

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL - CAMPUS FELIZ

SABRINA BENDER FRANZ

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NA PRODUÇÃO DE AGREGADOS LEVES:
POTENCIAL DO VIDRO, DISCO DE CORTE E CASCA DE OVO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de
bacharelado em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. André Zimmer

FELIZ

2024

SABRINA BENDER FRANZ

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NA PRODUÇÃO DE AGREGADOS LEVES:
POTENCIAL DO VIDRO, DISCO DE CORTE E CASCA DE OVO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ma. Flávia Dagostim Minatto

Profa. Dra. Daiane Romanzini

ORIENTADOR

Prof. Dr. André Zimmer

Feliz, 22 de novembro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais pelo apoio incondicional, pela motivação e pela compreensão ao longo desses cinco anos de estudo. Vocês foram meu alicerce em todos os momentos.

Ao meu namorado, Augusto, pela paciência e por sempre estar ao meu lado (além de ajudar na obtenção da principal matéria-prima do trabalho).

Aos professores da graduação que muito contribuíram para minha formação. Agradeço ao meu orientador, André Zimmer, pelo apoio, conselhos e orientações durante todo o processo.

Aos colegas discentes e amigos, que estiveram ao meu lado ao longo dessa trajetória, oferecendo conselhos e incentivo. Agradeço especialmente à minha colega e amiga Maria Eduarda, pela parceria nas muitas horas passadas no laboratório trabalhando na produção dos agregados.

Aos meus amigos de longa data – Mireila, Vitor, Taciana, Régis, Jeferson e Bianca – por terem acompanhado esses anos de estudo e pelas incontáveis horas de conversa e conselhos que nunca me deixaram desanimar. A amizade de vocês é muito especial.

Este trabalho é resultado do empenho e da colaboração de cada um de vocês.
Muito obrigada!

RESUMO

Agregados leves são materiais porosos e de baixa densidade geralmente usados na construção civil e apresentam diversas aplicações, podendo ser utilizados como isolamento térmico e acústico, em obras de infraestrutura, paisagismo, entre outros. Nos últimos anos, estudos sobre a incorporação de resíduos para sua fabricação têm ganhado destaque. Nesse contexto, o vidro, um material amplamente disponível, reciclável e de baixo custo e o carbetto de silício, utilizado em abrasivos como lixas e discos, possuem grande potencial para serem reciclados e reaproveitados em novas aplicações, incluindo a produção de agregados leves. As cascas de ovos, resíduos da indústria alimentícia gerados em grandes quantidades, também possuem potencial para incorporação na área da construção civil. O processo de queima é uma etapa crucial na fabricação de agregados leves, pois as propriedades físicas e químicas do material dependem fortemente da temperatura e do tempo de permanência durante o processo. Dessa forma, foram desenvolvidos agregados leves contendo diferentes percentuais de casca de ovo, carbetto de silício, vidro e argila, com o intuito de investigar o mecanismo de formação e expansão. As matérias primas foram caracterizadas quanto a granulometria e os agregados foram avaliados quanto à resistência à compressão, absorção de água e densidade. Os resultados revelaram que os agregados com casca de ovo alcançaram expansão de até 238%, enquanto aqueles com carbetto de silício chegaram a atingir 432%, com densidades entre 0,13 g/cm³ e 1,51 g/cm³ para os agregados com carbetto de silício, e entre 0,39 g/cm³ e 0,59 g/cm³ para os com casca de ovo. Esses valores encontram-se dentro dos padrões normativos para agregados leves, indicando o potencial desses resíduos para aplicação em materiais de construção.

Palavras-chave: Agregados leves. Vidro. Casca de ovo. Carbetto de silício. Mecanismo de formação

ABSTRACT

Lightweight aggregates are porous, low-density materials commonly used in civil construction, with various applications such as thermal and acoustic insulation, infrastructure projects, landscaping, and more. In recent years, studies on the incorporation of waste materials in their production have gained prominence. In this context, glass — a widely available, recyclable, and low-cost material — and silicon carbide, commonly used in abrasives such as sandpaper and grinding discs, show great potential for recycling and reuse in new applications, including the production of lightweight aggregates. Eggshells, a byproduct of the food industry generated in large quantities, also hold the potential for incorporation in the construction sector. Firing is a crucial stage in the production of lightweight aggregates, as the physical and chemical properties of the materials strongly depend on the temperature and residence time during the process. Accordingly, lightweight aggregates containing different proportions of eggshells, silicon carbide, glass, and clay were developed to investigate the mechanisms of formation and expansion. The raw materials were characterized for particle size distribution, and the aggregates were evaluated for compressive strength, water absorption, and density. The results showed that aggregates containing eggshells achieved up to 238% expansion, while those with silicon carbide reached up to 432%, with densities ranging from 0.13 g/cm³ to 1.51 g/cm³ for silicon carbide aggregates and from 0.39 g/cm³ to 0.59 g/cm³ for eggshell aggregates. These values meet the normative standards for lightweight aggregates, indicating the potential of these waste materials for application in construction materials.

Keywords: Lightweight aggregates. Glass. Eggshell. Silicon carbide. Formation mechanism.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais propriedades, vantagens e aplicações dos agregados leves...	15
Figura 2 – Formação de uma fase vítrea contínua que favorece o mecanismo de expansão.....	20
Figura 3 – Principais fatores que interferem na porosidade dos agregados leves. ...	22
Figura 4 – Usos potenciais para cascas de ovos.	28
Figura 5 - Análise termogravimétrica da casca de ovo.....	30
Figura 6 – Fluxograma da organização da pesquisa.....	32
Figura 7 – Corpos de prova antes do processo de sinterização.....	35
Figura 8 – Análises selecionadas para caracterização dos agregados produzidos. .	36
Figura 9 – Agregados com 5% de casca de ovo (C5) após a queima a 825 °C, 850°C, 900 °C, 925 °C e 950 °C nos patamares de 1 minuto (a) e 20 minutos (b).....	40
Figura 10 – Agregados com 2,5% de casca de ovo (C2,5) após a queima a 900 °C, 925 °C e 950 °C nos patamares de 1 minuto (a) e 20 minutos (b).....	41
Figura 11 – Efeito das temperaturas e patamares no índice de expansão dos agregados leves fabricados com casca de ovo.....	41
Figura 12 – Agregados com 45% de vidro e 5% de SiC (S45) após a queima a 950 °C, 1000 °C e 1050 °C, com patamares de 1 minuto (a) e 20 minutos (b).....	42
Figura 13 – Agregados com 55% de vidro e 5% de SiC (S55) após a queima a 950 °C, 1000 °C e 1050 °C, com patamares de 1 minuto (a) e 20 minutos (b).....	42
Figura 14 – Efeito das temperaturas e patamares no índice de expansão dos agregados leves fabricados com SiC.....	43
Figura 15 – Efeito das temperaturas e patamares na densidade aparente dos agregados leves fabricados com casca de ovo.....	44
Figura 16 – Efeito das temperaturas e patamares na densidade aparente dos agregados leves fabricados com SiC.....	45
Figura 17 – Efeito das temperaturas e patamar de 1 minuto na perda ao fogo dos agregados leves fabricados.....	47

