

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PPGE3M

**ESPUMAS VÍTREAS PRODUZIDAS A PARTIR DA RECICLAGEM DE VIDRO
SODOCÁLCICO E CINZAS DE CASCA DE ARROZ APLICADAS EM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADOS EM CONCRETO LEVE**

FERNANDO ANTONIO DA SILVA FERNANDES

Eng°. Civil e de Segurança do Trabalho

Porto Alegre

2019

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PPGE3M

**ESPUMAS VÍTREAS PRODUZIDAS A PARTIR DA RECICLAGEM DE VIDRO
SODOCÁLCICO E CINZAS DE CASCA DE ARROZ APLICADAS EM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADOS EM CONCRETO LEVE**

FERNANDO ANTONIO DA SILVA FERNANDES

Eng^o. Civil e de Segurança do Trabalho

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia na área de Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof^o. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Porto Alegre

2019

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia na área de Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovado em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Orientador: Carlos Pérez Bergmann

Profa. Coorientadora: Sabrina Arcaro

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

Profa. Dra. Adriane Lawisch Rodriguez

Profa. Dra. Tania Maria Basegio

Prof. Dr. Afonso Reguly

Coordenador PPGE3M

AGRADECIMENTOS

À UFRGS pela oportunidade de desenvolver um trabalho em uma instituição de prestígio e qualidade.

Ao orientador Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann, pelo voto de confiança, pela motivação e apoio entusiasmado em todos os momentos fundamentais na realização deste trabalho.

À Prof^a. Dr^a Sabrina Arcaro pela sua dedicação, determinação e apoio para publicar meu artigo.

À Dr^a Andrea Pokorny que sempre me orientou quando as dúvidas surgiam.

À Prof^a. Dr^a Annelise Kopp que sempre me recebeu com muita alegria e entusiasmo.

Ao meu coorientador de coração Prof. Dr. Erwin Tochtrop pelo apoio, pela motivação sempre a mim dispensados.

Ao CEULP/ULBRA pela liberação para uso do laboratório do curso de Engenharia de Minas, sem qual este trabalho não teria sido realizado.

Aos amigos Saulo e Fabio que me ajudaram nos ensaios realizados no laboratório da ULBRA na cidade de Palmas-TO.

Aos professores Joel e Juan pela motivação e pelo apoio para alcançar este título de grande importância.

À minha esposa Rosa Christina pelo apoio incondicional e que sempre me motivou e acreditou em mim e que nos momentos de maior dedicação deste trabalho teve paciência. Sem você nenhuma conquista valeria a pena.

Aos meus grandes amores que são a motivação maior desta conquista minhas filhas Krissia e Thamara, pela compreensão, apoio e amor compartilhados em todos os momentos de nossas vidas.

Aos meus pais Antonio do Vale (*in memoriam*) e Raimunda Célia que dignamente me apresentaram à importância da família e ao caminho da honestidade, humildade e persistência, agradeço por tudo o que tenho hoje e pelo que sou como pessoa.

Dedico este trabalho à minha esposa
Rosa Christina pelo apoio e
compressão dos momentos em que
estive ausente.

“Materiais: do nanoalfinete ao
superfoguete”. Prof. Túlio Madruga

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GERAL	19
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	19
3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	20
4 REFERENCIAL TEÓRICO	21
4.1 CONCRETO	21
4.1.1 CONCRETO COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS	21
4.1.2 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO.....	22
4.1.3 A SUSTENTABILIDADE DO CONCRETO	23
4.1.4 AGREGADO NATURAL	23
4.1.5 INFLUÊNCIA DO AGREGADO NA REOLOGIA DO CONCRETO.....	25
4.1.6 COMPORTAMENTO DO CONCRETO EM ALTAS TEMPERATURAS	25
4.1.7 CONCRETO LEVE ESTRUTURAL	26
4.1.8 DURABILIDADE DO CONCRETO LEVE	28
4.1.9 AGREGADO LEVE.....	29
4.1.9.1 Agregados leves produzidos com resíduos.....	30
4.2. ESPUMA VÍTREA	30
4.2.1 A SUSTENTABILIDADE DA ESPUMA VÍTREA.....	31
4.2.2 PRODUÇÃO DAS ESPUMAS VÍTREAS.....	32
4.2.3 APLICAÇÃO DAS ESPUMAS VÍTREAS.....	33
4.2.4 MATÉRIAS-PRIMAS	33
4.2.4.1 Vidro	33
4.2.4.2 Vidro sodocálcico	34
4.2.4.3 Cinza da casca de arroz.....	34
4.2.4.4 Agente espumante	36
5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	38
5.1 MATERIAIS	38
5.1.1 VIDRO SODOCÁLCICO.....	39
5.1.2 CINZA DA CASCA DE ARROZ.....	41

5.1.3 AGENTE ESPUMANTE	43
5.1.4 CIMENTO	46
5.1.5 AGREGADOS	46
5.1.5.1 Agregado miúdo	46
5.1.5.2 Agregado graúdo.....	48
5.1.6. ÁGUA DE AMASSAMENTO	50
5.2 FABRICAÇÃO DAS ESPUMAS VÍTREAS PARA USO EM CONCRETO COMO AGREGADO LEVE.....	50
5.2.1 PESAGEM E HOMOGENEIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	50
5.2.2 PELOTIZAÇÃO E SECAGEM DAS AMOSTRAS.....	50
5.3 OBTENÇÃO DAS ESPUMAS VÍTREAS	51
5.3.1 DEFINIÇÃO DA FORMULAÇÃO DAS AMOSTRAS EM PRÉ-TESTES.....	51
5.3.2 QUEIMA DAS ESPUMAS	52
5.4 CARACTERIZAÇÃO DAS ESPUMAS VÍTREAS.....	53
5.4.1 EXPANSÃO VOLUMÉTRICA.....	53
5.4.2 ACOMPANHAMENTO DO AQUECIMENTO DAS MISTURAS.....	54
5.4.3 POROSIDADE	55
5.4.4 MORFOLOGIA E TAMANHO DOS POROS	55
5.4.5 GRANULOMETRIA	55
5.4.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	56
5.5 OBTENÇÃO DO CONCRETO COM ESPUMA VÍTREA	56
5.5.1 FORMULAÇÃO	56
5.5.2 HOMOGENEIZAÇÃO.....	57
5.5.3 MOLDAGEM DAS AMOSTRAS	58
5.5.4 CURA	59
5.6 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO COM ESPUMA VÍTREA.....	59
5.6.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE NO CONCRETO ENDURECIDO	59
5.6.2 TRABALHABILIDADE (<i>SLUMP</i>)	60
5.6.3 MASSA APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO	60
5.6.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	61
5.6.5 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.....	61
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	62

6.1 RESULTADO DOS PRÉ-TESTES.....	62
6.2 RESULTADO DA FILMAGEM DURANTE O PRÉ-TESTES	63
6.3 PRODUÇÃO DA ESPUMA VÍTREA.....	65
6.4 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO COM ESPUMA VÍTREA	67
6.4.1 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	67
6.4.2 TRABALHABILIDADE DO CONCRETO	70
6.4.3 DENSIDADE	72
6.4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	73
6.4.5 EFEITO DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	78
7 CONCLUSÕES	80
8 PRODUÇÃO DECORRENTE DESTA TESE	82
8.1 ARTIGOS.....	82
8.2 PATENTES	82
REFERÊNCIAS.....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Número de publicações de artigos a partir de 2009 obtidos na busca das expressões (a) glass foams, (b) lightweight concrete, (c) recycling e (d) compressive strength.	17
Figura 4.1. Agregado leve celular produzido por queima	30
Figura 4.2. Representação esquemática do modelo de espuma	31
Figura 5.1. Fluxograma da parte experimental utilizada neste trabalho	38
Figura 5.2. Análise granulométrica do vidro sodocálcico utilizado neste trabalho.....	39
Figura 5.3. Análise termogravimétrica e térmica diferencial do vidro sodocálcico.....	40
Figura 5.4.(a) Forno industrial, (b) CCA depositada ao tempo, (c) amostra coleta ...	41
Figura 5.5. Análise granulométrica da CCA	42
Figura 5.6. Análise térmica diferencial da CCA empregado na formulação das espumas vítreas	43
Figura 5.7. Análise granulométrica por difração a laser do CaCO_3	44
Figura 5.8. Análise térmica diferencial do CaCO_3	45
Figura 5.9. Agregado miúdo utilizado na fabricação do concreto.....	47
Figura 5.10. Agregado graúdo utilizado na fabricação de concreto	49
Figura 5.11. Equipamento usado para pelotizar as matérias-primas.....	51
Figura 5.12. (a) Mufla utilizada neste trabalho Marca-EDG 1800, (b) aspecto físico das espumas.....	53
Figura 5.13. Betoneira elétrica de 120 litros.....	57
Figura 5.14. Moldagem dos corpos-de-prova de concreto	58
Figura 5.15. Cura das amostras de concreto em tanque de água saturada.....	59
Figura 5.16. Ensaio de <i>Slump Test</i>	60
Figura 6.1. Expansão volumétrica das espumas vítreas obtidas em pré-teste em função do teor de CCA (12%, 16%, 22% e 30%), da temperatura de queima (800°C, 850°C, 900°C, 950°C e 1000°C), e dos seguintes teores de CaCO_3 na formulação: (a): 4%, (b) 6%, (c) 7% e (d) 10%.	62
Figura 6.2. Filmagem da amostra em aquecimento no pré-teste	63
Figura 6.3. Expansão volumétrica em relação à temperatura de queima no pré-teste	64

Figura 6.4. Imagens por microscopia óptica das espumas vítreas com tamanhos de esferas de (a) 4,8 mm, (b) 6,3 mm, e (c) 12,5 mm.	66
Figura 6.5. Face interna da amostra de concreto com adição de espuma vítrea: (a) 4,8 mm, (b) 6,3 mm e (c) 12,5 mm	70
Figura 6.6. Variação do <i>Slump</i> em relação à concentração de espuma vítrea (10, 20, e 30%) e tamanho de partícula (4,8, 6,3 e 12,5 mm).	71
Figura 6.7. Densidade do concreto aos 28 dias em função da quantidade percentual de espuma vítrea com tamanhos de 4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm.....	73
Figura 6.8. Ganhos de resistência à compressão após 3, 7, 28, 56 e 90 dias com incremento da adição de espuma vítrea com tamanhos de esferas de (a) 4,8 mm, (b) 6,3 mm e (c) 12,5 mm.	74
Figura 6.9. Variação da resistência à compressão do concreto em função da adição da espuma vítrea (0%, 10%, 20% e 30%), com diferentes tamanhos (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm) aos 28 dias de idade.....	76
Figura 6.10. Resistência à compressão em relação a densidade das amostras (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm) com e sem adição de espuma vítrea (0%, 10%, 20% e 30%).....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Estudos que incorporaram adição de resíduos em concreto	22
Tabela 4.2. Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo (Adaptada da NBR 7211, 2009).....	24
Tabela 4.3. Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo (Adaptada da NBR 7211, 2009).....	25
Tabela 4.4. Resistência à compressão e massa específica para concretos leves. (NM 35:1995)	27
Tabela 4.5. Valores de referência da massa específica dos concretos leves (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011)	28
Tabela 4.6. Composições química da cinza da casca de arroz em massa publicada em trabalhos.....	36
Tabela 5.1. Distribuição granulométrica do vidro sodocálcico.....	39
Tabela 5.2. Composição química do vidro Sodocálcico (em óxidos)	40
Tabela 5.3. Distribuição granulométrica da CCA empregada para a produção das espumas.....	42
Tabela 5.4. Composição química da CCA empregada para a produção de espumas	42
Tabela 5.5. Distribuição granulométrica CaCO_3	44
Tabela 5.6. Composição química do CaCO_3	45
Tabela 5.7. Caracterização do agregado miúdo utilizado na fabricação do concreto (NBR 72/2009)	47
Tabela 5.8. Caracterização do agregado graúdo (NBR 7211/2009)	49
Tabela 5.9. Formulações das espumas vítreas investigadas em pré-teste (% em massa)	52
Tabela 5.10. Composição da formulação de concreto em relação à adição de espuma vítrea.....	57
Tabela 6.1. Espuma vítrea: tamanho, porosidade, tamanho dos poros e resistência à compressão.....	67

Tabela 6.2. Concreto leve após 28 dias de cura em câmara úmida. Absorção de água por capilaridade em relação a adição de espuma vítrea em intervalos de 24, 48 e 72 horas	68
Tabela 6.3. Influência da temperatura 100°C, 200°C e 300°C na resistência mecânica do concreto	78

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a/c	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATD	Análise termodiferencial
ATG	Análise termogravimétrica
CA	Casca de arroz
CCA	Cinza da casca de arroz
CEN prEN	Comité Européen de Normalisation
DRX	difração de raios-X
EPS	Poliestireno expandido (expanded polystyrene)
FRX	fluorescência de raios X
GEE	Gases efeito estufa
MEV	microscopia eletrônica de varredura
p.a.	Pureza analítica
R2O	Cátion monovalente RO - Cátion bivalente
γ	Massa específica aparente
ρ_r	Massa específica real
ρ_s	Massa específica seca
ρ_{sat}	Massa específica saturada

RESUMO

Neste trabalho, foi produzido amostras de concreto leve estrutural com adição parcial (10%, 20% e 30%) de espumas vítreas com tamanho (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm) em substituição ao agregado natural produzidas com adição de vidro sodocálcico moído (78%), cinza da casca de arroz (16%) e carbonato de cálcio (6%) como agente espumante. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da adição de espumas vítreas nas propriedades tecnológicas do concreto, visando produzir um concreto leve estrutural. As amostras foram avaliadas em relação a sua resistência à compressão, densidade, absorção de água por capilaridade e comportamento ao aquecimento. Observou-se aumento da resistência à compressão em todas as amostras ao longo da idade (3, 7, 28, 56 e 90 dias). Aos 90 dias, para todas as concentrações, a resistência à compressão variou de 32 a 38 MPa. A densidade das amostras aos 28 dias também foi favorecida (2380, 2285 e 2332 kg/m³). As amostras reduziram o efeito da ação da temperatura (200°C e 300°C) em (13%) no concreto com adição em relação ao traço controle. Além disso, a consistência (*Slump*) apresentou valores (>90 mm) para todas as amostras, possibilitando a sua comercialização e facilidade de bombeamento a partir de caminhões betoneira.

Palavras-chave: Espuma vítrea, concreto leve, reciclado, meio ambiente, resistência à compressão.

ABSTRACT

In this work, samples of light structural concrete with partial addition (10%, 20% and 30%) of glassy foams with size (4.8 mm, 6.3 mm and 12.5 mm) were produced instead of the natural aggregate produced. with the addition of milled calcium glass (78%), rice husk ash (16%) and calcium carbonate (6%) as a foaming agent. The objective of this work was to evaluate the influence of the addition of glassy foams on the technological properties of the concrete, aiming to produce a lightweight structural concrete. The samples were evaluated for their compressive strength, density, capillary water absorption and heating behavior. Increased compressive strength was observed in all samples throughout age (3, 7, 28, 56 and 90 days). At 90 days, for all concentrations, compressive strength ranged from 32 to 38 MPa. The density of samples at 28 days was also favored (2380, 2285 and 2332 kg/m³). The samples reduced the effect of the temperature action (200 °C and 300 °C) by (13%) on the concrete with addition to the control trait. In addition, the consistency (*Slump*) presented values (> 90 mm) for all samples, allowing their commercialization and easy pumping from concrete mixer trucks.

Keywords: Glass foam; lightweight concrete, recycled; environment; compressive strength.

1 INTRODUÇÃO

As questões ambientais vêm aumentando a preocupação mundial (LIU; XU; LI, 2017). O consumo de recursos naturais na criação de ambientes construídos dá origem a sérias preocupações do ponto de vista da sustentabilidade (KIM *et al.*, 2018). As discussões sobre sustentabilidade sempre incluem a indústria da construção, principalmente devido ao forte impacto ambiental associado à produção de materiais de construção (MÜLLER *et al.*, 2014).

Concreto é um dos materiais mais consumidos no mundo, com uma produção anual de aproximadamente 10 bilhões de metros cúbicos (THOMAS, 2018). Os agregados respondem por 70-80% do volume de constituintes concretos (YADAV; PATHAK, 2009). A indústria da construção civil demonstra grande interesse na substituição parcial ou total de constituintes de concreto por resíduos industriais e agrícolas com propriedades cimentícias (KHAN *et al.*, 2017). A produção de agregados utilizando resíduos provenientes da reciclagem para uso no concreto (XIAO, 2018), sem prejudicar seu desempenho e durabilidade, pode ser uma alternativa econômica e ambientalmente sustentável que deve contribuir para redução do descarte de resíduos em aterros (THOMAS, 2018).

O concreto leve é composto basicamente de cimento e agregados leves. Não é um material novo e sua existência é registrada desde os primórdios do Império Romano, é um material de construção consagrado em todo mundo (ALI *et al.*, 2018; ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011). O concreto leve é caracterizado com base em sua densidade aparente ($>2000 \text{ kg/m}^3$) e resistência à compressão ($>17,2 \text{ MPa}$) (ALI *et al.*, 2018; ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, 2011).

As espumas vítreas têm atraído grande interesse da indústria de construção devido a características como leveza, rigidez e boa resistência à compressão. Essas características favorecem seu uso, por exemplo, no isolamento térmico (ZHU *et al.*, 2016). As espumas vítreas podem ser projetadas de acordo com as propriedades requeridas e a possível aplicação, modificando para isso os parâmetros do processo como técnica de conformação, quantidade de agente espumante etc. (STUDART *et al.*, 2006). O carbonato de cálcio puro pode ser usado como agente espumante (KÖNIG; PETERSEN; YUE, 2015; PETERSEN; KÖNIG; YUE, 2017). As espumas

vítreas são produzidas a partir de uma matriz de vidro reciclado (DE MORAES *et al.*, 2019; FERNANDES *et al.*, 2014; SOUZA *et al.*, 2017; TEIXEIRA *et al.*, 2017) como por exemplo, o vidro sodocálcico que representa 90% de todo o vidro produzido em todo o mundo (AKERMAN, 2013). No caso do vidro de subprodutos industriais domésticos, há atualmente uma produção anual 700.000 ~ 800.000 toneladas, das quais 70% estão sendo recicladas. Mas a realidade é que, com exceção das garrafas de vidro usadas, o vidro não está sendo reciclado (LEE *et al.*, 2018). As embalagens de vidro possuem um ciclo de vida infinito, e sempre tiveram um grande destaque na indústria vidreira, principalmente devido ao fato do vidro ser 100% reciclável (ABIVIDRO, 2017). A reutilização do vidro no processo inicial é muito limitada principalmente pelo risco de contaminação e degradação da qualidade (ZHU *et al.*, 2016).

Resíduos agroindustriais, podem ser usados como fonte de SiO₂ sem comprometer as propriedades da matriz de vidro. Entre esses resíduos, destaca-se a casca de arroz (CA), considerando que o arroz é o alimento mais consumido no mundo, com estimativa de produção de 450 milhões de toneladas para 2020 (SOARES *et al.*, 2015). O resíduo neste caso, a casca do arroz corresponde a aproximadamente 20-33% do peso do arroz. A CA quando queimada dá origem a cinza da casca de arroz (CCA), representando então (18–20% em peso) (ELICHE-QUESADA *et al.*, 2017). A composição de CCA é quimicamente inerte (PODE, 2016), possui grande concentração de SiO₂ (> 92%) (SOBROSA *et al.*, 2017), e pode ser encontrada na estrutura amorfa ou cristalina, dependendo da temperatura de queima a que é submetida (ELICHE-QUESADA *et al.*, 2017).

A reciclagem de subprodutos industriais contribui para reduzir a exploração de recursos naturais, traz benefícios ao meio ambiente e econômicos (HANIF *et al.*, 2017b).

A Figura 1.1 apresenta os trabalhos publicados de 2009 a 2019, envolvendo espuma vítrea, concreto leve, meio ambiente, reciclagem e resistência à compressão. Para tal, foi realizada busca pelas expressões “glass foams”, “*lightweight concrete*”, “*recycling*” e “*compressive strength*” na plataforma *online* Sciencedirect.com em setembro de 2019.

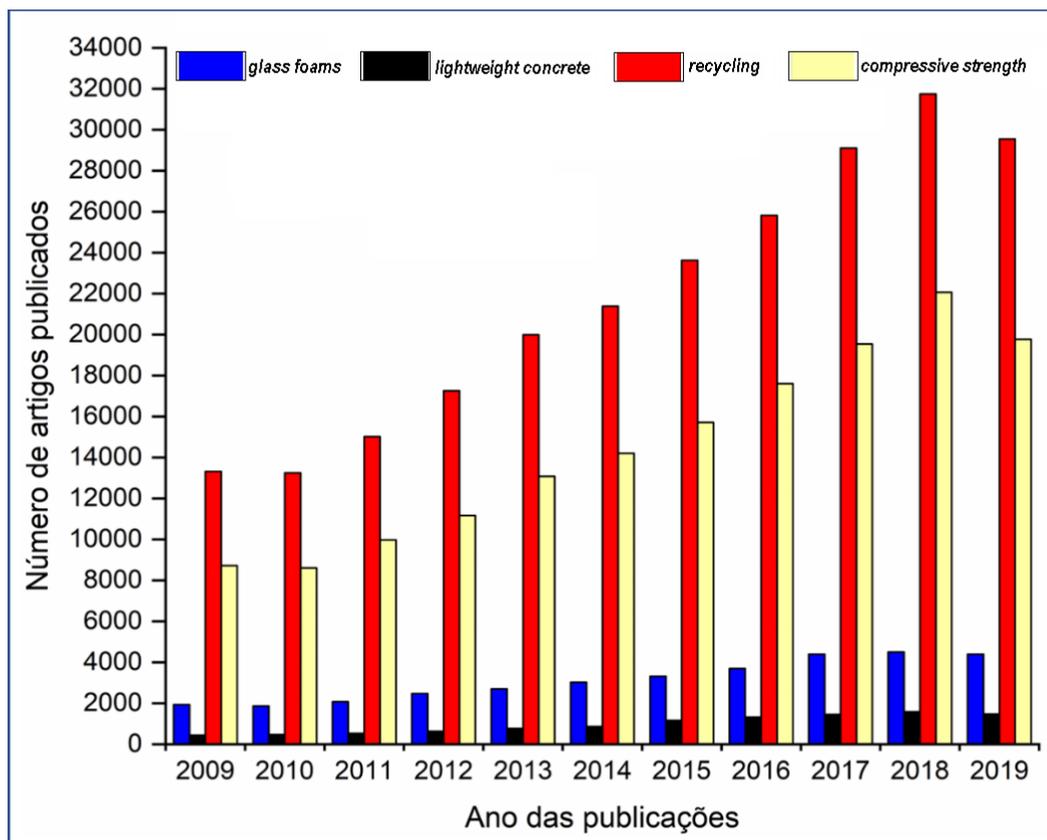


Figura 1.1. Número de publicações de artigos a partir de 2009 obtidos na busca das expressões: *glass foams*, *lightweight concrete*, *recycling* e *compressive strength*.

Verifica-se (Figura 1) que o número de publicações tem aumentado para todos os temas buscados nos últimos 10 anos. Os temas “*recycling*” e “*compressive strength*” apresentam números de publicações bem significativos devido ao aumento da produção de materiais e pela redução de matérias-primas naturais em todo mundo. Para “*glass foams*” e “*lightweight concrete*” o número de publicações no período ainda requer estudos, se comparados ao número de publicações relacionadas a outros temas pesquisados. A pesquisa demonstrou que a produção de novos materiais utilizando material reciclado é bem relevante, mas ainda existe a necessidade de novas pesquisas para produção de “*lightweight concrete*” com adição de material produzido de resíduos em substituição aos materiais naturais no concreto.

Hoje em dia, com a preocupação com às questões ambientais e a reutilização de resíduos na produção em larga escala de produtos eco compatíveis (MUGONI et al., 2015), a substituição parcial do agregado graúdo natural por espumas vítreas na produção de concreto pode contribuir para minimizar a extração

do agregado natural no meio ambiente. Além disso, pode contribuir para o destino correto do vidro sodocálcico e da CCA, que são resíduos com grandes volumes de descarte em aterros sanitários. Nesse contexto, este estudo investigou os efeitos da substituição parcial de agregados naturais (seixos) por espumas vítreas (10-30% em peso), produzidos por pelotização com resíduos de vidro sodocálcico, cinza de casca de arroz e carbonato de cálcio na densidade, resistência à compressão, consistência (*Slump*) e comportamento térmico.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar as propriedades tecnológicas de um concreto leve estrutural produzido com substituição parcial do agregado graúdo natural, pela adição de espuma vítrea produzida com resíduos de vidro sodocálcico, cinza da casca de arroz e carbonato de cálcio usado como agente espumante.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Na realização deste trabalho, foram os seguintes os objetivos específicos traçados:

- Obtenção de espumas vítreas a partir de cinzas de casca de arroz, resíduos de vidro sodocálcico e agente espumante;
- otimizar as características das espumas visando emprego como agregado em concreto;
- produzir o concreto utilizando espuma vítrea como agregado;
- obter uma boa trabalhabilidade do concreto produzido (*Slump*);
- otimizar características do concreto como trabalhabilidade (*Slump*), propriedades mecânica e densidade;
- reduzir o consumo de agregado graúdo natural, visando tornar o concreto leve com espuma vítreas, mais sustentável e economicamente competitivo no mercado.

