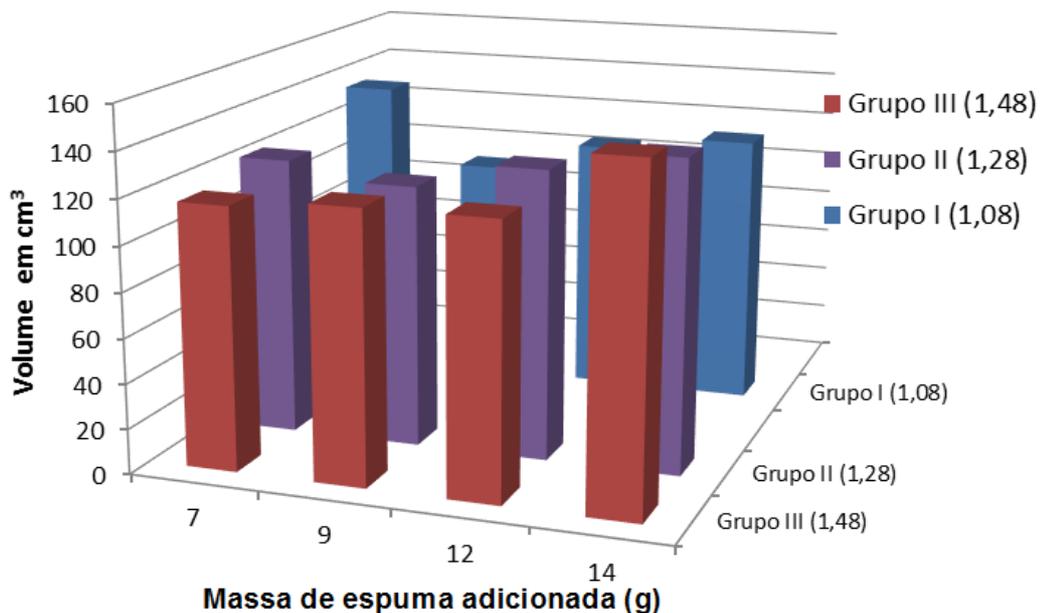
Volume de Argamassa Aerada Gerada

O estudo procurou avaliar também qual a quantidade de espuma mais adequada para se obter o maior volume de BCCE gerado com a menor densidade e maior resistência. Utilizando os valores obtidos da resistência a compressão, foi plotado um gráfico relacionando à resistência, densidade e volume de espuma adicionado. Cabe ressaltar que dentro de cada grupo foi mantida a relação de água/cimento.

A Figura 25 apresenta o comportamento da densidade e da resistência na mesma figura. A interpretação deste gráfico preconiza que, quanto maior o volume gerado de argamassa aerada, menor será o resultado com relação ao volume

produzido. Sendo assim, pode-se perceber que o primeiro lote do Grupo III e o último lote do Grupo I obtiveram os maiores valores de argamassa aerada gerada. Contudo, as resistências ficaram entre 0,3 e 0,4 MPa, muito abaixo do recomendado pela NBR 13438, que é de 1,2 MPa.

Figura 25 - Volume gerado em função da relação água/cimento e massa de espuma adicionada.



Fonte; Elaborado pelo autor.

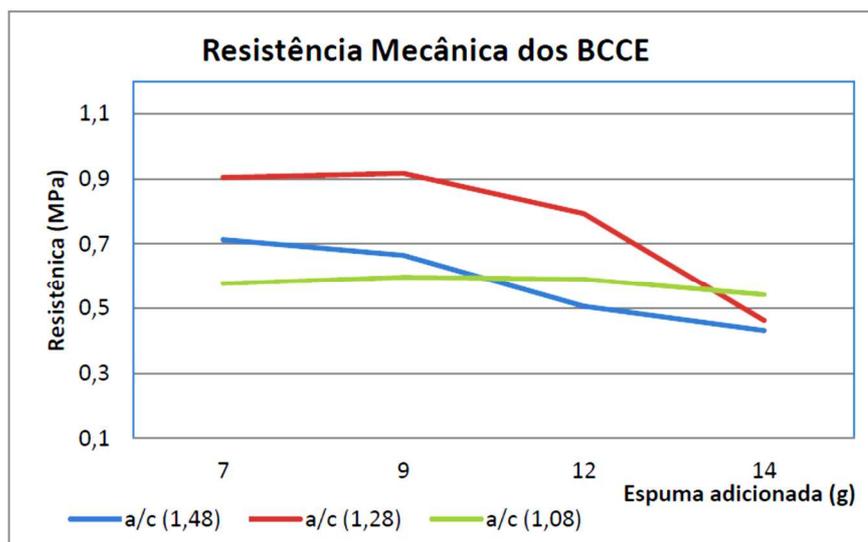
Acredita-se que a pouca quantidade de água na composição da argamassa, favoreceu a desestabilização das microbolhas, coalescendo várias bolhas menores e bolhas maiores, explicando, assim, o grande volume gerado e a baixa resistência. Semelhantemente, quando há um excesso de água, ocorre uma grande diluição do agente espumígeno, tornando o filme que aprisiona a bolha de ar frágil, propiciando seu rompimento, gerando também grandes bolhas no interior da argamassa aerada.

