



HENRIQUE ALVES SANTOS

**PRODUÇÃO DE ESPUMAS DE VIDRO A PARTIR DE CASCAS DE ARROZ
E VIDROS RECICLADOS**

LAVRAS - MG

2022

HENRIQUE ALVES SANTOS

**PRODUÇÃO DE ESPUMAS DE VIDRO A PARTIR DE CASCAS DE ARROZ
E VIDROS RECICLADOS**

Monografia apresentado à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do
Curso de Engenharia de
Materiais, para obtenção do título
de Bacharel.

Prof. Dra. Camila Soares Fonseca

Orientadora

Prof. Dr. Leonardo Sant'Ana Gallo

Coorientador

Lavras - MG

2022

HENRIQUE ALVES SANTOS

**PRODUÇÃO DE ESPUMAS DE VIDRO A PARTIR DE CASCAS DE ARROZ
E VIDROS RECICLADOS**

**PRODUCTION OF GLASS FOAM FROM RICE HUSK AND RECYCLED
GLASS**

Monografia apresentado à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do
Curso de Engenharia de
Materiais, para obtenção do título
de Bacharel.

APROVADO em 12 de setembro de 2022

Prof. Dra. Camila Sorares Fonseca UFLA

Prof. Dr. Leonardo Sant'Ana Gallo UFLA

Prof. Dra. Jéssica de Oliveira Notório Ribeiro UFLA

Prof. Dra. Camila Soares Fonseca

Orientadora

Prof. Dr. Leonardo Sant'Ana Gallo

Coorientador

Lavras - MG

2022

RESUMO

A casca de arroz e a garrafa de vidro são resíduos gerados em elevado volume no Brasil, sendo excelentes fontes de sílica, o emprego destes resíduos como matéria prima para produção de materiais cerâmicos apresenta-se com grande potencial. Nesse contexto, o objetivo desse projeto é produzir e analisar as propriedades físicas, térmicas e mecânicas das espumas de vidro produzidas a partir de resíduos de garrafa de vidro e casca de arroz. Para a produção das espumas de vidro as garrafas de vidro e casca de arroz foram fragmentadas até ter passantes em peneira de 65 mesh, em seguida foram homogeneizados em agitador mecânico e prensados à 35,45 MPa (5,5 ton), levados ao forno tipo mufla à 900°C durante 2 horas. As cascas de arroz passaram por análise química e análise termogravimétrica. As espumas de vidro foram caracterizadas com relação a sua porosidade, absorção de água, tamanho de poros, isolamento térmico e resistência à compressão. As análises químicas demonstraram que os elementos pré e pós queima da casca de arroz é benéfica para o intuito do projeto, sua porosidade média foi de $78,51 \pm 1,25\%$, sua absorção de água é de em média $182 \pm 25\%$, com presença de macroporos, condutividade térmica entre 0,37 e 0,43 (W/m°C) e com baixa resistência à compressão, que variou entre 0,04 e 0,16 MPa. Conclui-se que o material tem grande potencial para ser aplicado como revestimento no intuito de isolamento térmico, onde a solicitação mecânica for pequena ou nula, sendo então uma alternativa sustentável ao “Foamglas”.

Palavras-chave: resíduo; vidro de garrafa; casca de arroz; espuma de vidro.

ABSTRACT

Rice husk and glass bottle are waste generated in high volume in Brazil, being excellent sources of silica, the use of these residues as raw material to produce ceramic materials has great potential. In this context, the project aims to produce and analyze the physical, thermal and mechanical properties of glass foams produced from waste glass bottles and rice husks. To produce the glass foams, the glass bottles and rice husk got reduced until they could pass through a 65-mesh sieve, then blended in a mechanical stirrer and pressed at 35,45 MPa (5,5 ton), and finally put in the muffle furnace, at 900°C for two hours. The rice husk underwent chemical analysis and thermogravimetric analysis. Glass foams were characterized in terms of their porosity, water absorption, pore size, thermal insulation and compressive strength. The chemical analyzes showed that the pre and post burning elements of the rice husk is beneficial for the purpose of the project, its average porosity was $78.51 \pm 1.25\%$, its water absorption is on average $182 \pm 25\%$, with the presence of macropores, thermal conductivity between 0.37 and 0.43 (W/m°C) and with low compressive strength, which varied between 0.04 and 0.16 MPa. It is concluded that the material has great potential to be applied as a coating for thermal insulation, where the mechanical demand is small or null, thus being a sustainable alternative to "Foamglas".

Keywords: residues; glass bottles; rice husk; glass foam.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Resumo em Fluxograma dos Processos	9
Figura 2 -	Materiais utilizados: (A) Casca de arroz; (B) Garrafa de vidro	9
Figura 3 -	Fluxograma de obtenção dos pós de vidro e casca de arroz	11
Figura 4 -	Massa de matriz de vidro com casca de arroz	12
Figura 5 -	Obtenção dos corpos de prova para sintetização e obtenção das espumas de vidro	12
Figura 6 -	a) Espumas de vidro coalescidas; b) Espumas de vidro separadas	13
Figura 7 -	Equipamento de análise térmica; b) Lâmpada da câmara inferior; c) Termopar câmara inferior; d) Amostra, molde e termopar da câmara superior.....	15
Figura 8 -	a) Vista superior máquina de ensaio e amostra; b) Vista lateral máquina de ensaio e amostra	16
Figura 9 -	a) Poros internos CP1; b) Poros superficiais CP1	22
Figura 10 -	a) Poros internos CP3; b) Poros superficiais CP4	23
Figura 11 -	Corpos de prova após ensaio mecânico	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Quadro de suprimento nacional (base arroz em casca em milhões de toneladas)	6
Tabela 2 -	Relação mensal entre os volumes de arroz beneficiados e os resíduos gerados	7
Tabela 3 -	Normas e Estudos utilizados como referência para análise química	10
Tabela 4 -	Teor dos componentes	17

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -	TGA acompanhado de DTA da casca de arroz	18
Gráfico 2 -	Porosidade dos corpos de prova (ϵ)	20
Gráfico 3 -	Absorção de Água (%AA)	21
Gráfico 4 -	Condutividade (λ)	24
Gráfico 5 -	Resistência a compressão (R_c)	25

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
2	REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1	Espumas de Vidro	4
2.2	Resíduos de Vidro	5
2.3	Arroz	6
2.4	Casca de Arroz	7
2.5	Espumas de Vidro Associadas a Resíduos	8
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	9
3.1	Materiais.....	9
3.2	Métodos.....	10
3.2.1	<i>Caracterização da casca de arroz</i>	10
3.2.1.1	<i>Análise química</i>	10
3.2.1.2	<i>Termogravimetria Analítica (TGA)</i>	10
3.2.2	<i>Produção das Espumas de Vidro</i>	11
3.2.3	<i>Caracterização das Espumas de Vidro</i>	12
3.2.3.1	<i>Análises Físicas</i>	13
3.2.3.1.1	Porosidade.....	13
3.2.3.1.2	Absorção de Água	14
3.2.3.2	<i>Microscopia Óptica Digital</i>	14

3.2.3.3	<i>Análise Térmica</i>	14
3.2.3.4	<i>Análises Mecânica</i>	15
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
4.1	Casca de Arroz	16
4.1.1	<i>Análise Química</i>	16
4.1.2	<i>Termogravimetria Analítica (TGA)</i>	18
4.2	Espuma de Vidro	19
4.2.1	<i>Porosidade</i>	19
4.2.2	<i>Absorção de Água</i>	21
4.2.3	<i>Microscopia Óptica Digital</i>	22
4.2.4	<i>Análise Térmica</i>	23
4.2.5	<i>Análise Mecânica</i>	25
5	CONCLUSÃO.....	27
6	REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

No levantamento da safra 2021/22 de produção de arroz, estimou-se que serão produzidos aproximadamente 11,79 milhões de toneladas de arroz no Brasil em 2022, no beneficiamento do cultivar, o cereal representa 66% em peso dos produtos obtidos na indústria e dos 34% restantes, 20,4% é a casca do arroz. Logo, temos no cenário industrial um montante de aproximadamente 2.36 milhões de toneladas de casca de arroz que será produzida somente no ano de 2022. (CONAB, 2021; Lorenzetti et al 2012.)

A casca de arroz é uma excelente fonte de sílica, que é um composto químico que pode ser encontrado na natureza puro ou na forma de minerais. Quando puro, encontra-se nas rochas de quartzo e areia, quando minerais, encontra-se em silicatos. (Tayeh, 2021.)