3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A investigação científica realizada neste trabalho apresenta limitações quanto à sua interpretação. Entre estas, destacam-se:

- i) O resíduo de vidro sodocálcico utilizado é referente a uma amostragem pontual, aleatória, de embalagens de vidro para bebidas, podendo haver diferenças com outras embalagens de outros fabricantes;
- ii) Os resíduos de cinza da casca de arroz encontravam-se exposto ao tempo e foram coletados após o período de chuva na região central do Brasil. Essas condições podem levar a diferenças de características em relação a outras cinzas de casca de arroz;
- iii) A extrapolação para produção industrial dos resultados obtidos deve levar em conta principalmente o processo de compactação e o tipo de queima praticada:
 - a) na conformação dos corpos-de-prova em laboratório, foi empregada a prensagem de simples efeito. Para tanto, a cinza de casca de arroz foi submetida a um processo de pelotização de pós. A pelotização utilizada neste trabalho não necessariamente é comparável com a obtida por outros processos/equipamentos;
 - b) a queima praticada em laboratório em fornos elétricos tipo mufla difere da queima praticada industrialmente para este tipo de produto;
- iv) Os ensaios de *Slump* foram realizados na temperatura ambiente de Palmas-TO, no período onde predomina o tempo seco com temperaturas >40°C.
- v) O traço de concreto escolhido foi baseado no traço mais usado na região com os agregados disponível na região.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 CONCRETO

O material de construção mais utilizado no mundo é o concreto (MEHTA, P. K.; MONTEIRO, 2014), com produção anual aproximada de 10 bilhões de metros cúbicos (THOMAS, 2018). O concreto não só tem sido fundamental para alcançar muitos avanços na indústria da construção, mas também é considerado um material de construção absolutamente essencial do futuro e, devido à sua durabilidade relativamente alta e viabilidade econômica, é amplamente utilizado na construção civil em todo o mundo (HANIF *et al.*, 2017a).

O concreto é projetado para atingir a resistência mecânica calculada em projeto aos 28 dias (SALEM ALSANUSI; LOUBNA BENTAHER, 2015). O prazo de 28 dias propicia os melhores resultados. Projetar um concreto com adições é um processo que utiliza recomendação de normas (SALEM ALSANUSI; LOUBNA BENTAHER, 2015).

4.1.1 CONCRETO COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS

A incorporação no concreto de adições minerais, resíduos industriais e agrícolas proporciona melhor resistência à fissuração térmica, aumento da resistência final e redução da permeabilidade devida ao refinamento dos poros proporcionando uma maior resistência ao ataque químico, aumentando a durabilidade das estruturas (MEHTA, P. K.; MONTEIRO, 2014). A Tabela 4.1 apresenta uma relação de estudos que incorporaram resíduos em concretos em substituição aos agregados naturais e o resultado da resistência à compressão aos 28 dias.

Tabela 4.1. Estudos que incorporaram adição de resíduos em concreto.

Autor	Agregado	Resíduo	Adição Massa (%)	Resistência à Compressão (28 dias) MPa
Limbachiya <i>et al.</i> (2012)	Miúdo	Vidro	5,10 e 15	38
Limbachiya <i>et al.</i> (2012)	Graúdo	Vidro	30 até 100	32
Park <i>et al.</i> (2004)	Miúdo	Vidro	0-70	34
Corinaldesi <i>et al.</i> (2004)	Miúdo	Vidro	30-70	33
Lam <i>et al.</i> (2007)	Miúdo	Vidro/Cinza	>25	32
Oliveira <i>et al.</i> (2008)	Miúdo	Vidro	0-100	33
'Hanif <i>et al.</i> (2017b)	Graúdo	Concreto reciclado	100	34

As adições de resíduos para concreto são estudada em todo mundo, sendo cada vez mais frequente como por exemplo: cinza volante, escória, sílica ativa, casca de arroz e cinza de casca de arroz (BLISSETT *et al.*, 2017; CHUANG *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2015; LU; DUAN; POON, 2017; PRASARA-A; GHEEWALA, 2017; SHAO *et al.*, 2000; THOMAS, 2018; YADAV; PATHAK, 2009), poliestireno expandido (ATHANASOPOULOS - ZEKKOS; LAMOTE; ATHANASOPOULOS, 2012), argilas cimentícias celulares leves e pneus (HORPIBULSUK *et al.*, 2014) e vidro (BELIE; SOUTSOS; GRUYAERT, 2018).

4.1.2 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO

O concreto é comumente composto da mistura de cimento Portland agregado miúdo, agregado graúdo e água (MEHTA, P. K.; MONTEIRO, 2014). Os agregados representam entre 60-80% do volume do concreto (ANDERBERG; FORSEN, 1982; YADAV; PATHAK, 2009). Para formar o meio de cimentação, é acrescida água ao sistema. Agregados graúdos e miúdos são a parte que constituem a massa inerte. Em concretos bem homogêneos, esses materiais são completamente envolvidos pela pasta de cimento preenchendo todo o espaço vazio entre as partículas que, ao passar do tempo começa a ganhar resistência (SALEM ALSANUSI; LOUBNA BENTAHER, 2015). As adições minerais em concretos são classificadas como adições predominantemente inertes (API) e adições predominantemente reativas (APR), baseando-se na possibilidade de haver função aglomerante potencial ou não (SALES; ALFERES FILHO, 2014).

4.1.3 A SUSTENTABILIDADE DO CONCRETO

As discussões sobre sustentabilidade sempre incluem a indústria da construção, principalmente devido ao forte impacto ambiental associado à produção de materiais de construção (MÜLLER et al., 2014). Isso porque, à construção de edifícios e ao uso subsequente dessas estruturas com vida útil exigida normalmente variando entre 50 a 100 anos (MÜLLER et al., 2014).

A sustentabilidade no setor da construção é uma das necessidades de maior relevância em um mundo em desenvolvimento, devido à diminuição dos recursos naturais resultantes da enorme produção de concreto (SNEHA, 2018; THOMAS, 2018). Com o recente aumento das preocupações ambientais, a questão da sustentabilidade emerge com fundamental importância (LEE et al., 2018).

A origem e forma de extração de matérias-primas para produção de agregados naturais para uso no concreto é importante para redução dos impactos ambientais, envolvidos na atividade extrativa. O controle direto da origem das matérias-primas e o licenciamento ambiental de fornecedores é uma necessidade para a produção de concreto sustentável (JOHN, 2011). Os processos de extração informal dos agregados naturais têm forte impacto ambiental, pela destruição descontrolada de áreas protegidas e o desperdício de matérias-primas. Os agregados representam aproximadamente 70-80% do volume do concreto (YADAV; PATHAK, 2009).

A indústria da construção tem grande interesse na substituição parcial ou total dos agregados do concreto por materiais residuais da agricultura com propriedades cimentícias (KHAN et al., 2017). A produção de agregados utilizando resíduos provenientes da reciclagem para uso no concreto (XIAO, 2018), sem prejudicar seu desempenho e durabilidade, pode ser uma alternativa econômica e ambientalmente sustentável, que deve contribuir para redução do descarte de resíduos em aterros (THOMAS, 2018; YADAV; PATHAK, 2009). Os agregados produzidos localmente contribuem de modo eficiente para a redução de impactos ambientais (JOHN, 2011).

4.1.4 AGREGADO NATURAL

Agregado natural é considerado um material pétreo que pode ser utilizado tal como é encontrado na natureza, podendo ser submetido a lavagem, classificação ou britagem (FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M.; BEJA, 2017).

A substituição de agregado natural em concretos tem forte influência nos resultados finais de resistência à compressão, sendo sempre inferiores aos obtidos com agregados naturais (KIM *et al.*, 2018). A trabalhabilidade (*Slump*) em concretos que receberam a incorporação de material reciclado em substituição parcial ao agregado natural é favorecida. Como os agregados compreendem três quartos do volume total do concreto, é racional que o abatimento do concreto seja diretamente influenciado pelo tipo agregado.

A classificação quanto a sua granulometria é definida pela ABNT NBR 9935:2011, que define material miúdo como o material que passa na peneira de malha de 4,75 mm. Material graúdo como aquele cujos grão passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira de malha de 4,75 mm. A NBR 7211: 2009 - Agregados para Concreto – Especificações (ABNT, 2009) determina as zonas granulométricas, indicando os limites correspondentes à menor e à maior dimensão do agregado miúdo, conforme Tabela 4.2 e graúdo Tabela 4.3.

Tabela 4.2. Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo (adaptada da NBR 7211, 2009).

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem em massa retida acumulada			
	Limites inferior		Limites superior	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Nota 1: O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
 Nota2: O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
 Nota3: O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

* O termo (*Slump*) usado neste trabalho, refere-se ao “abatimento do tronco de cone” definido pela NBR NM 67.

Tabela 4.3. Limites da composição granulométrica do agregado graúdo. (Adaptada da NBR 7211, 2009).

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)	Porcentagem em massa retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D ^a				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 - 5
63 mm	-	-	-	-	5 - 30
50 mm	-	-	-	0 - 5	75 - 100
37,5 mm	-	-	-	5 - 30	90 - 100
31,5 mm	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25 mm	-	0 - 5	5 - 25 ^b	87 - 100	-
19 mm	-	2 - 15 ^b	65 ^b - 95	95 - 100	-
12,5 mm	0 - 5	40 ^b - 65 ^b	92 - 100	-	-
9,5 mm	2 - 15 ^b	80 ^b - 100	95 - 100	-	-
6,3 mm	40 ^b - 65 ^b	92 - 100	-	-	-
4,75 mm	80 ^b - 100	95 - 100	-	-	-
2,36 mm	95 - 100	-	-	-	-

^a - Zona Granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensão do agregado graúdo.

^b - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

4.1.5 INFLUÊNCIA DO AGREGADO NA REOLOGIA DO CONCRETO

O concreto deve apresentar características específicas que garantam seu manuseio ainda no estado fresco e a obtenção da resistência desejada após o endurecimento GONÇALVES *et al.* (2007), relatam que propriedades como granulometria, densidade, forma das partículas e textura superficial dos agregados têm forte influência nas propriedades do concreto em seu estado fresco, enquanto a composição mineralógica, dureza, módulo de elasticidade e o grau de alteração dos agregados afetam principalmente as características do concreto em seu estado endurecido.

4.1.6 COMPORTAMENTO DO CONCRETO EM ALTAS TEMPERATURAS

O concreto é reconhecido pela sua boa resistência em temperaturas elevadas em virtude de suas características térmicas, tais como: a incombustibilidade e a baixa condutibilidade térmica (ISAIA., 2011). O concreto leve é considerado um bom isolante térmico (ALI *et al.*, 2018).

As propriedades do concreto quando submetido a altas temperaturas são modificadas, sua resistência à compressão chega a ser reduzida $\pm 25\%$ quando aquecido até 300°C (ISAIA., 2011; UMASABOR; OKOVIDO, 2018). A resistência do concreto em altas temperaturas pode ser definida como a resistência à compressão residual em relação a um tempo específico, estando diretamente relacionada com a escolha do agregado que representa 60-80% do seu volume (ANDERBERG; FORSEN, 1982; YADAV; PATHAK, 2009). A condutividade térmica dos agregados com estrutura cristalina é maior que a dos agregados com uma estrutura amorfa (ALI *et al.*, 2018).

4.1.7 CONCRETO LEVE ESTRUTURAL

O concreto leve não é um material novo, sua existência é registrada desde os primórdios do Império Romano, tanto o Coliseu quanto o Panteão foram parcialmente construídos com materiais que podem ser caracterizados como concreto de agregado leve (agregados de lava triturada, tijolo triturado e pedrapomes) (ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, 2011). Os Estados Unidos utilizaram na Segunda Guerra Mundial mais de 100 navios construídos com concreto leve, com capacidade de 3000 a 140.000 toneladas e seu desempenho foi bem-sucedido, motivando o uso na época do concreto leve estrutural em edifícios e pontes (KRALJ, 2009).

A redução do peso unitário do concreto leve e ainda o fornecimento de resistência adequada, cria um impacto positivo econômico significativo para a indústria da construção. A este respeito o concreto leve oferece uma vantagem considerável em termos de peso unitário em relação ao concreto convencional (ALI *et al.*, 2018).

O concreto com agregado leve (concreto leve estrutural) é considerado um material de construção consagrado em todo mundo com aplicações em várias áreas da construção civil como pontes, plataformas marítimas e edificações pré-moldadas e painéis pré-fabricados (MEHTA, P. K.; MONTEIRO, 2014). Seu uso é motivado

pela redução do peso das peças estruturais, seções estruturais mais esbeltas, que por sua vez resultam em uma diminuição na quantidade de cimento e aço de reforço, economia com a redução de formas e cimbramento, equipamentos de manuseio e transporte menores e mais baratos, necessários para levantar e colocar elementos pré-moldados, aumento no espaço de serviço devido a uma redução no tamanho das colunas, vigas e lajes, tamanho reduzido das sapatas, e bom isolamento térmico e resistência ao fogo (ALI *et al.*, 2018; ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011).

O concreto leve é caracterizado com base em sua densidade aparente e resistência à compressão (ALI *et al.*, 2018). O concreto leve é composto de cimento e agregados leves. Tem uma densidade que varia entre 300 e 2000 kg/m³ comparada com 2200-2600 kg/m³ do concreto convencional. O concreto leve estrutural deve possuir massa específica nos limites apresentados na Tabela 4.4 e resistência à compressão acima de 17,2 MPa (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011). De acordo com a NM 35:1995, os valores mínimos de resistência à compressão do concreto leve em função de sua massa específica deve atender conforme mostra a Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Resistência à compressão e massa específica para concretos leves. (NM 35:1995).

Referência à compressão aos 28 dias (MPa) (Valores mínimos)	Massa específica aparente (Kg/m³) (Valores mínimos)
28	1840
21	1760
17	1680

O concreto leve de baixa resistência (não estrutural) usados em estruturas onde a resistência do concreto não é importante, apresentam densidade aparente na faixa de 800 a 1400 kg/m³, enquanto a resistência à compressão está na faixa de 7 a 18 MPa (ALI *et al.*, 2018). Para Ali *et al.*, (2018) algumas características devem ser consideradas:

- a) Concreto leve termoisolante - é utilizado como material de enchimento ou como revestimento isolante. Sua densidade está na faixa de 300 a 800 kg/m³, enquanto a força compressiva está na faixa de 0,5 a 7 MPa.

- b) Concreto leve de baixa resistência - é usado em estruturas onde a resistência do concreto não é importante; ao mesmo tempo, garante um nível aceitável de conforto térmico. A densidade aparente está na faixa de 800 a 1400 kg/m³, enquanto a resistência à compressão está na faixa de 7 a 18 MPa.
- c) Concreto leve estrutural - é normalmente preparado com agregados sintéticos. A densidade a granel reduzida deve-se à adição de um sistema de vácuo no interior do conglomerado cimentício. A densidade aparente está na faixa de 1400 a 2000 kg/m³, enquanto a resistência à compressão é normalmente superior a 20 MPa.

A propriedade do concreto leve é influenciada pela absorção dos agregados leves e pelo aglomerante. Dependendo do tipo de agregado, traço e dosagem da mistura, concretos produzidos com agregados leves podem atingir resistências moderadas e altas (GOMES *et al.*, 2015). A Tabela 4.5 apresenta as indicações das principais normalizações de referência.

Tabela 4.5. Valores de referência da massa específica dos concretos leves (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011).

Referência	Massa específica aparente (Kg/m ³)
ABNT NBR 8953 (2009)	$\gamma < 2000$
RILEM (1975)	$1120 < \gamma < 1920$
CEB-FIP (1977)	< 2000
NS 3473 E (1998)	$1200 < \gamma < 2200$
ACI 213 (2003)	$1400 < \gamma < 1850$
CEN prEN 206-25 (1999)	$800\gamma < 2000$

4.1.8 DURABILIDADE DO CONCRETO LEVE

Os resultados de diversas pesquisas mostram que o uso de agregados porosos não aumenta a permeabilidade do concreto aos fluidos e, com isso, não contribui para diminuir a resistência do concreto aos agentes agressivos (ROSSIGNOLO, 2009). Nessa mesma linha, diversos estudos realizados com concretos com argila expandida brasileira indicam que o uso desse agregado não necessariamente reduz a durabilidade do concreto (ROSSIGNOLO, 2009).

Para avaliar a durabilidade do concreto, deve-se dar atenção especial a sua estrutura porosa, predeterminada pela sua porosidade, permeabilidade e distribuição do tamanho dos poros, esta característica é muito importante, pois influencia na durabilidade (RAMAMURTHY; KUNHANANDAN NAMBIAR; INDU SIVA RANJANI, 2009), se a porosidade é constituída por poros conectados ou não. Assim, é essencial a distinção entre sistemas fechados ou abertos quando se pretende avaliar a relação entre a porosidade e a permeabilidade (ROSSIGNOLO, 2009).

A absorção de água do concreto leve diminui com redução da densidade, que é atribuída à fase de menor volume da pasta e, portanto, ao menor volume de poro capilar. A absorção de água do concreto leve é influenciada principalmente pela fase da pasta de cimento e nem todos os poros artificiais participam da absorção de água, pois não estão interconectados (RAMAMURTHY; KUNHANANDAN NAMBIAR; INDU SIVA RANJANI, 2009).

Aumentar a resistência do concreto à penetração de íons de cloreto é a principal maneira de aumentar a vida útil das estruturas em ambientes agressivos (MADANDOUST *et al.*, 2011).

4.1.9 AGREGADO LEVE

O agregado leve tem forte influência nos resultados finais do concreto leve, fazendo com que este possa atingir resistências moderadas a altas, dependendo do tipo de agregado, traço e dosagem da mistura (GOMES *et al.*, 2015). O agregado leve pode ser natural ou artificial com alta porosidade (ALI *et al.*, 2018).

O agregado leve usado na produção do concreto leve deve apresentar massa unitária no estado seco e solto ($>880 \text{ Kg/m}^3$) para agregados graúdos (1120 Kg/m^3) para miúdos, são caracterizado por uma microestrutura altamente porosa (Figura 4.1) e uma baixa densidade aparente (ALI *et al.*, 2018; ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011).

Agregados leves podem ser naturais como, por exemplo, a pedra pome ou escórias vulcânicas. Já os agregados leves artificiais são obtidos por processos industriais capazes de criar uma estrutura altamente porosa e celular (ALI *et al.*, 2018). São produzidos por queima em temperaturas ($>950 \text{ }^\circ\text{C}$), incluindo aquecimento, vitrificação e formação de espuma (CHUANG *et al.*, 2018). Os

agregados leves produzidos por queima apresentam forma irregular e boa aderência à pasta de cimento em função da sua rugosidade da superfície. Outra particularidade do agregado leve produzido por queima é a penetração da pasta de cimento nos poros (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011).

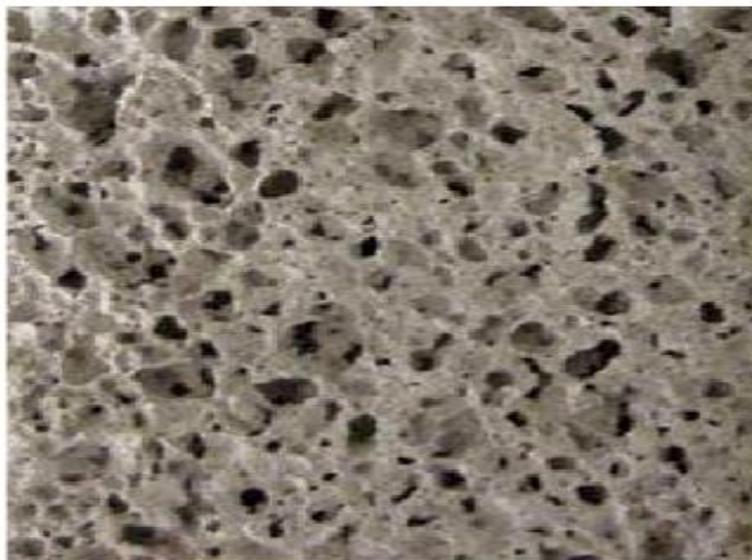


Figura 4.1. Agregado leve celular produzido por queima (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011).

4.1.9.1 Agregados leves produzidos com resíduos

Na literatura, existe vários registros da produção de agregados leves com adição de resíduos como a matéria-prima por exemplo: cinzas volantes e sedimentos de reservatórios (CHUANG *et al.*, 2018), resíduos da incineração de sólidos urbanos (QUINA; BORDADO; QUINTA-FERREIRA, 2014), resíduos de construção (KRALJ, 2009), resíduos de polietileno (ALI *et al.*, 2018).

4.2. ESPUMA VÍTREA

As espumas vítreas são materiais porosos formados por uma fase gasosa (presente no interior dos poros) e uma fase sólida (matriz de vidro) com porosidade geralmente superior a 60% volume (SOUZA *et al.*, 2017). A Figura 4.2 apresenta a representação esquemática do modelo de espuma.

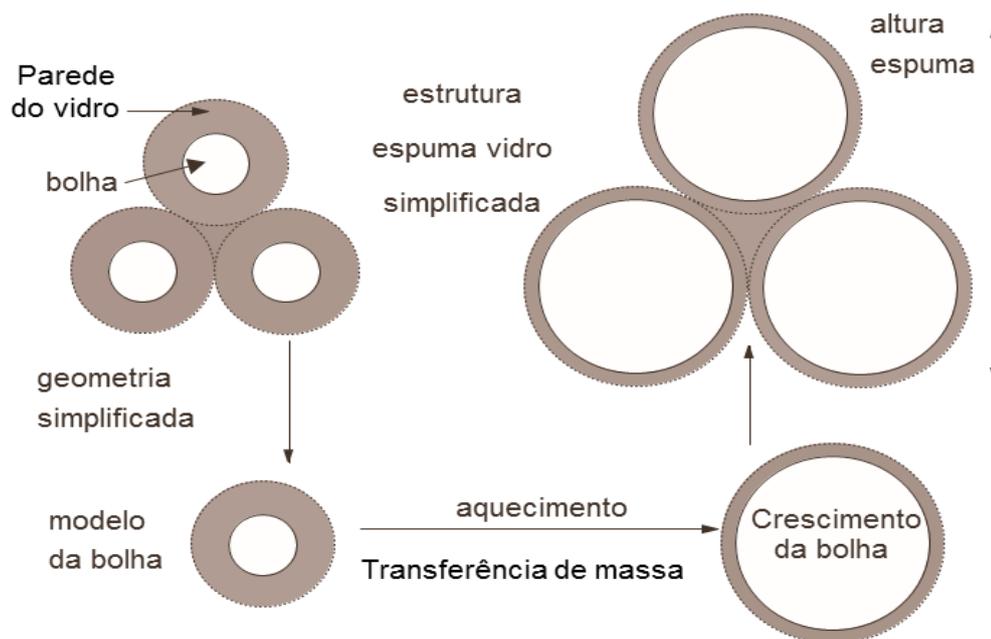


Figura 4.2. Representação esquemática do modelo de espuma (STEINER, 2006).

As características dos poros (tamanho, distribuição e morfologia) determinam propriedades específicas, como baixa densidade, baixa condutividade térmica, alta área superficial, permeabilidade, estabilidade química e térmica (SOUZA *et al.*, 2017). As espumas vítreas têm atraído grande interesse na área da construção civil, devido às suas características, como leveza, rigidez, boa resistência à compressão, quimicamente inertes e não tóxicas. Estes fatores favorecem sua utilização em isolamento térmico, por exemplo (ZHU *et al.*, 2016).

As espumas vítreas podem ser produzidas de acordo com as propriedades requeridas e a possível aplicação, modificando para isso os parâmetros do processo como a técnica de conformação, a quantidade de agente espumante etc. (STUDART *et al.*, 2006).

4.2.1 A SUSTENTABILIDADE DA ESPUMA VÍTREA

A crescente preocupação causada pelo consumo de produtos industrializados e os impactos ambientais associados ao descarte indiscriminado, tornam a reciclagem um aspecto fundamental a ser considerado (DE MORAES *et al.*, 2019). A produção de espuma vítrea tem potencial de absorver grande parte de resíduos de vidro residual e outros tipos de resíduos, que antes seriam descartados no meio ambiente (GONG *et al.*, 2016). Como exemplo: o vidro reciclado pode

substituir até 95% das matérias-primas no processo de produção de espumas vítreas, já que é 100% reciclável, diferente de outros materiais (DE MORAES *et al.*, 2019).

A grande vantagem das espumas vítreas está na possibilidade do aproveitamento de resíduos que podem ser utilizados como matriz ou agente espumante. Uma característica ambiental muito importante da espuma vítrea é sua reciclabilidade (POKORNY, 2011).

A produção de espumas vítreas pode ser uma boa alternativa para reciclar resíduos sólidos e resíduos agroindustriais, porque sua estrutura aceita adição (HAMMEL; IGHODARO; OKOLI, 2014), como exemplo: resíduos sólidos vidro sodocálcico em até 97% (POKORNY; VICENZI; PÉREZ BERGMANN, 2011) e cinza volantes (ZHU *et al.*, 2016).