Resistência à compressão

A resistência à compressão também tem grande dependência da quantidade de água que é adicionado na hidratação dos materiais. Um excesso de água causa caminhos preferenciais dentro da argamassa, por onde a água em excesso extravasa, deixando esta região com baixa resistência mecânica. Além disso, um

excesso de bolhas de ar também causa uma queda acentuada na resistência à compressão, pois geram espaços vazios que, ao mesmo tempo, podem propiciar um melhor abatimento na transmissão som e calor e não oferecer resistência mecânica a carregamentos sistemáticos. Estes resultados podem ser vistos na Figura 26.

Figura 26 - Relação resistência mecânica dos BCCE e massa de espuma.

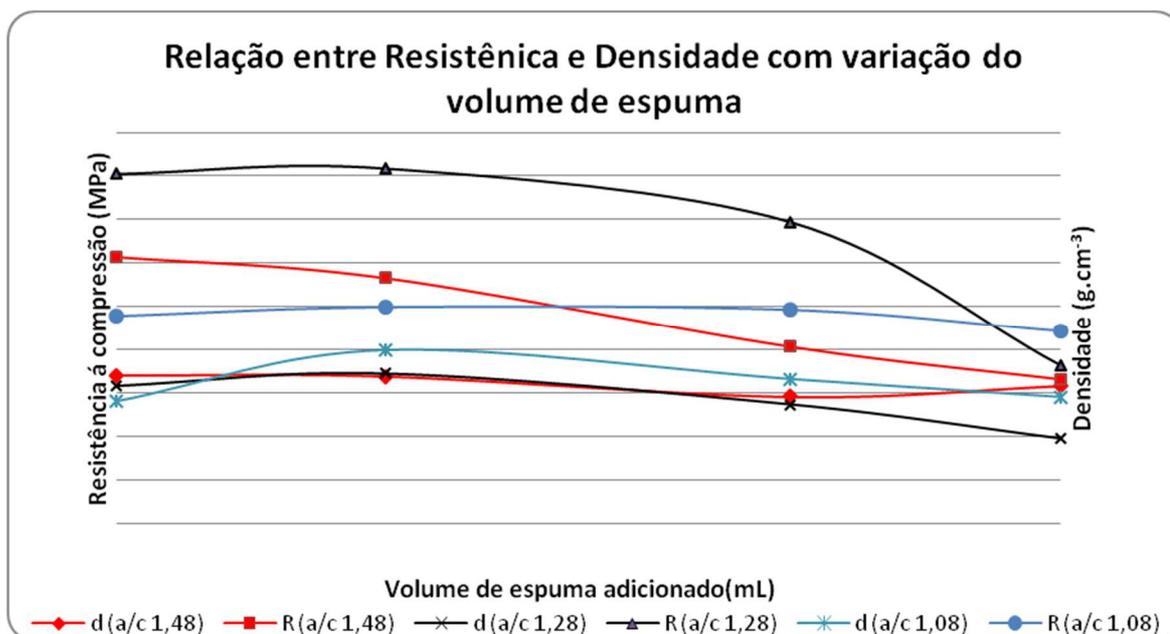


Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando se faz a correlação entre a densidade e a resistência (Figura 27), pode-se observar que a resistência à compressão na argamassa aerada não corresponde diretamente ao valor de densidade, como esperado. A interpretação deste gráfico sugere que há outros aspectos relevantes, tais como, tamanho e distribuição das bolhas de ar e relação a/c. Esta verificação concorda com Kadashevich (2005). Sendo assim, este gráfico reforça os resultados verificados no Grupo II, onde a relação a/c em 1,28 apresentou menor densidade e maior resistência para a maioria das adições de espumas. Contudo, cabe salientar que o melhor resultado dentro do grupo está para a amostra com adição de 9 g de espuma, a qual apresentou menor densidade (430 Kg/m^3) e 1,07 MPa. Utilizando a normatização brasileira para BCCA, NBR 13438 (ABNT, 2013), que determina a resistência mínima média entre 1,2 e 1,5 MPa para blocos com densidade entre 400 e 500 Kg/m^3 . Dessa forma, fica claro que a resistência verificada no ensaio foi muito próxima da estabelecida na norma. Assim, acredita-se que, com estudo

complementar, é plenamente viável o atendimento da resistência normalizada com processo de cura em 28 dias, em temperatura e umidade ambiente.

Figura 27 - Gráfico com o comportamento da resistência à compressão em relação a densidade e volume de espuma adicionado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

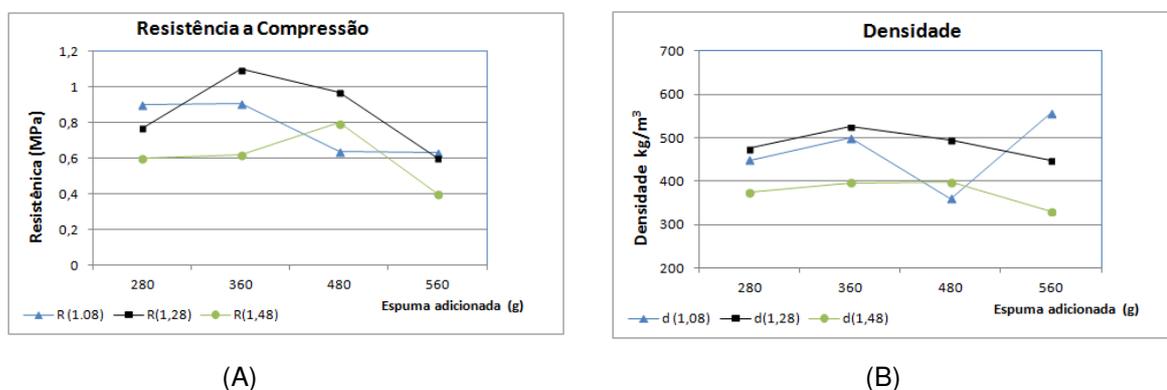
Desse modo, a resistência à compressão é influenciada por todos os vazios criados no material. Cabe salientar que o concreto celular apresenta ar incorporado pela espuma como gerador de vazios (poros). Portanto, o tamanho e a uniformidade da distribuição dos mesmos resultam em uma maior resistência à compressão axial.