Outra fonte de sílica são os resíduos de garrafa de vidro. Esses resíduos podem ser reciclados diversas vezes e apresentam um potencial para aplicações como agente redutor de absorção de água em cerâmicas vermelhas, membrana para microfiltração e como matriz vítrea para confecção de espumas de vidro. O Brasil é um dos maiores produtores de vidro, porém a reciclagem dele é ainda muito precária, haja vista que os pontos de coleta são localizados em grandes centros, os valores das matérias primas são baixos, baixo interesse dos catadores e uma demanda elevada de iniciativas individuais para que empresas reutilizem ou reciclem os vidros. A economia energética com a reutilização e reciclagem do vidro pode chegar a valores de 4000 KJ/Kg de vidro produzido, logo seus estudos sobre o emprego deste resíduo é uma nova vertente para a economia. (Assis, 2006; Rosa et al, 2007; Teixeira et al, 2017; Zaccaron et al, 2016)

As espumas de vidro, citadas anteriormente, podem ser confeccionadas com a garrafa de vidro como matriz vítrea e cascas de arroz como agente porogênico, combinando assim os dois resíduos para produção de um produto. Estes materiais são altamente porosos. O emprego deste produto, devido suas propriedades, pode ter as mais diversas aplicações, as mais comuns são para isolamento térmico de paredes e tetos, pisos, lareiras, churrasqueiras e podem ser explorados também na engenharia de

tecidos com relação a liberação controlada. (Takahashi e Assis, 2008; Oliveira et al, 2007; Teixeira et al, 2017)

A espuma de vidro mais famosa utilizada comercialmente é de patente da empresa Owens Corning, produto denominado “Foamglas”, utilizado como revestimento para isolamento térmico de dutos, telhados, paredes e, em alguns casos, sob lajes. Para sua confecção são utilizados vidros virgens como matriz vítrea (sendo que na Europa, por apresentar maior mercado para esse material, pode-se utilizar até 66% de vidro reciclado) e “negro de fumo” como agente porogênico, este reage com o oxigênio no processo de sinterização, criando os poros do material. (Ryan et al, 2019; Zhang et al ,2020)

A reciclagem e reuso dos resíduos é, portanto, de suma importância econômica e ambiental para diminuir os impactos da poluição. Nesse contexto, o objetivo deste projeto é produzir uma espuma de vidro a partir de resíduos da agricultura (cascas de arroz) e resíduos de embalagens de vidro (garrafas de vidro) e analisar suas propriedades físicas, térmicas e mecânicas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Espumas de Vidro

As espumas de vidro são materiais com porosidade acima de 70%, não inflamáveis, com resistência química e mecânica entre (0,4 e 6 MPa) e com uma baixa condutividade térmica entre (0,04 e 0,08 W/m.K), logo podem ser aplicados como revestimentos para isolamento térmico e acústico, devido a essas propriedades (Kristály et al, 2020;Teixeira et al., 2017).

Há vários métodos para obtenção das espumas de vidro, as mais utilizadas são a fundição em gel, replicação de esponja polimérica, sinterização à alta pressão e utilizando agentes porogênico. Neste último método citado, são obtidas a partir da reação e decomposição de uma matéria prima (agente porogênico) distribuída o mais uniformemente possível na matriz de vidro, que pode ser de origem virgem ou residual. Esse agente porogênico, quando queimado, gera gases que deixam uma lacuna (bolhas ou espaços vazios) no material, formando assim uma espécie de espuma (material poroso) (da Silva et al., 2019).

A porosidade pode ser classificada como aberta (quando há uma interconectividade entre os poros, ausência de poros isolados), fechada (quando não há uma interconectividade entre os poros, presença de poros isolados) e mista (quando há interconectividade de alguns poros, podendo haver poros isolados dos demais) e, com relação ao seu tamanho, que pode ser microporos (menor que 2 nm), mesoporos (entre 2 e 50 nm) ou macroporos (acima de 50 nm) (Teixeira et al., 2017).

As características desses poros definem a aplicação que pode ser dada ao material, quando há uma alta relação de interconectividade desses poros, as espumas de vidro podem ser aplicadas para liberação controlada de feromônios e engenharia de tecidos, por exemplo. Quando há uma baixa ou ausente interconectividade de poros, pode ser utilizado para blocos estruturais, isolamento de tetos e paredes, pisos, lareiras e churrasqueiras, tendo uma excelente propriedade com relação sua densidade, que é muito baixa (Takahashi e Assis, 2008; Oliveira et al, 2007; Teixeira et al, 2017).

2.2 Resíduos de Vidro

O Brasil está incluído como um dos maiores produtores mundiais de vidro, tendo uma crescente que acompanha a economia do país. Falando apenas de vidro plano, em 2019 foram produzidos mais de 60 milhões de metros quadrados e na sua produção já é gerado muitos resíduos de vidro (de Azevedo et al, 2021).

O vidro pode ser definido como material amorfo resultante da fusão seguida de solidificação de mistura de materiais inorgânicos. As matérias primas mais comuns são sílica, barrilha, calcário e alumina. Os tipos mais comuns de vidro são: borossilicato, sodo-cáustico e quartzo (sílica fundida) (Tang, et al, 2021).

Os vidros podem ser classificados como planos (mais difundido), ocos (embalagens de garrafa de vidro, por exemplo) e técnicos ou especiais (aplicações aeronáuticas). As principais características do vidro são seu caráter inerte, transparência (dependendo da aplicação), possibilidade de reutilização e possibilidade de reciclagem. Na temática da reciclagem, os vidros apresentam elevada reciclabilidade, podendo ser considerada infinita (quando não contaminada, visto que apresenta boa inércia química), porém sua reciclagem ainda é pouco aplicada devido à dificuldade apresentada pela falta de centros de coleta, baixo valor das matérias primas e baixa coleta realizada por catadores (Rosa, 2007; Teixeira, 2017).

Os estudos para a reutilização e reciclagem de garrafas de vidro já se apresentam com maior fomento pelos pesquisadores para dar uma nova aplicação a estes materiais. O descarte das garrafas de vidro em ambientes domiciliares pode chegar à 7000 toneladas por mês na cidade de São Paulo (equivalente a 2% de todo resíduo sólido gerado na cidade de São Paulo) (Assis, 2006; Rosa, 2007).

As espumas de vidro são uma alternativa interessante para os resíduos de vidro de garrafa visto que por se tratar de um resíduo, há então uma fonte barata e tem também um apelo ambiental pela diminuição do volume de resíduos que seriam simplesmente descartados. Pelo tipo de aplicação de espumas de vidro ser, majoritariamente, como revestimentos, suas fontes de sucata de vidro são as mais variadas, não demandando de um tipo específico de vidro. (da Silva et al, 2019; Teixeira, 2017).

2.3 Arroz

O arroz é o segundo cereal mais produzido no planeta, ficando atrás somente do milho. Sendo consumido por mais da metade da população mundial, tem-se estimado que ocupa uma área plantada de, aproximadamente, 163 milhões de hectares, o equivalente à mesma quantia de campos de futebol (Coêlho, 2021; EMBRAPA, 2021).

Dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), teve para o levantamento da safra de arroz 2021/22 uma estimativa de produção nacional de 11,79 milhões de toneladas de arroz. A região Sul do Brasil apresenta a maior concentração de produção do grão (CONAB, 2021).

Na Tabela 1 é possível observar que o mercado do arroz no Brasil é ligeiramente estável, tendo uma pequena oscilação nas últimas safras devido à crise mundial enfrentada pela humanidade devido à pandemia do coronavírus, tendo então produções acima da casa de dezenas de milhões de toneladas.

Tabela 1. Quadro de suprimento nacional (base arroz em casca em milhões de toneladas)

	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22
Estoque Inicial	1,74	2,12	2,43	1,95	1,89	2,48
Produção	12,33	12,06	10,48	11,18	11,74	11,79
Importação	1,14	0,84	1,01	1,28	1,00	1,00
Consumo	12,21	10,79	10,54	10,71	11,00	11,00
Exportação	0,87	1,81	1,43	1,81	1,15	1,40
Estoque Final	2,12	2,43	1,95	1,89	2,49	2,87
Relação estoque/consumo	17%	23%	19%	18%	23%	26%

Fonte: CONAB 2021

2.4 Casca de Arroz

As cascas de arroz são um dos resíduos gerados da rizicultura, estima-se que 20% em peso de toda produção do cereal é correspondente ao resíduo. Sua constituição é de 75-90% de substâncias biológicas (lignina, celulose etc.) e o restante refere-se à minerais, em sua maioria, sílica (Tayeh, 2021).

Um estudo realizado por Lorenzetti et al (2012) em uma indústria de arroz na região sul do Brasil, comprovou a quantidade aproximada encontrada por Tayeh et al (2021) para os produtos e resíduos gerados por estas indústrias mensalmente conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2. Relação mensal entre os volumes de arroz beneficiados e os de resíduos gerados

PRODUTO / RESÍDUO	VALORES MENSAIS (Kg)	(%)
Arroz beneficiado	2.640,00	66,00
Quirera de arroz	200,00	5,00
Farelo de arroz	360,00	9,00
Casca de arroz	800,00	20,00
Cinzas da queima da casca de arroz	Volume não estimado	Volume não estimado
TOTAL (Arroz in natura)	4.000,00	100,00

Fonte: Lorenzetti et al (2012).

O destino dado a estas cascas é de 70% para consumo energético para o próprio beneficiamento do arroz, enquanto o excedente é descartado sem aproveitamento. Desconsiderando o arroz beneficiado, temos os itens, farelo, quirera e casca de arroz totalizando 34% de produtos que podem ser considerados resíduos sólidos. (Tayeh et al, 2021)

Tendo as cascas de arroz o valor mais expressivo de resíduos gerados (20%), como 70% das cascas de arroz são reaproveitadas pela empresa, sobraram 30% que equivalem a 240 Kg de casca de arroz descartadas mensalmente, evidenciando assim a problemática deste resíduo, por conseguinte um estudo acerca do aproveitamento do mesmo é de alto valor para a sustentabilidade, tendo em vista que além de ser o mais abundante resíduo é também o mais poluente por suas características de difícil degradação natural (Jittin et al, 2020; Lorenzetti et al, 2012).