Figura 18 – Efeito das temperaturas e patamar de 20 minutos na perda ao dos agregados leves fabricados.....	47
Figura 19 – Microestrutura dos agregados leves com 5% de casca de ovo (C5) em diferentes temperaturas com patamares de 1 (a) e 20 minutos (b).....	51
Figura 20 – Microestrutura dos agregados leves com 2,5% de casca de ovo (C2,5) em diferentes temperaturas com patamares de 1 (a) e 20 minutos (b).....	52
Figura 21 – Microestrutura dos agregados leves com 45% de vidro e 5% SiC (S45) em diferentes temperaturas com patamares de 1 (a) e 20 minutos (b).....	53
Figura 22 – Microestrutura dos agregados leves com 55% de vidro e 5% SiC em diferentes temperaturas com patamares de 1 (a) e 20 minutos (b).....	54
Figura 23 – Absorção de água (%) dos agregados contendo 2,5% de casca de ovo (C2,5) em 1 e 20 minutos de patamar.....	57
Figura 24 – Absorção de água (%) dos agregados contendo 5% de casca de ovo (C5) em 1 e 20 minutos de patamar.....	57
Figura 25 – Resistência à compressão dos agregados contendo 2,5% de casca de ovo (C2,5).....	58
Figura 26 – Resistência à compressão dos agregados contendo 5% de casca de ovo (C5).	58
Figura 27 – Resistência à compressão dos agregados contendo 45% vidro e 5% de SiC (S45).....	59
Figura 28 – Resistência à compressão dos agregados contendo 55% vidro e 5% de SiC (S55).....	59
Figura 29 – Resultados das análises de calcinação da casca de ovo em diferentes temperaturas.	61
Figura 30 – Análise de cone de fusão das formulações C1, C2,5 e C5, no patamar 1 minuto.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidade dos diferentes tipos de agregados.	16
Tabela 2 - Diferentes resíduos utilizados por outros autores para produção de agregados leves.	24
Tabela 3 – Principais componentes químicos de diferentes resíduos utilizados para a fabricação de agregados leves.	25
Tabela 4 – Temperaturas e teores de vidro utilizados para produção de agregados leves em estudos anteriores.	26
Tabela 5 - Composição química da casca de ovo de acordo com estudos anteriores.	29
Tabela 6 – Formulações das misturas para produção dos agregados leves.	33
Tabela 7 – Parâmetros de queima das diferentes formulações.	35
Tabela 8 – Percentual de retenção granulométrica das formulações.	39
Tabela 9 – Composição química das matérias-primas.	40
Tabela 10 – Retração dos agregados contendo 100% de argila em diferentes temperaturas de sinterização.	49
Tabela 11 – Retração dos agregados contendo 1% de casca de ovo (C1) em diferentes temperaturas de sinterização.	49
Tabela 12 – Retração dos agregados contendo 2,5% de casca de ovo (C2,5) em diferentes temperaturas de sinterização.	49
Tabela 13 – Retração dos agregados contendo 30% de vidro e 5% de SiC em diferentes parâmetros de queima.	50
Tabela 14 – Tamanho médio dos poros para 1 minuto de patamar.	55
Tabela 15 – Tamanho médio dos poros para 20 minutos de patamar.	55
Tabela 16 – Medida de deformação dos cones antes e após a sinterização e retração linear (patamar de 1 minuto).	62
Tabela 17 – Intervalo das propriedades dos agregados leves produzidos com patamar de 1 minuto.	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estudos sobre possíveis aplicações da casca de ovo no setor de construção.....	28
Quadro 2 – Principais teorias sobre o mecanismo de expansão de agregados leves, segundo outros autores.....	63

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
2 REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 AGREGADOS LEVES.....	16
2.1.1 Definições e propriedades.....	16
2.1.2 Processo de fabricação	17
2.1.3 Fenômeno de expansão pirolástica.....	18
2.1.4 Influência dos parâmetros de produção	21
2.1.4.1 Influência da composição química, mineralógica e granulométrica.....	22
2.1.4.2 Influência dos parâmetros de queima	23
2.2 INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NA FABRICAÇÃO DE AGREGADOS LEVES	24
2.2.1 Vidro	25
2.2.1.1 Influências das propriedades do vidro na produção do agregado leve	26
2.2.2 Casca de ovo	27
2.2.2.1 Composição química da casca do ovo	29
2.2.2.2 Análises térmicas da casca de ovo	29
3 METODOLOGIA	31
3.1 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	31
3.1.1 Argila	31
3.1.2 Resíduo vidro	31
3.1.3 Resíduo casca de ovo	31
3.1.4 Discos de corte.....	31
3.2.1 Formulação e preparo dos corpos de prova	33
3.2.1.1 Preparo das formulações.....	33
3.2.1.1.1 <i>Análise granulométrica</i>	33
3.2.1.1.2 <i>Análise do cone de fusão</i>	34
3.2.1.2 Preparo dos corpos de prova	34
3.2.2 Sinterização dos agregados leves.....	35
3.2.3 Caracterização dos agregados leves produzidos	35

3.2.3.1 Absorção de água	36
3.2.3.2 Perda ao fogo	37
3.2.3.3 Massa específica aparente	37
3.2.3.4 Análise microscópica.....	37
3.2.3.4 Resistência à compressão.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	39
4.1.1 Análise granulométrica	39
4.1.2 Análise de composição química	39
4.2 ÍNDICE DE EXPANSÃO.....	40
4.3 PERDA AO FOGO E ÍNDICE DE RETRAÇÃO	46
4.4. POROSIDADE	50
4.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	56
4.6 ANÁLISE DE CONE DE FUSÃO.....	60
4.7 RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES E CONDIÇÕES DE QUEIMA DOS AGREGADOS LEVES.....	64
4 CONCLUSÕES.....	66
5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

Agregados leves (do inglês *Lightweight aggregate* - LWAs) podem ser definidos como materiais granulares de estrutura porosa, fabricados e comercializados por diversas empresas ao redor do mundo. Suas aplicações abrangem desde decoração em paisagismos, isolamento acústico e térmico, uso na cultura hidropônica, entre outras utilidades (Cinexpan, 2024).

Na construção civil, os LWAs são caracterizados como materiais artificiais ou naturais que possuem densidade inferior quando comparados aos agregados normais. Devido a essa característica, são empregados em concretos quando são desejadas propriedades como leveza, bom isolamento térmico e resistência (Gomes Neto, 1998).

Entre os LWAs, destaca-se a argila expandida devido a possibilidade de sua utilização na construção civil como agregados para concretos e enchimentos leves. No entanto, com o uso exacerbado dos recursos naturais, incluindo a própria argila, torna-se necessário um reaproveitamento de resíduos. A incorporação de resíduos em materiais de construção surge como uma solução viável e de grande potencial de crescimento. Nesse contexto, o segmento de construção ganha destaque, uma vez que, sendo um ramo de atividade tecnológica, oferece grande capacidade de absorver diversos tipos de materiais de maneira sustentável e eficiente (Moraiva et al., 2006).

Um resíduo gerado diariamente em grandes quantidades é a casca de ovo, devido ao uso industrial de ovos. Pesquisas recentes foram realizadas nesse campo para propor usos para este resíduo da indústria alimentícia, indicando que os resíduos de ovos descartados têm aplicações agrícolas, médicas e industriais (Aditya et al., 2021). Na construção civil, a casca de ovo tem sido investigada principalmente devido à semelhança com o cimento em termos de quantidade de óxido de cálcio (Murthi et al., 2022).

Além das cascas de ovos, o vidro, material utilizado de maneira ampla, também pode ser incorporado em materiais para construção, ajudando no problema de seu descarte e armazenamento. No Brasil, conforme dados do Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE, 2022), em torno de 3% dos resíduos urbanos produzidos são provenientes de resíduos de vidro, sendo 2% resultantes de falhas e quebras ao longo do processo de fabricação, tratamento, furação, corte, transporte e manuseio e 19 1% de origem de embalagens. No entanto, o índice de reciclagem de vidro no país no ano de 2022 foi de apenas 25,8%.

O carbetto de silício (SiC) é um material amplamente utilizado como agente expansivo na produção de cerâmicas (Eom et al., 2013). Apesar de seu custo relativamente elevado, uma alternativa para reduzir despesas e promover a sustentabilidade é o reaproveitamento de resíduos de SiC, como por exemplo, lixas e discos de corte usados. Esse processo de reciclagem permite incorporar SiC em novos processos de produção de materiais expansivos, reduzindo custos.

Sob essa perspectiva, a crescente preocupação com a sustentabilidade tem impulsionado diversos estudos sobre a possibilidade de incorporação de materiais residuais nos LWAs. A literatura apresenta uma ampla gama de pesquisas focadas na substituição parcial ou total de matérias primas convencionais, como lodo de esgoto (Wang et al., 2009), vidro (Tuan et al., 2013) e cinzas volantes (Bijen et al., 1986), na produção de agregados leves.

Por se tratarem de materiais residuais com distintas composições e propriedades, que em sua maioria divergem das características da argila, frequentemente utilizada na produção de agregados leves, o comportamento de expansão desses materiais pode ser bem diferente. Isso resulta em diversas teorias sobre os fatores que influenciam no mecanismo de expansão do agregado leve. González-Corrochano et al., (2009) destaca que a expansão dos LWAs depende da formação de uma fase viscosa adequada que retém e libera os gases de maneira simultânea. Os autores Nguyen et al., (2021), Soltan et al., (2016) e Dondi et al., (2016), reforçam que o controle da composição química e do tamanho das partículas influencia de maneira significativa a expansão dos agregados leves produzidos.

Essas referências mostram que a expansão dos LWAs é um fenômeno complexo, influenciado por uma combinação de fatores envolvendo principalmente a composição dos materiais, o tamanho das partículas, a viscosidade da fase líquida e os parâmetros de sinterização (Dondi et al., 2016). Dessa forma, para a produção de agregados leves com boas propriedades, faz-se necessário um controle cuidadoso de todas essas variáveis.