Ressalta-se que a incorporação de ar em argamassas não é um procedimento novo e, quando o ar está homogeneamente distribuído em pequenas bolhas, tende a melhorar o desempenho acústico (isolamento acústico) e desempenho térmico (isolamento térmico). No caso do BCCE, melhora também a trabalhabilidade das paredes de vedação, visto que permite uma melhor técnica construtiva, maior produtividade e menor desperdício, devido ao seu baixo peso específico. Também a incorporação de ar aumenta o volume de concreto produzido, aumentando a rentabilidade do processo produtivo por unidade de bloco. Entretanto, quanto maior o volume de ar incorporado, menor a resistência à compressão.

É muito importante deixar claro que a produção de blocos de concreto celular é amplamente utilizada. Porém, não há normatização brasileira para os BCCE, apenas para os autoclavados, que têm sua geração de espuma provocada por agente químico. Neste trabalho, buscou-se a referência de normatização na NBR 13439 (ABNT, 1995), Blocos de Concreto Celular Autoclavados, com relação ao atendimento da resistência à compressão, parâmetro importante para se obter um produto com potencial de produção industrial.

Para complementar os estudos foi realizado um teste com quantidades mais próximas da escala real, no qual foram mantidas as mesmas proporções dos componentes dos testes anteriores. Como eram esperados, os valores da densidade 430 Kg/m³ e resistência 1,52 MPa foram similares, permanecendo o Grupo II (relação a/c 1,28) com os melhores valores para resistência à compressão e densidade. Estes dados podem ser vistos na Figura 28.

Figura 28 - Relação de densidade (A) e resistência (B) para teste industrial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para além do apresentado, os ensaios foram também avaliados pela correlação da ANOVA, onde se verificou a significância dos fatores de controle água e espuma na produção dos blocos de concreto celular. Como eram esperados, os resultados demonstrados na Tabela 7, a relação a/c e a massa de espuma adicionada apresentam significância na correlação da resistência à compressão dos BCCE. A interação dos fatores água e espuma não apresentam significância, ou seja, não há variação dos valores de resistência, olhando-se somente para a interação destes fatores. Isto pode ser verificado de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 - Análise da variância para resistência a compressão.

ANOVA							
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Sig.</i>
Relação a/c	0,292321	2	0,146161	9,555201	0,000886	3,402826	(Sim)
Qde de espuma	0,378715	3	0,126238	8,252792	0,000602	3,008787	(Sim)
Interações	0,190256	6	0,031709	2,072982	0,09456	2,508189	(Não)
Dentro	0,367115	24	0,015296				
Total	1,228407	35					

Fonte: Elaborado pelo autor

Com relação à densidade dos BCCE, observou-se que a relação a/c e a interação entre a relação de a/c e a quantidade de espuma adicionada apresentam-se não significativos na determinação da densidade. Contudo, a quantidade de espuma é determinante na definição da densidade dos BCCE. Os resultados estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8 - Análise da variância para a densidade.

ANOVA							
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Sig.</i>
Relação a/c	0,013704	2	0,006852	2,050543	0,150611	3,402826	(Não)
Qde de espuma	0,040135	3	0,013378	4,003601	0,019162	3,008787	(Sim)
Interações	0,028131	6	0,004688	1,403077	0,254124	2,508189	(Não)
Dentro	0,080197	24	0,003342				
Total	0,162166	35					

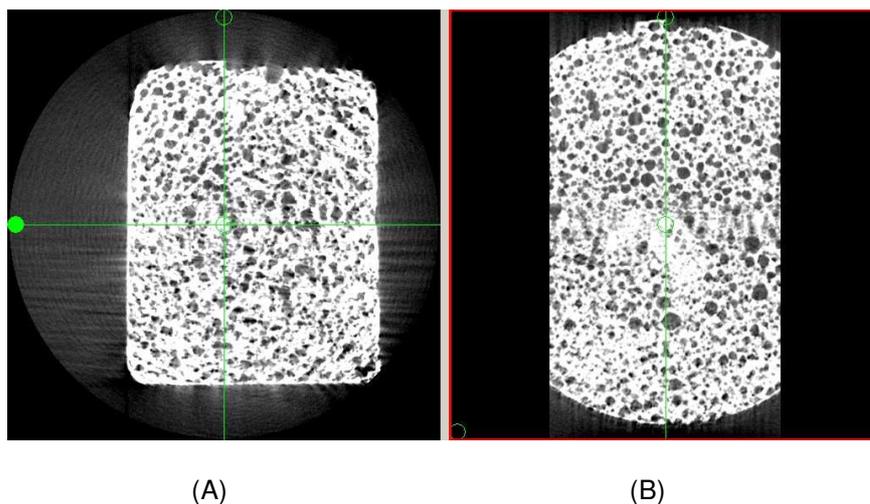
Fonte; Elaborado pelo autor.