Devido à crise energética e busca por alternativas de energia renovável, estas cascas de arroz, por serem uma parte dos resíduos da indústria agrícola e terem suas cinzas como uma fonte de vasta aplicabilidade tecnológicas, surge como opção de matéria prima para diferentes produtos, como produção de sílica pura, utilização da cinza para reforço de compostos poliméricos, produção de cimento e uso em concretos, uso da cinza como adsorventes, uso da cinza como suporte de catalizadores metálicos, síntese de zeólitas, produção de diferentes tipos de silicatos. Todavia, as cinzas das cascas vão apresentar majoritariamente a sílica, para que os processos listados acima possam ocorrer (Foletto et al, 2005).

2.5 Espumas de Vidro Associadas a Resíduos

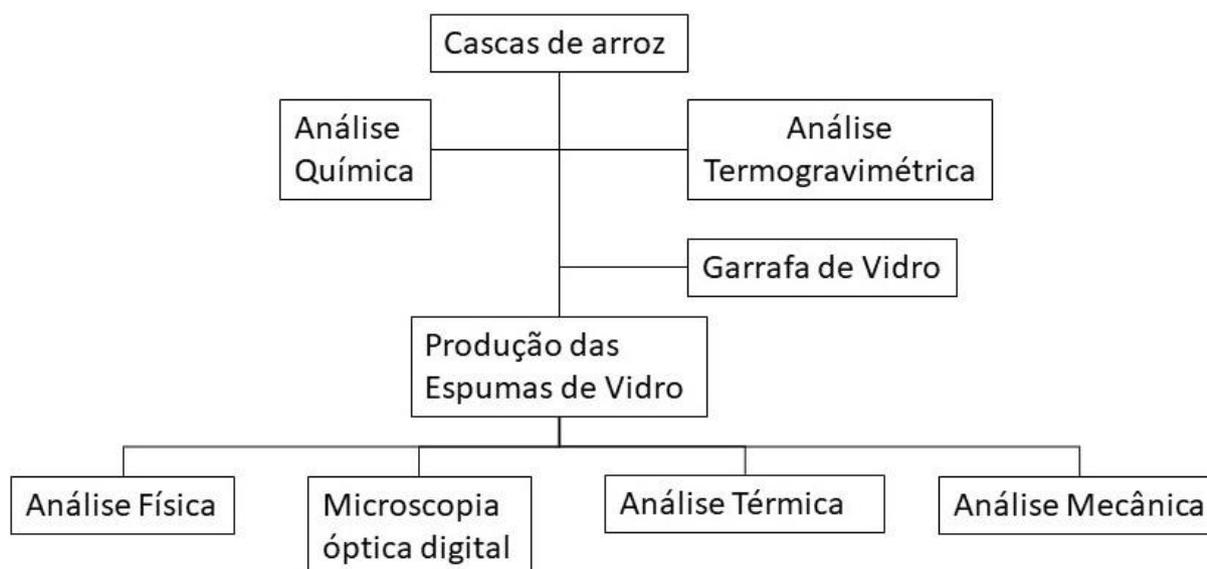
A produção das espumas de vidro a partir de resíduos já se apresenta com algumas alternativas sendo pesquisadas, no caso da matriz vítrea o vidro irá diferir apenas do tipo de fonte como garrafas ou janelas, por exemplo. Quanto ao agente porogênico, este é explorado comumente de fontes orgânicas, onde haverá a queima do material, liberando gás carbônico para formação dos poros. Outro método para formação dos poros é por oxirredução de elementos, onde há liberação de gás oxigênio (da Silva et al, 2019; Cruz et al, 2022).

São exemplos de resíduos usados como agente porogênico: Tabaco, cascas de arroz e baterias alcalinas descarregadas. No caso das baterias descarregadas, é extraído os elementos químicos presentes em seu interior, o anodo (fonte de zinco) e o catodo (fonte óxido de manganês e carbono) para reação química, formando os poros (Santos et al, 2019; Teixeira et al 2017; Cruz et al, 2022).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O fluxograma ilustrado na Figura 1 demonstra a sequência de eventos para realização deste trabalho.

Figura 1 – Resumo em Fluxograma dos Processos.



3.1 Materiais

Para a síntese da espuma de vidro foram utilizadas garrafas de vidro marrom (GV), e casca de arroz (CA) representadas na Figura 2.

Figura 2 – Materiais utilizados: (A) Casca de arroz; (B) Garrafa de vidro.



Fonte: Autor (2019)

3.2 Métodos

3.2.1 Caracterização da casca de arroz

3.2.1.1 Análise química

A análise química das cascas de arroz foi realizada a fim de quantificar o teor de cinzas presentes no material e complementarmente os outros componentes, isto é, lignina, celulose, hemicelulose, holocelulose e extrativos. Os teores mencionados, foram obtidos a partir das normas e estudos destacados na Tabela 3, adaptando os volumes utilizados.

Tabela 3. Normas e Estudos utilizados como referência para análise química

Constituintes	Norma / Estudo
Cinzas	NBR 13999 (ABNT, 2003)
Extrativos Totais	Adaptado – NBR 14853 (ABNT, 2010)
Lignina Insolúvel	NBR 7989 (ABNT, 2010)
Holocelulose	Adaptado – Browning (1963)
Celulose	Kennedy, Philips e Willians (1987)
Hemicelulose	(= Holocelulose – Celulose)

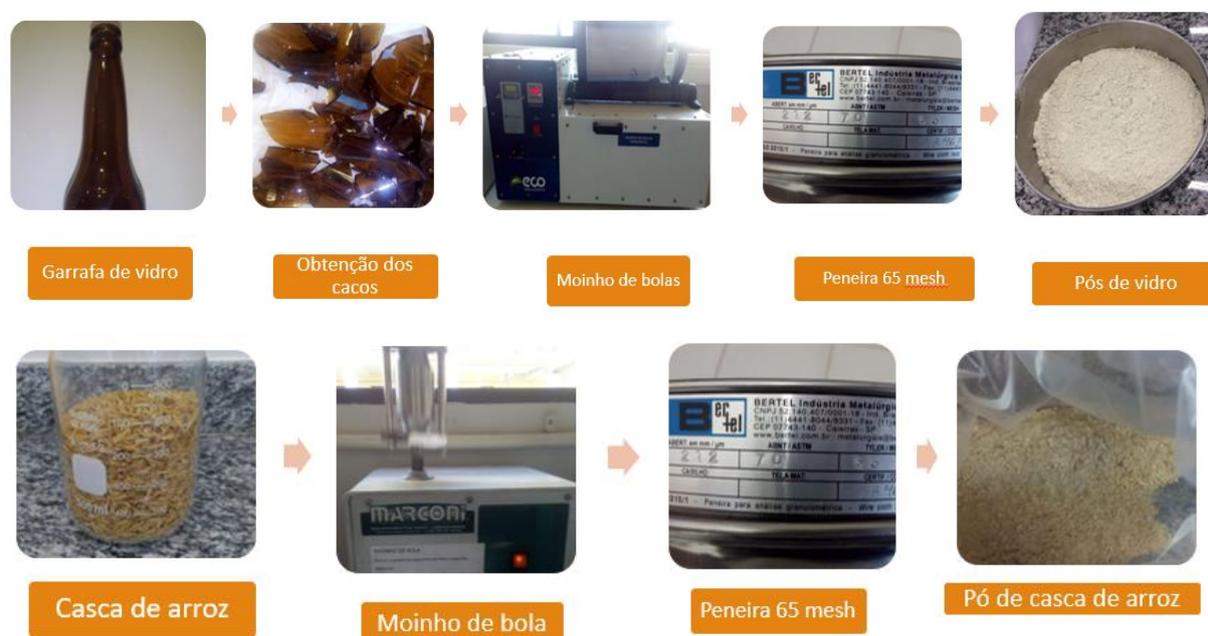
3.2.1.2 Termogravimetria Analítica (TGA)

O equipamento utilizado foi o Shimadzu DTG-60AH. Com parâmetros de meio com ar sintético, temperatura inicial 25°C e final 600°C com uma rampa de aquecimento de 10°C/min. Foi utilizado um cadinho de alumina para realizar a análise.

3.2.2 Produção das Espumas de Vidro

A síntese da espuma de vidro foi baseada na metodologia proposta por Teixeira et al (2017). A garrafa de vidro é fragmentada mecanicamente em cacos com o auxílio de um martelo e posteriormente é moída em moinho de bolas durante 2 horas à 3600 rpm (60 Hz). As cascas de arroz foram moídas à seco em moinho de bola durante aproximadamente 3 minutos. Após o processo de diminuição granulométrica por moinhos, os pós de garrafa e de casca de arroz passam por uma peneira de 65 mesh, abertura de 212 micrometros. A Figura 3 demonstra o processo descrito.

Figura 3 – Fluxograma de obtenção dos pós de vidro e casca de arroz:



Fonte: Autor (2019).

Posterior a obtenção dos pós, estes foram misturados na proporção de 85% de pó de garrafa de vidro e 15% de casca de arroz à úmido (40% dos sólidos) e homogeneizados em agitador mecânico durante 2 horas à 200 rpm. Após a homogeneização as composições foram secas em estufa a 110°C durante 24 horas aproximadamente. A Figura 4 mostra o resultado ao final do processo de obtenção da massa.