A incorporação de resíduos em agregados leves tem ganhado destaque na construção civil por promover materiais mais sustentáveis. Apesar dos avanços nas pesquisas sobre agregados leves produzidos a partir de resíduos, ainda existe uma lacuna na literatura quanto ao uso de cascas de ovos como matéria-prima para a sua fabricação.

Portanto, o presente estudo se justifica pela necessidade de ampliar as opções de matérias-primas sustentáveis na construção civil. Além disso, ao investigar o uso de cascas de ovos em combinação com materiais como a argila e o vidro, esta pesquisa busca contribuir para o avanço do conhecimento técnico sobre o impacto de diferentes parâmetros de queima na formação e no desempenho de agregados leves, abrindo novas possibilidades para práticas futuras envolvendo essa matéria-prima.

Assim, o objetivo do presente estudo é realizar a incorporação dos resíduos vidro, casca de ovo e discos de corte na produção de agregados leves. O estudo aborda os efeitos de diferentes temperaturas e durações de sinterização nas propriedades dos LWAs e o comportamento dos resíduos.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção, serão apresentados os objetivos gerais e específicos.

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver agregados leves a partir de argila e os resíduos vidro, casca de ovo e discos de corte.

1.1.2 Objetivos específicos

- Investigar a influência dos parâmetros de queima nas propriedades dos agregados leves;
- Investigar o comportamento térmico e as interações entre a argila e os resíduos vidro, casca de ovo e discos de corte durante o processo de sinterização;
- Avaliar a influência de diferentes proporções de casca de ovo e vidro na expansão e nas propriedades estruturais dos agregados leves formados;
- Comparar o desempenho dos agregados leves obtidos com diferentes formulações em análises como resistência e absorção de água.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Agregados leves podem ser definidos como materiais granulares de estrutura porosa e baixa densidade, fabricados e comercializados por diversas empresas ao redor do mundo (Cinexpan, 2024). A utilização de LWAs na construção civil tem ganhado destaque devido às suas vantagens, aplicações e propriedades, como ilustra o esquema da Figura 1.

Figura 1 – Principais propriedades, vantagens e aplicações dos agregados leves.



Fonte: Elaborado a partir de De Souza Santos (1992) e CINEXPAN (2024).

Conforme apresenta a Figura 1, os LWAs possuem alta porosidade, baixa densidade e capacidade de absorção de água. Essas características os tornam ideais para aplicações específicas em projetos que demandam leveza e isolamento. Entre as vantagens dos agregados leves, estão a redução do peso em estruturas, a melhoria do isolamento térmico e acústico e a sustentabilidade ambiental. Podem ser utilizados para isolamentos, tanto térmico quanto acústicos, como para infraestruturas, desde aterros e pavimentos a blocos e painéis.

Agregados leves podem ser classificados conforme sua origem, sendo naturais ou artificiais. Segundo De Souza Santos (1992), os agregados leves naturais, como pedra-pomes e escórias vulcânicas, passam por processos de extração e classificação granulométrica adequados ao seu uso. Já os agregados artificiais são obtidos em processos industriais, produzidos em fábricas a partir de tratamentos térmicos de matérias-primas (Borja et al., 2011).

Nesta seção, será apresentada uma revisão bibliográfica com ênfase em agregados leves artificiais, abordando suas propriedades, processos de fabricação, trabalhos anteriores e a incorporação de resíduos na sua produção.

2.1 AGREGADOS LEVES

2.1.1 Definições e propriedades

Agregados leves para a construção civil são materiais de estrutura porosa que possuem densidade inferior aos agregados normais, conforme apresenta a Tabela 1.

Tabela 1 – Densidade dos diferentes tipos de agregados.

Tipo de agregado	Densidade (kg/m ³)	Descrição
Leve	< 2000	Agregados leves usados na construção, com baixa densidade para concretos leves
Normal	2000 – 2800	Agregados normais usados na construção para concretos convencionais
Pesado	< 2800	Agregados pesados utilizados na construção, com alta densidade para concretos pesados

Fonte: Elaborado a partir de NBR 12655 (2015).

As propriedades desejáveis dos agregados leves incluem baixa massa específica, alta resistência mecânica, ausência de pontas e arestas agudas, inércia química, baixa absorção de água, faixa granulométrica adequada e bom custo-benefício (De Souza Santos, 1992).

Em relação à massa específica, o agregado deve ter entre um terço e dois terços do peso dos agregados convencionais que se deseja substituir. A resistência mecânica deve ser alta, pois isso resulta em um concreto mais resistente. Além disso, o agregado deve ter forma e textura sem pontas ou arestas agudas para melhorar a trabalhabilidade do concreto. No entanto, partículas excessivamente lisas, sem rugosidade superficial, podem não aderir bem à argamassa (De Souza Santos, 1992).

Além disso, devem apresentar uma faixa granulométrica adequada e uma quantidade apropriada de finos para garantir a trabalhabilidade ideal. Ademais, para evitar reações indesejadas com o cimento e que possam prejudicar suas propriedades, os agregados devem apresentar inércia química (De Souza Santos, 1992).

Agregados com alta absorção de água, devido aos poros abertos, podem comprometer a qualidade do concreto e da argamassa, exigindo mais cimento e resultando em menor volume de concreto. Assim, saturar os agregados com água antes do uso pode ajudar a minimizar esse problema (De Souza Santos, 1992).

2.1.2 Processo de fabricação

Os métodos mais utilizados para a fabricação dos agregados leves artificiais são através de fornos rotativos e fornos de bancada. O processo de produção em forno rotativo faz o uso de materiais que têm capacidade de se expandirem quando submetidos a temperaturas elevadas (em torno de 1000°C a 1350°C). Nessa faixa de temperatura, uma parte dos constituintes do material se funde gerando uma massa viscosa, enquanto a outra parte se decompõe quimicamente liberando gases que são incorporados por essa massa, expandindo-a (Moraive et al., 2006). Além disso, esse processo de fabricação promove a formação de uma camada vitrificada externa na partícula com baixa porosidade. O agregado produzido por esse processo recebe também a denominação de "encapado", pois possui uma camada externa de material vítreo que diminui de maneira significativa a absorção de água (De Souza Santos, 1992).

De Souza Santos (1992) descreve o processo de fabricação da argila expandida em forno rotativo em oito etapas principais:

- a) Homogeneização: a matéria-prima é lançada em depósitos para ser homogeneizada;
- b) Desintegração: o material passa por um desintegrador para reduzir os grandes torrões;
- c) Mistura e nova homogeneização: é realizada a correção de água e podem ser utilizados aditivos para melhorar a plasticidade da argila ou para aumentar sua expansão durante a queima. O material é transportado por meio de esteiras

- para um misturador com a finalidade de deixar a argila com a trabalhabilidade adequada para extrusão;
- d) Laminação: o material passa por dois cilindros rotativos que eliminam os torrões, deixando a mistura pronta para extrusão;
 - e) Pelotização: é realizada por extrusão contínua onde o material é forçado contra uma placa perfurada por orifícios circulares. O diâmetro desses orifícios influencia no diâmetro dos agregados após a queima. O material que sai pelos orifícios é cortado por uma lâmina rotativa, formando as pelotas que são lançadas ao forno;
 - f) Secagem e queima: a disposição das aletas internas para condução do material, a inclinação do forno, o tempo de permanência dentro do forno, além de outros detalhes específicos, dependem das características da argila. Na primeira fase, ocorre a secagem das pelotas e na zona de combustão o forno atinge a temperatura prevista poro expansão das pelotas;
 - g) Resfriamento: geralmente é utilizado um cilindro na saída do forno, onde o ar é soprado por ventiladores;
 - h) Classificação e estocagem final: os agregados leves são classificados em peneiras vibratórias e armazenados para comercialização.

Em escala laboratorial, os fornos de bancada são frequentemente mais utilizados em comparação ao uso de fornos rotativos. Isso se deve principalmente pela maior acessibilidade a equipamentos, ao menor consumo de energia e à necessidade de menores quantidades de material.