4.3.2 Distribuição das Bolhas de Ar

Para verificar a distribuição dos poros, realizou-se análise de Micro tomografia, onde foram realizadas análises de volume e porosidade.

Na Figura 29 (A e B) pode-se verificar a imagem da distribuição das bolhas de ar no BCCE. Além da imagem, o equipamento é capaz de mensurar o tamanho das bolhas e volume de cada poro. O software é utilizado para analisar o volume e porosidade das amostras. Os resultados obtidos para o volume total da amostra foi de 2.157,0 mm³; volume total dos vazios ou porosidade total é 670,0 mm³. Sabe-se que a porosidade total melhora as propriedades de congelamento e descongelamento, isolamento térmico, acústico e resistência ao fogo.

Figura 29 - Micro tomografia do BCCE.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 30 (A e B) apresenta os dados obtidos na tomografia realizada nos traços estudados por Mello (2004). Esta imagem representa a distribuição dos poros para um BCCA, estudado pelo autor. Assim, fica evidente que a incorporação de ar através do agente espumígeno tem distribuição semelhante à dos geradores de bolhas por agente químico, tendo o alumínio metálico como gerador das mesmas.

Figura 30 - Tomografia realizada nos traços estudados por Melo (2004).



(A)



(B)

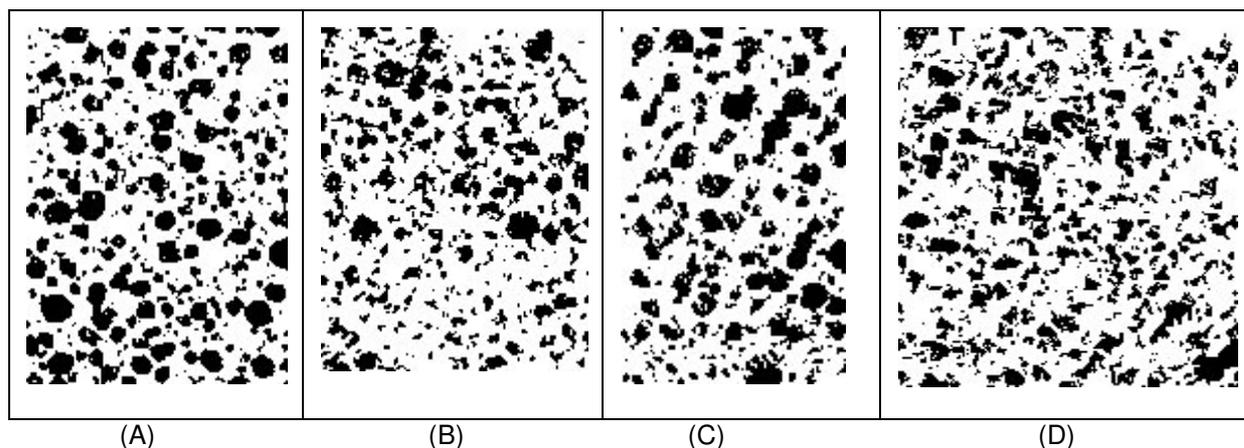
Fonte: Melo, 2004.

Segundo Malhotra (1993), a adição de sílica no concreto proporciona um refinamento da estrutura porosa, aspecto esse que é importante, pois possivelmente evita a formação de poros capilares, o "efeito esponja" e vasos comunicantes.

Sabe-se que os métodos utilizados e o teor e quantidade de espuma e sua qualidade tem relação direta com a quantidade de poros, e, nesse caso em particular, a sílica tem um efeito auxiliar importante na distribuição no tamanho e dos poros (MALHOTRA, 1993) Na Figura 31(A,B,C e D), constata-se nos traços analisados por tomografia uma homogeneidade na distribuição e o mesmo observa-se em relação aos seus tamanhos.

O tratamento das imagens foi efetuado pelo software Imagem J, bem como por Hilal (2016), a Figura 31 revela que aproximadamente 30% da amostra foi ocupada por espaços vazios de ar, com tamanho variando de 0,1 a 2,0 mm, não levando em consideração os micro e os meso poros, derivados do processo de hidratação do cimento.

Figura 31 - Imagem do BCCE tratada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3 Comparação dos Blocos Industrial e Laboratorial

Para a utilização dos blocos de concreto celular, a NBR 13438 (ABNT, 2013) que determina os requisitos para os Blocos de Concreto Celular Autoclavado, isto é, que sejam curados em autoclave para aumento da resistência mecânica. Contudo, este processo de cura apresenta vantagens e desvantagens. A principal vantagem é um ganho na resistência a compressão e redução do tempo de cura. A desvantagem é o custo do processo de autoclave como um todo. Alternativamente, vem sendo aplicado a produção de Blocos de Concreto Celular Espumígeno, curados em ambiente natural.

Assim, este ensaio se propôs a avaliar a obtenção de blocos de concreto celular espumígeno, utilizando um resíduo industrial e uma espuma de qualidade superior ao espumígeno empregado comercialmente. Para aplicar um panorama industrial do estudo, foi efetuada uma comparação entre as características de resistência a compressão e densidade para os BCCE, em escala de bancada e piloto, utilizando os materiais industriais e materiais em estudo resíduos de pedras roladas de ágatas, espumígenos de ácidos graxos de coco e cimento CPV ARI-RS. Isto pode ser visto na Tabela 9.

Tabela 9 - Comparação das características dos BCCE industrial e de estudo.