Figura 4 – Massa de matriz de vidro com casca de arroz.



Fonte: Autor (2019).

Após a secagem em estufa, a formulação foi homogeneizada em agitador mecânico e os pós obtidos foram umidificados (8% de água) e levados ao equipamento Prensa Hidráulica 15 ST – BOVENAU onde foram conformados de forma uniaxial à uma pressão de 35,43 MPa (5,50 TON). Os corpos obtidos foram sinterizados em forno tipo mufla à uma temperatura de 900°C durante 2 horas. A Figura 5 demonstra o processo.

Figura 5 – Obtenção dos corpos de prova para sinterização e obtenção da espuma de vidro.



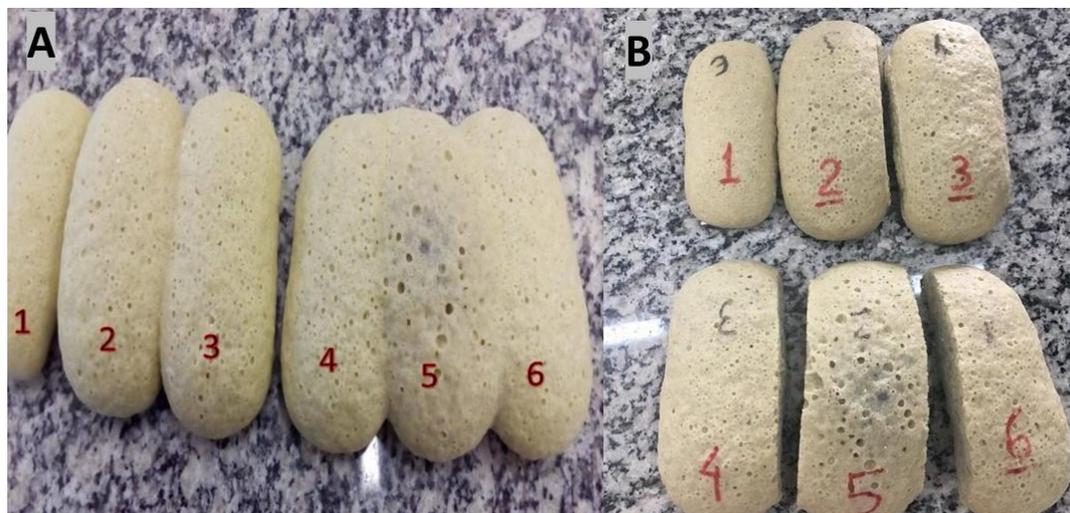
Fonte: Autor (2019).

3.2.3 Caracterização das Espumas de Vidro

Conforme é demonstrado na Figura 6.A, após os corpos de prova terem sido sinterizados para a formação dos poros da espuma de vidro, as amostras 2 e 3 e as amostras 4, 5 e 6 acabaram, por sua proximidade quando inseridas no forno,

coalescendo entre si. Logo, foi necessário separá-las com o auxílio de um canivete, conforme demonstrado na Figura 6.B.

Figura 6 – (A) Espumas de vidro coalescidas; (B) Espumas de vidro separadas



Fonte: Autor (2022).

3.2.3.1 Análises Físicas

3.2.3.1.1 Porosidade

O cálculo percentual da porosidade ($\epsilon\%$) dos corpos de prova foi baseada na metodologia proposta por Teixeira et al (2017). Onde é calculada a densidade do material antes do processo de sinterização (ρ_r) e a densidade após a sinterização (ρ_a) através da retirada de suas dimensões geométricas com o auxílio de um paquímetro digital (modelo KingTools, com resolução de 0,01 mm) um a fim de calcular o volume do material e seu peso (obtido com uma balança analítica modelo JJ623BC, com resolução de 0,001g). Após a coleta dos valores, foi possível estimar o percentual de porosidade pela Equação 1.

$$(\epsilon\%) = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right) \times 100 \quad (1)$$

3.2.3.1.2 Absorção de Água

Para a análise de Absorção de Água (AA) dos corpos de prova foi adaptada a norma ASTM C20 (2010). Onde é aferido o peso úmido do material após imerso em água à temperatura ambiente durante 24 horas (P_u) e o peso seco do material após passar 24 horas em estufa à 100°C (P_s). Calculando sua porcentagem conforme Equação 2.

$$(\%AA) = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100 \quad (2)$$

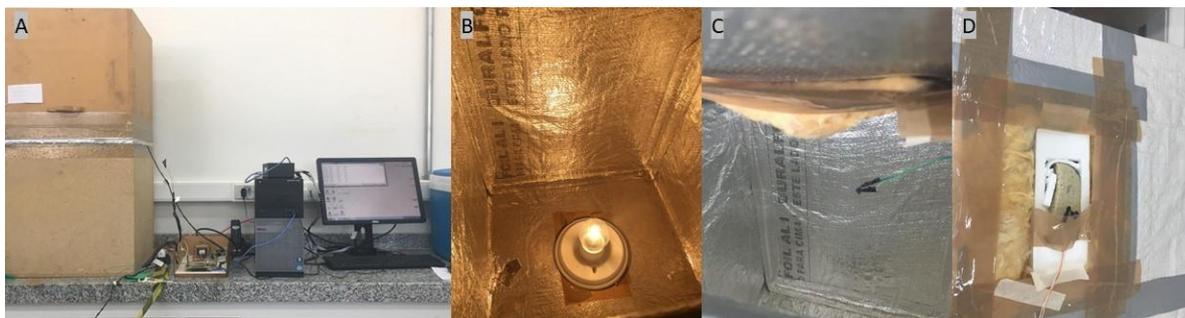
3.2.3.2 Microscopia Óptica Digital

O tamanho dos poros foi verificado com o auxílio do microscópio digital Calin Tech com zoom ótico de 1.000X 8 leds brancos 2Mp, fornecido pelo Laboratório de Materiais Compósitos (DEG-UFLA). As imagens são obtidas, processadas e apuradas pelo próprio software fornecido pelo equipamento. Foram retiradas aproximadamente 9 medidas internas e superficiais (3 no meio e 3 em cada uma das pontas da amostra) dos diâmetros dos poros da espuma de vidro, para que tivéssemos a maior acuracidade possível da média.

3.2.3.3 Análise Térmica

A condutividade térmica das amostras foi averiguada por um equipamento construído “in loco” do Laboratório de Materiais Compósitos sob responsabilidade do Professor Dr. Rafael Farinassi Mendes (DEG – UFLA), que consiste em duas câmaras de painéis de bagaço de cana, vedadas com isopor, papel alumínio e polietileno (onde a amostra fica localizada). Na câmara de baixo há a presença de uma lâmpada com temperatura máxima de 90°C que irá fornecer o calor para a amostra. O equipamento apresenta também termopares para averiguar a temperatura na câmara onde está a lâmpada (logo abaixo da amostra) e para averiguar a câmara acima, podendo então estimar o quanto o material está conduzindo o calor. Usou-se um Arduino programado para coletar os dados fornecidos pelos termopares, tendo uma leitura a cada 12 segundos até que se completasse mil leituras. A Figura 7 mostra a composição do equipamento.

Figura 7 – (A) Equipamento de análise térmica; (B) Lâmpada da câmara inferior; (C) Termopar câmara inferior; (D) Amostra, molde e termopar da câmara superior



Fonte: Autor (2022).

Para obter o valor da condutividade, seguiu-se o proposto pela Equação 3.

$$(\lambda) = \frac{P \cdot e}{A \cdot \Delta T} \quad (3)$$

Onde:

λ – Condutividade térmica (W/(m°C));

P – Potência fornecida pela lâmpada (W);

A – Área do corpo de prova (m²);

e – Espessura do corpo de prova (m);

ΔT – Diferença de Temperatura entre as câmaras (°C).

3.2.3.4 Análises Mecânica

A resistência à compressão das amostras foi estimada utilizando a Máquina Universal de Ensaio do Departamento de Engenharia (DEG-UFLA), conforme proposto por Kaur et al. (2019). A carga foi aplicada até que se observasse a ruptura, com velocidade de $0,5 \pm 0,2$ kN/s. A Figura 8 demonstra como o teste foi realizado.

Figura 8 – (A) Vista superior máquina de ensaio e amostra; (B) Vista lateral máquina de ensaio e amostra



Fonte: Autor (2022).

O modulo de resistência à compressão foi obtido de acordo com a Equação 4.

$$(R_c) = \frac{F_c}{A} \quad (4)$$

Onde:

Rc – Resistência à compressão (MPa);

Fc – Força máxima à fratura em (N);

A – Área do corpo de prova (mm²)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Casca de Arroz

4.1.1 Análise Química

Para a análise química das cascas de arroz obteve-se os valores descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Teor dos componentes

COMPONENTE	TEOR (%)
EXTRATIVOS	3,95
HOLOCELULOSE	53,70
CELULOSE	40,94
HEMICELULOSE	12,76
LIGNINA INSOLÚVEL	15,34
CINZAS	14,58

O valor encontrado neste trabalho para extrativos (3,95%), concorda com o que foi encontrado segundo Paula (2011), sugerindo que a casca de arroz passou por modificações padrões seu processo fisiológico. O teor de holocelulose (53,70%) foi um pouco discrepante quanto ao encontrado na literatura segundo Ma'ruf (2017), que foi 64,35%, porém é próximo ao encontrado por Paula (2011), no caso, 52,61%, significando que, sua queima não será dificultada e nem há presença de agentes contaminantes na casca.