4.2.2 PRODUÇÃO DAS ESPUMAS VÍTREAS

No processo de fabricação das espumas vítreas, é possível usar vários tipos de resíduos como matéria-prima (HAMMEL; IGHODARO; OKOLI, 2014; ZHANG *et al.*, 2016). Como exemplo, pode-se citar o vidro sodocálcico (SOUZA *et al.*, 2017), cinzas volantes (ZHU *et al.*, 2016) e resíduos agroindustriais, que podem ser utilizados como fonte de SiO₂ ou agente formador de poros. Na literatura, encontram-se resíduos agroindustriais como casca de ostra (TEIXEIRA *et al.*, 2017), folha de bananeira (ARCARO *et al.*, 2016) e erva mate (DA *et al.*, 2018) que já foram incorporados com sucesso em espumas vítreas.

A rota de produção mais utilizada é a sinterização da mistura contendo as matérias-primas com agentes porogênicos (ZHU *et al.*, 2016) em temperaturas baixas (<1000°C) (PETERSEN; KÖNIG; YUE, 2017). Todo material é moído até alcançar granulometria desejada em moinho tipo bola (LOW, 1981). No processo de sinterização o agente espumante se decompõe em CO e CO₂, mais a formação de outros gases é possível (KÖNIG; PETERSEN; YUE, 2014). A emissão do gás dentro da massa de vidro quebra as paredes que separa os poros, fazendo surgindo novos poros entre as partículas em todas as partes do corpo sintetizado, onde as partículas do agente espumante encontram-se enclausurada (FERNANDES; TULYAGANOV; FERREIRA, 2009; ALVES; BERGMANN; BERUTTI, 2013). A temperatura de patamar deve ter um tempo curto para evitar o crescimento e coalescência dos

poros (KÖNIG; PETERSEN; YUE, 2014), assim como resfriamento deve ser mais rápido.

4.2.3 APLICAÇÃO DAS ESPUMAS VÍTREAS

As espumas vítreas são versáteis e podem ser usadas como blocos de construção para isolar telhados, paredes de vedação de interiores, pisos e tetos em altas ou baixas temperaturas, como material agregado leve em concreto (SOUZA *et al.*, 2017). Por outro lado, as aplicações das espumas vítreas são limitadas pela sua temperatura de trabalho, que não pode exceder a sua temperatura de transição vítrea entre 500 e 600 °C (SOUZA *et al.*, 2017). Estas propriedades têm atraído grande interesse do setor da construção (ZHU *et al.*, 2016).

4.2.4 MATÉRIAS-PRIMAS

4.2.4.1 Vidro

O vidro devido sua ampla utilização possui várias aplicações, e combinações única de propriedades importantes: é leve, rígido, resistente à compressão, termicamente isolante, não inflamável, também possui alta estabilidade química (DE MORAES *et al.*, 2019). Através da história, o vidro tem sido associado a várias transformações tecnológicas, sua composição química aceita a incorporação de diferentes tipos de resíduos em sua estrutura, resultando em produto muito heterogêneo (ANDREOLA *et al.*, 2016; BROW; SCHMITT, 2009).

Os resíduos de vidro são depositados em aterro com volume mundial estimado em 200 milhões de toneladas por ano ou reciclados após a coleta (BELIE; SOUTSOS; GRUYAERT, 2018). De acordo com os dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), no Brasil, aproximadamente 260 mil toneladas de vidro são descartadas em aterros todos os anos. O IPEA também estima uma despesa de R\$ 8 bilhões para descartar / enterrar resíduos que geralmente poderiam ser reutilizados (SOUZA *et al.*, 2017).

A produção de novos materiais usando vidro atrai muita atenção, principalmente quando se utiliza vidros reciclados, isso porque não apresentam qualquer redução na qualidade (BELIE; SOUTSOS; GRUYAERT, 2018) e atuam como fluxos (BINHUSSAIN *et al.*, 2014; SCHABBACH *et al.*, 2011). O vidro

sodocálcico pode ser usado como material de fluxo e pode advir de processos de reciclagem (BRAGANÇA; BERGMANN, 2004).

4.2.4.2 Vidro sodocálcico

O vidro sodocálcico é o vidro comercial mais comum e barato, corresponde a 90% de todo o vidro produzido no mundo, usado principalmente em embalagens, como garrafas (AKERMAN, 2013), ou seja, a demanda por esses materiais é extremamente alta (GONÇALVES *et al.*, 2018). Possui composição química (71-74% SiO₂; 12-16% NaO; 5-11% CaO; 1-4% MgO e 1-2% Al₂O₃) (POKORNY; VICENZI; PÉREZ BERGMANN, 2011). Apresenta boa estabilidade química (SOUZA *et al.*, 2017), com temperatura de amolecimento próxima de 800 °C (MORAIS *et al.*, 2012; VIEIRA *et al.*, 2016). Para que seja usado como matéria-prima em espumas vítreas deve apresentar tamanho da partícula de pó (>98,6 µm) (SANTOS, 2009).

4.2.4.3 Cinza da casca de arroz

A casca de arroz (CA) é o resíduo agrícola resultante do beneficiamento do arroz. O arroz é a segunda cultura mais cultivada no mundo e a que gera mais resíduos (NAKHSHINIEV *et al.*, 2014). Sua produção deve chegar em 2020 há 450 mi/t (SOARES *et al.*, 2015). Em média, 20% do arroz é casca (MISTRY, 2016; MORAES *et al.*, 2014). No Brasil a previsão da safra 2017 foi de colher 11,3 milhões de toneladas, o Estado do Rio Grande do Sul representa o maior produtor brasileiro (69,8% do total nacional) (IBGE, 2019).

A CA é geralmente descartada ou queimada nos campos, devido apresentar propriedades intrínsecas como dureza fibrosa e natureza abrasiva, podendo levar até 5 anos para se decompor, quando mantida em terrenos a céu aberto ou utilizada em lavouras como adubo. A casca do arroz emite grandes quantidades de gás metano (CH₄) (LORENZETT; NEUHAUS; SCHWAB, 2012). De acordo com a EMBRAPA (2018), “o metano é um importante gás de efeito estufa e influencia fortemente a fotoquímica da atmosfera”; a queima do metano, o transforma em CO₂ e gera energia. O CO₂ possui um poder de aquecimento global 21 vezes menor do que o metano, resultando em uma redução das emissões de gases efeito estufa (GEE) (SUSTAINABLE CARBON CLIMATE SOLUTIONS, 2009).

A queima da CA a temperaturas entre 400 e 1200 °C produz a cinza de casca de arroz (CCA) (GEETHA; ANANTHIAND; RAMESH, 2016).

A CCA possui característica de um material inerte quimicamente, isso lhe atribui um potencial de ser transformado em um subproduto do arroz e, portanto, muito seguro para uso na reciclagem e reutilização (MORAES *et al.*, 2014). A CCA pode ser usada para produtos à base de sílica (VASSILEV *et al.*, 2013). Como exemplo, a sílica na CCA pode ser usada como SiO₂ para produção de vidros (DELLA *et al.*, 2001; (LEE; OTHMAN; YEOH, 2013). A sílica pode cristalizar nas fases quartzo, cristobalita e tridimita (SHINOHARA; KOHYAMA, 2004).

A CCA é composta de pó de carbono e sílica, uniformemente misturado com uma área superficial muito elevada, alta porosidade, baixo peso e ponto de fusão elevado (BAKAR; YAHYA; GAN, 2016; HWANG; HUYNH, 2015). A CCA tem baixo valor comercial, para aumentar seu valor de mercado ela pode ser queimada e transforma-se em sílica amorfa ou cristalina (ELICHE-QUESADA *et al.*, 2017; FAÉ GOMES *et al.*, 2016; LE; LUDWIG, 2016), é um material leve, volumoso e altamente poroso com densidade aproximada em 1800 kg.m⁻³ e representa aproximadamente (18–20% em peso) (ELICHE-QUESADA *et al.*, 2017).

A composição química CCA depende do processo de combustão. A revisão da literatura apresenta a composição química tendo a sílica como material predominante, contendo entre 60-95% em massa, óxidos alcalinos 2% e carbono entre 5-40% também em massa (FAÉ GOMES *et al.*, 2016; FOLETTTO *et al.*, 2005; JAMES; SUBBA RAO, 1986; TCHAKOUTÉ *et al.*, 2016). A Tabela 4.6 apresenta a composição química da cinza da casca de arroz em massa determinados por fluorescência de raios-x encontradas por Faé Gomes *et al.*, (2016); Huang *et al.*, (2017); Nascimento *et al.*, (2015).

O carbono existente na CCA é estimado como o percentual de perda ao fogo (GEETHA; ANANTHIAND; RAMESH, 2016). O controle da temperatura durante a queima da casca de arroz é muito importante, devido a temperatura ter forte influência na produção de carbono. Quando a cinza é produzida em temperaturas mais baixas existe maior formação de carbono (GONÇALVES; BERGMANN, 2007). Para retirada do carbono contido na CCA é necessário submeter a CCA a uma nova queima em uma temperatura entre 500-900 °C, desta forma é possível remover o

carbono não queimado, ocasionando a cristalização da sílica amorfa em cristobalita, quartzo e tridimita (GEETHA; ANANTHIAND; RAMESH, 2016).

Quanto menor a quantidade de carbono mais clara é a cinza, variando desde uma cor branca para preta (LEE; OTHMAN; YEOH, 2013).

Tabela 4.6. Composições química da cinza da casca de arroz em massa publica em trabalhos.

Óxidos	Autores		
	Nascimento <i>et al.</i> , (2015)	Faé Gomes <i>et al.</i> , (2016)	Huang <i>et al.</i> , (2017)
SiO ₂	86,37	86,00	91,56
Al ₂ O ₃	0,86	5,12	0,19
Fe ₂ O ₃	1,16	1,12	0,17
CaO	0,63	1,26	1,07
MgO	0,68	0,48	0,65
K ₂ O	3,09	1,82	3,76
P ₂ O ₅	4,79	0,48	-

A CCA apresenta cerca de 0,3% de materiais voláteis, valor comparável à faixa de 0,37 a 1,47%. O Cl, Br e SO₃ são voláteis normalmente encontrados na CCA, quanto maior a quantidade de carbono residual e de mais materiais voláteis, maior a perda de massa durante a queima. (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2001).

4.2.4.4 Agente espumante

O carbonato de cálcio (CaCO₃) tem bastante eficiência como agente porogênico (KÖNIG; PETERSEN; YUE, 2015; PETERSEN; KÖNIG; YUE, 2017). Como matéria-prima industrial, sua composição química varia, podendo conter outros carbonatos e óxidos, como por exemplo, CaCO₃ 98%, MgCO₃ 1%, Al₂O₃ 0,1% e Fe₂O₃ <0,1 (VETTA, 2017).

A decomposição CaCO₃ ocorre 800-850 °C, (LI *et al.*, 2017) De acordo com (BERNARDO; SCARINCI; HREGLICH, 2005), a temperatura ótima de decomposição deve começar em 700-725 °C. Se decomposição do CaCO₃ ocorrer em uma temperatura acima do ponto de amolecimento do vidro, gera uma baixa viscosidade essencial para a formação de espuma (BERNARDO; ALBERTINI, 2006).

A granulometria do agente espumante tem influência no tamanho dos poros e nas características do produto. Mear *et al.* (2006) sugerem que a granulometria ideal deva estar entre 105 μm e 155 μm .

Espuma vítreas com adição 3, 5 e 7% em massa de CaCO_3 foram produzidas por (BERNARDO; ALBERTINI, 2006). Da mesma forma, em seu trabalho (KÖNIG; PETERSEN; YUE, 2014) adicionaram entre 1-7% em massa de CaCO_3 ; os autores relatam que percentuais de 10% em massa de CaCO_3 interrompe o processo de formação de espuma quase que completo. Em seu trabalho König; Petersen; Yue (2014) verificaram não parecer haver qualquer tendência que indique uma concentração ideal de CaCO_3 .

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 5.1 apresenta o fluxograma da metodologia adotada neste trabalho para a obtenção de espumas vítreas a partir da reciclagem de vidro sodocálcico e cinzas de casca de arroz e sua avaliação na substituição de agregados em concretos.

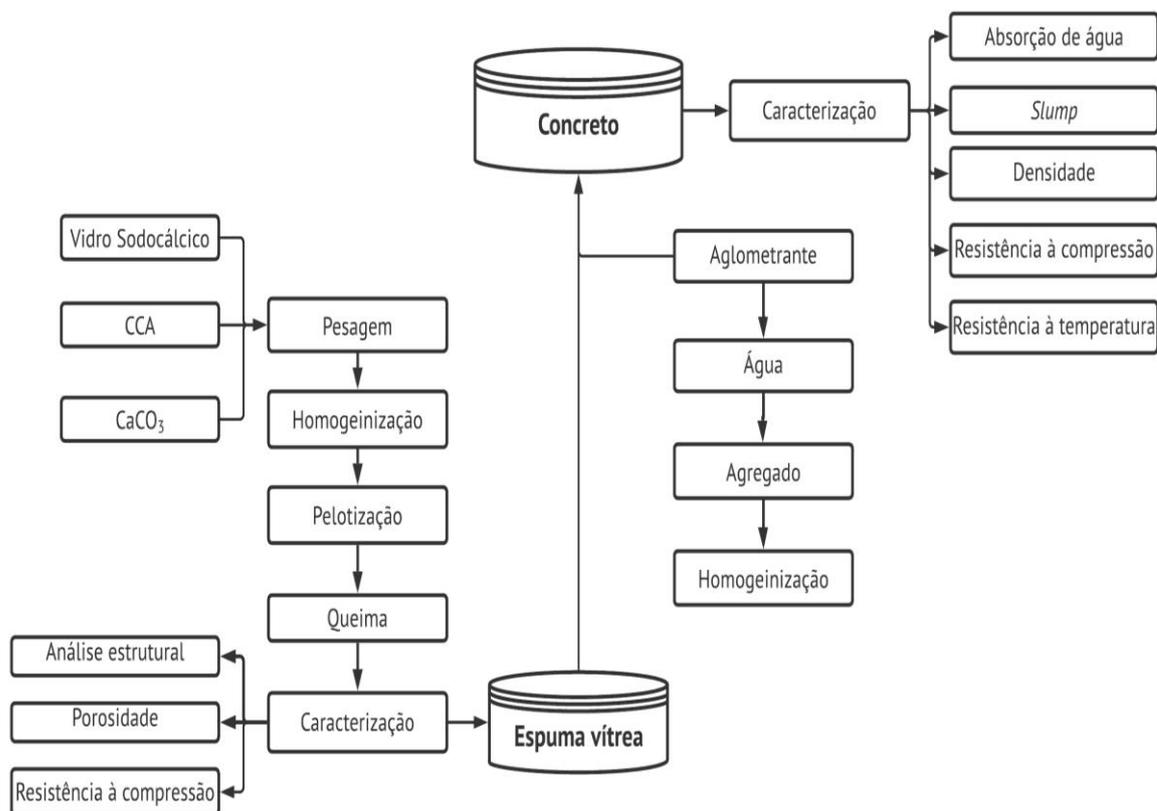


Figura 5.1. Fluxograma da metodologia adotada para obtenção e caracterização do concreto produzido com adição de espuma vítreas produzida com vidro sodocálcico, cinza da casca de arroz e carbonato de cálcio.

5.1 MATERIAIS

As matérias-primas utilizadas nesta investigação foram caracterizadas no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) na cidade de Porto Alegre/RS, quanto à composição química por fluorescência de raios-X (Shimadzu XRF 1800), distribuição granulométrica (CILAS 1180), análise termodiferencial (ATG TGA-50, Shimadzu) e (ATD, SDT Q600, TA Instruments), a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min em atmosfera de ar sintético.

5.1.1 VIDRO SODOCÁLCICO

O vidro utilizado no estudo, resultou da coleta de embalagens (garrafas) de vidro transparente. O vidro foi lavado e seco ao ar, e depois as garrafas foram então trituradas manualmente até obtenção de partículas menores do que 10 mm. Após, foi moída a seco em moinho de bolas com corpos moedores de aço (36,5; 30,2; 25,4; 19,1; 15,9 mm) até o tamanho de partícula passante nas peneiras de malha 150 ABNT (106 μm), sem controle de tempo de moagem. Parte deste procedimento foi o mesmo utilizado por (POKORNY; VICENZI; BERGMANN, 2008). A Figura 5.2 e a Tabela 5.1 apresentam o resultado da distribuição granulométrica a laser do vidro sodocálcico passante na peneira 150 ABNT (106 μm).

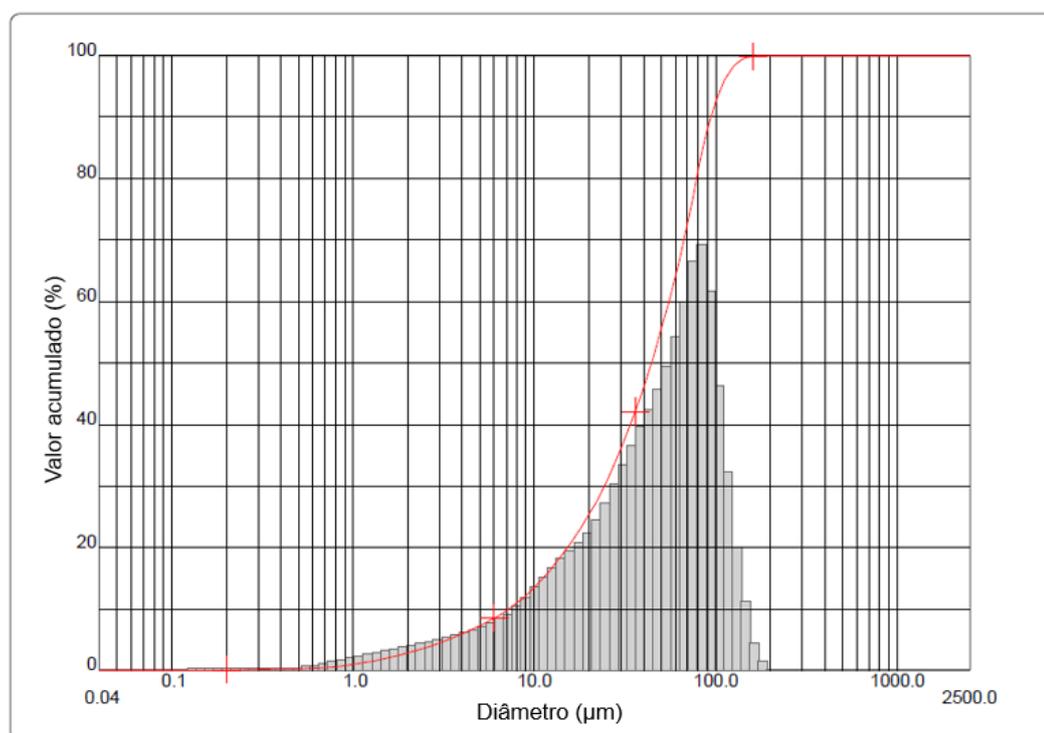


Figura 5.2. Análise granulométrica do vidro sodocálcico utilizado neste trabalho.

Tabela 5.1. Distribuição granulométrica do vidro sodocálcico.

Matéria-prima	D ₁₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₉₀ (μm)	D médio (μm)
Vidro sodocálcico	7,21	44,12	94,00	48,33

A composição química do vidro usado neste estudo é típica de vidros sodocálcico, usado para fabricação de garrafas (Tabela 5.2) (SOUZA *et al.*, 2017). Sua composição é basicamente: SiO₂ (72,26 %), CaO (12,01%) e Na₂O (12,61%)

Tabela 5.2. Composição química do vidro sodocálcico (em óxidos).

Óxido	Massa (%)
SiO ₂	72,26
CaO	12,01
Na ₂ O	12,61
Al ₂ O ₃	1,48
K ₂ O	0,87
Fe ₂ O ₃	0,77
P ₂ O ₅	0,36

A análise termogravimétrica (ATG) e termodiferencial (ATD) do vidro sodocálcico (Figura 5.3) mostra que o vidro sodocálcico não teve perda de massa significativa com aumento da temperatura. Isso é um comportamento esperado pelo seu processo de fabricação a elevadas temperaturas e estabilidade térmica. Acima de 700°C pode haver a formação de silicato de sódio e cálcio, verificado pela banda endotérmica. Nesta temperatura, o vidro encontra-se amolecido, seus átomos têm mobilidade suficiente para se difundirem em direção a qualquer gradiente de concentração de vazios.

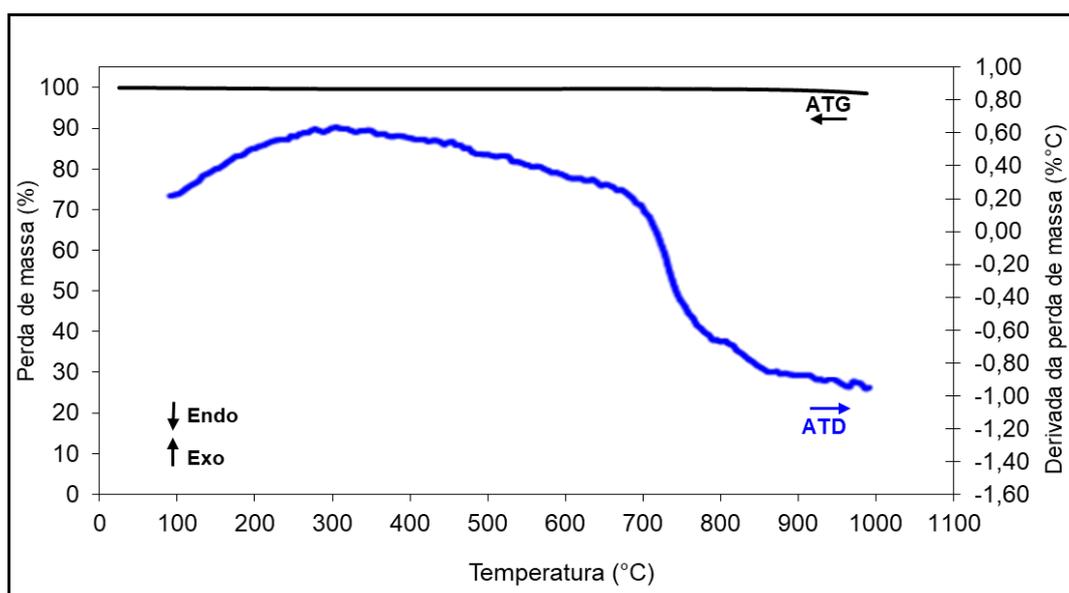


Figura 5.3. Análise termogravimétrica e térmica diferencial do vidro sodocálcico utilizado neste trabalho.

5.1.2 CINZA DA CASCA DE ARROZ

A cinza da casca de arroz utilizada neste estudo foi coletada em uma indústria cerâmica que produz telha na cidade de Paraíso do Tocantins/TO. A cinza foi originada após a queima de casca de arroz em forno industrial (Figura 5.4(a)), ficando depositada ao tempo no pátio da empresa (Figura 5.4(b)). Para realizar os ensaios neste estudo, a CCA coletada foi acondicionada em quatro sacos de 50 Kg cada (Figura 5.4(c)). A CCA não teve nem um tipo de controle das condições de queima e não sofreu nem um tipo de beneficiamento.

Em laboratório, o material foi moído, peneirado e classificada de acordo a granulometria pré-fixada através da peneira 150 ABNT (106 μm), o material passante na peneira foi utilizado para produção de todas amostras de espuma vítrea usadas neste trabalho. Observando a Figura 5.4 (a, b e c), verifica-se que a CCA apresenta cor escura.

A Figura 5.5 e a Tabela 5.3 apresentam o resultado da distribuição granulométrica a laser da CCA passante na peneira 150 ABNT (106 μm). Pode-se verificar que a CCA apresentou diâmetro médio de partícula de 60,63 μm .

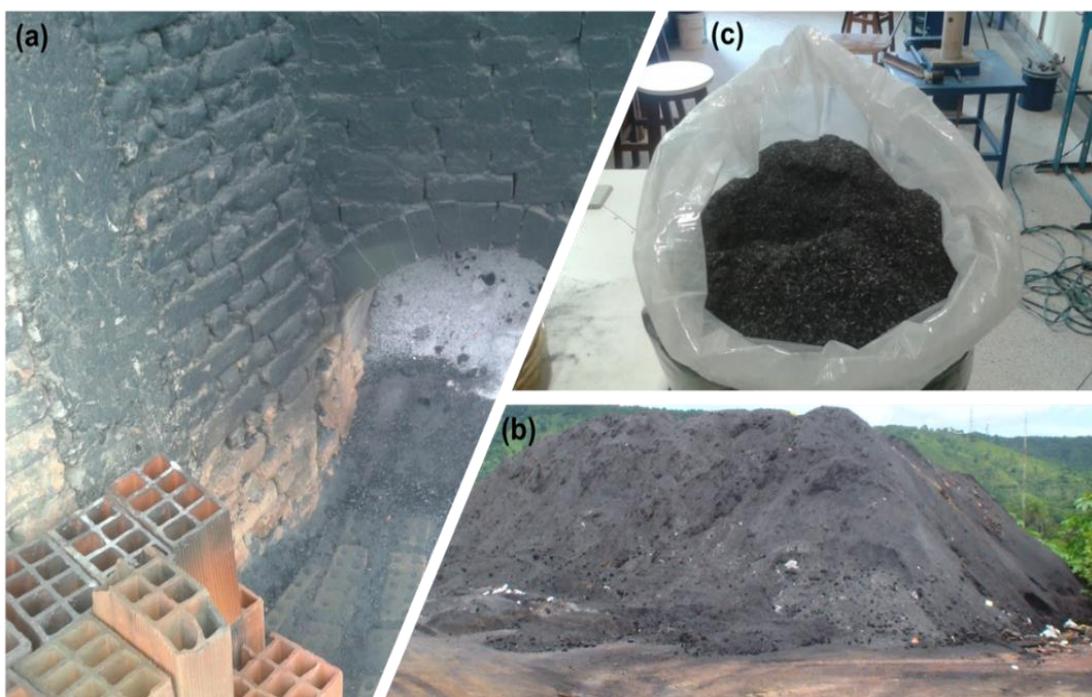


Figura 5.4. (a) – Forno industrial, (b) CCA depositada ao tempo, (c) amostra utilizada.