Blocos	Resistência (MPa)	Densidade (Kg/m ³)	Absorção de água	Descrição do processo de fabricação
Bloco Industrial	2,14	830	11,1 %	Relação a/c de 0,82, 25 kg de areia, 25 kg de cimento e 20 kg de água. Agitação de 10 min. em betoneira de 250L. Adição de 50 litros de espuma e 5 minutos de agitação. Cura de 28 dias ao ambiente
NBR 13438/2013	4,5	Maior que 600	Não Aplicado	Processo de cura por autoclave, formação de estruturas mais resistentes.
Bloco Laboratorial	1,07	430	13,6	Relação a/c de 1,28, 25g de cimento, 25 g de resíduos de pedras roladas de ágatas, 20 g de água. Agitação manual até obter argamassa homogênea. Adição de 9g de espuma e agitação mecânica por 1 minuto.
NBR 13438/2013	1,2	400	Não Aplicado	Processo de cura por autoclave, formação de estruturas mais resistentes.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A diferença de resistência entre os traços industrial e o preparado nos ensaios da pesquisa se deve à densidade. No caso específico da resistência e densidade dos BCCE, acredita-se que os fatores como processos de produção, granulometria, tipo de cura e, principalmente, a produção da espuma são decisivos para seu melhoramento. Reforçando essa visão, repare-se que o teste com materiais industriais apresentou densidade de 830kg/m³ e resistência de 2,14 MPa. Comparando com a especificação da normatização Brasileira para o BCCA, quanto à resistência dessa classe, o traço industrial apresenta-se distante ao atendimento da norma, em valor percentual, de aproximadamente 53% aquém do especificado. Paralelamente, os resultados utilizando os materiais do estudo, apresentaram o valor percentual aproximado, em relação a resistência à compressão, de 21,6% aquém do especificado. Contudo, mais próximo do valor normatizado para essa classe. Cabe salientar que foi utilizado processo de cura por 28 dias, com temperatura e umidade ambiente.

Vislumbrando como promissora a incorporação dos resíduos de pedras roladas de ágatas com espumígeno de ácidos graxos de coco para a produção de BCCE, e buscando atender os requisitos da norma do BCCA (Bloco de Concreto Celular Autoclavado), efetuou-se um estudo prévio da viabilidade econômica da

utilização dos resíduos (Tabela 10). Tal estudo foi mensurado analisando a metodologia de fabricação do BCCE e calculado o custo de fabricação do m³ do BCCE industrial, utilizando areia natural e espumígeno industrial, e o m³ do BCCE estudado, substituindo 100% a areia natural por resíduos de pedras roladas de ágatas e utilizando o espumígeno de ácidos graxos de coco.

Tabela 10 – Comparativo de custos do BCCE industrial e de estudo.

BCCE m ³	BCCE INDUSTRIAL	BCCE ESTUDO
Cimento	R\$ 140,00	R\$ 140,00
Areia	R\$ 20,00	R\$ 00,00
Água	R\$ 1,15	R\$ 1,15
Resíduos de pedras roladas de ágatas	R\$ 00,00	R\$ 00,00
Espumígeno industrial	R\$ 18,00	R\$ 00,00
Espumígeno estudo	R\$ 00,00	R\$ 6,00
TOTAL m³ BCCE	R\$ 179,15	R\$ 147,15

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os estudos indicando a total viabilidade de substituir 100% a areia natural, e a planilha de custos indicando uma economia de R\$ 32,00 (trinta e dois reais) por m³ de BCCE fabricado com resíduos de pedras roladas de ágatas, a viabilidade econômica ficou claramente demonstrada.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir dos experimentos de bancada permitem inferir que os resíduos de pedras roladas de ágatas apresentam potencial importante e promissor como substituto parcial ou total da areia na confecção dos blocos de Concreto Celular Espumígeno (BCCE).

A mistura dos agentes espumígenos derivados dos ácidos graxos de coco, Dietanolamina de Ácidos Graxos de Coco e Coco Amino Propil Betaína, na proporção de 1:3 e na diluição 1:70 apresentou a melhor resposta devidos às suas características físicas químicas superiores ao espumígeno derivado do LAS e, portanto, adequados ao uso na fabricação de BCCE, gerando espuma com alto desempenho e resistente às forças que são geradas no momento da agitação da argamassa aerada.

A metodologia de confecção dos blocos de concreto celular espumígeno foi estabelecida com boa reprodutibilidade com relação ao traço dos componentes. O processo de cura dos blocos de concreto celular espumígeno foi executado à temperatura ambiente.

Em relação à comparação dos BCCE fabricados, o teste piloto industrial com materiais convencionais apresentou-se 53% distante da norma, considerando a densidade e resistência. Por outro lado, o teste de bancada do BCCE do Grupo II com 9 g de espuma, resultou cerca de 21% distante do atendimento da norma, ou seja, mais próximo de obedecer à normatização.

Apesar de não existir normas brasileiras (NBR ABNT) que determinem esse tipo de processo, as pesquisas indicam que sua densidade entre 450 kg/m³ a 1850 kg/m³, aspecto que depende diretamente da qualidade e quantidade de espuma usada e dos poros, sem dúvida é uma vantagem competitiva para o BCCE no desenvolvimento de novos processos construtivo, na busca de respostas às exigências de redução de custos e na rapidez nas construções.