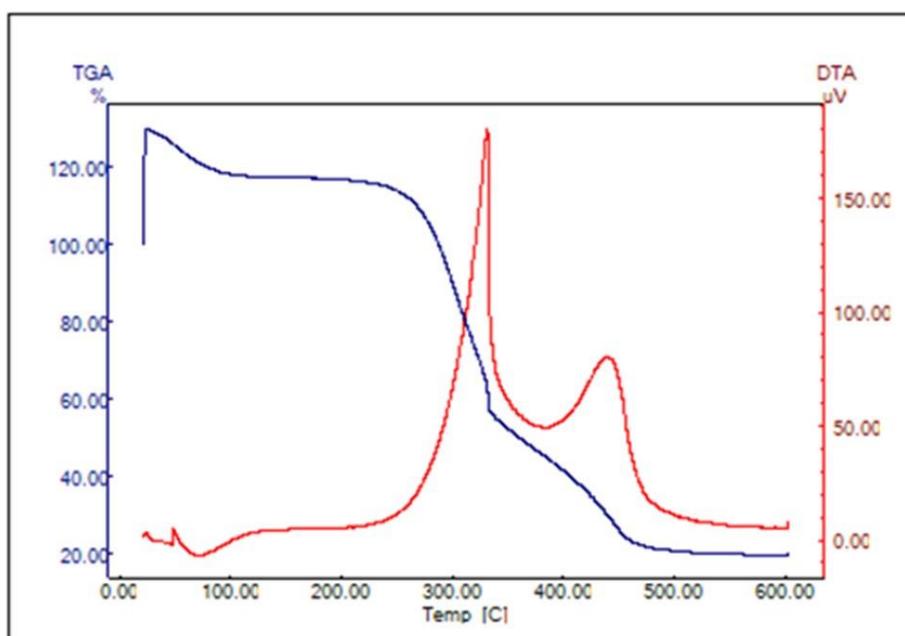
O valor de celulose encontrado na literatura por Ma'ruf (2017) foi de 32,67%, neste trabalho está um pouco maior (40,94%), o que significa que a concentração do monômero formador da celulose, no caso a glicose, é muito alta. Já a hemicelulose é definida como polissacarídeos, pode-se dizer que com um teor neste experimento de 12,76%, comparado com a literatura de Ma'ruf (2017) que obteve 31,68%, a casca de arroz deste trabalho apresenta baixa concentração de polissacarídeos. A lignina está associada ao ligamento entre as células e a rigidez da parede celular, tendo em vista que se obteve neste trabalho que o teor desta de 15,34% pode-se concluir que a casca de arroz em questão tem uma maior mobilidade em sua parede celular, com base na literatura de Paula (2011) e Ma'ruf (2017), que obtiveram um teor de 18,58% e 18,81%, respectivamente. Sugerindo, então, que os componentes que irão formar as bolhas estão presente em elevado teor.

Segundo Paula (2011) o valor do teor de cinzas de casca de arroz foi 16,43%, para Vieira (2013) foi de 15,51% enquanto para Ma'ruf (2017), foi de 11,88%. Observou-se neste trabalho um teor de 14,58% de cinzas para a casca de arroz, valor que está intermediário aos valores encontrados na literatura, sendo então, um valor plausível.

4.1.2 Termogravimetria Analítica (TGA)

As cascas de arroz degradaram devido sua função como agente porogênico, um estudo sobre sua deterioração térmica se fez necessário para investigar como o processo iria ocorrer. Para investigar tal comportamento, foi realizado uma uma Análise Termogravimétrica (TGA). O resultado de sua análise termogravimétrica pode ser observado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – TGA acompanhado de DTA da casca de arroz.



O gráfico acima apresenta em seus resultados uma curva da análise termogravimétrica (TGA) em azul seguido de uma curva de análise térmica diferencial (DTA) em vermelho, esta segunda trata-se de um auxílio para a análise de termogravimetria pois registra variação de energia, térmica neste caso, da amostra e da referência.

Na curva do TGA inicialmente é possível observar inicialmente um aumento na porcentagem de massa da amostra, esta variação está relacionada à calibração da máquina. Logo em seguida, na faixa entre 50°C e 100°C, há uma perda mássica endotérmica que é referente a água adsorvida na superfície das cascas. Na faixa entre 250°C e 500°C há a maior perda mássica da amostra, assim como observado por Teixeira (2017), que obteve 77% de perda em seus estudos. No caso deste trabalho, a perda mássica total nessa faixa de temperatura foi de 85%, tendo dois picos exotérmicos devido à decomposição de componentes orgânicos da casca, como celulose, hemicelulose e uma parcela da lignina, causadores dos poros desejados, que teve sua decomposição completa um pouco acima de 500°C.

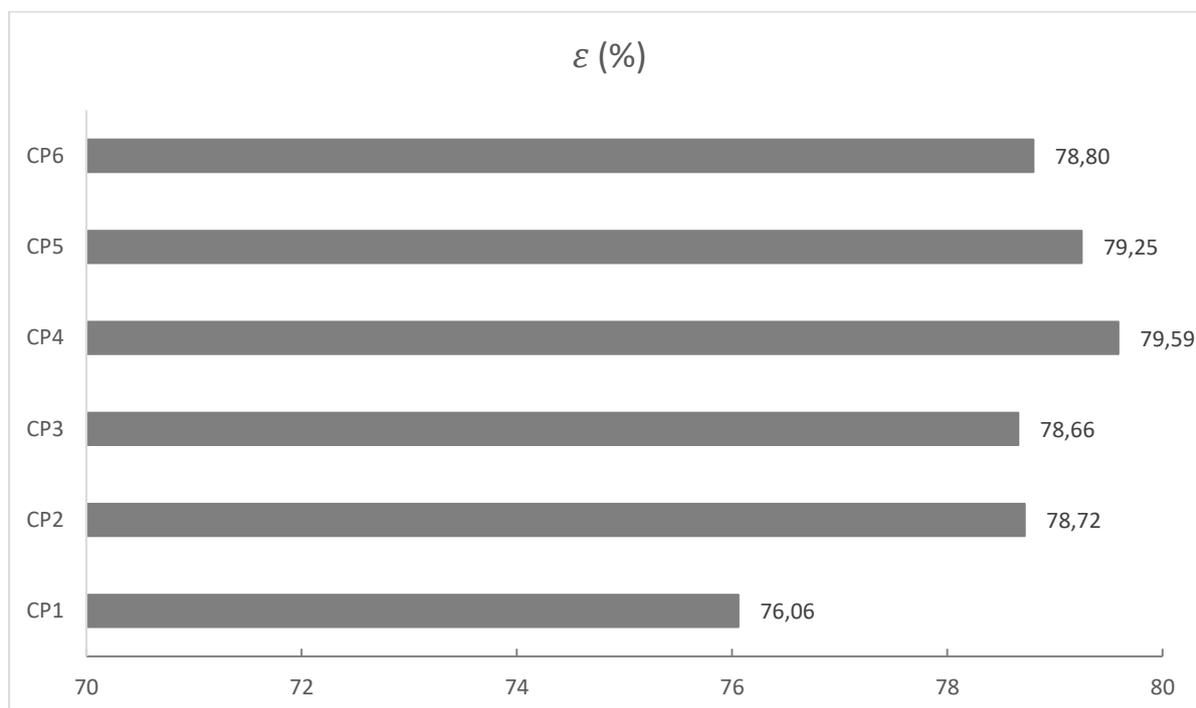
Resultado de perda mássica esse que concordam com os obtidos na análise química, onde de fato o único componente que irá permanecer da casca de arroz após sinterização, são suas cinzas.

4.2 Espuma de Vidro

Foi-se produzido seis corpos de prova enumerados de 1 a 6. Seguindo esta lógica, foram nomeados de CP1, CP2 e assim sucessivamente. Os corpos de prova CP2 e CP3 obtidos acabaram se unindo na sinterização, bem como CP4, CP5 e CP6, devido ao gradiente de temperatura ser maior perto da entrada do forno, causando seu aumento de volume e por estarem muito perto um do outro acabaram coalescendo. Portanto, para separá-los foi utilizado um canivete que facilmente cortou as marcas divisórias entre os corpos de prova, fato que mostrou sua simples manipulação de forma pós sinterizado, além de ter a característica de não exalar nenhum gás nocivo, apesar de ter a presença de pó de vidro, que não deve ser inalado.