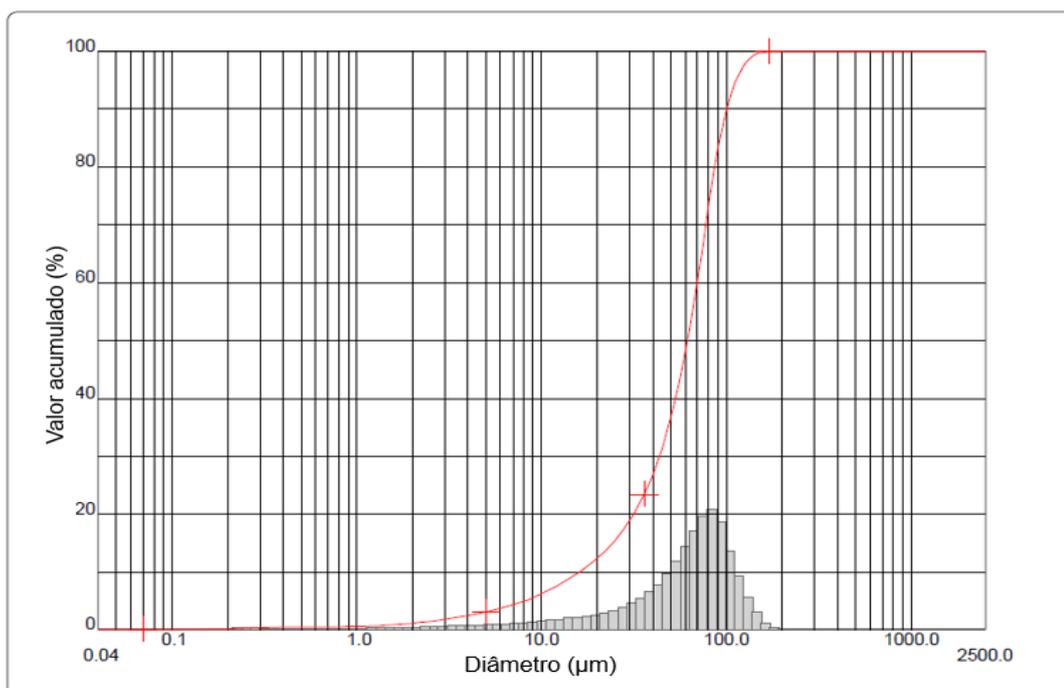


Figura 5.5. Análise granulométrica da CCA empregada para a produção das espumas vítreas.

Tabela 5.3. Distribuição granulométrica da CCA empregada para a produção das espumas vítreas.

Matéria-prima	D ₁₀ (µm)	D ₅₀ (µm)	D ₉₀ (µm)	D _{médio} (µm)
CCA	16,00	61,50	100,39	60,63

A composição química da CCA (Tabela 5.4) mostra a presença predominante de SiO₂, típica da CCA (BLISSETT *et al.*, 2017).

Tabela 5.4. Composição química da CCA empregada para a produção de espumas.

Óxido	Massa (%)
SiO ₂	89,43
CaO	2,67
Na ₂ O	1,60
Al ₂ O ₃	0,99
K ₂ O	3,67
Fe ₂ O ₃	0,65
P ₂ O ₅	0,99

O resultado das análises termogravimétricas (ATG) e termodiferencial (ATD) da CCA (Figura 5.6) mostra que a CCA possui um evento endotérmico por volta de 100 °C, associado a uma perda em massa de 1% correspondente à presença de umidade residual na amostra. Um evento exotérmico é observado em torno de 450 °C, associado a uma perda em massa de 2% que pode estar relacionado a liberação de substâncias voláteis presentes. De acordo com Della *et al.*, (2006); Umamaheswaran; Batra (2008), uma dessas substâncias voláteis pode ser o óxido de fósforo, que está presente na cinza de acordo com a análise química. Posteriormente, outros 2 eventos exotérmicos são observados, próximos a 800 e 900°C respectivamente. Nesta mesma região é observada uma perda em massa de aproximadamente 4%. Esta perda em massa é associada à decomposição do carbono residual presente na cinza em CO₂.

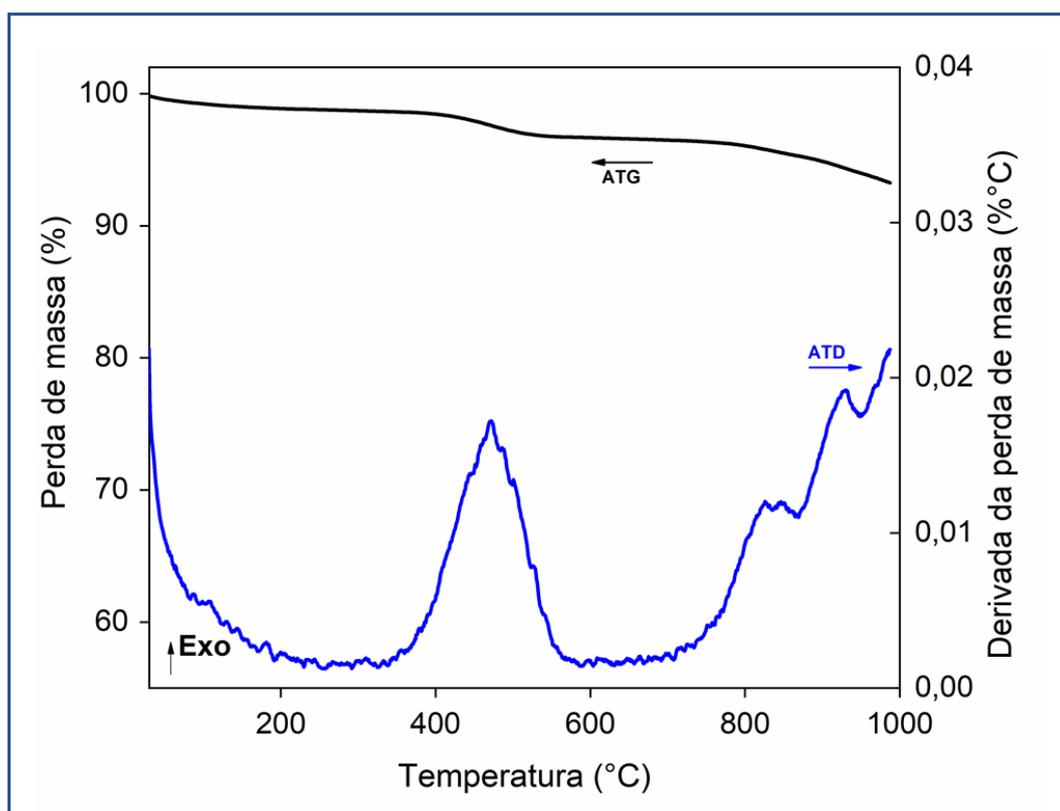


Figura 5.6. Análise térmica diferencial da CCA empregada na formulação das espumas vítreas.

5.1.3 AGENTE ESPUMANTE

Para produção da espuma vítrea neste estudo foi utilizado na formulação como agente espumante o carbonato de cálcio (CaCO₃) sintético com grau P.A do

fabricante DINÂMICA. Levou-se em consideração para uso deste espumante sua eficiência na produção de espumas vítreas (KÖNIG; PETERSEN; YUE, 2015; PETERSEN; KÖNIG; YUE, 2017) e por ser viável economicamente (BERNARDO *et al.*, 2007; SOUZA *et al.*, 2017).

A Figura 5.7 e Tabela 5.5 apresentam o resultado da distribuição granulométrica da CaCO_3 utilizado, obtido por difração a laser. Pode-se verificar que CaCO_3 apresentou diâmetro médio de partícula 2,74 μm . O tamanho da partícula do agente espumante tem influência no tamanho dos poros e nas características do produto final (KÖNIG; PETERSEN; YUE, 2014; SOUZA *et al.*, 2017).

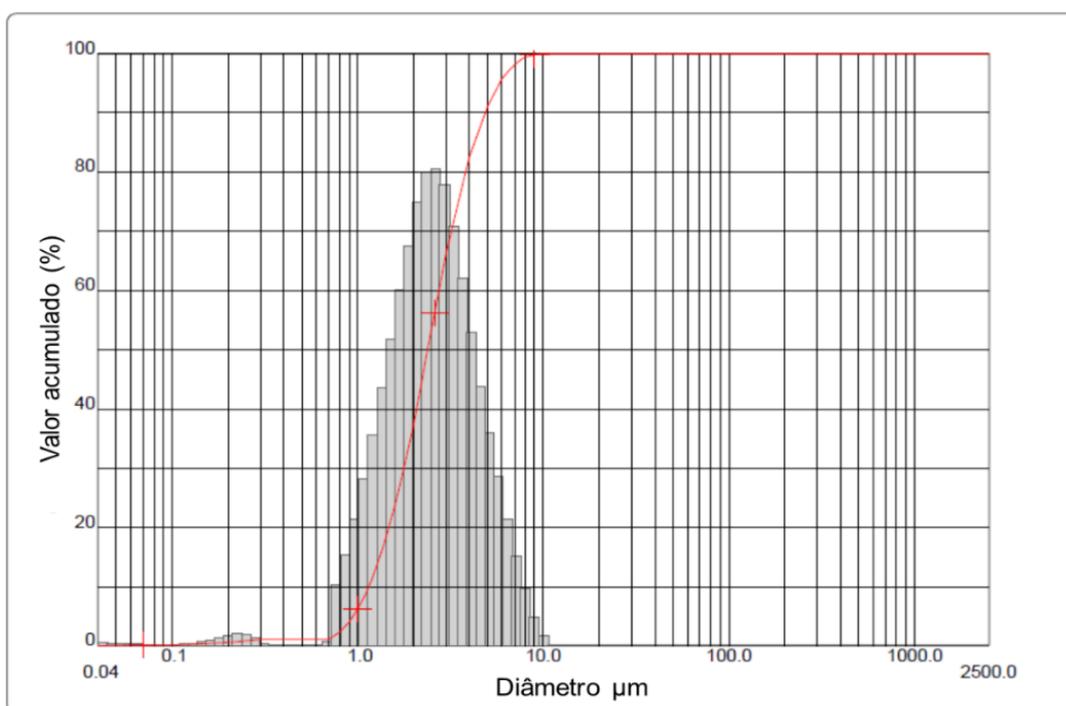


Figura 5.7. Análise granulométrica por difração a laser do CaCO_3 utilizado neste trabalho.

Tabela 5.5. Distribuição granulométrica CaCO_3 utilizado neste trabalho.

Matéria-prima	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)	$D_{\text{médio}}$ (μm)
CaCO_3	1,15	2,39	4,86	2,74

A composição química do CaCO_3 (Tabela 5.6) mostra a presença predominante do CaO (97,77%).

Tabela 5.6. Composição química do CaCO₃ utilizado neste trabalho.

Óxido	Massa (%)
SiO ₂	0,40
CaO	97,77
Na ₂ O	-
Al ₂ O ₃	0,06
K ₂ O	-
Fe ₂ O ₃	0,14
P ₂ O ₅	1,09

As análises termogravimétricas (ATG) e termodiferencial (ATD) do CaCO₃ (Figura 5.8) mostram o comportamento térmico do CaCO₃. É possível observar que o CaCO₃ possui um evento exotérmico próximo à temperatura de 700 °C associado à uma perda em massa de ~ 40%. Este valor está próximo ao valor teórico esperado de 44% em peso para o CaCO₃ devido à liberação de CO₂.

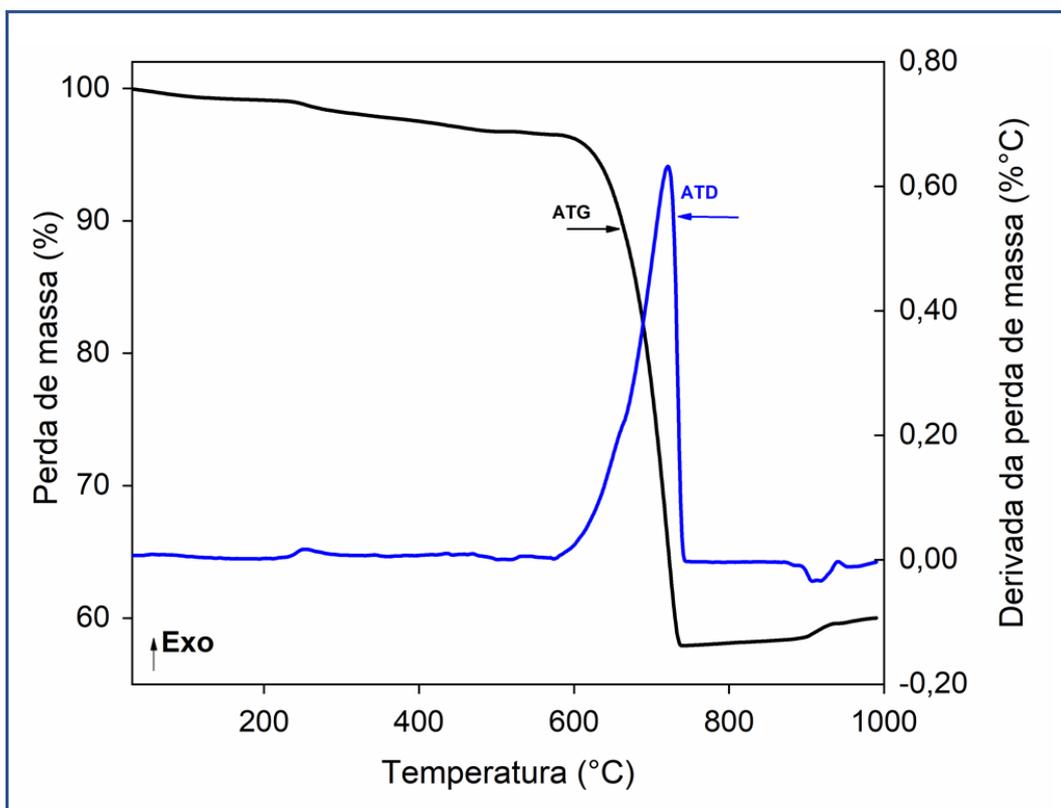


Figura 5.8. Análise térmica diferencial do CaCO₃ utilizado neste trabalho.

5.1.4 CIMENTO

Para a obtenção do concreto, o aglomerante utilizado foi o cimento Portland CPlI F-32 do Tipo II (todas as obras) da marca Tocantins produzido pela Votorantim Cimentos. Este aglomerante não contém adições quimicamente ativas, encontra-se em conformidade com os requisitos da especificação mencionada na norma ASTM C150 (ASTM C150, 2012).

5.1.5 AGREGADOS

Os agregados miúdos e graúdos utilizados neste trabalho são naturais retirados do Rio Tocantins próximo à cidade de Palmas/TO. Os agregados graúdos e miúdos foram inicialmente homogeneizados e quarteados antes de serem classificados por peneiramento a seco, utilizando-se o equipamento Produstest®. Adotou-se os procedimentos estabelecidos pela norma técnica NBR NM 248 (ABNT, 2003). A parcela referente aos agregados (secos) nas dosagens foi inserida em massa.

5.1.5.1 Agregado miúdo

Como agregado miúdo foi utilizado uma areia grossa (Figura 5.9), predominante na região e muito utilizada para produção de concretos. A classificação foi realizada de acordo com a ABNT NBR 9935, que define agregado miúdo como o material que passa na peneira de malha de 4,75 mm. A caracterização granulométrica foi realizada com base na NBR 2011:2009 (Tabela 5.7).



Figura 5.9. Agregado miúdo utilizado para a fabricação do concreto.

Tabela 5.7. Caracterização do agregado miúdo utilizado na fabricação do concreto (NBR 7211/2009).

Peneira Abertura (mm)	Retida Acumulada (%)
6,3	0
4,8	0
2,4	5
1,2	30
0,6	66
0,3	80
0,15	90
<0,15	100
Dimensão máxima (mm)	4,8
Módulo de finura	2,94
Graduação (zona)	3 (média)
Massa esp. aparente (g/cm ³)	2,65

Determinação da absorção d'água. Os ensaios para determinação da absorção d'água dos agregados miúdos foram realizados de acordo os procedimentos estabelecidos pela norma técnica NBR NM 30: (ABNT, 2001) - Agregado Miúdo – Determinação da Absorção de Água, que estabelecem que após secagem em estufa (105 ± 5)°C até a constância de massa, o material deve ser submergido em água durante 24 horas. Por fim, deve-se realizar a secagem superficial do material por meio de revolvimento da amostra e sua colocação em um molde, aplicando 25 golpes com a haste de compactação. A retirada da amostra do molde deve ser repetida até que o cone de agregado desmorone e não conserve a forma do molde, atingindo a condição de saturada superfície seca. A absorção d'água é calculada pela Equação 5.1:

$$A = \left(\frac{m_s - m}{m} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação (5.1)}$$

na qual, A é a absorção de água, em porcentagem; m_s é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca; e m é a massa da amostra seca em estufa.

5.1.5.2 Agregado graúdo

Como agregado graúdo foi utilizado seixo rolado (Figura 5.10) predominante na região e muito utilizado para produção de concretos. Classificado conforme orientações da ABNT NBR 9935 (Tabela 5.8), que define material graúdo, como aquele, cujos grão passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira de malha de 4,75 mm. Como existia partículas em dimensões além da faixa granulométrica desejadas para o agregado graúdo, realizou-se primeiramente o peneiramento manual, excluindo-se partículas de dimensões inferiores a 4,75 mm e superiores a 19 mm, separando-se aproximadamente a faixa correspondente a seixo 0 e 1. O agregado natural foi selecionado de formar apresentar similaridade com tamanho de partícula das espumas vítreas (4,8, 6,3 e 12,5 mm); tamanhos diferentes foram descartados.



Figura 5.10. Agregado graúdo utilizado na fabricação do concreto.

Tabela 5.8. Caracterização do agregado graúdo (NBR 7211/2009).

Peneira Abertura (mm)	Retida Acumulada (%)
19,0	-
12,5	73,2
9,5	96,0
6,3	99,4
4,75	99,9
Fundo	100,0
Dimensão máxima (mm)	12,5
Módulo de finura	6,79
Graduação (zona)	Fora dos limites da NBR 7211/2009
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,85

Determinação da absorção d'água. Os ensaios para determinação da absorção d'água dos agregados graúdo foram realizados de acordo os procedimentos estabelecidos pela norma técnica NBR NM 53: (ABNT, 2009) - Agregado Graúdo – Determinação de Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção de Água, que estabelecem após secagem em estufa (105 ± 5)°C até a constância de massa, o material deve ser submergido em água durante 24 horas. Por fim, deve-se realizar a secagem superficial do material, envolvendo-o em um pano absorvente até o estado em que toda água superficial seja removida, denominado de condição de saturada superfície seca. A absorção d'água é calculada pela Equação 5.1.

5.1.6. ÁGUA DE AMASSAMENTO

A água utilizada para a mistura do concreto foi proveniente da rede de distribuição da cidade de Palmas/TO, fornecida pela empresa de saneamento da região.

5.2 FABRICAÇÃO DAS ESPUMAS VÍTREAS PARA USO EM CONCRETO COMO AGREGADO LEVE

5.2.1 PESAGEM E HOMOGENEIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

As matérias-primas foram devidamente separadas e pesadas em balança analítica. A homogeneização foi realizada manualmente durante dois minutos em um almofariz de porcelana para cada formulação. A seguir, foram umidificadas com adição de água (5%), e adição de PVA (solução contendo 5% de matéria ativa) (Álcool polivinílico P.S, Dinâmica Brasil).

5.2.2 PELOTIZAÇÃO E SECAGEM DAS AMOSTRAS

A pelotização mecânica aglomera as partículas em formatos esféricos, tendo sido iniciada logo após o processo de pesagem e homogeneização, o que promoveu uma boa aglutinação das matérias-primas e formação das esferas passantes em peneiras com as seguintes aberturas: 4,8, 6,3 e 12,5 mm. O tempo de pelotização foi

de ± 3 minutos para cada formulação. A Figura 5.11 mostra o equipamento utilizado para pelotizar as matérias-primas.



Figura 5.11. Equipamento usado para pelotizar as matérias-primas.

5.3 OBTENÇÃO DAS ESPUMAS VÍTREAS

5.3.1 DEFINIÇÃO DA FORMULAÇÃO DAS AMOSTRAS EM PRÉ-TESTES

Para determinação da formulação ideal, foi executado um pré-teste com as formulações (Tabela 5.9). As amostras foram formuladas com adição de vidro sodocálcico, CCA e CaCO_3 . A adição de CaCO_3 foi investigada, porque sua concentração e tamanho de partícula influenciam na formação do poro e da aplicação da espuma vítrea (BERNARDO; ALBERTINI, 2006; SOUZA *et al.*, 2017). A investigação do CaCO_3 foi motivada porque não existe uma concentração ideal na literatura para produção de espumas vítreas (FERNANDES; TULYAGANOV; FERREIRA, 2009).

Tabela 5.9. Formulações das espumas vítreas investigadas em pré-teste (% em massa).

NOMENCLATURA	Matérias-primas (% em peso)		
	Vidro	CCA	CaCO ₃
P1	96	0	4
P2	94	0	6
P3	93	0	7
P4	90	0	10
P5	84	12	4
P6	82	12	6
P7	81	12	7
P8	78	12	10
P9	80	16	4
P10	78	16	6
P11	77	16	7
P12	74	16	10
P13	74	22	4
P14	72	22	6
P15	71	22	7
P16	68	22	10
P17	66	30	4
P18	64	30	6
P19	63	30	7
P20	60	30	10

5.3.2 QUEIMA DAS ESPUMAS

Antes de iniciar o processo de queima, as esferas foram secas ao ambiente por 30 minutos e, logo após, foram queimadas em forno mufla (EDG 1800) à temperatura (850°C) (CHUANG *et al.*, 2018) com ciclo de queima de 100 °C/h e patamar de trinta minutos (DE MORAES *et al.*, 2019; KÖNIG; PETERSEN; YUE, 2014). Ao final, foram resfriadas inercialmente durante 60 min e caracterizadas pelo tamanho das esferas (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm) (ABNT, 2009).

A Figura 5.12 ilustra (a) mufla utilizada para queima das espumas vítreas e (b) aspecto físico das espumas obtidas neste trabalho.

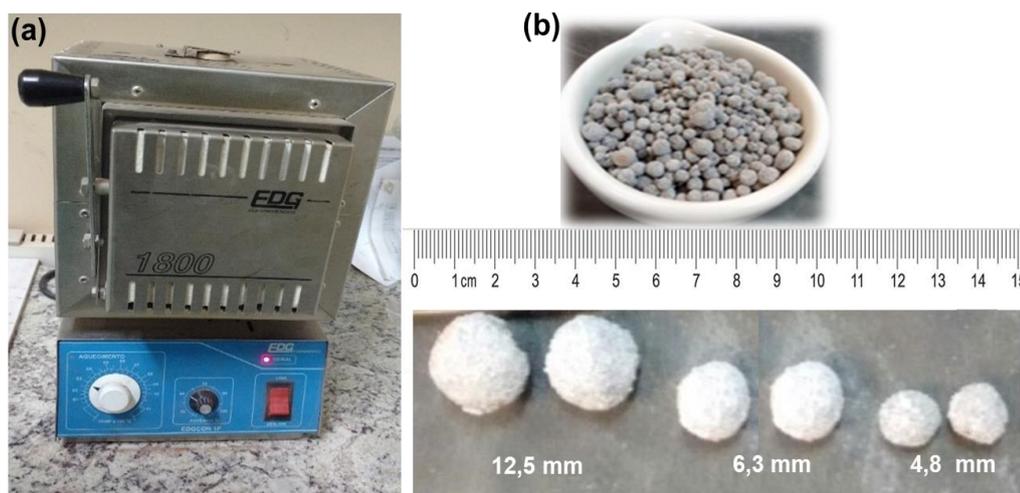


Figura 5.12. (a) Mufla utilizada neste trabalho Marca-EDG 1800, (b) aspecto físico das espumas.

5.4 CARACTERIZAÇÃO DAS ESPUMAS VÍTREAS

Além da expansão volumétrica, cuja metodologia foi informada anteriormente, as esferas vítreas obtidas foram caracterizadas para a utilização em concreto como agregado de acordo com as metodologias descritas a seguir.