Os aspectos econômicos e financeiros também devem ser salientados, pois podem representar um impacto decisivo no futuro das empresas geradoras dos resíduos. Como os custos de transportes e disposição ambientalmente correta de resíduos industriais são de aproximadamente R\$ 170 reais o m³, um significativo

corte de custeio se realizará na indústria fabricante de pedras preciosas, ao cessar a necessidade de transportes dos mesmos, e, ao mesmo tempo, um importante e significativo ganho ambiental acontecerá, pois os passivos criados por depósitos irregulares de resíduos de pedras roladas de ágatas deixarão de existir.

Por fim, estes estudos permitem antever um grande potencial em relação à utilização dos resíduos de pedras roladas de ágata, podendo substituir em até 100% a areia natural, principalmente na fabricação de BCCE, utilizando como agente formador dos poros, espumígenos derivados de ácidos graxos de coco.

6. TRABALHOS FUTUROS

Novo ensaio poderá ser realizado envolvendo outros tipos de cimentos e agregados, utilizando filer de basalto e Pet triturado misturados com pó de pedras roladas de ágatas. Testes com cura a micro-ondas e em estufas com temperatura controladas seriam um caminho para aumentar a produtividade e facilitar a logística, pois podem acelerar o processo produtivo.

Uma investigação sobre interferências eletromagnéticas (internet) dos BCCE em edificações e outras propriedades como, por exemplo, sua durabilidade, resistência, isolamento térmico, isolamento acústico, resistência ao fogo, absorção de água e estudo específicos em idades diferentes, comparando com o BCCA.

Pesquisas sobre o comportamento reológico da espuma, em ambientes com temperatura e umidade do ar controlados, utilizando água deionizada, ou outro método que atenua sua dureza (íons cálcio e magnésio, cloretos, nitratos, sulfatos), pode ser um caminho para aperfeiçoar o controle de qualidade, principalmente a densidade da espuma, e padronizar uma linha de produção de BCCE.

7. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos. NBR 7219. Rio de Janeiro, 2 p., 1987.

_____. Cimento Portland de alta resistência inicial. NBR 5733. Rio de Janeiro, 5p., 1991.

_____. Rochas e Solos – Terminologia. NBR 6502. Rio de Janeiro, 18 p., 1995.

_____. Placas cerâmicas para revestimento- Especificação e métodos de ensaios. NBR 13818. Rio de Janeiro, 78 p., 1997.

_____. Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. NBR 14656. Rio de Janeiro, 6 p., 2001.

_____. Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem-ABNT NBR NM 46:2003 Rio de Janeiro, 6 p., 2003.

_____. Amostragem de Resíduos sólidos. NBR 10007. Rio de Janeiro, 21 p., 2004.

_____. Materiais metálicos - Calibração de máquinas de ensaio estático uniaxial - Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão - Calibração do sistema de medição da força. NBR NM-ISSO 7500-1. Rio de Janeiro, 17 p., 2004b.

_____. Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. NBR ISO/IEC 17025. Rio de Janeiro, 31 p., 2005.

_____. Concreto de Cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento. NBR 12655. Rio de Janeiro, 18 p., 2006.

_____. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. NBR 5738. Rio de Janeiro, 6 p., 2008.

_____. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. NBR NM 52. Rio de Janeiro, 6 p. 2009.

_____. Agregados – Terminologia. NBR 9935. Rio de Janeiro, 12 p., 2011.

_____. Blocos de concreto celular autoclavado – Requisitos. NBR 13438. Rio de Janeiro, 5 p., 2013.

AÏTCIN, P. C. Cements of yesterday and today; concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research**. v.30, p. 1349-1359, 2000.

BETAT, E. F.; PEREIRA, F. M.; VERNEY, J. C. K. De. Concretos produzidos com resíduos do beneficiamento de ágata: avaliação da resistência à compressão e do consumo de cimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v.14, n. 3, p. 1047-1060, 2009.

BOSSI, J.; CAGGIANO, W. Contribución a la geología de los yacimientos de ametista del Departamento de Artigas (Uruguay). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Porto Alegre, 1974. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1974. p. 301-317.

BRUM, T.M.M. et al. Características microscópicas da ágata do Salto do Jacuí. In: 1º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TRATAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE GEMAS, Ouro Preto, 2000. **Resumos...** Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2000. p. 42.

BRITISH PHARMACOPEIA. London: Her Majesty's Stationery Office, 1999.

BRUXEL, F.R. **A problemática dos resíduos provenientes do setor de gemas: avaliação da incorporação do lodo de gemas na massa cerâmica.** 2011. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento) - Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento (PPGAD). Centro Universitário UNIVATES, Lageado, 2011.

BRUXEL, F.R. et al. Estudo da adição de resíduo (lodo) de gemas na massa cerâmica vermelha. **Cerâmica.** São Paulo, v. 58, n. 346, abr./jun. 2012.

CARASEK, H. **Materiais de construção civil e Princípios de ciência e engenharia de materiais.** Ed. ISAIA, G. C. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 2. p.1712.

CHIARO, S. X. et al. Avaliação da potencialidade de desenvolvimento da reação álcali-agregado de agregados oriundos de resíduos de ágata. 2013, Cartagena. In: XII CONGRESO LATINOAMERICANO DE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y XIV CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN CONPAT. **Anais...** Cartagena/Colombia, 2013.

CILAS – COMPAGNIE INDUSTRIELLE DES LASERS. **Granulometer 1064: User Manual.** Marcousses, France: Cilas, 1992, 73 p.