4.2.1 Porosidade

A análise de porosidade das espumas de vidro obtidas, após execução do método proposto por Teixeira et al (2017) com auxílio da Equação 1, verificou o seguinte resultado demonstrado no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Porosidade dos corpos de prova (ϵ)

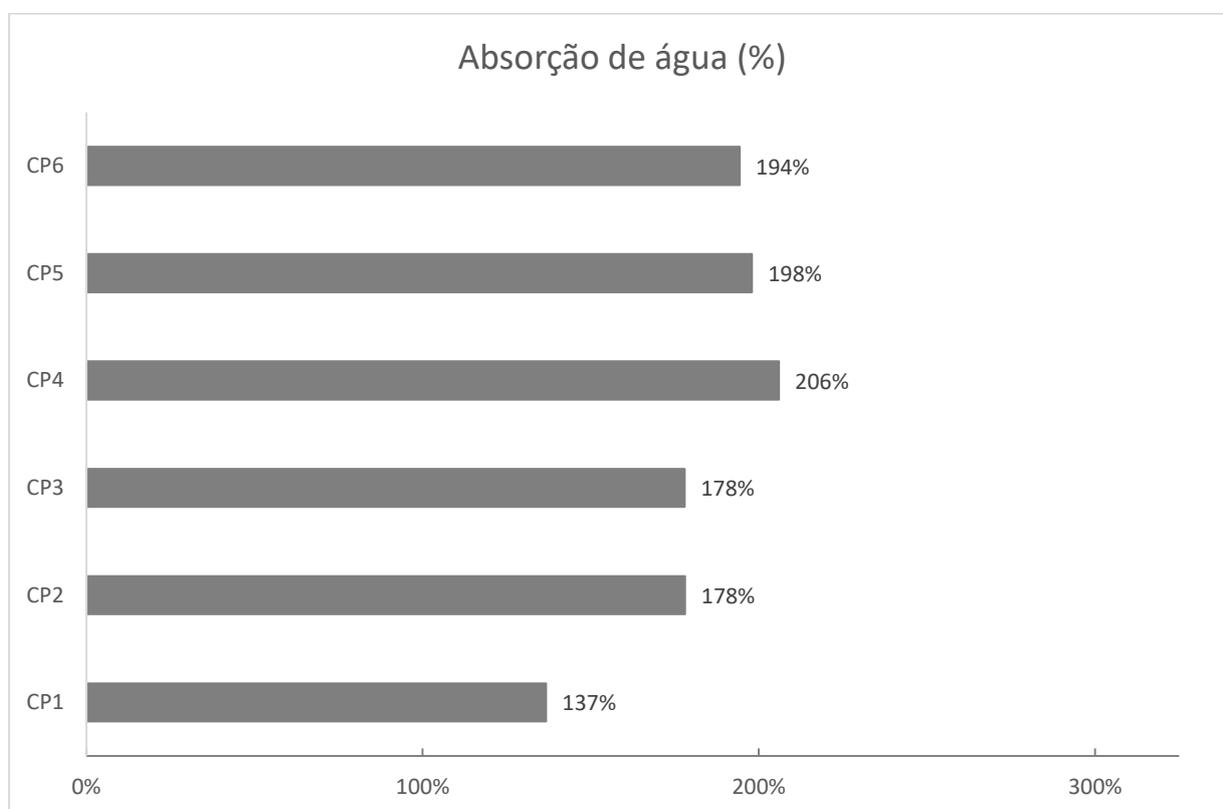
Os valores obtidos de porosidade concordam para uma classificação desses materiais como porosos (porosidade acima de 70%). O corpo de prova CP1 obteve o menor valor de porosidade pelo fato de ter um gradiente de temperatura à menor envolvido no fundo do forno, além de ter sido o corpo de prova com menor volume e massa dentre os demais. Porém como todos tratam, teoricamente, da mesma formulação, foi calculado uma média de suas porosidades para que a porosidade da formulação fosse estimada e o valor foi de $78,51 \pm 1,25\%$ de porosidade. Este valor é próximo do encontrado na literatura, Teixeira et al (2017) encontrou um valor de 84,3%. No trabalho de Arriagada et al (2019), suas espumas de vidro, com agente porogênico (Carbeto de silício e misturas de carvão ativado e dióxido de manganês) obteve resultados de porosidade (para mesma temperatura de sinterização do material) que variou entre 42,4% e 93,1%, enquanto o obtido por Ryan et al, que usou a espuma de vidro FOAMGLAS da empresa Owens Corning para seu estudo, obteve uma variação entre 85% e 92%, mostrando que mesmo variando de agente porogênico, este trabalho se aproxima aos valores encontrados na literatura para o material. O valor de porosidade é uma estimativa, pois é muito provável que dentro do material há a presença de poros fechado, logo o valor obtido não pode ser considerado como o real

para a porosidade do material, porém a estimativa foi boa, levando em conta o encontrado na literatura, portanto o uso das cascas de arroz como agente porogênico para obtenção de espumas de vidro é efetivo.

4.2.2 Absorção de Água

A relação obtida para a Absorção de Água (%AA) das amostras é demonstrada no Gráfico 3 abaixo.

Gráfico 3 – Absorção de Água (%AA)



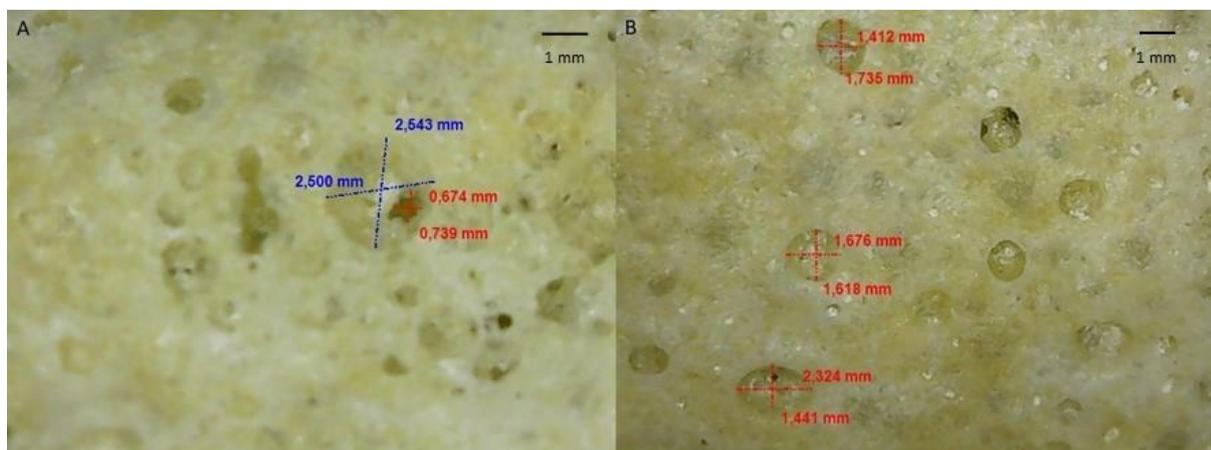
Exceto para o CP1, onde notou-se um corpo de prova mais fechado superficialmente, dificultando assim a penetração de água, a análise de absorção de água da espuma de vidro fica muito próxima de uma relação de absorção de 2:1, tendo uma média de absorção de $182 \pm 25\%$ o que significa que a massa de água que pode penetrar e alojar-se dentro da amostra é quase o dobro da massa do material, sugerindo assim, uma alta interconectividade entre os poros do material, por onde a água pode infiltrar-se em direção ao núcleo do material.

4.2.3 Microscopia Óptica Digital

Ao se tratar dos tamanhos dos poros, a CP1 obteve os menores tamanhos com diâmetro médio de 1,7 mm, conforme mostra a Figura 9 A e B. Isso explica-se devido ao fato da menor intensidade da queima desempenhado pela amostra (posicionou-se ao fundo do forno na sinterização, onde há menor gradiente de temperatura), que se apresentou com estrutura bem fechada com relação às demais amostras e mais se aproximou ao encontrado por Teixeira et al (2017) e Bernardo et al (2007) que foi em média 0,8mm para poros superficiais. Este segundo utilizou carbeto de silício como agente porogênico.

Porém, este corpo de prova concordou com o encontrado por Santos et al (2019) que, usando resíduo de tabaco como agente porogênico (30%), obteve diâmetros em suas espumas de vidro de em média 2 mm. Sendo assim, pode-se entender que utilizando resíduos sem tratamento, corre-se o risco de que existiam alguns agentes contaminantes na formulação que aumentaram o tamanho dos poros.

Figura 9 – (A) Poros internos CP1; (B) Poros superficiais CP1



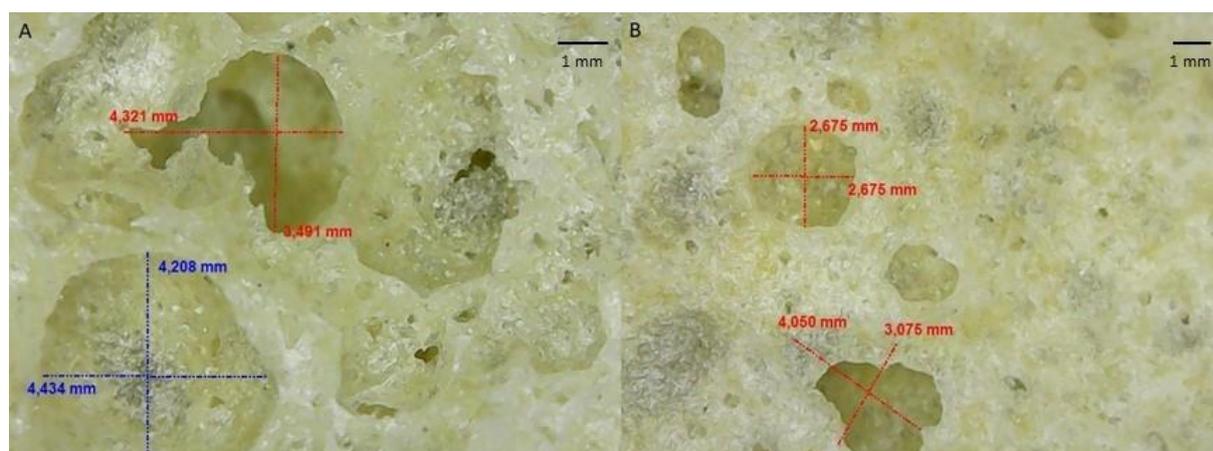
Já os demais corpos de prova variaram seus diâmetros superficiais entre 2,8 mm e 4,5 mm e diâmetros internos entre 3,2 e 5,9 mm, conforme mostra os exemplos da Figura 15 A e B.