5.4.1 EXPANSÃO VOLUMÉTRICA

Para calcular a expansão volumétrica das amostra ensaiadas no pré-teste, adotou-se o método utilizado por Pokorny (2011) em seu trabalho, onde foi inicialmente feita a medição do comprimento, largura e espessura do corpo cerâmico na condição de verde, após conformação e secagem (ao ar livre), obtendo-se assim, seu volume antes da queima (V_i). O volume após a queima foi determinado pela inserção da amostra dentro de uma proveta, no interior do volume pré-calculado com areia grossa com granulometria maior que 180 μ m. O ensaio foi repetido três vezes para cada espuma vítrea produzida. O acréscimo em altura, devido ao deslocamento da areia, forneceu dados para o cálculo do volume após queima da espuma vítrea (V_f). A expansão volumétrica foi calculada, utilizando a Equação 5.2.

$$\text{Expansão (\%)} = \left(\frac{V_f - V_i}{V_i} \right) \times 100$$

Equação (5.2)

onde V_i é o volume após a conformação e secagem (g/cm^3) e V_f é o volume após a queima (g/cm^3).

Com valor determinado do volume pelo deslocamento de massa dentro da proveta e da massa através da pesagem do corpo cerâmico após a queima, pôde-se calcular a densidade expressa pela Equação 5.3.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Equação (5.3)}$$

onde, m é a massa (g) e V é o volume (cm^3) da espuma vítrea.

Os resultados da expansão volumétrica das amostras de espuma vítrea ensaiadas no pré-teste em função da adição de CaCO_3 e de CCA e da temperatura de queima são apresentados na Figura 5.14: (a): 4%, (b) 6%, (c) 7% e (d) 10%. Adição de CCA (12%, 16%, 22% e 30%), e da temperatura de queima (800°C , 850°C , 900°C , 950°C e 1000°C).

5.4.2 ACOMPANHAMENTO DO AQUECIMENTO DAS MISTURAS

Para avaliar o processo e comportamento do aquecimento das amostras formuladas com vidro sodocálcico, cinza da casca de arroz e carbonato de cálcio em durante a produção da espuma vítrea, uma amostra foi ensaiada com a formulação em massa de 78% de vidro sodocálcico, 16% de CCA e 6% de CaCO_3 , queimada na temperatura de 950°C ; esta formulação foi escolhido porque apresentou maior expansão volumétrica nos pré-testes realizados.

O monitoramento da expansão volumétrica da amostra foi realizado por filmagem com uma câmera portátil "SAMSUG FULL HD 2.7", que gravou em cartão de memória e projetava a imagem em tempo real em uma televisão de 55". O procedimento adotado possibilitou acompanhar a expansão volumétrica da amostra e a influência de cada temperatura no processo de expansão da espuma vítrea. Para realizar a filmagem, uma mufla foi adaptada. A porta da mufla foi substituída por um painel em concreto refratário com dimensão $150 \times 200 \text{ mm}^2$ que vedou a entrada da mufla, e nele foi colocada uma abertura de $100 \times 120 \text{ mm}^2$, onde foi instalado um vidro temoressistente (1100°C) para viabilizar a filmagem. O processo de filmagem é apresentado na Figura 6.2.

5.4.3 POROSIDADE

A porosidade (ϵ) das espumas vítreas foi obtida a partir da relação entre sua densidade aparente (ρ_a) e da densidade teórica (ρ_t) dos pós de acordo, com a Equação 5.4.

$$\epsilon (\%) = \left[1 - \frac{\rho_a}{\rho_t} \right] \quad \text{Equação 5.4}$$

A densidade aparente foi determinada pela massa e a dimensão geométrica das amostras.

5.4.4 MORFOLOGIA E TAMANHO DOS POROS

A morfologia dos poros pode ser visualizada a partir de imagens da secção transversal cortada das espumas vítreas após queima por meio de um microscópio óptico (Olympus, 3Z61).

O tamanho médio de poros para as espumas vítreas foi determinado por quantificações correspondentes às faixas de diâmetro de poros especificadas. O ensaio foi baseado no método do intercepto linear onde a relação entre o comprimento médio (t) e o diâmetro médio do poro (D) é dado pela Equação 5.5, capaz de obter a medição de uma estrutura 3D (poro) por uma imagem 2D (ASTM e 112-13, 2013).

$$D = 1.623t \quad \text{Equação 5.5}$$

Neste caso, cinco imagens das superfícies de fratura de cada espuma obtida foram utilizadas, e pelo menos 50 medidas de cada imagem foram feitas com auxílio do *software* ImageJ®.

5.4.5 GRANULOMETRIA

As espumas vítreas produzidas foram classificadas de acordo com sua granulometria em peneiras com malha de abertura 25 mm passante e de 4,75 mm retido, a fim de se obterem os agregados graúdos (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm), de acordo com a especificação da NBR 7211:2009.

5.4.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência mecânica à compressão das espumas vítreas da faixa granulométrica retida na peneira com abertura de 12,5 mm foi obtida usando uma máquina de teste universal (EMIC, modelo DL 2000; cruzeta de 10 mm/min velocidade), de acordo com ASTM C133–97R15, 2015 *standard*. Foram utilizadas amostras (5 de cada) com essa granulometria para atender exigência dessa norma. Placas de EVA (etileno-acetato de vinila) de 2 mm de espessura foram colocadas na interface entre as faces da amostra e a carga da célula, a fim de garantir a transferência de carga homogênea e compensar eventuais irregularidades da superfície.

5.5 OBTENÇÃO DO CONCRETO COM ESPUMA VÍTREA

5.5.1 FORMULAÇÃO

O concreto com adição de espuma vítrea estudado foi projetado para apresentar uma densidade aparente na faixa de 1400 a 2000 kg/m³ com resistência à compressão (>20 MPa) aos 28 dias. A dosagem de referência foi alterada para se ajustar aos diferentes materiais deste estudo.

Para alcançar os resultados propostos neste trabalho, foram formuladas um total de 388 amostras, submetidas ao ensaio de: consistência (*Slump* - 36 amostras), influência da temperatura na resistência à compressão (64 amostras); capilaridade (108 amostras), resistência à compressão após o processo de hidratação/cura (3,7, 28, 56 e 90 dias – 144 amostras); e densidade (aos 28 dias – 36 amostras). As composições receberam adição de espuma vítrea (10, 20 e 30%) em substituição ao agregado natural graúdo.

Para comparar os resultados apresentados pelas amostras com adição de espuma vítrea, foi formulado um traço controle para cada formulação sem adição de espuma vítrea. As proporções da dosagem de concreto com e sem adição de espuma vítrea estão apresentadas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10. Composição da formulação de concreto em relação à adição de espuma vítrea.

Amostra	Materiais					
	Espuma (%)	Espuma (Kg/m ³)	Cimento (Kg/m ³)	Água (Kg/m ³)	Agregado Miúdo (Kg/m ³)	Agregado Graúdo (Kg/m ³)
Controle	0	0,0	407	176	682	1089
CA-10	10	108,9	407	176	682	980,1
CA-20	20	217,8	407	176	682	871,2
CA-30	30	326,7	407	176	682	762,3

5.5.2 HOMOGENEIZAÇÃO

Todos os materiais foram homogeneizados, utilizando uma betoneira elétrica com capacidade de 120 litros, para que o material a ser analisado apresentasse o mesmo lote de mistura. A Figura 5.13 ilustra a betoneira elétrica usada para homogeneizar o concreto.



Figura 5.13. Betoneira elétrica de 120 litros.

A sequência de execução adotada foi:

- a) Lançamento do seixo rolado com 50% da espuma vítrea e cimento na betoneira, realizando a mistura por 30 segundos;
- b) Adição de 70% do total de água do traço à mistura, realizando a mistura por mais 30 segundos;
- c) Adição de todo agregado miúdo com restante da espuma vítreas e do restante de água, realizando a mistura por mais 2 minutos;
- d) Pausa na mistura durante o período de 1 minuto;
- e) Execução final de 1 minuto de mistura para garantir a completa homogeneização do concreto.

5.5.3 MOLDAGEM DAS AMOSTRAS

Os corpos-de-prova foram moldados de acordo com a NBR 5738 em moldes metálicos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Adensamento foi realizado manualmente (Figura 5.14).



Figura 5.14. Moldagem dos corpos-de-prova de concreto.

5.5.4 CURA

A cura é um tratamento que evita a secagem excessiva com a manutenção de um teor de água na massa de concreto, garantindo que o cimento atinja o grau desejado de hidratação (ABDEL-HAY, 2017). Todas as misturas ensaiadas neste estudo foram desmoldadas com aproximadamente 24 horas após a moldagem para capeamento e identificação. Posteriormente todas as amostras foram imersas em um tanque de água saturada (Figura 5.15) para o processo de cura e hidratação e acompanhado (3, 7, 28, 56 e 90 dias) a exemplo do realizado por Bignozzi *et al.*, (2015); Gill (2018); Siddique (2018).



Figura 5.15. Cura das amostras de concreto em tanque de água saturada.

5.6 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO COM ESPUMA VÍTREA

Todos os ensaios realizados para os diferentes traços de concreto investigados seguiram as recomendações da normalização vigente, conforme descrito na sequência deste texto.

5.6.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE NO CONCRETO ENDURECIDO

Absorção de água por capilaridade foi investigada em 108 amostras de acordo com a orientação da NBR 9779 em 24, 48 e 72 horas. Amostras foram ensaiadas após 28 dias de cura.

5.6.2 TRABALHABILIDADE (*SLUMP*)

A trabalhabilidade do concreto com adição de espuma vítrea foi realizada através do ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (*Slump*), conforme a NBR NM 67:98. Neste ensaio, a massa de concreto foi colocada em uma forma troncocônica, em três camadas de ± 100 mm cada e foram igualmente adensadas, cada uma com 25 golpes manualmente. Ao final retirou-se o molde lentamente, levantando-o verticalmente e foram avaliadas a diferença entre a altura do molde e a altura da massa de concreto depois assentado (Figura 5.16). Foram avaliadas três amostras para cada formulação.



Figura 5.16. Ensaio de *Slump*.

5.6.3 MASSA APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO

Após secagem em temperatura ambiente, os corpos de prova cilíndricos foram pesados e sua altura foi determinada após a retífica. Com essas informações,

a massa aparente do concreto endurecido foi calculada pela divisão da massa em quilogramas pelo volume em metro cúbico.

5.6.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados com a máquina de ensaio universal EMIC modelo DL 3000 de acordo com a NBR 5739. Para execução dos ensaios, foram preparadas 12 amostra de cada traço (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm) em cada idade (3, 7, 28, 56 e 90 dias). Os procedimentos utilizados são similares aos utilizados por (BENATTI; AZAMBUJA, 2016). Para comparar os resultados das propriedades mecânicas relacionadas à resistência à compressão das formulações de concreto com adição parcial de espuma vítrea, foram ensaiadas 12 amostra de cada formulação com e sem adição de espuma vítrea com as mesmas idade. A formulação usada foi cimento: agregado miúdo: agregado graúdo (1:1,68:2,68), o fator água cimento foi de 0,482.

5.6.5 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

O efeito de um tratamento térmico a três diferentes temperaturas (100°C, 200°C e 300°C) na resistência à compressão do concreto com e incremento de espuma vítrea foi investigado comparativamente, a exemplo do realizado por Ali *et al.*, (2018); e Isaia., (2011). Para tanto, os corpos-de-prova foram colocados em um forno mufla (Figura 5.22). Foram ensaiadas três amostras de cada formulação com incremento espuma vítrea (10 %, 20% e 30%) na temperatura (100°C, 200°C e 300°C). O tempo de permanência na mufla foi de duas horas. Ao final as amostras foram resfriadas ao tempo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 RESULTADO DOS PRÉ-TESTES

A Figura 6.1. mostra a expansão volumétrica das espumas vítreas obtidas no pré-teste em função do teor de CCA (12%, 16%, 22% e 30%), da temperatura de queima (800°C, 850°C, 900°C, 950°C e 1000°C), e dos seguintes teores de CaCO_3 na formulação: (a): 4%, (b) 6%, (c) 7% e (d) 10%. A formulação definida no pré-teste, favoreceu a formação dos poros nas espumas vítreas usadas como agregado.

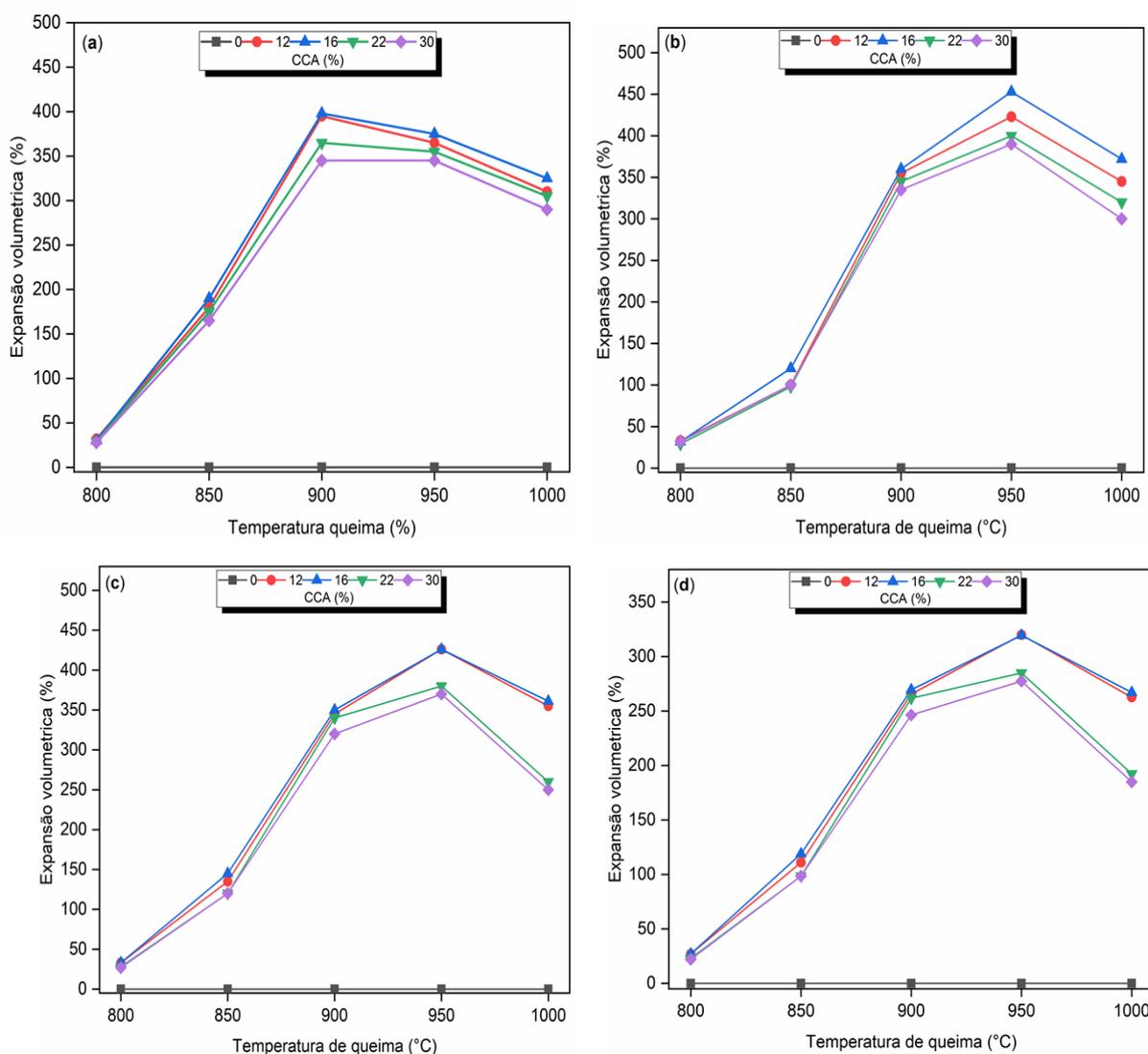


Figura 6.1. Expansão volumétrica das espumas vítreas obtidas em pré-testes em função do teor de CCA (12%, 16%, 22% e 30%), da temperatura de queima (800°C, 850°C, 900°C, 950°C e 1000°C), e dos seguintes teores de CaCO_3 na formulação: (a): 4%, (b) 6%, (c) 7% e (d) 10%.

Os resultados apresentados na Figura 6.3 indicam que na temperatura de 800°C em todas as formulações analisadas, a expansão volumétrica é incipiente. Estes resultados já eram esperados, porque os gases gerados pela decomposição do CaCO₃ dentro da massa do vidro com CCA nesta temperatura não conseguem expandir o vidro já formado (KOPP ALVES; BERGMANN; BERUTTI, 2013). Nesta temperatura o vidro encontra-se com baixa viscosidade (OTA *et al.*, 1995). O vidro sodocálcico inicia seu amolecimento em 700 °C , a partir de aproximadamente 900°C o vidro atinge o seu maior encolhimento e densificação, a expansão do vidro ocorre até 1000 °C devido à formação de fase líquida de menor viscosidade (SOUZA *et al.*, 2017); quando atinge a temperatura de amolecimento começa o processo de coalescimento das partículas (TULYAGANOV *et al.*, 2006; VIEIRA *et al.*, 2016). Os resultados mostram que a partir de uma temperatura ≥850°C, todas as formulações apresentam expansão volumétrica à medida em que a temperatura aumenta.

6.2 RESULTADO DA FILMAGEM DURANTE O PRÉ-TESTES

O comportamento das amostras em relação ao aumento de temperatura de queima é apresentado na Figura 6.2.



Figura 6.2. Filmagem da amostra em aquecimento no pré-teste.

A Figura 6.3 apresenta uma sequência de imagens obtidas na evolução da expansão volumétrica da amostra. Verifica-se que a temperatura de 800 °C não exerce influência no processo de expansão volumétrica, sendo incipiente. A expansão volumétrica começa a partir de $\pm 850^{\circ}\text{C}$, iniciando-se pelas bordas, sendo diretamente proporcional ao aumento de temperatura (BERNARDO *et al.*, 2005). A dobra da borda da amostra ensaiada no início da expansão volumétrica na temperatura ($\pm 850^{\circ}\text{C}$), indica o modo de deformação essencial de uma espuma vítrea (HU; LI; MAO, 2009; MONTANARO *et al.*, 1998). A dobra das bordas é favorecida pelo efeito das pontas e pelo tamanho das partículas do vidro e da CCA (LAUTENSACK *et al.*, 2008; MÜLLER, 1997) que aumentou o contato com CaCO_3 , garantindo a estabilidade e formação da estrutura celular interna.

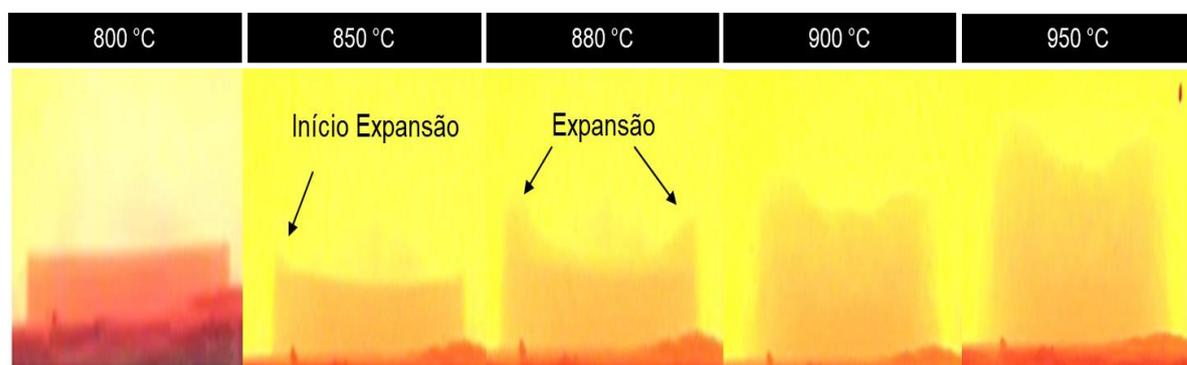


Figura 6.3. Expansão volumétrica em relação à temperatura de queima no pré-teste.

Analisando todos os resultados apresentados no pré-teste, optou-se em usar neste trabalho a formulação com a seguinte composição: vidro sodocálcico (78%), CaCO_3 (6%) e CCA (16%), queimada na temperatura de $\geq 850^{\circ}\text{C}$.

Neste trabalho, a expansão volumétrica das espumas vítreas em temperaturas ($< 850^{\circ}\text{C}$) não fizeram parte do foco da investigação.

6.3 PRODUÇÃO DA ESPUMA VÍTREA

A formulação definida no pré-teste, favoreceu a formação dos poros nas espumas vítreas produzidas neste estudo. Analisando as imagens da microscopia óptica das esferas produzidas (Figura 6.4), observou-se que todas as esferas apresentaram porosidade essencialmente fechada, bem distribuída e sem rachaduras. Esta condição favorece a adição das espumas vítreas no concreto em substituição parcial do agregado graúdo natural, porque contribui para reduzir a condutividade térmica (DA et al., 2018). A espuma vítrea não compete com água da pasta de cimento, não influenciando nas reações de hidratação durante o processo de curado (HAN; KIM; PARK, 2011; ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, 2011). Onde as características de porosidade e absorção de água dos agregados leves afetam significativamente as propriedades dos concretos e o processo de hidratação do cimento (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011). Outra particularidade das espumas vítreas é que a pasta de cimento não penetra nos poros evitando o aumento do consumo de cimento (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011). A queima das amostras de espumas vítreas (850°C) também corrobora para reduzir os custos de produção da espuma vítrea, viabilizando sua produção e a sua difusão na indústria da construção através de novas rotas de produção (BERNARDO *et al.*, 2007; SOUZA *et al.*, 2017). As espumas vítreas foram projetadas para atender as propriedades requeridas pelo concreto leve como densidade e resistência à compressão.

Em todas as amostras, poros maiores são cercados por poros menores. Esta formação foi influenciada pelo tamanho das partículas das matérias-primas (Vidro $D_{médio} = 48,33 \mu\text{m}$ e CCA $D_{médio} = 60,63 \mu\text{m}$). O tamanho de partícula favoreceu o contato entre as matérias-primas e CaCO_3 ($D_{médio} 2,74 \mu\text{m}$), garantindo a estabilidade e formação da estrutura celular interna, durante as reações provocadas pela queima. Poros fechados apresentam baixa permeabilidade, o que é fundamental neste estudo, isso porque as espumas vítreas foram adicionadas no concreto e não poderiam competir com reações de hidratação do cimento em relação da água de amassamento (HAN; KIM; PARK, 2011). Poros fechados não facilitam a comunicação com o seu entorno, desta forma não aprisionam água em seu interior. Nenhuma espuma vítrea produzida apresentou absorção de água.

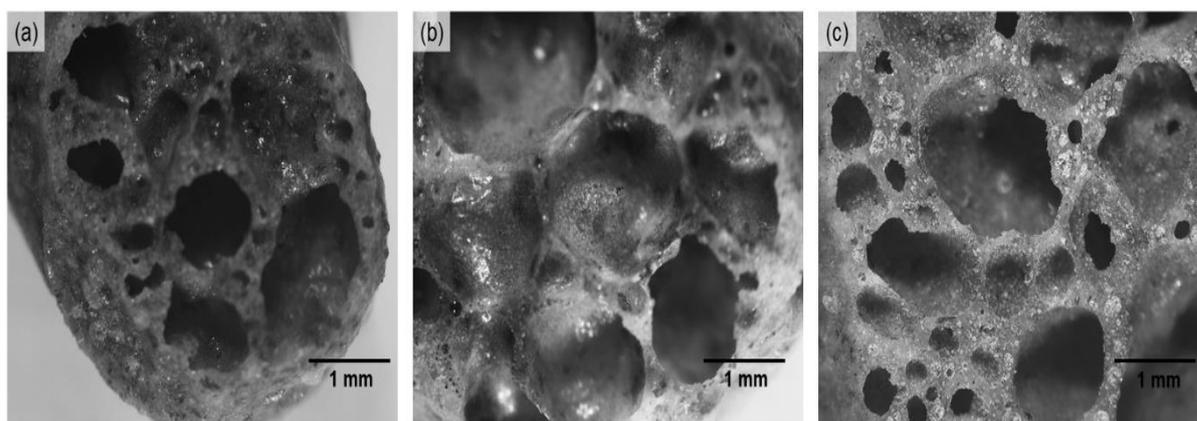


Figura 6.4. Imagens por microscopia óptica das espumas vítreas com tamanhos de esferas de (a) 4,8 mm, (b) 6,3 mm, e (c) 12,5 mm.

Os valores da média e do desvio padrão da porosidade, tamanhos médios de poros e resistência à compressão das esferas são apresentados na Tabela 6.1. A porosidade das esferas (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm) variaram entre 87 e 93%, ou seja, são relativamente semelhantes. Essa similaridade ocorre porque as amostras foram obtidas utilizando os mesmos parâmetros do processo, diferindo apenas no que diz respeito ao tamanho das esferas. Apenas um pequeno aumento na porosidade foi encontrado com o tamanho das esferas, o que pode estar associado com as maiores quantidades de massa nessas amostras e, conseqüentemente, com a formação de um maior número de poros.

As esferas apresentaram valores de porosidade semelhantes aos encontrados na literatura e produtos comerciais produzidos sob condições similares (ARCARO *et al.*, 2016; DA *et al.*, 2018; DE MORAES *et al.*, 2019; M. SCHEFFLER; P. COLOMBO, 2006; POKORNY; VICENZI; PÉREZ BERGMANN, 2011; TEIXEIRA *et al.*, 2017; ZILLI *et al.*, 2015), demonstrando a eficácia dos resíduos utilizados além do CaCO_3 na produção de espumas vítreas.