CONSOLI, N.C. et al. Caracterização geotécnica de um resíduo da indústria de pedras semipreciosas e viabilidade de seu uso em estabilização dos solos. 2002, São Paulo. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (XII COBRAMSEG). **Anais...** São Paulo. São Paulo: ABMS, 2002. v. 01. p. 229-239.

CORSAN. <http://www.corsan.com.br/indicadoresdequalidadedaaguadistribuida>. Acesso em 10 dez. 2015.

DAL MOLIN, D.C.C. Adições Minerais para Concreto Estrutural. In: ISAIA, G.C. (Edt.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.p. 345-379.

DALLA ROSA, F.; THOMÉ, A.; DONATO, M. Análise da viabilidade técnica da aplicação do resíduo da rolagem de pedras preciosas em estruturas de pavimentos urbanos. In: LÉO AFRANEO HARTMANN, JULIANO TONEZER DA SILVA, MACIEL DONATO. (Org.). **Tecnologia e inovação em gemas, jóias e mineração**. 1 ed. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2014, v. 1, p. 91-98.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Ágata do Rio Grande do Sul**. Brasília: DNPM, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Sumário Mineral 2013**. Ministério de Minas e Energia. Brasília: DNPM, 2013. Disponível em: < <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2013>> . Acesso em 10 dez. 2015.

DUARTE, L. C.; HARTMANN, L. A. Geodos preenchidos por ametistas em basaltos da Formação Arapey, Artigas, República Oriental do Uruguai: Modelo Epigenético. In: 44 CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2008, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia, 2008.

FABBRI, G. T. P.; SÓRIA, M.H.A. (1994). Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 28, Rio de Janeiro, 1994. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1994, v.1, p.157-183.

FERREIRA, O. A. R. **Concretos Celulares Espumosos**. Boletim Técnico do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo; Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP, 1987, 20 p. BT- PCC 10/87. Disponível em: < http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00010.pdf>. Acesso em 12 dez. 2015.

GOUAL, M.S. et al. Isothermal moisture properties of Clayey Cellular Concretes elaborated from clayey waste, cement and aluminium powder. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n.9, p.1768- 1776, sept. 2006.

HELENE, P. R. L.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007. v.2. p. 905 -944

HILAL, A. A. ; THOM, N. H. ; DAWSON, A. R. Failure mechanism of foamed concrete made with/without additives and lightweight aggregate. **Journal of Advenced Concrete Techology**, v. 14, p. 511-520, 2016).

ITAMBÉ. **Resumo das Especificações Técnicas da ABNT para Cimentos.**

Curitiba, 2016. Disponível em:<www.cimentoitambe.com.br/wp-content/themes/itambe-2016/_assets/pdf/especificacoes_abnt.pdf>. Acesso em: 15 de dezembro de 2016.

JUCHEM, P. L. et al. **Geology of gemstone deposits in South Brazil.** In: ACTAS XIII CONG. LATINO-AMERICANO GEOLOGIA. Lima, 2008. Lima: Sociedad Geol. Peru, 2008. V. 1. p. 1-6.

KADASHEVICH; D. S. Micro-mechanical analysis of ACC. In: LIMBACHYIA, M.C.; ROBERTS, J.J. (Eds.) **Autoclaved aerated concrete.** London: Taylor and Francis Group, 2005. p. 219–228.

KAEFER, L. F. **A Evolução do Concreto Armado.** São Paulo, 1998. Disponível em < <http://www.feb.unesp.br/lutt/Concreto%20Protendido/HistoriadoConcreto.pdf>> . Acesso em nov. 2015.

KIHARA, Y; CENTURIONE, S. L. O Cimento Portland. In: ISAIA, G.C. (Edt.). **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005, p. 295-322.

KRÄMER, C. et al. Three-phase-foams for foam concrete application. **Materials Characterization**, v. 102, 173-179, 2015.

KURUGOL, S.; TANACAN, L.; ERSOY, H. Y. Young's modulus of fiber reinforced and polymer-modified lightweight concrete composites. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1019–1028, 2008.

KYLE, J.R.; MISI, A. Origin of Zn-Pb-Ag sulfide de-synthesis during Neo Proterozoic glaciation. **Science**, v. 310, p. 471-474. 1997.

LEGATSKI, L. A. Cellular Concrete. In: STP169-C, **Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete – Making Materials.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 1994. p. 533-539.

MALHOTRA, V.M. Fly ash, slag, silica fume and rice husk ash in concrete: a review. **Concrete International**, Detroit, v.15, n. 4, p.23-28., apr. 1993.

MARTINS, M. S. Diagnóstico Operacional das Empresas Beneficiadoras de Pedras de Soledade/RS. 2009. Relatório da Disciplina de Estágio Curricular do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon (Instituto Brasileiro do Concreto), 2008.

MELLO, J. P. **Desarrollo y Caracterizacion de um Material Celular de Alta Porosidade Com Base Cementicia Activada Mediante Agentes Inorganicos**. Tesis (Doctoral) - Universidad Politecnica, Madrid, 2004.

MELO, G. F. **Concreto Celular Polimérico: Influência da adição de resíduo de poliéster insaturado termo fixo**. 2009. 83 f. Tese (Doutorado) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. 1997. 2 v. 255 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

MINIOLI, B. Determinações potássio-argônio em rochas localizadas no litoral Norte do Estado de São Paulo. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 43, n. 2, p. 443-448, 1971.