2.1.3 Fenômeno de expansão piropiástica

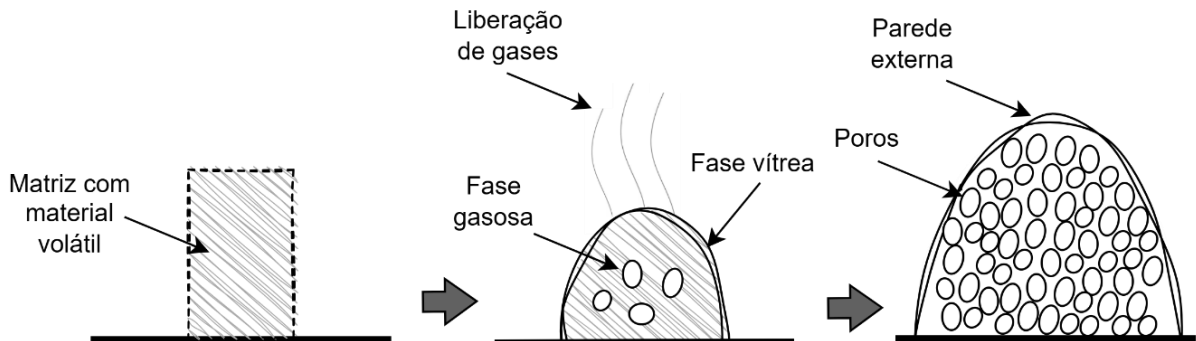
A expansão piropiástica, fenômeno de formação de gases, é um processo essencial para a produção de agregados leves. Nesse fenômeno é necessário que, durante a queima, a água e os gases voláteis presentes nas matérias-primas se vaporizem, de modo a criar uma pressão interna que propicie a expansão do material e a formação de poros. De maneira simultânea, a camada externa e superficial do agregado deve fundir-se parcialmente, formando uma casca mais resistente que possa aprisionar os gases internos, permitindo que a estrutura de poros interna permaneça protegida (Riley, 1951).

De um ponto de vista físico, o processo de expansão pirolástica consiste no somatório de todas as pequenas expansões de poros individuais que estão fechados (Mendes, 1998). A ampliação dos poros é influenciada por diversos fatores combinados, como a pressão dos gases, a viscosidade do sistema, o tempo de aquecimento, a temperatura de sinterização, além das características mineralógicas, químicas e granulométricas das matérias-primas utilizadas (De Souza Santos, 1992). Conforme De Souza Santos (1992), existem condições ideais para que a expansão pirolástica produza uma estrutura interna porosa e uma estrutura externa fechada, entre elas:

- a) O material precisa possuir, dentro das condições pirolásticas, teores de vidro suficientes para reter os gases formados e obstruir os poros;
- b) A matéria-prima deve possuir uma quantidade adequada de substâncias produtoras de gases para produzir o grau de expansão adequado;
- c) Os gases devem ser liberados em velocidade, quantidade e temperatura adequadas e condizentes com as condições pirolásticas;
- d) O material deve expandir na menor temperatura possível por razões econômicas. Ainda de acordo com De Souza Santos (1992), caso uma fase vítrea de baixa viscosidade seja formada ou não exista um teor de fundentes adequados para formar a fase vítrea, não há expansão, pois os gases irão escapar.

Em baixas temperaturas, a viscosidade da fase vítrea formada não é o suficiente para selar a superfície dos corpos de prova, ocorrendo liberação de uma parte do material volátil. Ao elevar a temperatura, forma-se uma fase vítrea que é capaz de isolar os poros e iniciar o processo de expansão do material. A Figura 2 apresenta o mecanismo do processo de expansão.

Figura 2 – Formação de uma fase vítrea contínua que favorece o mecanismo de expansão.



Fonte: Elaborado pela autora a partir de Mendes (1998).

Na Figura 2, observa-se que a fase vítrea deve apresentar uma viscosidade adequada para a formação de um grande número de poros para resultar em uma densidade baixa ao agregado leve e uma “parede” externa que delimite os poros e eleva a resistência mecânica (Mendes, 1998). A camada superficial pode ser expandida de forma ideal até um limite crítico, que depende da interação entre a fase gasosa e a fase vítrea e a da relação entre a pressão interna e externa.

Cougy (1990) realizou estudos voltados para a produção de agregados leves a partir de matérias-primas argilosas e propôs um modelo de expansão que pode ser utilizado para a fabricação de agregados leves a partir de resíduos. O modelo apresenta as condições ideais e necessárias para a expansão de materiais argilosos, destacando a viscosidade e temperatura durante o processo de queima: a viscosidade não deve ser muito elevada e nem muito baixa e deve haver a liberação de gases.

Além do estudo de Cougy (1990), é possível encontrar outras análises sobre a expansão de materiais argilosos. Dondi et al., (2016) realizou uma revisão da literatura e separou em duas classes os fatores que afetam o mecanismo de expansão:

- a) Fatores que dependem das propriedades físicas e químicas do corpo: composição química a granel, composição da fase, distribuição de tamanho de partículas, uso de aditivos, viscosidade em alta temperatura da fase vítrea;
- b) Fatores que dependem das condições de processamento: temperatura máxima, taxa e duração de pré-aquecimento, atmosfera e projeto da fornalha.

Conforme De Gennaro et al (2008), além do papel da viscosidade, gases naturais ou substâncias adicionadas às matérias-primas são essenciais para o

fenômeno de expansão. Os materiais artificiais (aditivos) usados na liberação de gases são os carvões, ceras e hidrocarbonetos, que, ao sofrerem combustão, levam à geração de dióxido de carbono, monóxido de carbono e fuligens; e os gases naturais podem ser (De Gennaro, 2008):

- a) Vapor de água proveniente da volatilização das moléculas de água das camadas interiores;
- b) CO₂ a partir da dissociação de carbonatos;
- c) CO e CO₂ da combustão da matéria orgânica;
- d) F e Cl dos minerais da argila;
- e) SO_x da oxidação do sulfeto.

2.1.4 Influência dos parâmetros de produção

A estrutura dos poros é um fator crucial na absorção de água, resistência e densidade dos agregados leves. A porosidade é fortemente influenciada pelas características das matérias-primas e pelos parâmetros de produção. Uma distribuição uniforme do tamanho dos poros pode ser obtida pela homogeneização das matérias-primas através de técnicas como moagem e peneiramento, além do controle dos parâmetros de queima (Ayati et al., 2018).

A estrutura ideal dos poros nos agregados leves consiste em poros uniformemente distribuídos pela matriz central, cercados por uma superfície não porosa (Figura 3).

Os fatores que influenciam na estrutura dos poros em agregados leves estão divididos em duas categorias principais: as características das matérias-primas, que incluem a composição química, mineralógica e granulométrica, sendo aspectos fundamentais para garantir uma formação adequada da estrutura porosa; e os parâmetros de produção, que envolvem a temperatura de sinterização, taxa de aquecimento e o tempo de permanência. A "estrutura Ideal" ilustrada na figura mostra poros uniformemente distribuídos pela matriz central, cercados por uma superfície não porosa, o que resulta em agregados leves com características ideais de desempenho.

Figura 3 – Principais fatores que interferem na porosidade dos agregados leves.



Fonte: Elaborado pela autora a partir de Ayati et al. (2018).

2.1.4.1 Influência da composição química, mineralógica e granulométrica

O mecanismo de expansão em minerais de argila ocorre quando uma fase viscosa contendo silicato captura gases liberados em alta temperatura. Esses gases são normalmente resultantes da decomposição da matéria orgânica ou outros componentes voláteis presentes na argila. A captura desses gases pela fase viscosa que provoca a expansão da argila, resultando na expansão. Já o teor de fluxos, que inclui componentes como óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O), óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), determina a faixa de temperatura na qual a piroplasticidade ocorre (Ayati et al., 2018).

A viscosidade da fase viscosa, por sua vez, é influenciada por vários fatores, incluindo o teor de silicato. A razão entre o dióxido de silício (SiO_2) e a soma dos fluxos (Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO , MgO) é uma característica mineralógica importante, usada para prever a expansão de corpos de argila. Para uma expansão eficaz, é necessário formar uma camada superficial vitrificada e não porosa, ou seja, uma

casca. Essa casca deve ser capaz de capturar os gases liberados durante o processo de aquecimento (Ayati et al., 2018).

Riley (1951) correlacionou a composição química de diferentes argilas (a partir da sua queima em forno) com a ocorrência ou não da expansão e constatou que a escolha da formulação dos agregados é crucial, visto que os teores de sílica, alumina e fundentes não devem ultrapassar certos limites.

De acordo com Cougny (1990), o fenômeno de inchaço em agregados pode ser influenciado pela granulometria do material que será utilizado. Dessa forma, o tamanho das partículas e sua área superficial podem auxiliar no aprisionamento dos gases. O estudo de Riley (1951) destaca que argilas com partículas mais finas podem ter uma maior tendência a expandir, pois o aumento da superfície de contato facilita as reações químicas necessárias para a liberação de gases.

Em relação à morfologia, Riley (1951) destaca a importância de compostos na morfologia dos agregados leves, principalmente durante o processo de expansão. Ele aponta que minerais como pirita, hematita e dolomita desempenham um papel importante na liberação de gases que causam a expansão, liberando, por exemplo, oxigênio ou dióxido de enxofre em altas temperaturas, o que contribui para o processo de expansão ao formar uma fase gasosa que é aprisionada pelo material fundido.