O tamanho dos poros pode definir a aplicação da espuma vítrea. Neste caso, os tamanhos dos poros variaram de 1,2 a 2,3 mm; nenhuma variação significativa foi observada, pois as amostras foram submetidas aos mesmos parâmetros do processo. Os valores de porosidade estão de acordo com os apresentados na Figura 6.4. Vale ressaltar, que os poros maiores estão provavelmente associados à porosidade formada pela decomposição do CaCO_3 , que ocorre a uma temperatura na qual a viscosidade do vidro facilita a expansão. Por

outro lado, poros menores podem ser originados de novos poros que foram nucleados por CO₂ e não tiveram tempo suficiente para crescer.

A resistência à compressão mecânica das espumas vítreas com 12,5 mm foi de $0,51 \pm 0,01$ MPa. Como os valores de porosidade e tamanho de poros foram relativamente semelhantes, acredita-se que as espumas vítreas com 4,8 e 6,3 mm apresentem resistência mecânica à compressão similar. Os valores de resistência mecânica à compressão das amostras com 4,8 mm e 6,3 mm não puderam ser obtidos, pois as esferas possuem tamanhos muito menores que os indicados pela norma ($10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$). Deve ser enfatizado que espumas vítreas comerciais tipicamente têm valores de resistência à compressão entre 0,4 e 6 MPa para valores de porosidade >70% (SCHEFFLER, 2005). Assim, as esferas de espuma vítrea obtidas neste estudo atendem aos requisitos básicos de espumas comerciais de vidro. Os valores de média e desvio padrão da porosidade, tamanhos médios de poros e resistência à compressão (σ) das esferas obtidas são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Espuma vítrea: Tamanho, porosidade, tamanho dos poros e resistência à compressão.

Tamanho Agregado (mm)	Porosidade (%)	Tamanho dos poros (mm)	Resistência à compressão (MPa)	
4,8	87 ± 2	1.2 ± 1	-	
6,3	89 ± 2	2.3 ± 1	-	
12,5	93 ± 2	1.5 ± 1	0.51	0.01

6.4 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO COM ESPUMA VÍTREA

6.4.1 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Os resultados individuais da absorção de água por capilaridade no concreto endurecido de cada corpo-de-prova sem adição de espuma vítrea (controle) e com adição (10%, 20% e 30%) são apresentados na Tabela 6.2. Cabe salientar, que todos os corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro de 100 mm e 200 mm de altura e foram moldados e curados em câmara úmida até os 28 dias, idade em que foram ensaiados para identificar a massa saturada e absorção de água dos corpos de prova em intervalos (24, 48 e 72 horas).

Tabela 6.2. Concreto leve após 28 dias de cura em câmara úmida: absorção de água por capilaridade em relação a adição de espuma vítrea em intervalos de 24, 48 e 72 horas.

(%)	Tamanho (mm)	Massa seca (g)	Massa saturada (g)			Absorção (g/cm ²)		
			Horas			24	48	72
			24	48	72			
0	4,8	2.380,00	2.379,92	2.379,91	2.379,80	0,084	0,010	0,104
	6,3	2.285,00	2.284,89	2.284,78	2.284,65	0,106	0,112	0,134
	12,5	2.332,00	2.331,89	2.331,77	2.331,65	0,114	0,116	0,118
10	4,8	1.904,00	1.903,92	1.903,91	1.903,82	0,080	0,009	0,095
	6,3	1.865,92	1.865,85	1.865,84	1.865,76	0,073	0,006	0,086
	12,5	1.884,96	1.884,89	1.884,84	1.884,76	0,069	0,050	0,081
20	4,8	1.770,72	1.770,64	1.770,64	1.770,55	0,077	0,008	0,085
	6,3	1.735,31	1.735,24	1.735,24	1.735,16	0,064	0,005	0,074
	12,5	1.753,01	1.752,95	1.752,91	1.752,84	0,060	0,043	0,069
30	4,8	1.694,56	1.694,49	1.694,48	1.694,42	0,071	0,006	0,062
	6,3	1.660,67	1.660,61	1.660,60	1.660,53	0,060	0,005	0,074
	12,5	1.677,61	1.677,56	1.677,52	1.677,46	0,053	0,039	0,066

Ao analisar (Tabela 6.2) identificou-se que as amostras sem adição de espuma vítrea apresentaram valores de absorção maiores que as amostras com adição, independentemente do tamanho da partícula do agregado. Os valores de absorção de água apresentados (Tabela 6.2) pelas amostras com tamanho 4,8 mm com adição 10% (0,084, 0,010 e 0,104 g/cm²; respectivamente), 20% (0,106, 0,112 e 0,134 g/cm²; respectivamente) e 30% (0,114, 0,116 e 0,118 g/cm²; respectivamente), indicaram a eficiência das formulações em relação à hidratação do concreto, devido a uma maior absorção da água durante evolução da cura (tempo). Estes resultados já eram esperados, sendo sustentados pelos valores apresentados por cada amostra no ensaio de resistência à compressão. O traço controle apresentou os maiores valores de resistência à compressão neste estudo, indicado uma eficiência da reação do aglomerante e agregado no processo de hidratação (BENATTI; AZAMBUJA, 2016).

O resultado da absorção de água para as amostras com adição de espuma vítrea (10%, 20% e 30%) ilustrado (Tabela 6.2) mostraram ainda que existe uma relação entre o tamanho do agregado e absorção água por parte das amostras. As

amostras com tamanho de partícula de 4,8 mm apresentaram maior absorção em todas as formulações ensaiadas. Para o tamanho de 4,8 mm com 10% de adição há absorção de água (0,080, 0,009 e 0,095 g/cm²; respectivamente), 20% (0,077, 0,008 e 0,085 g/cm²; respectivamente) e 30% (0,071, 0,006 e 0,062 g/cm²; respectivamente). Para 6,3 mm com adição de 10% (0,073, 0,006 e 0,086 g/cm²; respectivamente), 20% (0,064, 0,005 e 0,074 g/cm²; respectivamente) e 30% (0,060, 0,005 e 0,074 g/cm²; respectivamente). O tamanho de partícula de 12,5 para 10% (0,069, 0,050 e 0,081 g/cm²; respectivamente), 20% (0,060, 0,043 e 0,069 g/cm²; respectivamente) e 30% (0,053, 0,039 e 0,066 g/cm²; respectivamente).

Os resultados indicaram que, quanto menor o agregado, maior é absorção de água por parte da amostra e maior é sua resistência à compressão, isso porque, existe uma maior absorção entre os capilares do concreto. A Figura 6.5 (a) 4,8 mm, (b) 6,3 mm e (c) 12,5 mm) apresenta a vista da face interna das amostras após 28 dias de cura. Observando a amostra com tamanho de partícula 4,8 mm, foi possível verificar que as espumas vítreas contidas dentro da massa de cimento estão bem distribuídas com pouca distância uma da outra. Esta condição pode ter sido favorecida pela eficiência da homogeneização e pela contribuição do tamanho dos agregados nesta amostra que eram bem similares. Já nas amostras com 6,3 e 12,5 mm, foi possível verificar que espumas vítreas ficaram afastadas uma das outras, mas, bem distribuídas na massa de concreto. Esta condição pode ter influenciado os resultados do *Slump* destas amostras, possibilitando uma boa trabalhabilidade da massa de concreto, porque água encontra-se bem retida e distribuída. De acordo com Helene (1993), a penetração de água por capilaridade é menor quando a pressão capilar é menor.

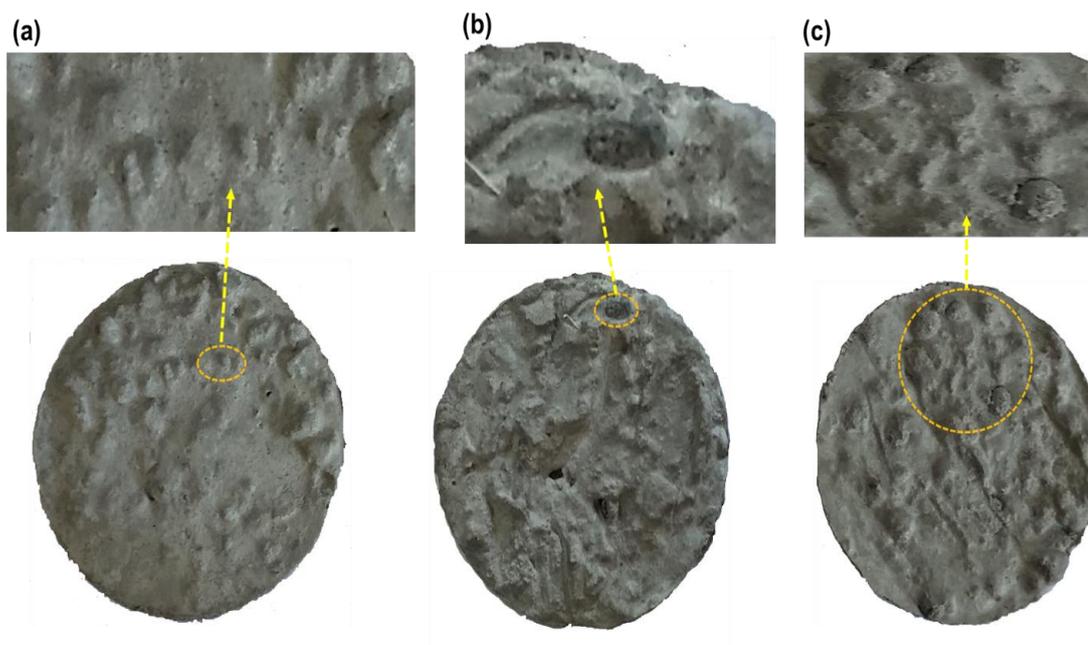


Figura 6.5. Face interna da amostra de concreto com adição de espuma vítrea: (a) 4,8 mm, (b) 6,3 mm e (c) 12,5 mm.

6.4.2 TRABALHABILIDADE DO CONCRETO

A trabalhabilidade do concreto é fortemente influenciada pela consistência. A consistência, por sua vez, tem relação com características inerentes ao próprio concreto, a homogeneidade da mistura e a coesão entre seus componentes. Por esta razão, procurou-se produzir o concreto com agregados graúdos naturais e com espumas vítreas de tamanhos similares (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm). A Figura 6.6 mostra os resultados apresentados nos ensaios de consistência (*Slump* %) em função da concentração de espuma vítrea no concreto (10%, 20% e 30%) e do tamanho da partícula (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm).

Os resultados mostraram que todas as amostras com adição de espuma vítrea apresentaram boa trabalhabilidade, permitindo a produção de concretos sem a necessidade de plastificantes. Os resultados também mostraram que as formulações com adição de 30% de espuma vítrea apresentaram os maiores valores (*Slump*). Os resultados para tamanhos de esferas de 4,8, 6,3 e 12,5 mm foram 98, 97 e 96%, respectivamente. Para formulações com adição de 20% de espuma vítrea, os tamanhos das esferas de 4,8, 6,3 e 12,5 mm obtiveram valores de 95, 94 e 93%, respectivamente. Em relação às formulações com 10% de espuma vítrea, os tamanhos de esferas de 4,8, 6,3 e 12,5 mm revelaram valores de 92, 91 e 90%,

respectivamente. A formulação de controle apresentou valores de 88, 87 e 86% para agregados graúdos com tamanhos de 4,8, 6,3 e 12,5 mm, respectivamente. Portanto, pode-se observar que o comportamento de consistência (*Slump*) e a trabalhabilidade do concreto melhoraram com o aumento da concentração de espuma vítrea nas formulações.

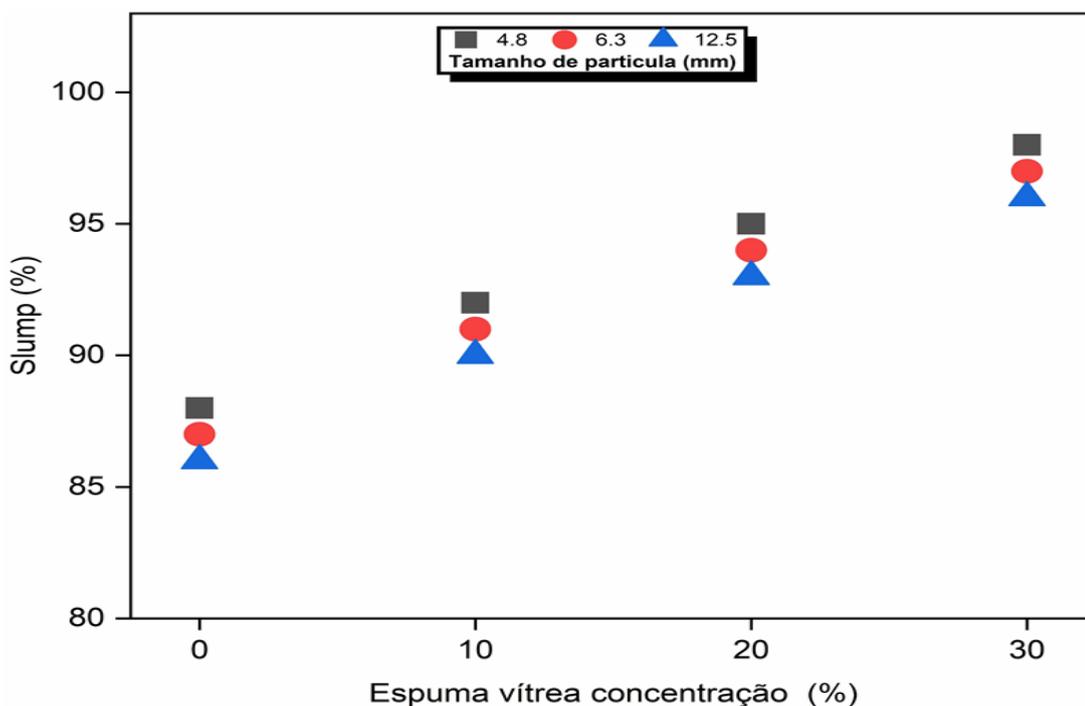


Figura 6.6. Variação do *Slump* em relação à concentração de espuma vítrea (10, 20, e 30%) e tamanho de partícula (4,8, 6,3 e 12,5 mm).

As espumas vítreas melhoraram os resultados de *Slump* sem a necessidade de adicionar qualquer tipo de plastificante devido principalmente à redução da densidade real com a substituição parcial dos agregados naturais por espumas vítreas. Com a menor densidade de massa, a viscosidade plástica da massa também é menor, assim como a tensão de escoamento (MOLAEI RAISI; VASEGHI AMIRI; DAVOODI, 2018). Vale ressaltar que as espumas vítreas têm baixa absorção de água, o que é um fator positivo para o *Slump*. Além disso, a espuma vítrea pode ter influenciado o crescimento do *Slump*, possivelmente também devido à sua menor rugosidade superficial, diminuindo a área superficial e assim, diminuindo as interações químicas entre as partículas agregado e a pasta de cimento.

Os resultados apresentados pelas amostras no ensaio de *Slump* (Figura 6.3) podem fazer supor que a trabalhabilidade do concreto foi melhorada também pelo fato das espumas vítreas não absorverem a água na mistura de concreto. Embora

apresentassem diferentes níveis de perda de *Slump*, as misturas de concreto encontravam-se dentro dos limites de tolerância (± 10 mm) descritos na norma ASTM: C143 / C143M-15^a (ASTM C143M, 2015). Esta característica das espumas vítreas contribuiria para uma redução no custo do concreto, por não requerer a adição de misturas plastificantes para melhorar sua consistência (*Slump*) e trabalhabilidade.

Deve-se mencionar que todas as amostras testadas receberam a mesma quantidade de água, não influenciando os resultados apresentados neste estudo. Portanto, as espumas vítreas não competiram na absorção de água presente na massa de amassada com os componentes do cimento durante a hidratação / *Slump*. De acordo com Marta Sánchez de Juan *et al.* (DE JUAN; GUTIÉRREZ, 2009), a absorção de água para agregados reciclados pode ser entre 3 e 10%, enquanto que pode ser de 5% para agregados naturais, dependendo do tamanho das partículas.

6.4.3 DENSIDADE

A Figura 6.7 mostra o resultado da densidade aparente aos 28 dias das amostras de concreto em relação à adição de espuma vítrea. O resultado da densidade (2380, 2285 e 2332 kg/m³) de todas as amostras estão dentro do esperado. Os resultados mostraram que todas as amostras com adição de espumas vítreas apresentaram redução na densidade (± 5 –11%) em relação ao controle. Além disso, um aumento na concentração de espumas vítreas diminuiu a densidade para valores em torno de 1700 kg/m³, como esperado. Esses valores são considerados adequados para o concreto leve (ALI *et al.*, 2018).

A redução da densidade foi motivada pela redução de vazios na estrutura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento, que é geralmente a região mais fraca do concreto devido à sua maior porosidade e presença de trincas (PARK; KWON; WANG, 2016; SHI *et al.*, 2016). A incorporação das espumas vítreas pelo concreto juntamente com os agregados naturais influenciou diretamente as propriedades dos concretos, como o obtido por outros autores (GOMES *et al.*, 2015). Por outro lado, o tamanho das esferas praticamente não influenciou os resultados de densidade. Os resultados apresentados pela densidade mostram a existência de correlação com a resistência à compressão e ao *Slump*. Ou seja, concretos com

menor densidade apresentaram menor resistência mecânica e maior abatimento do concreto.

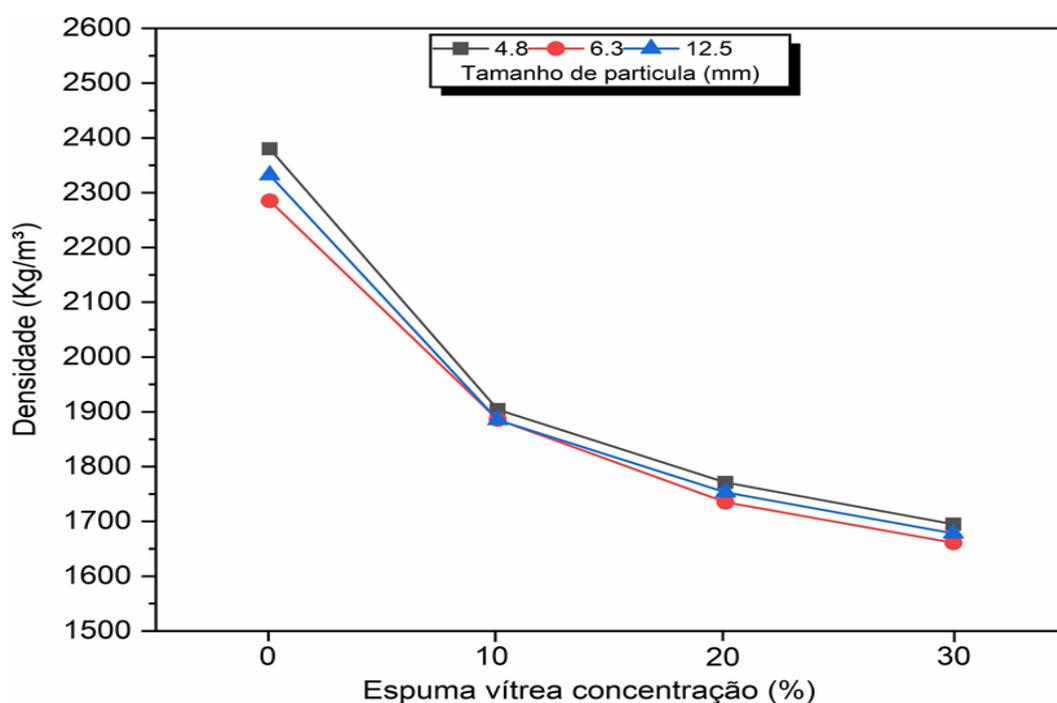


Figura 6.7. Densidade do concreto aos 28 dias em função da quantidade percentual de espuma vítrea com tamanhos de 4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm.

6.4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão caracteriza o concreto de acordo com seu uso estrutural. Assim, o conhecimento sobre a variação da resistência à compressão do concreto quando um material é usado para substituir a matéria-prima é de suma importância (SHARMA; BANSAL, 2016). A Figura 6.8 mostra o comportamento mecânico do concreto em função da influência do tamanho de espuma vítrea (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm) e do seu incremento na massa de concreto (10, 20 e 30%) em relação ao tempo de cura (3, 7, 28, 56 e 90 dias).

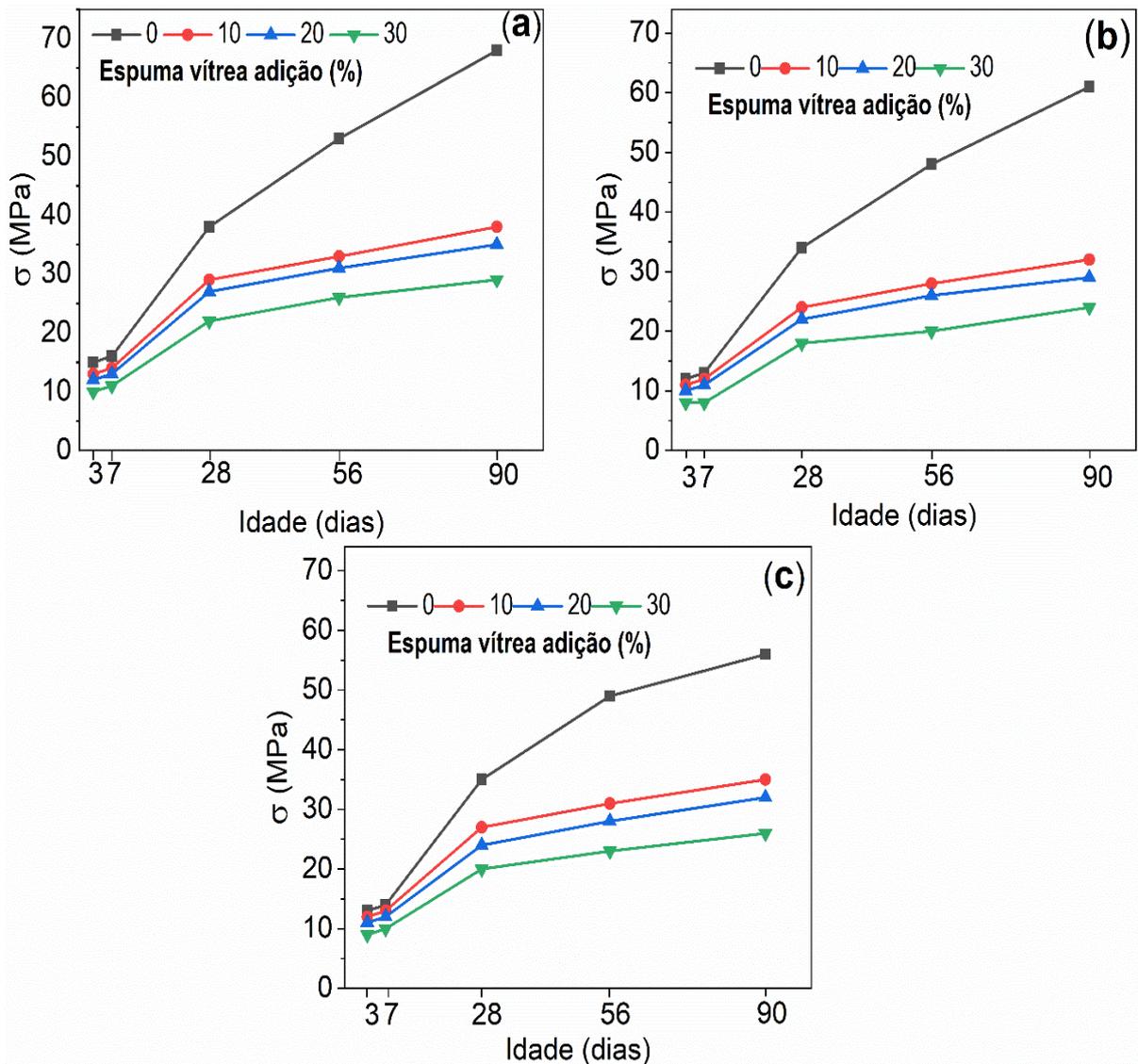


Figura 6.8. Ganhos de resistência à compressão após 3, 7, 28, 56 e 90 dias com incremento da adição de espuma vítrea com tamanhos de esferas de (a) 4,8 mm, (b) 6,3 mm e (c) 12,5 mm.

Os resultados ilustrados (Figura 6.8) mostraram uma perda gradual da resistência à compressão das amostras com incremento de espuma vítreas (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm), quando comparados com as amostras sem incremento. Essa perda já era esperada, pois a adição de agregados produzidos com material reciclado no concreto reduz sua resistência à compressão devido à porosidade deste material. O tamanho e a adição de espumas vítreas contribuíram para a redução da resistência à compressão. Os melhores resultados foram apresentados pelas espumas vítreas com tamanho de 4,8 mm e adição de 10%, 13 MPa após 3 dias, 14 MPa após 7 dias, 29 MPa após 28 dias, 33 MPa após 56 dias e 38 MPa após 90 dias. Quanto às espumas de 6,3 mm de espessura e 10% de adição, os

resultados foram os seguintes: 11 MPa aos 3 dias, 12 MPa aos 7 dias, 24 MPa aos 28 dias, 28 MPa aos 56 dias e 32 MPa aos 90 dias. Em relação às espumas vítreas de 12,5 mm e adição de 10%, os seguintes resultados foram encontrados: 12 MPa após 3 dias, 13 MPa após 7 dias, 27 MPa após 28 dias, 31 MPa após 56 dias e 35 MPa após 90 dias. Em contraste, para espumas vítreas de 4,8 mm, a adição de 20 e 30% em peso mostrou perda na resistência à compressão entre 25 e 45% para todas as amostras analisadas.