Sendo assim, conforme afirma Teixeira et al (2017) como todas as amostras apresentaram-se com tamanhos de poros superiores a 50 nm, estas são classificadas

como macroporos. Notou-se que há uma perceptível divisão entre regiões com poros pequenos e grandes, fato relacionado a alta heterogenia da síntese (concentração de matriz porogênica) tendo então, uma dificuldade do gás mais interno produzido pela queima da casca de arroz em sair da amostra, gerando assim o aprisionamento destes gases, que quanto mais perto da superfície, tendo assim, maior delta de temperatura repara-se uma maior interconectividade entre os poros como foi possível reparar na Figura 10 A.

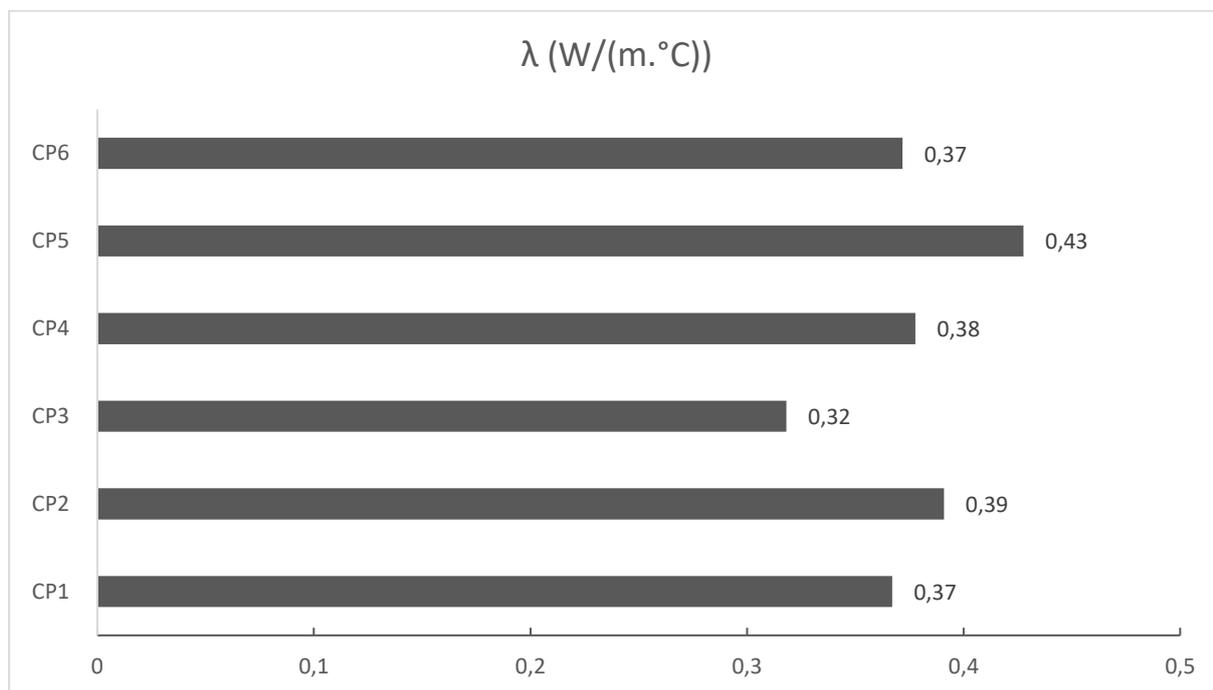
Ao se tratar da superfície, nota-se uma tendência da matriz vítrea em unir-se, aprisionando então os poros do material, fato relacionado com a coalescência, tendo então com uma maior energia (temperatura), uma união de sua estrutura e componentes. Conforme mostra a Figura 10 B.

Figura 10 – (A) Poros internos CP3; (B) Poros superficiais CP4



4.2.4 Análise Térmica

Seguindo para a caracterização quanto ao isolamento térmico das amostras, obteve-se os resultados de condutividade térmica apresentados no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Condutividade (λ)

Com relação aos corpos de prova entre si, surpreendentemente o CP4, tendo em vista maior capacidade de isolamento térmico, teve pior desempenho que o CP3 e CP1, apesar de estar bem próximo a estes. Esperava-se que este teria o melhor desempenho nesta caracterização por ter apresentado maior porosidade, relação peso úmido/seco e tamanho de poros. Todavia, de forma geral, observou-se uma média de condutividade de $0,38 \pm 0,03$ W/m°C.

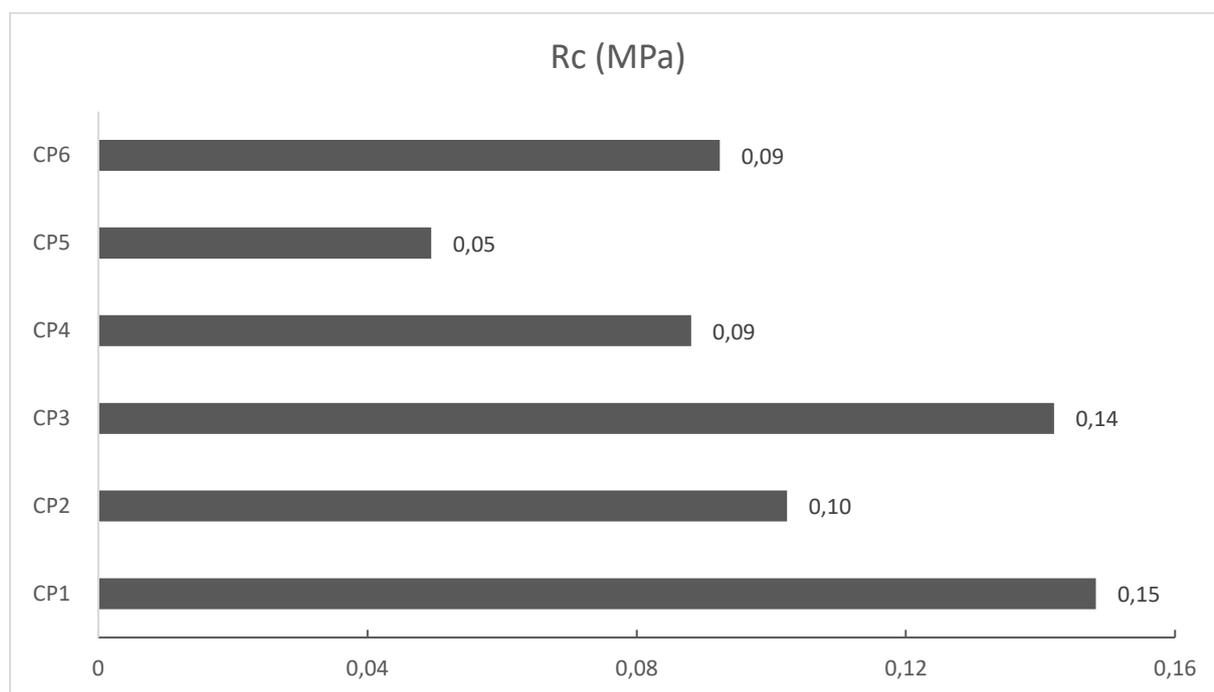
Comparando com a literatura, temos que Arrigada et al (2019) encontrou um valor de condutividade para suas espumas de aproximadamente $0,10$ W/m°C, Østergaard et al (2017) que usou óxidos de manganês e ferro para sintetização de espumas de vidro, obteve uma variação de $0,51$ a $0,54$ W/m°C enquanto que, Teixeira et al (2017) encontrou para suas espumas de vidro de mesma formulação deste trabalho compreenderam valores entre $0,07$ e $0,15$ W/m°C, valores que são mais que duas vezes menor que o encontrado neste trabalho. Isto deve-se à limitação do equipamento que foi elaborado manualmente, podendo haver erros. Além disso, os corpos de prova apresentaram disformidade entre si, podendo ainda haver, apesar de ter sido tomada medidas de higiene e preservação, presença de contaminantes, já que a matéria prima destas espumas são 100% de origem residual.

Entende-se que a condutividade térmica do ar é de aproximadamente $0,03 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ e do vidro de garrafa $0,8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, sendo assim, tendo em vista a diferença com relação ao encontrado por Teixeira et al (2017), as amostras apresentaram-se com valores próximos ao esperado, mesmo não se comportando como um excelente isolante térmico, o emprego o agente porogênico em matriz vítrea mostrou bom potencial para diminuir a condutividade do material. Levando em consideração que o tijolo apresenta uma condutividade próxima, em média, à $0,6 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ podemos assumir que a espuma de vidro produzida neste trabalho se trata de um material isolante térmico.