2.1.4.2 Influência dos parâmetros de queima

Caso a temperatura for excessivamente alta durante a sinterização, o gás pode ser gerado em excesso, aumentando a porosidade total e produzindo poros contínuos, resultando em uma diminuição na resistência e durabilidade do material. Além disso, a taxa de aquecimento também influencia a microestrutura e, caso for baixa, o material pode ser vitrificado de forma incompleta, permitindo que os gases gerados escapem sem causar inchaço (Ayati et al., 2018).

De acordo com o estudo de Bernhardt et al., (2014), um resfriamento lento é preferível, pois resulta em melhores valores de resistência. O resfriamento rápido pode causar microfissuras entre o núcleo e a superfície do agregado leve. Nessas condições, a casca e o núcleo podem sofrer diferentes contrações térmicas, induzindo estresse na casca e gerando microfissuras que reduzem a resistência.

Além destes parâmetros, o tempo de permanência em altas temperaturas também tem influência sobre a estrutura dos poros, conforme apresentam os autores

Korat et al, (2013). O aumento do tempo de permanência diminui o número de poros e aumenta a porosidade total, essa mudança na estrutura ocorre pelo aumento da conectividade dos poros.

2.2 INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NA FABRICAÇÃO DE AGREGADOS LEVES

Diante dos problemas relacionados à geração de resíduos industriais, diversos estudos que visam a incorporação de resíduos na produção de agregados leves ganharam destaque desde a última década. A Tabela 2 apresenta diferentes matérias-primas utilizadas por outros autores para a fabricação de agregados leves.

Tabela 2 - Diferentes resíduos utilizados por outros autores para produção de agregados leves.

Referência	Resíduo utilizado	Teores de adição do resíduo
Mun et al., 2007	Lodo de esgoto	50%; 66,67% e 83,33%
Chindaprasirt et al., 2009	Cinzas de casca de arroz	50% e 20,57%
De Gennaro et al., 2008	Rochas ricas em zeólitas	50%; 55%; 60% e 65%
Tuan et al., 2013	Vidro	10%; 30% e 50%
Chiou et al., 2006	Cinzas de esgoto	70%; 80%; 90% e 100%

Como é possível observar na Tabela 2, as proporções utilizadas pelos autores variam para atender os requisitos para o processo de formação, uma vez que os resíduos possuem diferentes propriedades e características. Conforme Dondi et al., (2016), o principal desafio na fabricação de agregados leves com resíduos é o controle de seu comportamento tecnológico durante a queima. Propriedades básicas, como densidade aparente, resistência mecânica e absorção de água, devem ser adaptadas para várias aplicações pois dependem dos processos de sinterização e expansão.

Diversos fatores desempenham um papel significativo durante a queima dos agregados leves, incluindo composição química, tamanho da partícula e das pelotas, viscosidade da fase vítrea, cronograma de queima, atmosfera e projeto do forno, uso de aditivos, entre outros (Dondi et al., 2016). A Tabela 3 apresenta a composição química de diferentes resíduos utilizados em estudos anteriores para produção de agregados leves.

Tabela 3 – Principais componentes químicos de diferentes resíduos utilizados para a fabricação de agregados leves.

Referência	Resíduo utilizado	Composição química								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	PF*
Mun et al., 2007	Lodo de esgoto	52,0	20,9	4,1	8,9	2,2	3,1	5,3	ND	ND
Chindaprasit et al., 2009	Cinzas de casca de arroz	87,5	2,5	0,8	0,40	1,6	4,7	ND	ND	2,52
Chiou et al., 2006	Cinzas de esgoto	63,3	15,4	1,8	6,8	1,0	1,5	7,0	1,0	ND
De Gennaro et al., 2008	Rochas ricas em zeólitas	54,5	15,2	4,1	4,0	0,9	6,9	0,1	ND	12,5

*Não Disponível

*Perda ao fogo

A partir dos estudos mencionados, verificou-se que foram utilizadas diferentes matérias-primas para a confecção de LWAs. A análise dos resultados de composição química revela semelhanças entre os componentes que foram encontrados em todas as pesquisas, como o dióxido de silício, óxido de alumínio e óxido de cálcio, presentes em maior quantidade na maioria dos trabalhos. Como visto, o dióxido de silício é um componente importante para a formação da estrutura dos agregados leves, pois, durante o processo de sinterização, o SiO₂ reage com outros óxidos presentes nas matérias-primas e forma fases vítreas que aumentam a resistência dos agregados leves.

Dessa forma, percebe-se a importância de uma análise detalhada da composição química dos materiais que serão utilizados para a produção dos agregados leves, para compreender a interação e a concentração dos componentes. Além disso, a análise química permite o ajuste das proporções dos materiais para que ocorra a expansão dos agregados.

2.2.1 Vidro

O estudo de Rosa, Cosenza e Barroso (2007) identificou o uso de resíduos de vidro como um tema de destaque na pesquisa de materiais. Isso ocorre pois é visto como um material que possui boas propriedades para aplicações na construção civil.

O vidro utilizado de embalagens descartadas pode ser uma alternativa para o reaproveitamento na produção de cerâmicas. A utilização de subprodutos industriais com outros resíduos é comum na literatura. A presença de teor de sódio no vidro influencia no fluxo de fusão e na captura de gás durante a sinterização de agregados leves, que também reduz a viscosidade da fase líquida em altas temperaturas (Bouachera, 2021). Dessa forma, diversos autores já exploraram as propriedades do vidro combinado com diferentes materiais para a produção de agregados leves, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Temperaturas e teores de vidro utilizados para produção de agregados leves em estudos anteriores.

Autor/ano	Matéria-prima	Teores de adição do vidro	Temperatura de sinterização
Tuan et al., 2013	Lodo e resíduos de vidro	10%, 30% e 50%	830 – 1100 °C
Wei, Cheng e Ko, 2016	Cinza volante de carvão e pó de vidro	25%	Entre 1050 e 1300°C
Kourti e Cheeseman, 2010	Cinza volante de carvão e pó de vidro	40%	1120°C
Li et al., 2020	Lodo e resíduos de vidro	5%, 10%, 20% e 85%	1180 °C
Bouachera et al., 2021	Argila, lodo e resíduos de vidro	20% e 30%	700 – 1030 °C

*Não Disponível

Conforme Li et al. (2020) o sistema de sinterização tem uma influência muito importante nas características físicas dos agregados leves. Para que esses materiais apresentem um excelente desempenho, só podem ser preparados permanecendo por um tempo adequado em uma temperatura de sinterização adequada.

2.2.1.1 Influências das propriedades do vidro na produção do agregado leve

O vidro mais amplamente produzido para fins comerciais é o vidro sodo-cálcico, utilizado na fabricação de garrafas, potes, frascos e no processamento de vidros planos empregados na construção civil, na indústria automobilística e em eletrodomésticos (Pokorny et al., 2011). Esse tipo de vidro é composto principalmente de dióxido de silício (SiO_2), óxido de sódio (Na_2O) e óxido de cálcio (CaO) (Wei et al., 2021). Ele influencia de maneira significativa as propriedades dos agregados leves, reduzindo a temperatura de sinterização e os custos associados. Além disso, aumenta

a resistência e a durabilidade, formando fases líquidas e influenciando a porosidade (Kourti et al., 2010).

O vidro sodo-cálcico tem um ponto de fusão significativamente mais baixo do que a argila devido à presença de óxidos fundentes, que reduzem a temperatura necessária para a sinterização. Esses óxidos, como Na_2O e CaO , promovem a fusão parcial da mistura a temperaturas mais baixas em comparação com a temperatura necessária para a sinterização da argila pura. Conforme observado no estudo de Tuan et al., (2013), a adição de quantidades adequadas de resíduos de vidro pode levar à redução da temperatura de sinterização, aumento do efeito de expansão e economia de energia. Os autores constataram que os pellets contendo maiores quantidades de resíduos de vidro apresentaram maior expansão.