Em relação aos tamanhos de espuma vítrea (6,3 mm e 12,5 mm), verificou-se reduções ainda maiores na resistência à compressão (25 a 90%). Estes resultados mostraram que quanto menor o tamanho da espuma vítrea adicionada à mistura de concreto, maior a resistência à compressão. Isso ocorre, porque partículas menores tendem a um empacotamento maior por preencherem um maior número de vazios no concreto, reduzindo sua porosidade e aumentando sua compressão (KRALJ, 2009; VISHWAKARMA *et al.*, 2016).

Em termo do esperado aumento da resistência mecânica com o tempo de cura, também verificado para o concreto com adição de espuma vítrea, outros estudos relataram similarmente que todas as amostras com adição de espuma vítrea apresentam ganho de resistência em função do tempo de cura (MODARRES; HOSSEINI, 2014).

Deve-se destacar que mesmo com a redução da resistência mecânica das amostras testadas com o aumento do tamanho das partículas de espuma vítrea, os valores obtidos ainda estão dentro dos limites permitidos (LIMBACHIYA; MEDDAH; FOTIADOU, 2012). Além disso, deve ser levado em conta que a adição de espumas vítreas como agregados produz um concreto mais leve.

A diminuição da resistência mecânica também pode estar associada à menor quantidade de argamassa aderida ao agregado (YADAV; PATHAK, 2009). Essa diminuição prejudica a formação da zona de transição interfacial, menor área interfacial, que por sua vez, é relacionada ao movimento da umidade e reação química no concreto com agregado reciclado (YADAV; PATHAK, 2009). Quanto mais forte a ligação desenvolvida na zona interfacial entre a matriz e o agregado graúdo, maior é a resistência do concreto (YADAV; PATHAK, 2009).

Segundo Frondistou e Yannas (FRONDISTOU; YANNAS, 1977), os agregados reciclados apresentaram resistência à compressão entre 4 e 14%. Narud

(NARUD, 1983) relata valores de resistência à compressão semelhantes aos do concreto com agregados naturais. Esses pesquisadores concluíram que a adição de resíduos em concreto pode variar de 30 a 60%. Além disso, a vantagem da utilização da espuma vítrea produzida com resíduos de vidro sodocálcico e cinza da casca de arroz é devido à eliminação da expansão causado pela reação alcalina-silica expansiva (ASR) entre água da pasta de cimento com alto teor alcalino e sílica reativa. Esta expansão ocorre principalmente em vidros residuais (PARK; LEE, 2004). No caso das espumas vítreas usadas como agregado, a não expansão possibilita a aplicação do concreto, além de torná-lo ambientalmente menos impactante (XIAO, 2018).

A variação da resistência à compressão do concreto em função da adição da espuma vítrea (0%, 10%, 20% e 30%), com diferentes tamanhos (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm) aos 28 dias de idade é apresentada (Figura 6.9).

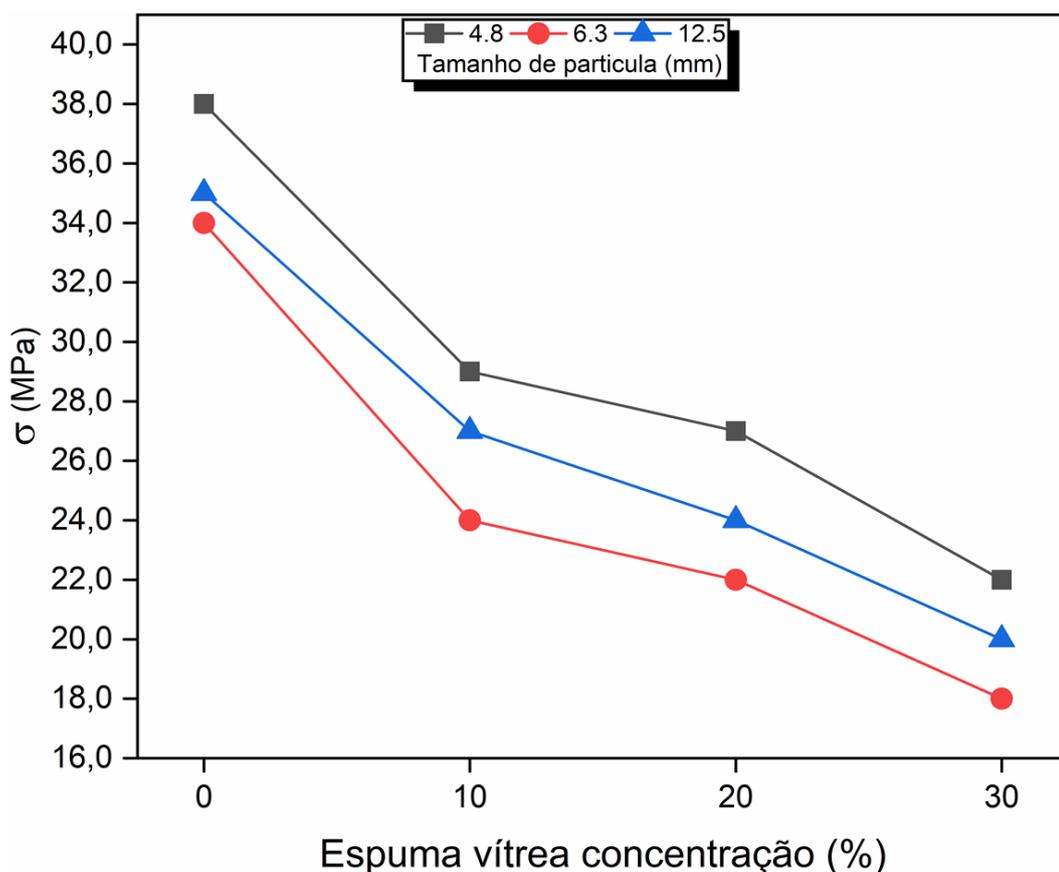


Figura 6.9. Variação da resistência à compressão do concreto em função da adição da espuma vítrea (0%, 10%, 20% e 30%), com diferentes tamanhos (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm) aos 28 dias de idade.

Os resultados apresentados na Figura 6.9 confirmaram que todas amostras possuem características de concreto leve estrutural. As amostras com adição de 10% e 20%, para os tamanhos de partícula de 4,8 mm e 12,5 mm, apresentaram as maiores médias de resistência à compressão (respectivamente 14,5 MPa e 14,8 MPa) e densidade (respectivamente 1,8 g/cm³ e 1,90 g/cm³), quando comparadas com os resultados das amostras com espuma vítrea de tamanho 6,3 mm que em todas as adições apresentaram perda gradual de resistência e densidade média (~15%). Adição de espuma vítrea (30%) apresentou os menores valores de resistência à compressão (12,4 MPa) e densidade (1,70 g/cm³). Estes valores podem ser associados a um aumento significativo de vazios (existentes na espuma vítrea) na massa do concreto produzido.

A Figura 6.10 sumariza a relação entre a resistência à compressão e a densidade das amostras (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm) investigadas com e sem adição de espuma vítrea nos teores de 0%, 10%, 20% e 30%.

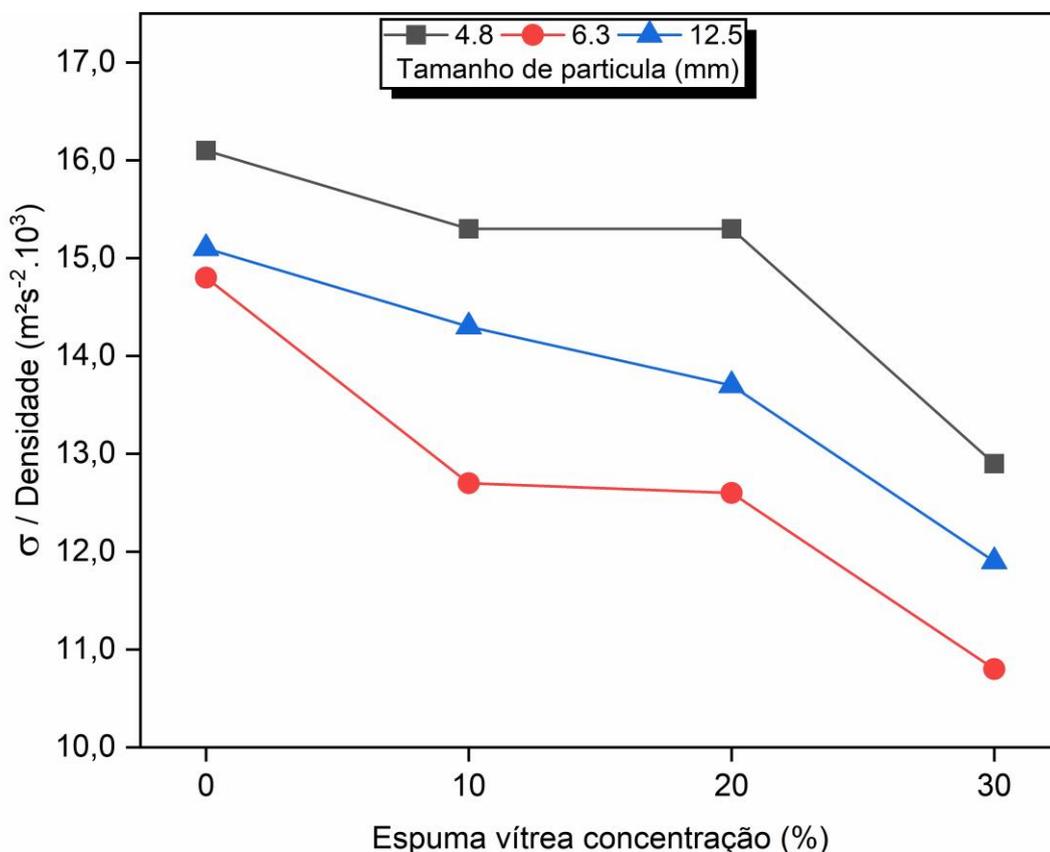


Figura 6.10. Resistência à compressão em relação a densidade das amostras (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm) com e sem adição de espuma vítrea (0%, 10%, 20% e 30%).

Comparando os gráficos das Figuras 6.9 e 6.10, pode-se constatar que há um achatamento da dispersão dos resultados de resistência à compressão, quando estes são indexados à densidade da amostra: da maior resistência à compressão obtida (38 MPa para 0% e tamanho da espuma vítrea de 4,8 mm) à menor resistência à compressão obtida (18 MPa para 30% e tamanho da espuma vítrea de 6,3 mm) há uma diferença bem maior (20 MPa) do que quando esses valores de resistência à compressão são divididos pela densidade das amostras ($16 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot 10^3$ e $10,8 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot 10^3$), uma diferença de apenas $5,2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot 10^3$. Isto seria um forte indicativo do papel dos vazios na definição da resistência à compressão das amostras de concreto investigadas.

6.4.5 EFEITO DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O resultado da influência da temperatura ambiente ($\sim 40^\circ\text{C}$), 100°C , 200°C e 300°C na resistência à compressão do concreto com idade de 28 dias produzido com e sem adição de espuma (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm) é apresentado na Tabela 6.3.

Tabela 6.3. Influência da temperatura de tratamento térmico a 100°C , 200°C e 300°C na resistência mecânica do concreto.

Tamanho (mm)	Temperatura (C°)	Resistência à compressão aos 28 dias			
		Adição de espuma vítrea			
		Controle	10	20	30
4,8	Ambiente	38,00	29,00	27,00	30,00
	100	36,86	28,42	26,46	29,70
	200	29,86	25,01	23,28	25,84
	300	22,69	21,76	20,49	22,48
6,3	Ambiente	34,00	24,00	22,00	18,00
	100	32,98	23,52	21,56	17,82
	200	26,71	20,70	18,97	15,50
	300	20,30	18,01	16,70	13,49
12,5	Ambiente	35,00	27,00	24,00	20,00
	100	33,95	26,46	23,52	19,80
	200	27,50	23,28	20,70	17,23
	300	20,90	20,26	18,21	14,99

Os resultados médios (Tabela 6.3) mostraram que todas as amostras que estavam exposta à temperatura ambiente (~ 40°C) apresentaram uma queda gradual média (~6%) na resistência à compressão. A queda gradual da resistência à compressão das amostras ensaiadas foi favorecida pela diminuição das reações de hidratação pela evolução da idade do concreto durante a cura de 28 dias.

Quando são avaliados os resultados apresentados às temperaturas de 200°C e 300°C para o traço controle, observa-se uma perda na resistência (19% e 24%; respectivamente) com aumento da temperatura (ISAIA., 2011) (UMASABOR; OKOVIDO, 2018). Os resultados das amostras com adição de espuma vítreas ensaiadas às temperaturas de 200°C e 300°C permitem constatar uma perda média da resistência de 13%. Esta perda, quando comparada às perdas das amostras sem adição de espuma, é menor. A elevação da temperatura nesta fase de cura de 28 dias acelera o processo de hidratação do concreto, supostamente pelo aumento do volume dos vazios na massa, resultado da evaporação precoce da água. Como a estrutura das espumas vítreas produzidas neste trabalho é amorfa, elas funcionam muito bem como isolante térmico (ALI *et al.*, 2018; UMASABOR; OKOVIDO, 2018). A adição de espuma vítrea no concreto exposto às temperaturas de 200°C e 300°C favoreceu assim à resistência à compressão. Além desse efeito positivo, haveria outro, qual seja, a da resistência à propagação da temperatura no concreto quando exposto ao fogo.

7 CONCLUSÕES

Foi possível obter com sucesso espumas vítreas com adição de vidro sodocálcico (78%), cinza da casca de arroz (16%) e carbonato de cálcio (6%) com tamanho (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm) com porosidade de $87\% \pm 2$, $89\% \pm 2$ e $93\% \pm 2$, tamanhos de poros de $1,2 \text{ mm} \pm 1$, $2,3 \text{ mm} \pm 1$ e $1,5 \text{ mm} \pm 1$ e valores resistência à compressão variando de 0,51 a 0,56 MPa. O processo de pelotização foi eficiente e garantiu aglutinação das adições no estado verde. Os resultados apresentados pelas amostras no pré-teste favoreceram a definição da formulação ideal e a temperatura de queima (850°C). As características e propriedades das espumas vítreas obtidas mostraram a viabilidade técnica da substituição parcial do agregado natural em concretos.

Os resultados apresentados pelas amostras (concreto) com adição de espuma vítrea (10%, 20% e 30%) confirmaram que os concretos produzidos apresentam características de concreto leve estrutural. As amostras com adição de 10% e 20%, para os tamanhos de partícula de 4,8 mm e 12,5 mm, apresentaram as maiores médias de resistência à compressão (respectivamente 14,5 MPa e 14,8 MPa) e densidade (respectivamente $1,8 \text{ g/cm}^3$ e $1,90 \text{ g/cm}^3$), quando comparadas com os resultados das amostras com espuma vítrea de tamanho 6,3 mm que em todas as adições apresentaram perda gradual de resistência e densidade média (~15%). Adição de espuma vítrea (30%) apresentou os menores valores de resistência à compressão (12,4 MPa) e densidade ($1,70 \text{ g/cm}^3$). Estes valores podem ser associados a um aumento significativo de vazios (existentes na espuma vítrea) na massa do concreto produzido. Comparando os resultados da resistência à compressão em relação a densidade das amostra (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm) com e sem adição de espuma vítrea (0%, 10%, 20% e 30%) com os resultados da variação da resistência à compressão do concreto em função da adição da espuma vítrea (0%, 10%, 20% e 30%), com diferentes tamanhos (4,8 mm, 6,3 mm e 12,5 mm) aos 28 dias de idade e possível constatar que há um achatamento da dispersão dos resultados de resistência à compressão, quando estes são indexados à densidade da amostra: da maior resistência à compressão obtida (38 MPa para 0% e tamanho da espuma vítrea de 4,8 mm) à menor resistência à compressão obtida (18 MPa para 30% e tamanho da espuma vítrea de 6,3 mm) há uma diferença bem

maior (20 MPa) do que quando esses valores de resistência à compressão são divididos pela densidade das amostras ($16 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot 10^3$ e $10,8 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot 10^3$), uma diferença de apenas $5,2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot 10^3$. Isto seria um forte indicativo do papel dos vazios na definição da resistência à compressão das amostras de concreto investigadas.

O *Slump* obtido para todas amostras com adição de espuma vítrea (>90 mm), estes resultados potencializam seu uso em obras de construção civil; sua trabalhabilidade possibilitaria o bombeamento em caminhões betoneira, viabilizando sua comercialização.

O concreto produzido com adição de espuma vítrea também apresentou boa resistência à variação de temperatura (200°C e 300°C) com perda média (13%) na sua resistência, quando comparada com o concreto convencional (19% - 24%).

Portanto, a adição de espumas vítreas como agregado no concreto pode contribuir para mitigar os problemas resultantes do descarte de resíduos de casca de arroz e de vidro sodocálcico no meio ambiente, além de melhorar algumas das propriedades do concreto, sem comprometer significativamente sua resistência à compressão, tornando-o um produto mais sustentável.

8. PRODUÇÃO DECORRENTE DESTA TESE

8.1 ARTIGO

Revista: **PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION** 128 (2019)
77–84 - <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.044>

GLASS FOAMS PRODUCED FROM SODA-LIME GLASS WASTE AND RICE HUSK ASH APPLIED AS PARTIAL SUBSTITUTES FOR CONCRETE AGGREGATES

Autores: FERNANDO ANTONIO DA SILVA FERNANDES, SABRINA ARCARO, ERWIN FRANCISCO TOCHTROP JUNIOR, JUAN CARLOS VALDÉS SERRA, CARLOS PÉREZ BERGMANN.

8.2 PATENTES

BR 102016030372-9 A2 - Produção de pastilha vítrea coma adição de vidro sodo-cálcico, cinza da casca de arroz e carbonato de cálcio como agente espumante

Titular(es): UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Inventor(es): FERNANDO ANTONIO DA SILVA FERNANDES; CARLOS PÉREZ BERGMANN

BR 102017014548-4 A2 - Agregado com adição de cinza da casca de arroz, vidro sodocálcico e carbonato de cálcio.

Depositante(es): FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS.

Inventor(es): FERNANDO ANTONIO DA SILVA FERNANDES; JUAN CARLOS VALDÉS SERRA; CARLOS PÉREZ BERGMANN; ERWIN FRANCISCO TOCHTROP JUNIOR

BR 102017014546-8 A2 - Espuma vítrea com adição de vidro sodocálcico, cinza da casca de arroz e carbonato de cálcio de grau P.A.

Depositante(es): FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS.

Inventor(es): FERNANDO ANTONIO DA SILVA FERNANDES; JUAN CARLOS VALDÉS SERRA; CARLOS PÉREZ BERGMANN; ERWIN FRANCISCO TOCHTROP JUNIOR.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-HAY, Ahmed Shaban. Properties of recycled concrete aggregate under different curing conditions. **HBRC Journal**, Beni-Suef, v. 13, n. 3, p. 271–276, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2015.07.001>>. Acesso em: 2 maio. 2019.
- ABIVIDRO. **ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO**. 2017.
- ABNT. **Agregados - Determinação da composição granulométrica NBR 7211**. Rio de Janeiro.
- AKERMAN, M. **Introdução ao vidro e sua produção, ABIVIDRO – Escola do Vidro**. São Paulo.
- ALEX, Josephin; DHANALAKSHMI, J.; AMBEDKAR, B. Experimental investigation on rice husk ash as cement replacement on concrete production. **Construction and Building Materials**, Chennai, v. 127, p. 353–362, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.150>>. Acesso em: 17 maio. 2018.
- ALI, M. R. et al. Thermal-resistant lightweight concrete with polyethylene beads as coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, Dhahran, v. 164, p. 739–749, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.012>>. Acesso em: 21 abr. 2019.
- ANDERBERG, Yngve; FORSEN, Nils Erik. Summary for Policymakers. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (Ed.). **Climate Change 2013 - The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1982. p. 1–30.
- ANDREOLA, Fernanda et al. Recycling of industrial wastes in ceramic manufacturing: State of art and glass case studies. **Ceramics International**, Modena, v. 42, n. 12, p. 13333–13338, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884216308240>>. Acesso em: 1 abr. 2019.
- ARCARO, Sabrina et al. Thermal Insulating Foams Produced From Glass Waste and Banana Leaves. **Materials Research**, Florianópolis, v. 19, n. 5, p. 1064–1069, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392016000501064&lng=en&tng=en>. Acesso em: 17 out. 2018.
- ASTM C143M. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. **ASTM International**, West Conshohocken, n. 1, p. 1–4, 2015.
- ASTM C150. Standard Specification for Portland Cement. **ASTM International**, West Conshohocken, v. 552, n. d, p. 1–9, 2012.
- ASTM E112. Standard test methods for determining average grain size. **ASTM International**, West Conshohocken, p. 1–28, 2013.
- ATHANASOPOULOS - ZEKOS, A.; LAMOTE, K.; ATHANASOPOULOS, G. A. Use of EPS geof foam compressible inclusions for reducing the earthquake effects on yielding earth retaining structures. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, Ann Arbor, v. 41, p. 59–71, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.05.004>>. Acesso em: 30 jun. 2018.

- BAKAR, Rohani Abu; YAHYA, Rosiyah; GAN, Seng Neon. Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk. **Procedia Chemistry**, Kuala Lumpur, v. 19, p. 189–195, 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876619616001388>>. Acesso em: 18 mar. 2018.
- BELIE, Nele De; SOUTSOS, Marios; GRUYAERT, Elke. **Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials**. Cham: Springer International Publishing, 2018. v. 25 Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-70606-1>>
- BENATTI, Larissa Barbieri; AZAMBUJA, Maximiliano Dos Anjos. Reciclagem de vidro como alternativa para concreto. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, São Paulo, v. 4, n. 26, p. 16–27, 2016. Disponível em: <https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/gerenciamento_de_cidades/article/view/1341>. Acesso em: 15 maio. 2019.
- BERNARDO, E. et al. Sintered Glass-Ceramics and Glass-Ceramic Matrix Composites from CRT Panel Glass. **Journal of the American Ceramic Society**, [s. l.], v. 88, n. 7, p. 1886–1891, 2005.
- BERNARDO, E. et al. Reutilization and stabilization of wastes by the production of glass foams. **Ceramics International**, Venezia, v. 33, n. 6, p. 963–968, 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884206000964>>. Acesso em: 15 nov. 2018.
- BERNARDO, Enrico; ALBERTINI, Francesca. Glass foams from dismantled cathode ray tubes. **Ceramics International**, Padova, v. 32, n. 6, p. 603–608, 2006.
- BERNARDO, Enrico; SCARINCI, Giovanni; HREGLICH, Sandro. Foam glass as a way of recycling glasses from cathode ray tubes. *Glass Sci. Technol. (Glastechnische Berichte)*. **Glass science and technology**, Padova, v. 78, n. 1, p. 7–11, 2005.
- BIGNOZZI, M. C. et al. Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition. **Cement and Concrete Composites**, Bologna, v. 55, p. 45–52, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946514001383>>. Acesso em: 30 maio. 2018.
- BINHUSSAIN, Mohammed A. et al. Sintered and glazed glass-ceramics from natural and waste raw materials. **Ceramics International**, Pennsylvania, v. 40, n. 2, p. 3543–3551, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.09.074>>. Acesso em: 15 fev. 2016.
- BLISSETT, R. et al. Valorisation of rice husks using a TORBED® combustion process. **Fuel Processing Technology**, Leeds, v. 159, p. 247–255, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.01.046>>. Acesso em: 20 nov. 2018.
- BRAGANÇA, S. R.; BERGMANN, C. P. Traditional and glass powder porcelain: Technical and microstructure analysis. **Journal of the European Ceramic Society**, Porto Alegre, v. 24, n. 8, p. 2383–2388, 2004. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221903007155>>. Acesso em: 15 maio. 2015.
- BROW, Richard K.; SCHMITT, Melodie L. A survey of energy and environmental

applications of glass. **Journal of the European Ceramic Society**, Rolla, v. 29, n. 7, p. 1193–1201, 2009. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095522190800438X>>. Acesso em: 15 maio. 2015.

CAVALCANTE, R. F. et al. Utilização do resíduo da extração de esmeraldas em uma formulação de massa de revestimento cerâmico. **Cerâmica**, Belo Horizonte, v. 58, n. 346, p. 158–164, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132012000200005&lng=pt&lng=pt>. Acesso em: 2 jan. 2015.

CHUANG, Kui-hao et al. Reuse of bottom ash and fly ash from mechanical-bed and fluidized-bed municipal incinerators in manufacturing lightweight aggregates. **Ceramics International**, Taichun, v. 44, n. 11, p. 12691–12696, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.070>>. Acesso em: 15 mar. 2019.