4.2.5 Análise Mecânica

Quanto as propriedades mecânicas deste material, obteve-se os valores para resistência a compressão, que estão dispostos no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Resistência a compressão (R_c)



Nota-se que o CP5 desempenhou o pior resultado de resistência mecânica à compressão e este fato deve-se pela amostra ter sido perfurada pela chapa superior da máquina de ensaios sem romper, mostrando uma grande fragilidade na amostra no ponto de contato. Isto explica-se pelo tamanho dos poros, que foi muito elevado

para a amostra (média maior que 4,5 mm) além disso, a amostra se apresentou com a maior espessura que as demais amostras, aproximadamente 28,3mm, ou seja, houve a maior formação em número de poros, tornando assim o material mais suscetível às fraturas na matriz vítrea. O relatado pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Corpos de prova após ensaio mecânico



Os resultados das amostras CP2, CP4 e CP6 ficaram relativamente iguais, mesmo fato apresentou-se para as amostras CP1 e CP3, porém estas com valores um pouco maiores de resistência. Este fato explica-se pela semelhança das características entre as amostras, o que indica uma relativa homogeneidade estrutural das amostras.

Descartando o valor apresentado pelo CP5, obtivemos uma resistência a compressão da espuma de vidro variando entre 0,09 e 0,15 MPa. Todavia, os valores obtidos para resistência a compressão ficaram bem abaixo do encontrado na literatura por Arrigada et al (2019) que teve variações de 10 a 30 MPa e por Teixeira et al (2017) que variou entre 1 e 2,5 MPa. Porém os valores encontrados por Ryan et al (2019) que variou entre 0,04 e 0,16 MPa, se assemelhou bastante com o obtido por esse trabalho.

Os valores baixos para característica frágil dos corpos de prova explicam-se pelo fator de que a geometria dos corpos de prova não era simétrica, proporcionando ponto de flexão no momento de tensão empregada no material, sendo assim, por se tratar de um material vítreo, fraturou com extrema facilidade. Uma solução para resolver este problema seria a queima mais controlada do agente porogênico com implementação

de platôs térmicos na sinterização ou diminuição da proporção de agente porogênico, diminuindo a formação de poros.

Sendo assim os resultados de caracterização mecânica das espumas de vidro não foram satisfatórios, podendo ser resolvidos em um cenário onde fosse possível o controle de formato do material, deixando-o o mais linear o possível, evitando flexão em sua estrutura ao operar a análise na máquina de ensaio.

5 CONCLUSÃO

Com as análises químicas da casca de arroz, ficou evidente que a maior parte da estrutura da matéria prima é composta de material orgânico que irá decompor com a solicitação térmica, conforme mostra os resultados da análise de TGA, tendo apenas um teor de 14,58% de material inorgânico que não é decomposto em sua queima para confecção das espumas de vidro.

Quanto a porosidade do material, este obteve um resultado satisfatório, com média de $78,51 \pm 1,25\%$. Este resultado, concorda com o estipulado na literatura quanto a classificação de materiais porosos, porém ao tratar do tamanho dos poros, estes se mostraram muito elevados com relação ao encontrado na literatura, fato que demonstra uma concentração de pós de casca de arroz próximos à superfície do material no momento da sinterização, movendo a matriz vítrea a se concentrar no centro do material. O tamanho também pode estar relacionado com o tamanho dos grânulos do pó da casca, concentrando assim mais materiais orgânicos.

Corroborando com o fato destacado anteriormente, é possível entender que a absorção de água do material é alta devido à suspeita de elevada interconectividade criada entre os poros próximo à superfície do material, proporcionando espaços para que a água flua para dentro do material. Fato que criou uma grande expectativa quando levado material para análise térmica, onde demonstrou ter duas vezes a capacidade de isolamento térmico de um tijolo, por exemplo, o que credencia dizer que o material é isolante térmico. Sua característica mecânica de compressão ficou muito abaixo do esperado, que demonstrou um material extremamente frágil, tendo então um potencial interessante apenas como revestimento para aumentar o

isolamento térmico com aplicações onde não há estresse mecânico. Sendo assim uma alternativa sustentável para concorrer com o “Foamglas”, espuma de vidro mais difundida no mercado atual.

Como sugestão para trabalhos futuros, há a possibilidade de variar as composições de agente porogênico, variar a matriz vítrea para aferir o comportamento da casca de arroz com outras fontes de vidro e variações no tempo e temperatura de sinterização do material.

6 REFERÊNCIAS

ARRIAGADA C. et al. Understanding the effect of porosity on the mechanical and thermal performance of glass foam lightweight aggregates and the influence of production factors. **Construction and Building Materials**, Vol. 228, 2019.

ASSIS O. B. G. O uso de vidro reciclado na confecção de membranas para microfiltração. **Revista Cerâmica**, Vol. 54, 462-465, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999: Determinação de resíduo (cinza) após incineração a 525°C**. Rio de Janeiro, p. 4. 2003b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853: Determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona**. Rio de Janeiro, p. 3. 2010b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989: Pasta celulósica e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido**. Rio de Janeiro, p. 6. 2010a.

BERNARDO, E. et al. Reutilization and stabilization of wastes by the production of glass foams. **Ceramics International**, Vol. 33, 963–968, 2007.

COÊLHO, J. D. Arroz: Produção e Mercado. **Caderno Setorial ETENE**. Vol. 6, No. 156. março, 2021.

CONAB, Perspectivas para agropecuária, **Safra 2021/22**, Brasília, Vol. 9, 31-44, agosto 2021.

DA SILVA, R. C. et al. Glass foams produced by glass waste, sodium hydroxide, and borax with several pore structures using factorial designs. **Int J. Appl. Ceram. Technol.**, 1-9, 2019.

CRUZ, G. M. et al. A novel foam glass obtained from solid waste: A sustainable strategy for application in the degradation of an environmental pollutant. **Ceramics International**, Vol. 48, 26351-26360, 2022.

EMBRAPA. AGEITEC – Arroz e Feijão, **Cultivo do Arroz**, Santo Antônio de Goiás, não paginado. 2021.

FERNANDES, A. A. **Síntese de zeólitas e wollastonita à partir da cinza de casca de arroz**. 2006. Dissertação (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo.

FOLETTTO, E. L. et al. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Quim. Nova**, Vol. 28, No. 6, 1055-1060, 2005.

JITTIN, V. et al. Utilisation of rice husk ash for cleaner production of different construction products. **Journal of Cleaner Production**, Vol. 236, 2020

KAUR, G. et al. Mechanical properties of bioactive glasses, ceramics, glass-ceramics and composites: State-of-the-art review and future challenges. **Materials Science & Engineering**, Vol. 104, 109895, 2019.

KRISTÁLY, F. et al. Lightweight composite from fly ash geopolymer and glass foam. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, 1-22, 2020.

LORENZETT, D. B. et al. Gestão de resíduos e a indústria de beneficiamento de arroz. *Revista Gestão Industrial*, Vol. 8, No. 1, 219-232, 2012.

MA'RUF, A. Lignin isolation process from rice husk by alkaline hydrogen peroxide: Lignin and silica extracted. **AIP Conference Proceedings** 1823, 020013, 2017.

OLIVEIRA, A. A. R. et al. Avaliação das Propriedades Mecânicas de Espumas Híbridas de Vidro Bioativo/Álcool Polivinílico para Aplicação em Engenharia de Tecidos. **Revista Matéria**, Vol 12, No. 1, 140-149, 2007.

ØSTERGAARD, M. B. et al. Impact of pore structure on the thermal conductivity of glass foams. **Materials Letters**, Vol. 250, 72-74, 2019.

PAULA, L. E. et al. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **CERNE [online]**. Vol. 17, No. 2, 237-246, 2011.

ROSA, S. E. S. et al. Considerações sobre a indústria do vidro no Brasil. **BNDS Setorial**, Rio de Janeiro, No. 26, 101-137, setembro 2007.

RYAN, A. G. et al. A proxy for magmatic foams: FOAMGLAS®, a closed-cell glass insulation. **Journal of Non-Crystalline Solids**, Vol. 1, 2019.

SANTOS, P. A. et al. Sustainable Glass Foams Produced from Glass Bottles and Tobacco Residue. **Materials Research**, Vol. 22, No. 1, 2019.

TAKAHASHI, L. B.; ASSIS O. B. G. Obtenção de vidros porosos para uso como dispositivo de liberação de feromônios. **Revista Cerâmica**, Vol. 54, 462-465, 2008.

TANG, T. et al. Glass based micro total analysis systems: Materials, fabrication methods, and applications. **Revista Matéria**, Vol. 22, No. 4, 2021.

TAYEH, B. A. et al. Recycling of rice husk waste for a sustainable concrete: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, Vol. 312, 2021.

TEIXEIRA, L. B. et al. Produção e caracterização de espumas vitrocrystalinas a partir de resíduos sólidos. **Sensors and Actuators: B. Chemical**, Vol. 339, 2021.

VIEIRA, A.C et al. Caracterização da casca de arroz para geração energética. **Revista Scientia Agrárias**, Vol. 3, No. 1, 51-57, 2013.

ZACCARON, A. et al. Utilização de Vidro de Garrafas para Redução da Absorção de Água em Produtos de Cerâmica Vermelha. **Cerâmica Industrial**, Vol. 21, No. 5-6, 35-39, 2016.

ZHANG, L. et al. Analysis of the Environmental Impact of Foam Glass. **Materials Science Forum**, Vol. 847, 315-320, 2020.