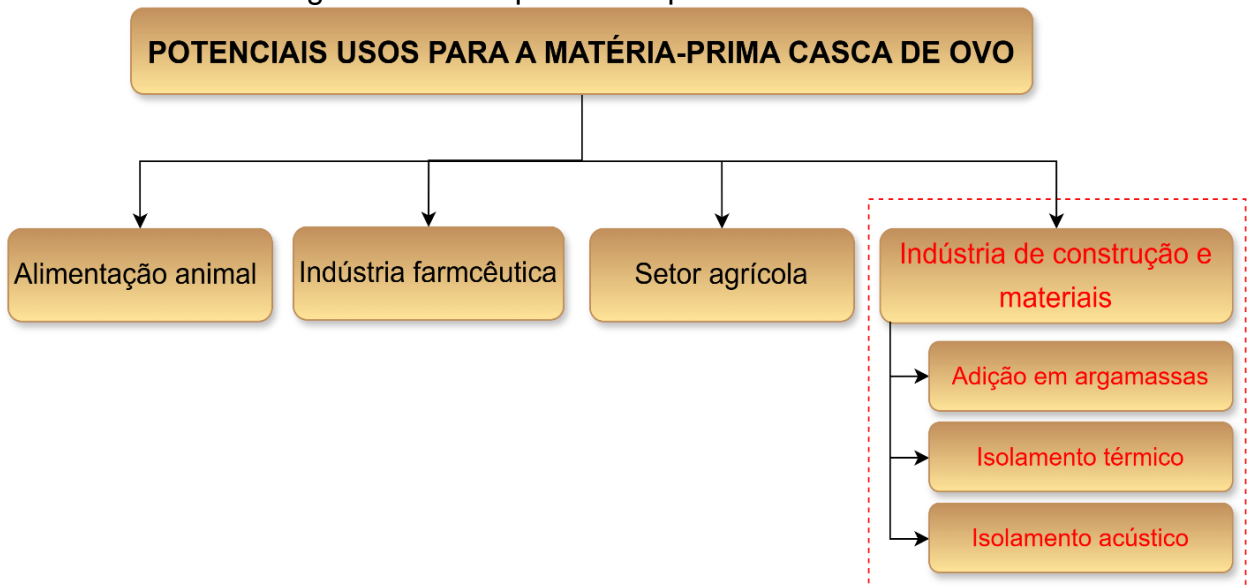
Durante o aquecimento, o vidro começa a fundir e formar uma fase líquida. Essa fase líquida facilita a difusão de íons entre as partículas de argila, promovendo a coalescência dessas partículas. O vidro também pode influenciar na formação de poros e na densidade do agregado leve, pois durante a sinterização, a liberação de gases voláteis da decomposição de componentes da argila e do vidro ajuda a criar poros dentro do material (Tuan et al., 2013).

Segundo Wei et al., (2021), em geral, os LWAs preparados sob condições de temperatura mais baixa e menor adição de vidro são caracterizados por poros menores e mais finos, enquanto a condição oposta leva ao produto contendo poros maiores.

2.2.2 Casca de ovo

A geração de resíduos em grandes volumes é um problema emergente que vem desencadeando uma série de consequências adversas, principalmente impactos ambientais. No setor alimentício vários fatores contribuem para isso, incluindo partes não comestíveis de plantas e animais, como o caso da casca de ovo, que é um resíduo gerado diariamente a partir do uso industrial de ovos. Nos últimos anos, várias pesquisas foram realizadas para propor potenciais usos para este resíduo da indústria alimentícia, indicando que as cascas de ovos descartadas têm aplicações agrícolas, médicas e industriais (Aditya et al., 2021), conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4 – Usos potenciais para cascas de ovos.



Fonte: Elaborado pela autora a partir de Aditya et al. (2021).

A integração de resíduos em materiais de construção apresenta-se como uma solução viável e de grande potencial de crescimento. A incorporação da casca de ovo em aplicações na construção civil tem sido investigada principalmente devido a sua semelhança com o cimento em termos de quantidade de óxido de cálcio (Murthi et al., 2022).

A utilização de cascas de ovos em materiais de construção civil é uma alternativa viável que promove a reciclagem desse resíduo. Mostrando-se uma matéria-prima versátil, pode ser incorporada em diversos tipos de materiais desse setor (Aditya et al., 2021). O Quadro 1 apresenta algumas das aplicações para a casca de ovo no setor de construção.

Quadro 1 – Estudos sobre possíveis aplicações da casca de ovo no setor de construção.

Referência	Aplicação
Wei et al., 2021	Utilização do pó de casca de ovo como substituto parcial do cimento em argamassas.
Mariosi et al., 2021	Utilização de garrafas de vidro descartadas e cascas de ovos para produção de espuma de vidro destinada ao isolamento térmico.
Ibrahim et al., 2022	Utilização potencial de rochas e cascas de ovos para produzir tijolos cerâmicos.
Owuamanam et al., 2021	Fabricação de um compósito com matriz parcialmente derivada de fontes naturais e enchimento de resíduos de casca de ovo.
Nandhini et al., 2022	Pó de casca de ovo pulverizado como substituto parcial do cimento

2.2.2.1 Composição química da casca do ovo

De acordo com Tompa et al. (1976), a casca de ovo é um material inorgânico composto por três camadas principais: mamilar, calcária e cutícula. A casca é predominantemente composta por carbonato de cálcio (CaCO_3), que representa aproximadamente 95% do peso total, e os 5% restantes são constituídos de matéria orgânica, fosfato de cálcio e carbonato de magnésio (Wei et al., 2020).

Hamada et al. (2020), afirmam que o componente principal do pó da casca de ovo é o óxido de cálcio (CaO), com 64,8% de sua composição. Além disso, ainda de acordo com os autores, as propriedades do pó da casca de ovo são relativamente semelhantes às do cimento em termos de quantidade de CaO , o que justifica sua aplicação na construção civil. Diversos estudos na literatura realizaram análises da composição química do pó da casca de ovo, a maioria com valores muito próximos entre si, conforme ilustra a Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química da casca de ovo de acordo com estudos anteriores.

Autores	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Cl	K ₂ O	SO ₃	MgO	P ₂ O ₅	SrO	PF*
Yerramala et al., 2014	52,1	0,08	0,03	0,02	0,15	ND	ND	0,62	0,01	ND	ND	45,4
Freire et al., 2006	50,7	0,09	0,03	0,02	0,19	0,08	ND	0,57	0,01	0,24	0,13	47,8
Parthasarathi et al., 2017	50,7	0,09	0,03	0,02	0,19	0,22	ND	0,57	0,01	0,24	0,13	ND
Hama et al. 2017	50,1	0,13	0,03	0,03	0,16	ND	ND	0,61	0,02	ND	ND	ND
Tchunte et al. 2019	93,2	0,24	0,23	ND	0,13	ND	0,07	0,2	0,85	0,47	0,28	ND
Khalid et al., 2018	98	0,05	0,05	0,02	ND	ND	0,11	0,49	1,12	0,1	ND	ND
Ujin et al., 2016	53,8	0,06	ND	ND	0,02	0,01	0,07	0,98	0,75	0,72	ND	42,2

*Não Disponível

*Perda ao Fogo

Conforme é possível observar na Tabela 5, o óxido de cálcio presente no pó da casca de ovo varia de 50,7% (Freire et al., 2006 e Parthasarathi et al., 2017) a 98% (Khalid et al., 2018) nos estudos analisados, sendo o principal constituinte.

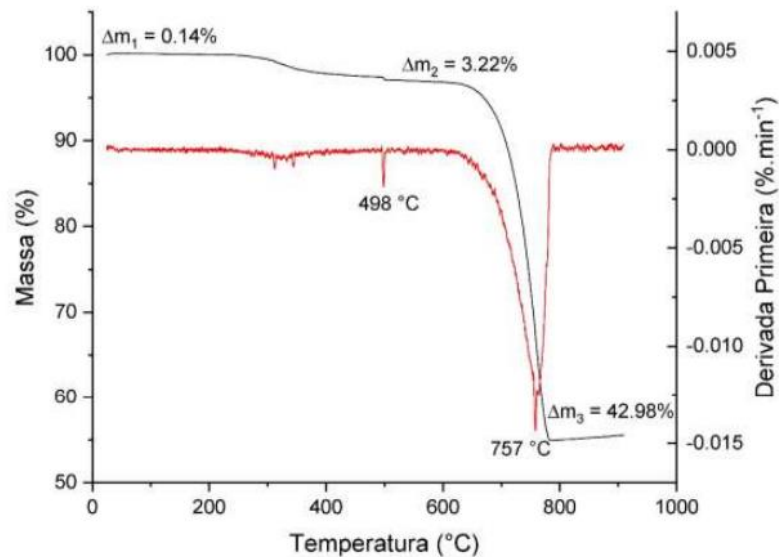
2.2.2.2 Análises térmicas da casca de ovo

Um dos métodos utilizados para a fabricação de materiais porosos é a incorporação de produtos orgânicos dentro dos corpos cerâmicos, que são removidos durante a queima e deixam poros cujo tamanho tem relação com o tamanho das

partículas dos agentes orgânicos (Dutra et al., 2002). Dessa forma, o pó da casca de ovo pode atuar como agente poroso ao ser aquecido.