MORAES, L; REOLON, R. **Avaliação da incorporação de lodo residual de gemas à argila expansiva para desenvolvimento de agregados leves**. Trabalho realizado na Disciplina Tópicos Especiais em Meio Ambiente – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K. Microstructural investigations on aerated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 457-464, 2000.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução Salvador E. Giamusso. 2. ed. rev. atual. São Paulo: Pini, 1997.

NETO, J.C.M. **Gestão de resíduos de construção de demolição no Brasil**. São Carlos: Rima, 2005.

OLIVEIRA, C. H. et al. Surfactantes derivados do fruto de coco (*Cocos nucifera* L.) e sensibilidade cutânea. **Revista Brasileira de Alergia e Imunopatologia**, v. 28, n. 3, p. 155-160, 2005.

OLIVEIRA, M. P. de; BARBOSA, N. P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 490–496, 2006.

PAULON, V. A. **Reação Álcali-Agregado em Concreto**. 1981. 114 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

PETRI, S.; FULFARO, V. J. **Geologia do Brasil (Fanerozóico)**. São Paulo: T. A. Queiroz - Editora da Universidade de São Paulo, 1983.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13ª ed. Rev. por Vladimir Antonio Paulon. São Paulo: Globo, 1998.

PETRY, N. S. **Uso de resíduos de ágatas como agregados em argamassa de cimento Portland branco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

PICOLOTTO, G. **Proposta de produção mais limpa aplicada em uma empresa de beneficiamento de pedras preciosas em Soledade - RS**. 2013. 73 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2013. Disponível em < <http://usuarios.upf.br/~engeamb/TCCs/2013-1/Gecielle%20Picolotto.pdf>> . Acesso em 10 set. 2015.

PRISTA, L.N.; ALVES, A.C; MORGADO, R.M.R. **Tecnologia Farmacêutica**. 6. ed., v. 1. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.

RABELO, N. M. A.; GARCIA, C. R. Comportamento do concreto mediante a adição de pozolana artificial. **Revista E-xacta**, Belo Horizonte, v. 6, n. 1, 2013, p. 55-66.

RAMAMURTHY, K.; KUNHANANDAN, E. K. N.; RANJANI, G. I. S. A classification of studies and properties of foam concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, pp. 388-396, 2009.

SANTOS, E.L.; MACIEL, L.C.; FILHO, J.A.Z. **Distritos Mineiros do Estado do Rio Grande do Sul**. DNPM - 1º Distrito/ Programa Nacional de Distritos Mineiros, 1998.

SANTOS, S. **Análise da fluência do concreto massa nas primeiras idades: influencias dos aditivos plastificantes e adições minerais**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SCHWERTMANN, U.; CORNELL, R. **Iron Oxides in the Laboratory: Preparation and Characterization**. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2000.

SCHERER, C.M.S., FACCINI, U.F.; LAVINA, E.L. Arcabouço estratigráfico do Mesozoico da Bacia do Paraná. In: HOLZ, M.; DE ROS, L.F. (Eds.). **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CIGO/UFRGS, 2000. p. 335-354.

SCHLATER, M. et al. **Random fields: simulation and analysis of random fields**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2012. 126 p.

SCHUMANN, W. **Gemas do mundo**. 9. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 2002.

SECCO, M. P. et al. Avaliação do comportamento mecânico, térmico e acústico de bloco de concreto celular como tema gerador para ensino de Matemática e Ciências no Ensino Médio. In: IX MOSTRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E EXTENSÃO COMUNITÁRIA E VIII MOSTRA DE PESQUISA DE PÓS-GRADUAÇÃO DA IMED. Passo Fundo, 2013. **Resumos...** Passo Fundo: IMED, 2015. Disponível em: < <http://soac.imed.edu.br/index.php/mic/ixmic/paper/view/182>>. Acesso em 10 dez. 2015.

SHIMADZU. **InspeXio SMX-90CT. Sistema de Tomografia de Raios X com microfoco de bancada.** Disponível em: <
<http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/ndi/smx-90ct-5.shtml>>. Acesso em 10 dez. 2015.

TRAMONTINA, L.; CASAGRANDE, L.; SCHNEIDER, I. A. H. Aproveitamento do Resíduo da Serragem de Ágatas e Ametistas na Construção Civil. In: SEMINÁRIO REGIONAL SOBRE LIXO E MEIO AMBIENTE. 1997, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: EDIUPF, 1997. p. 73-83.

VAN DEN HUL, H.J.; LYKLEMA, J. Determination of specific surface areas of dispersed materials. Comparison of the negative adsorption methods with some other methods. **Journal of the American Chemical Society**, v. 90, n. 12, p. 3010-3015, 1968.

VAN ROOSMALEN, M.J.E.; WOERLEE, G.F; WITKAMP, G.J. Amino acid based surfactants for dry-cleaning with high-pressure carbon dioxide. **The Journal of Supercritical Fluids**. v.32, p. 243-254, 2004.

VENQUIARUTO, S. et al. Aproveitamento de resíduos de ágata reciclada em materiais cimentícios sustentáveis. In: HARTMAN, L.A. et al. (Org.) **Tecnologia e Inovação em Gemas, Jóias e Mineração**. 1. ed. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2014. v. 1, p. 99 –106.

ZALÁN, P. V. et al. The Paraná Basin, Brazil. In: LEIGHTON, M. W. et al. (Eds.). **Interior Cratonic basins**. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1990.

ZANETTE, I.L. Principais tipos de dragas utilizadas no sistema lacustre-fluvial da Bacia do Guaíba. **Revista Areia & Brita**, n. 40, 2007.