DA, Silva et al. Glass foams produced from glass and yerba mate (*Ilex paraguayensis*) waste. **FME Transaction**, Porto Alegre, v. 46, n. 1, p. 70–79, 2018. Disponível em: <<http://scindeks.ceon.rs/Article.aspx?artid=1451-20921801070d>>. Acesso em: 5 mar. 2019.

DE JUAN, Marta Sánchez; GUTIÉRREZ, Pilar Alaejos. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, Madrid, v. 23, n. 2, p. 872–877, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012>>. Acesso em: 1 out. 2018.

DE MORAES, E. G. et al. Vitrocrystalline foams produced with EPS as pore former: Processing and characterization. **Process Safety and Environmental Protection**, Florianópolis, v. 121, p. 12–19, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582018310152>>. Acesso em: 3 nov. 2018.

DELLA, Viviana Possamai et al. Estudo comparativo entre sílica obtida por lixívia ácida da casca de arroz e sílica obtida por tratamento térmico da cinza de casca de arroz. **Química Nova**, Santa Catarina, v. 29, n. 6, p. 1175–1179, 2006.

DELLA, Viviana Possamai; KÜHN, Ingeborg; HOTZA, Dachamir. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Química Nova**, Florianópolis, v. 24, n. 6, p. 778–782, 2001.

ELICHE-QUESADA, D. et al. Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash in sustainable clay matrix bricks. **Ceramics International**, Malaga, v. 43, n. 1, p. 463–475, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.181>>. Acesso em: 25 maio. 2018.

EMBRAPA. 2018.

FAÉ GOMES, Gabriel M. et al. Rice husk bubbling fluidized bed combustion for amorphous silica synthesis. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Cachoeirinha, v. 4, n. 2, p. 2278–2290, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213343716301282>>. Acesso em: 20 mar. 2019.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M.; BEJA, A. I. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. In: **ISAIA, G. C. 3º.Ed. Agregados para construção civil**. v.I. Cap. 16. p.495 - 537. São Paulo: IBRACON, 2017.

FERNANDES, H. R.; TULYAGANOV, D. U.; FERREIRA, J. M. F. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents. **Ceramics International**, Tashkent, v. 35, n. 1, p. 229–235, 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884207003914>>. Acesso em: 12 jun. 2018.

FERNANDES, Hugo R. et al. Environmental friendly management of CRT glass by foaming with waste egg shells, calcite or dolomite. **Ceramics International**, Aveiro, v. 40, n. 8, p. 13371–13379, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.05.053>>. Acesso em: 18 jul. 2018.

FOLETTTO, Edson Luiz et al. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química Nova**, Santa Maria - RS, v. 28, n. 6, p. 1055–1060, 2005.

FRONDISTOU YANNAS. Waste Concrete as aggregate for new concrete. **AC1 Journal, Proc.**, London, v. 74, n. 8, p. 373–376, 1977.

GEETHA, D.; ANANTHIAND, A.; RAMESH, PS. Preparation and Characterization of Silica Material from Rice Husk Ash- An Economically Viable Method. **Chemistry and Materials Research**, Tamilnadu, v. 8, n. 6, p. 20–26, 2016.

GILL, Anhad Singh; SIDDIQUE, Rafat. Durability properties of self-compacting concrete incorporating metakaolin and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, Patiala, v. 176, p. 323–332, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.054>>. Acesso em: 2 maio. 2019.

GOMES, Paulo César Correia et al. Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados. **Ambiente Construído**, Maceió, v. 15, n. 3, p. 31–46, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212015000300031&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 26 abr. 2019.

GONÇALVES, Camila Da Silva et al. Production of vitreous materials from mineral coal bottom ash to minimize the pollution resulting from the waste generated by the thermoelectrical industry. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, Florianopolis, v. 57, n. 4, p. 142–150, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0366317517301000>>. Acesso em: 28 out. 2018.

GONÇALVES, J. P. et al. Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. **Cement and Concrete Research**, Rio de Janeiro, v. 37, n. 6, p. 924–932, 2007. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884607000774>>. Acesso em: 15 maio. 2017.

GONÇALVES, M. R. F.; BERGMANN, C. P. Thermal insulators made with rice husk ashes: Production and correlation between properties and microstructure. **Construction and Building Materials**, Pelotas, v. 21, n. 12, p. 2059–2065, 2007. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061806002248>>. Acesso em: 15 fev. 2015.

GONG, Y. et al. Recycling of waste amber glass and porcine bone into fast sintered and high strength glass foams. **Journal of Cleaner Production**, New York, v. 112, p. 4534–4539, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.052>>. Acesso em: 15 set. 2018.

HAMMEL, E. C.; IGHODARO, O. L.; OKOLI, O. I. Processing and properties of advanced porous ceramics: An application based review. **Ceramics International**,

Tallahassee, v. 40, n. 10, p. 15351–15370, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.095>>. Acesso em: 1 maio. 2016.

HAN, Yosep; KIM, Hyunjung; PARK, Jaikoo. Fabrication and characterization of macroporous flyash ceramic pellets. **Materials Characterization**, Seongdong-gu, v. 62, n. 9, p. 817–824, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2011.05.014>>. Acesso em: 22 abr. 2019.

HANIF, Asad et al. Early-age behavior of recycled aggregate concrete under steam curing regime. **Journal of Cleaner Production**, Kowloon, v. 152, p. 103–114, 2017. a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.107>>. Acesso em: 9 maio. 2019.

HANIF, Asad et al. Influence of cement and aggregate type on steam-cured concrete – an experimental study. **Magazine of Concrete Research**, Kowloon, v. 69, n. 13, p. 694–702, 2017. b. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/jmacr.17.00015>>. Acesso em: 9 maio. 2019.

HORPIBULSUK, Suksun et al. Factors influencing unit weight and strength of lightweight cemented clay. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, London, v. 47, n. 1, p. 101–109, 2014. Disponível em: <<http://qjgeh.lyellcollection.org/lookup/doi/10.1144/qjgeh2012-069>>. Acesso em: 1 fev. 2019.

HU, Anmin; LI, Ming; MAO, Dali. Controlled crystallization of glass–ceramics with two nucleating agents. **Materials Characterization**, Shanghai Jiaotong, v. 60, n. 12, p. 1529–1533, 2009.

HUANG, Huanghuang et al. Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, Harbin, v. 149, p. 621–628, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.155>>. Acesso em: 8 maio. 2019.

HWANG, Chao-lung; HUYNH, Trong-phuoc. Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, Viet Nam, v. 101, p. 1–9, 2015.

IBGE. **SAFRA DE ARROZ 2017 - PREVISÃO**. 2017.

ISAIA., G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia. In: ISAIA, G. C. Concreto: ciência e tecnologia. v.II. Cap. 47. p.1731-1767. São Paulo: IBRACON, 2011.

JAMES, Jose; SUBBA RAO, M. Reaction product of lime and silica from rice husk ash. **Cement and Concrete Research**, India, v. 16, n. 1, p. 67–73, 1986. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0008884686900694>>

JOHN, V. M. **Concreto sustentável**. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. v.II. São Paulo: IBRACON, 2011.

KALAPATHY, U.; PROCTOR, A.; SHULTZ, J. An improved method for production of silica from rice hull ash. **Bioresource Technology**, Arkansas, v. 85, n. 3, p. 285–289, 2002. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852402001165>>. Acesso em: 12 abr. 2014.

KHAN, M. N. N. et al. Filler effect of pozzolanic materials on the strength and microstructure development of mortar. **KSCE Journal of Civil Engineering**,

Kebangsaan, v. 21, n. 1, p. 274–284, 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12205-016-0737-5>>. Acesso em: 15 maio. 2018.

KIM, Yongjae et al. Properties enhancement of recycled aggregate concrete through pretreatment of coarse aggregates – Comparative assessment of assorted techniques. **Journal of Cleaner Production**, Gangwon-do, v. 191, p. 339–349, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.192>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

KÖNIG, Jakob; PETERSEN, Rasmus R.; YUE, Yuanzheng. Influence of the glass–calcium carbonate mixture’s characteristics on the foaming process and the properties of the foam glass. **Journal of the European Ceramic Society**, Ljubljana, v. 34, n. 6, p. 1591–1598, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.12.020>>. Acesso em: 15 fev. 2016.

KÖNIG, Jakob; PETERSEN, Rasmus R.; YUE, Yuanzheng. Fabrication of highly insulating foam glass made from CRT panel glass. **Ceramics International**, Ljubljana, v. 41, n. 8, p. 9793–9800, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.04.051>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

KOPP ALVES, Annelise; BERGMANN, Carlos P.; BERUTTI, Felipe Amorim. **Novel Synthesis and Characterization of Nanostructured Materials**. Berlin, Heidelberg, Heidelberg, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-41275-2>>

KRALJ, Davorin. Experimental study of recycling lightweight concrete with aggregates containing expanded glass. **Process Safety and Environmental Protection**, Primorska, v. 87, n. 4, p. 267–273, 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582009000214>>. Acesso em: 30 maio. 2018.

LAUTENSACK, C. et al. Modelling a ceramic foam using locally adaptable morphology. **Journal of Microscopy**, Darmstadt, v. 230, n. 3, p. 396–404, 2008. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2818.2008.01998.x>>. Acesso em: 15 maio. 2018.

LE, Ha Thanh; LUDWIG, Horst-michael. Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete. **Materials & Design**, Weimar, v. 89, p. 156–166, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127515305293>>. Acesso em: 22 set. 2017.

LEE, Hyeonggi et al. Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material. **Journal of Cleaner Production**, Gyeongsangnam-do, v. 170, p. 683–693, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.133>>. Acesso em: 9 maio. 2019.

LEE, Ting; OTHMAN, Radzali; YEOH, Fei-ye. Development of photoluminescent glass derived from rice husk. **Biomass and Bioenergy**, Penang, v. 59, p. 380–392, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.028>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

LI, Xiang-Guo et al. Decomposition kinetic characteristics of calcium carbonate containing organic acids by TGA. **Arabian Journal of Chemistry**, Wuhan, v. 10, p. S2534–S2538, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1878535213003249>>. Acesso em: 15 jun. 2015.

- LI, Y. et al. Fabrication of cordierite foam ceramics using direct foaming and slip casting method with plaster moulds. **Advances in Applied Ceramics**, Anhui 230027, v. 114, n. 8, p. 465–470, 2015. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743676115Y.0000000022>>. Acesso em: 20 abr. 2019.
- LIMBACHIYA, Mukesh; MEDDAH, Mohammed Seddik; FOTIADOU, Soumela. Performance of granulated foam glass concrete. **Construction and Building Materials**, London, v. 28, n. 1, p. 759–768, 2012. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061811006015>>. Acesso em: 25 mar. 2016.
- LIU, Mingwei; XU, Guoren; LI, Guibai. Effect of the ratio of components on the characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment. **Process Safety and Environmental Protection**, Jilin, v. 105, p. 109–116, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2016.10.018>>. Acesso em: 26 dez. 2018.
- LORENZETT, Daniel Benitti; NEUHAUS, Mauricio; SCHWAB, Natalia Teixeira. GESTÃO DE RESÍDUOS E A INDÚSTRIA DE BENEFICIAMENTO DE ARROZ. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 8, n. 1, p. 219–232, 2012. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/revistagi/article/view/838>>. Acesso em: 25 maio. 2014.
- LOW, Norman M. P. Formation of cellular-structure glass with carbonate compounds and natural mica powders. **Journal of Materials Science**, Montreal, v. 16, n. 3, p. 800–808, 1981. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF02402798>>. Acesso em: 15 jan. 2019.
- LU, Jian-xin; DUAN, Zhen-hua; POON, Chi Sun. Fresh properties of cement pastes or mortars incorporating waste glass powder and cullet. **Construction and Building Materials**, 21/03/2019, v. 131, p. 793–799, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.011>>. Acesso em: 25 jun. 2018.
- MADANDOUST, R. et al. Mechanical properties and durability assessment of rice husk ash concrete. *Biosystems Engineering*, v. 110, n. 2, p. 144–152, out. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.07.009>>. Acesso em: 22 out. 2019.
- M. SCHEFFLER; P. COLOMBO. Front Matter. In: **Cellular Ceramics**. Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. p. I–XXV.
- MEAR, François et al. Characterisation of porous glasses prepared from Cathode Ray Tube (CRT). **Powder Technology**, Paris, v. 162, n. 1, p. 59–63, 2006. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S003259100500553X>>. Acesso em: 13 maio. 2019.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedade e Materiais**. São Paulo.
- MISTRY, Bhavna. Properties and Industrial Applications of Rice husk: A review. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, India, v. 6, n. 10, p. 2677–2679, 2016.
- MODARRES, Amir; HOSSEINI, Zeinab. Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. **Materials & Design**, Babol, v. 64, p. 227–236, 2014. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.072>>. Acesso em: 15 dez. 2018.

MOLAEI RAISI, Elias; VASEGHI AMIRI, Javad; DAVOODI, Mohammad Reza. Mechanical performance of self-compacting concrete incorporating rice husk ash. **Construction and Building Materials**, Babol, v. 177, p. 148–157, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.053>>. Acesso em: 4 mar. 2019.

MONTANARO, L. et al. Ceramic foams by powder processing. **Journal of the European Ceramic Society**, Torino, v. 18, n. 9, p. 1339–1350, 1998. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221998000636>>. Acesso em: 15 maio. 2019.

MORAES, Carlos A. M. et al. Review of the rice production cycle: By-products and the main applications focusing on rice husk combustion and ash recycling. **Waste Management & Research**, São Leopoldo, v. 32, n. 11, p. 1034–1048, 2014. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X14557379>>. Acesso em: 30 abr. 2017.

MORAIS, Aline Sardinha Cordeiro et al. Characterization of Fluorescent Lamp Glass Waste Powders. **Materials Science Forum**, Campos dos Goytacazes, v. 727–728, p. 1579–1584, 2012.

MUGONI, C. et al. Design of glass foams with low environmental impact. **Ceramics International**, Padova, v. 41, n. 3, p. 3400–3408, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.127>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

MÜLLER, Harald S. et al. Design and Properties of Sustainable Concrete. **Procedia Engineering**, Karlsruhe, v. 95, n. Scescm, p. 290–304, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.189>>. Acesso em: 15 maio. 2019.

MÜLLER, Ralf. Surface nucleation in cordierite glass. **Journal of Non-Crystalline Solids**, Berlin, v. 219, p. 110–118, 1997. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022309397003207>>. Acesso em: 18 abr. 2018.

NAKSHINIEV, Bakhtiyor et al. Evaluation of hydrothermal treatment in enhancing rice straw compost stability and maturity. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 151, p. 306–313, 2014. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852413016702>>. Acesso em: 15 maio. 2015.

NARUD, Torben C. Hansen and Henrik. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. **ACI, Concrete International, Design and Construction**, Stoholm, v. 5, n. 1, p. 79–83, 1983.

NASCIMENTO, Guilherme Colle et al. Caracterização físico-química da cinza de casca de arroz oriunda do processo termelétrico do sul de Santa Catarina - Brasil. **Ciência e Natura**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 634, 2015.

OTA, R. et al. Glass formation and crystallization in $\text{Li}_2\text{O}\square\text{Na}_2\text{O}\square\text{K}_2\text{O}\square\text{SiO}_2$. **Journal of Non-Crystalline Solids**, Kyoto, v. 188, n. 1–2, p. 136–146, 1995. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022309395001859>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

PARK, Ki-Bong; KWON, Seung-Jun; WANG, Xiao-Yong. Analysis of the effects of rice husk ash on the hydration of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, Republic of Korea, v. 105, p. 196–205, 2016.

PARK, Seung-Bum; LEE, Bong-Chun. Studies on expansion properties in mortar

containing waste glass and fibers. **Cement and Concrete Research**, Daejeon, v. 34, n. 7, p. 1145–1152, 2004. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884603004277>>. Acesso em: 15 maio. 2015.

PETERSEN, Rasmus R.; KÖNIG, Jakob; YUE, Yuanzheng. The viscosity window of the silicate glass foam production. **Journal of Non-Crystalline Solids**, [s. l.], v. 456, p. 49–54, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.10.041>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

PODE, Ramchandra. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Seoul, v. 53, p. 1468–1485, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.051>>. Acesso em: 25 jan. 2019.

POKORNY, A.; VICENZI, J.; BERGMANN, C. P. Influência da adição de alumina na microestrutura da espuma vítrea. **Cerâmica**, Porto Alegre, v. 54, n. 329, p. 97–102, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132008000100014&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 15 jun. 2016.

POKORNY, Andrea. **Aditivação Por Óxidos De Agente Espumante À Base De Calcário Dolomítico Sintético E Seu Efeito Na Formação Da Microestrutura De Espumas Vítreas a Partir De Resíduo De Vidro Sodocálcico**. 2011. 107 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/38963>>. Acesso em: 15 maio. 2014.

POKORNY, Andrea; VICENZI, Juliane; PÉREZ BERGMANN, Carlos. Influence of heating rate on the microstructure of glass foams. **Waste Management & Research**, Porto Alegre, v. 29, n. 2, p. 172–179, 2011. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X10364209>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

PRASARA-A, Jittima; GHEEWALA, Shabbir H. Sustainable utilization of rice husk ash from power plants: A review. **Journal of Cleaner Production**, Mahasarakham, v. 167, p. 1020–1028, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.042>>. Acesso em: 3 fev. 2019.

QUINA, Margarida J.; BORDADO, João M.; QUINTA-FERREIRA, Rosa M. Recycling of air pollution control residues from municipal solid waste incineration into lightweight aggregates. **Waste Management**, Coimbra, v. 34, n. 2, p. 430–438, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.029>>. Acesso em: 29 jun. 2019.

RAMAMURTHY, K.; KUNHANANDAN NAMBIAR, E. K.; INDU SIVA RANJANI, G. A classification of studies on properties of foam concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 6, p. 388–396, jul. 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>>. Acesso em: 22 out. 2019.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. São Paulo: PINE, 2009.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Concreto leve estrutural. In: ISAIA, G. C. Concreto: ciência e tecnologia. In: **Concreto: ciência e tecnologia**. v.II. Cap. 42. p.1531-1568.São Paulo: IBRACON, 2011.

SALEM ALSANUSI; LOUBNA BENTAHER. Prediction of Compressive Strength of Concrete from Early Age Test Result Using Design of Experiments (RSM). **International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering**, Dhaka, v. 9, n. 12, p. 1522–1526, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/258255627_Prediction_of_compressive_strength_of_concrete_from_early_age_test_result>. Acesso em: 27 abr. 2019.

SALES, Angela Teresa Costa; ALFERES FILHO, Ricardo dos Santos. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Ambiente Construído**, São Cristovão, v. 14, n. 1, p. 113–125, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212014000100010&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 20 maio. 2019.

SANTOS, William J. Caracterização de vidros planos transparentes comerciais. **SCIENTIA PLENA**, Criciúma, v. 5, n. 2, p. 1–5, 2009. Disponível em: <www.scientiaplenu.org.br>. Acesso em: 15 fev. 2016.

SCHABBACH, L. Maccarini et al. Integrated approach to establish the sinter-crystallization ability of glasses from secondary raw material. **Journal of Non-Crystalline Solids**, Modena, v. 357, n. 1, p. 10–17, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.10.006>>. Acesso em: 20 mar. 2016.

SHAO, Yixin et al. Studies on concrete containing ground waste glass. **Cement and Concrete Research**, Quebec, v. 30, n. 1, p. 91–100, 2000. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884699002136>>. Acesso em: 18 mar. 2019.

SHARMA, Raju; BANSAL, Prem Pal. Use of different forms of waste plastic in concrete – a review. **Journal of Cleaner Production**, Mohali, v. 112, p. 473–482, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.042>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

SHEN, Yafei; ZHAO, Peitao; SHAO, Qinfu. Porous silica and carbon derived materials from rice husk pyrolysis char. **Microporous and Mesoporous Materials**, [s. l.], v. 188, p. 46–76, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.01.005>>

SHI, Caijun et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review. **Journal of Cleaner Production**, Guangzhou, v. 112, p. 466–472, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>>. Acesso em: 9 maio. 2019.

SHINOHARA, Yasushi; KOHYAMA, Norihiko. Quantitative Analysis of Tridymite and Cristobalite Crystallized in Rice Husk Ash by Heating. **Industrial Health**, Kawasaki,

p. 277–285, 2004. Disponível em: <http://ricehuskash.com/papers/Articles_on_RHA/27.Silica_Content_of_RHA_-_040505.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2015.

SIDDIQUE, Rafat; KHAN, Mohammad Iqbal. **Supplementary Cementing Materials**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. v. 37 Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-17866-5>>

SNEHA, M. Design and Performance of Sustainable concrete. **International Journal of Applied Engineering Research**, Annamalainagar, v. 13, n. 12, p. 10681–10686, 2018. Disponível em: <<http://www.ripublication.com>>. Acesso em: 15 nov. 2018.

SOARES, Lech W. O. et al. The effect of rice husk ash as pozzolan in addition to cement Portland class G for oil well cementing. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, João Pessoa, v. 131, p. 80–85, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2015.04.009>>. Acesso em: 20 maio. 2017.

SOBROSA, F. Z. et al. Development of refractory ceramics from residual silica derived from rice husk ash. **Ceramics International**, Campus Alegrete, v. 43, n. 9, p. 7142–7146, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.02.147>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

SOUZA, Marcelo T. et al. Glass foams produced from glass bottles and eggshell wastes. **Process Safety and Environmental Protection**, Florianópolis, v. 111, p. 60–64, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.06.011>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

STEINER, Arjen Christian. Foam glass production from vitrified municipal waste fly ashes door. Eindhoven, p. 1–222, 2006.

STUDART, Andre R. et al. Processing Routes to Macroporous Ceramics: A Review. **Journal of the American Ceramic Society**, Zurich, v. 89, n. 6, p. 1771–1789, 2006. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1551-2916.2006.01044.x>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

SUSTAINABLE CARBON CLIMATE SOLUTIONS. **Casca de arroz é alternativa de combustível**. 2009.

TAN, Kiang Hwee; DU, Hongjian. Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties. **Cement and Concrete Composites**, Singapore, v. 35, n. 1, p. 109–117, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.028>>. Acesso em: 15 maio. 2017.

TCHAKOUTÉ, Hervé K. et al. Tchakouté et al. - 2016 - Comparison of metakaolin-based geopolymer cements from commercial sodium waterglass and sodium waterglass from.pdf. . 2016, 3, p. 492–506.

TEIXEIRA, L. B. et al. Vitrocrystalline foams produced from glass and oyster shell wastes. **Ceramics International**, Santa Catarina (UFSC), v. 43, n. 9, p. 6730–6737, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.02.078>>. Acesso em: 18 fev. 2019.

THOMAS, Blessen Skariah. Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kerala, v. 82, n. October 2017, p. 3913–3923, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.081>>. Acesso em: 5 maio. 2019.

TULYAGANOV, D. U. et al. Preparation and characterization of high compressive strength foams from sheet glass. **Journal of Porous Materials**, Aveiro, v. 13, n. 2, p.

133–139, 2006. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10934-006-7014-9>>. Acesso em: 20 dez. 2018.

UMAMAHESWARAN, K.; BATRA, Vidya S. Physico-chemical characterisation of Indian biomass ashes. **Fuel**, New Delhi, v. 87, n. 6, p. 628–638, 2008. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236107002827>>. Acesso em: 20 fev. 2015.

UMASABOR, R. I.; OKOVIDO, J. O. Fire resistance evaluation of rice husk ash concrete. **Heliyon**, Benin, v. 4, n. 12, p. e01035, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e01035>>. Acesso em: 2 maio. 2019.

VASSILEV, Stanislav V. et al. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. **Fuel**, Petten, v. 105, p. 40–76, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.041>>. Acesso em: 15 jun. 2019.

VETTA. **Carnonato precipitado**. 2017.

VIEIRA, C. M. F. et al. Teste industrial de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de vidro de lâmpada fluorescente. **Cerâmica**, Campos dos Goytacazes, v. 62, n. 364, p. 376–385, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132016000400376&lng=pt&nrm=iso&tlng=en%0Ahttp://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132016000400376&lng=pt&tlng=pt>

VISHWAKARMA, Vinita et al. Studies of rice husk ash nanoparticles on the mechanical and microstructural properties of the concrete. **Materials Today: Proceedings**, Tamil Nadu, v. 3, n. 6, p. 1999–2007, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.102>>. Acesso em: 18 set. 2018.

XIAO, Jianzhuang. **Recycled Aggregate Concrete Structures**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-53987-3>>

YADAV, S. R.; PATHAK, S. R. Use of Recycled Concrete Aggregate in Making Concrete- an Overview. In: 34TH CONFERENCE ON OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES: 16 – 18 AUGUST 2009, SINGAPORE USE 2009, Singapore. **Anais...** Singapore Disponível em: <<http://cipremier.com/100034047%0AThis>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

ZHANG, Qiuping et al. Preparation of high strength glass ceramic foams from waste cathode ray tube and germanium tailings. **Construction and Building Materials**, Wuhan, v. 111, p. 105–110, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816300368>>. Acesso em: 27 abr. 2019.

ZHU, Mengguang et al. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass. **Construction and Building Materials**, Beijing, v. 112, p. 398–405, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816302410>>. Acesso em: 27 ago. 2017.

ZILLI, M. et al. Production and characterisation of ceramic foams from industrial solid waste. **Chemical Engineering Transactions**, Florianópolis, v. 43, 2015.