As cascas de ovo são compostas principalmente de carbonato de cálcio (CaCO_3), uma substância comum encontrada em materiais naturais como calcário e mármore (Hincke et al., 2012). Quando as cascas de ovo são aquecidas a temperaturas acima de 800°C , o carbonato de cálcio se decompõe em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO_2). A decomposição térmica do CaCO_3 ocorre de forma eficiente a partir de 800°C , liberando CO_2 (essencial para a formação de poros). O dióxido de carbono, ao se expandir, cria microbolhas no material, resultando em uma estrutura mais leve e porosa (Hincke et al., 2012). Os autores Salib et al. (2021) realizaram análises térmicas onde é possível visualizar o comportamento da casca do ovo, conforme Figura 5.

Figura 5 - Análise termogravimétrica da casca de ovo.



Fonte: Salib et al. (2021).

Observando a Figura 5, é possível identificar três eventos de perda de massa: o primeiro ocorrendo entre 25°C e 100°C , atribuído principalmente à perda de umidade da casca de ovo; o segundo manifestando-se em torno de 438°C , com a eliminação da fração orgânica (saída de monóxido de carbono e formação de carbonato de cálcio); e o último evento ocorrendo a cerca de 757°C , apresentando a decomposição térmica do carbonato de cálcio (resultando em óxido de cálcio) (Salib et al., 2021).

3 METODOLOGIA

Nesta seção, serão abordadas detalhadamente as matérias-primas e a metodologia aplicadas no presente estudo, visando alcançar os objetivos citados anteriormente.

3.1 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Argila

A argila utilizada para a produção dos agregados leves foi extraída de uma jazida localizada na região do Vale do Caí e fornecida por uma olaria situada na cidade de Feliz, RS.

3.1.2 Resíduo vidro

O vidro sodo-cálcico foi obtido a partir de garrafas de suco. As garrafas foram lavadas, secas e então quebradas em pedaços menores.

3.1.3 Resíduo casca de ovo

As cascas de ovo foram coletadas em residências locais e lavadas para retirada dos resíduos orgânicos.

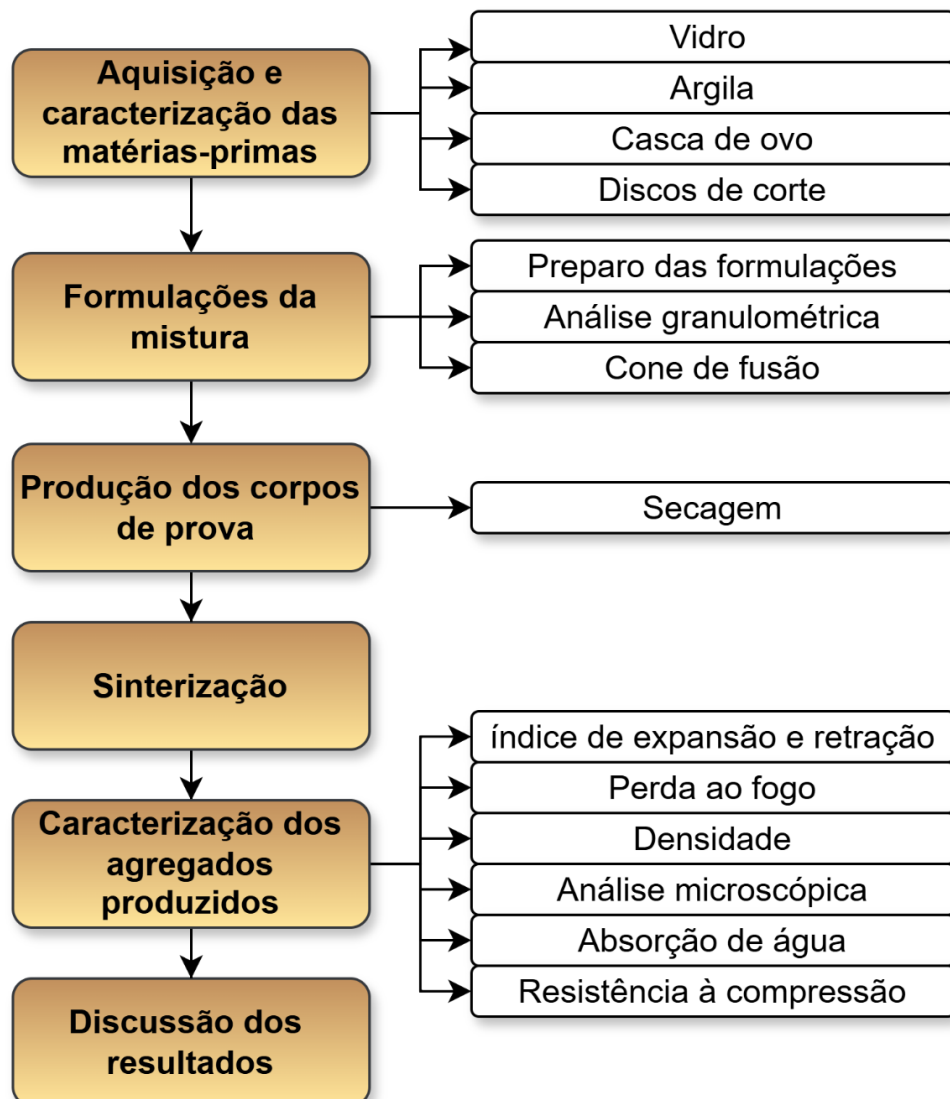
3.1.4 Discos de corte

Os discos de corte foram moídos para a obtenção do carbetto de silício (SiC), o material de interesse do presente estudo. Devido ao percentual em massa do disco de corte ser majoritariamente de SiC, não foram considerados nos cálculos os percentuais dos demais constituintes deste, com certa analogia as argilas que também apresentam matéria orgânica em suas composições

3.2 MÉTODOS

A metodologia utilizada neste estudo é apresentada através de um fluxograma (Figura 6). O processo começa com a aquisição das matérias-primas (vidro, argila, casca de ovo e discos de corte) e em seguida, ocorre a etapa de formulação da mistura, onde são realizados o preparo das formulações, análise granulométrica e testes de cone de fusão. Após, os corpos de prova são produzidos e passam pelo processo de secagem. A etapa de sinterização transforma as misturas em agregados leves que são caracterizados por meio de testes de índice de expansão e retração, perda ao fogo, densidade, análise microscópica, absorção de água e resistência à compressão.

Figura 6 – Fluxograma da organização da pesquisa.



Fonte: Autora (2024).

3.2.1 Formulação e preparo dos corpos de prova

3.2.1.1 Preparo das formulações

Como as matérias-primas foram obtidas em seu estado bruto, fez-se necessário um correto preparo antes de sua utilização. Para isso, realizou-se a secagem dos materiais em estufa e em seguida, a moagem em um moinho de bolas, a fim de se obter pequenas frações granulométricas.

Com base em testes preliminares, foram desenvolvidas sete formulações distintas: três contendo casca de ovo, três com SiC (inspiradas no estudo de Campelo et al., 2023) e uma composta somente por argila. A adição de elevadas porcentagens de vidro foi escolhida para reduzir a temperatura de sinterização das misturas. As formulações detalhadas estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Formulações das misturas para produção dos agregados leves.

Formulação	Vidro (% em massa)	Argila (% em massa)	Casca de ovo (% em massa)	SiC (% em massa)
C5	85	10	5	-
C1	85	14	1	-
C2,5	85	12,5	2,5	-
S55	55	40	-	5
S45	45	50	-	5
S30	30	65	-	5
Argila	0	100	0	0

Fonte: Autora (2024).

Para a mistura, adicionou-se 6% (em massa) de água e 2% (em massa) de silicato de sódio, que atua como um ligante, ajudando a unir as partículas de argila, vidro e as outras matérias-primas da mistura.

3.2.1.1.1 Análise granulométrica

A análise de granulometria foi conduzida começando com a imersão de 10 g de cada formulação em água por 24 h, para o amolecimento das partículas. Após esse período, foi realizado um banho ultrassônico por 380 s para promover a separação eficiente das partículas. Em seguida, a amostra foi peneirada usando uma peneira

de 250 mesh (63 μm). O material retido na peneira foi então seco em estufa para remover a água residual e o percentual retido foi calculado através da Equação 1.

$$\%R = \frac{Mf}{Mi} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

%R = Percentual retido;

Mf = Massa retida na peneira, g;

Mi = Massa inicial, g.

3.2.1.1.2 *Análise do cone de fusão*

A metodologia utilizada para determinar a análise de viscosidade da mistura é semelhante à empregada pelos autores De Mascheville et al. (2009), que utilizaram o cone de fusão para observar a viscosidade dos fundentes, seguindo as seguintes etapas:

- a) Moagem do material em moinho de bolas e secagem;
- b) Conformação dos cones (realizada com um molde);
- c) Queima dos cones;
- d) Avaliação da deformação.

Dessa forma, os cones que apresentaram uma menor deformação, indicaram uma maior viscosidade e o oposto ocorre para os cones que apresentaram maior deformação.

3.2.1.2 Preparo dos corpos de prova

Foram elaborados corpos de prova para cada formulação (Figura 7), em formatos cilíndricos, utilizando um equipamento de prensagem para garantir a uniformidade e a compactação das amostras. Após a prensagem, os corpos de prova permaneceram por 24 h em temperatura ambiente e, em seguida, foram colocados na estufa a 105 °C pelo mesmo período.

Figura 7 – Corpos de prova antes do processo de sinterização.



Fonte: Autora (2024).

3.2.2 Sinterização dos agregados leves

Os corpos de prova foram sinterizados a diferentes temperaturas e em dois patamares, conforme mostra a Tabela 7. Antes dessa etapa, foram realizados testes preliminares para determinar os parâmetros ideais de queima, garantindo a eficiência do processo de sinterização e a obtenção das propriedades desejadas nos materiais.

Tabela 7 – Parâmetros de queima das diferentes formulações.

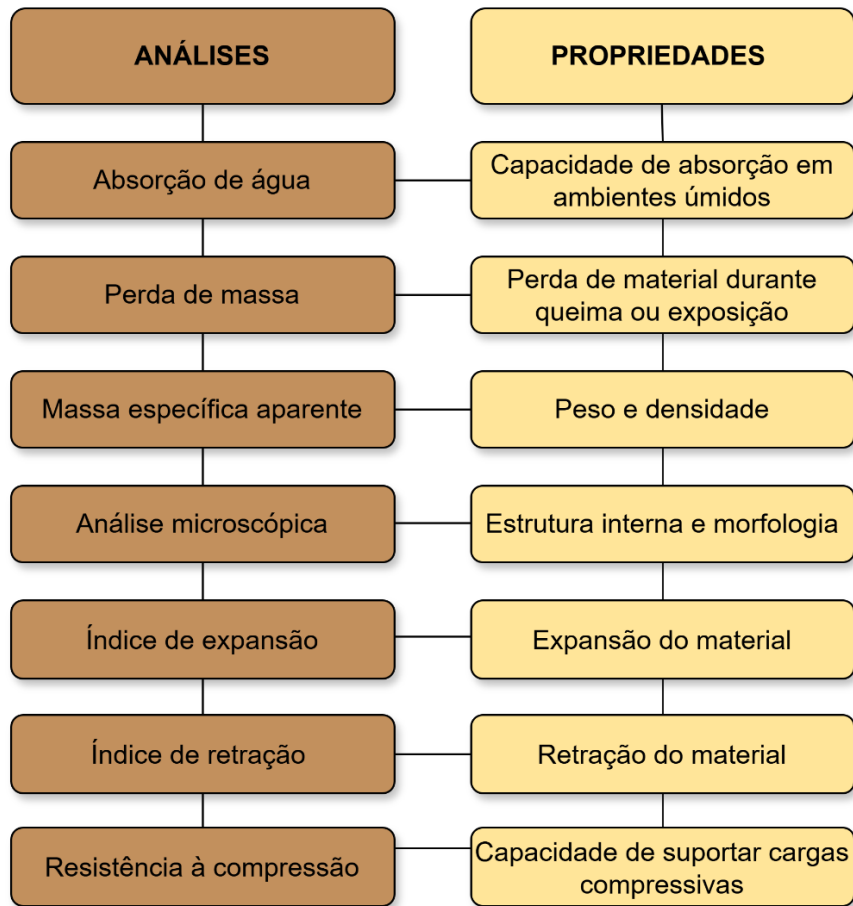
Formulações	Temperatura (°C)	Rampa (°C/min)	Patamar, (min)
C1; C2,5; C5 e argila	825,850,900	15	1 e 20
	925 e 950	10	
S30, S45, S55 e argila	950, 1000, 1050	10	1 e 20

Fonte: Autora (2024).

3.2.3 Caracterização dos agregados leves produzidos

Após concluída a etapa de fabricação, foram realizadas análises para avaliar as propriedades dos agregados leves produzidos, conforme apresenta a Figura 8.

Figura 8 – Análises selecionadas para caracterização dos agregados produzidos.



Fonte: Autora (2024).

3.2.3.1 Absorção de água

Os agregados leves produzidos foram secos em estufa, a 105 °C, por 24 h, para a retirada de toda umidade e pesados. Em seguida, foram imersos em água por 48 h. Após esse período, foram secos superficialmente e então novamente pesados, sendo a absorção de água definida conforme a Equação 2.

$$\text{Absorção (\%)} = \frac{(M_f - M_i)}{M_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

M_f = Massa final da amostra após imersão;

M_i = Massa inicial da amostra seca.

3.2.3.2 Perda ao fogo

Os agregados produzidos foram pesados antes e após a sinterização e a perda ao fogo foi calculada de acordo com a Equação 3.

$$PF = \frac{(Ma - Mr)}{Ma} \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

PF = Perda ao fogo, em %;

Ma = Massa da amostra antes da sinterização, em g;

Mr = Massa após a sinterização, em g.

3.2.3.3 Massa específica aparente

Os agregados leves produzidos foram secos em estufa, a 105 °C, por 24 h, para a retirada de toda umidade e pesados. Em seguida, com auxílio de um paquímetro, medi-se suas as dimensões para calcular a massa específica aparente, conforme a Equação 4.

$$Da = \frac{Ms}{V} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

Da = Massa específica aparente, g/cm³;

Ms = Massa do agregado seco (g);

V = volume aparente dos agregados, cm³.

3.2.3.4 Análise microscópica

Os agregados leves produzidos foram analisados em microscópio da marca Physis, modelo SZ – 24, com aumento de 8 vezes.

3.2.3.5 Índice de expansão

Seguiu-se a metodologia aplicada pelos autores Tuan et al. (2013), e, utilizando-se um paquímetro, medi-se o diâmetro dos agregados antes e após a sinterização, conforme mostra a Equação 5.

$$I = \frac{(d_2 - d_1)}{d_1} \times 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

I = Índice de expansão, %;

d1 = Diâmetro do agregado leve antes da sinterização, mm;

d2 = Diâmetro do agregado leve após sinterização, mm.

3.2.3.4 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada com base na metodologia aplicada por Hiramatsu et al. (1965). As amostras foram introduzidas no equipamento e receberam uma carga de 4,4 Kgf/s até ocorrer a ruptura. A resistência foi calculada conforme a Equação 6.

$$S = \frac{2.8Pc}{\pi X^2} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

S = Resistência à compressão, MPa;

Pc = Carga de fratura que ocorre a ruptura

X = Distância entre os pontos de carregamento

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

4.1.1 Análise granulométrica

Os resultados para a análise granulométrica realizada com a peneira de 250 mesh (63 μm) foram compilados na Tabela 8.

Tabela 8 – Percentual de retenção granulométrica das formulações.

Formulação	% Retido
C1	1,43
C2,5	13,21
C5	7,39
S30	6,31
S45	23,91
S55	8,47

Fonte: Autora (2024).

De acordo com Cougny (1990), o fenômeno de expansão em agregados pode ser influenciado pela granulometria do material que será utilizado. Dessa forma, o tamanho das partículas e sua área superficial podem auxiliar no aprisionamento dos gases. Analisando a Tabela 8, observa-se que os percentuais de material retido variaram de 1,43 a 13,21% para formulações com casca de ovo e de 8,47 a 23,91% nas formulações com SiC.

4.1.2 Análise de composição química

Foram realizados testes de análise de composição química das matérias-primas vidro, argila e casca de ovo. O vidro é caracterizado por um alto teor de sílica, 71,52%, com quantidades significativas de sódio e cálcio. A argila é rica em sílica, 59,21%, e alumina, 16,03%, características comuns em argilas usadas na produção de cerâmica. A casca de ovo, por sua vez, é composta principalmente por óxido de cálcio, 52,51%, proveniente da decomposição do carbonato de cálcio, e apresenta uma alta perda ao fogo, 46,45%, indicando a decomposição do carbonato. A Tabela 9 apresenta esses resultados.

Tabela 9 – Composição química das matérias-primas.

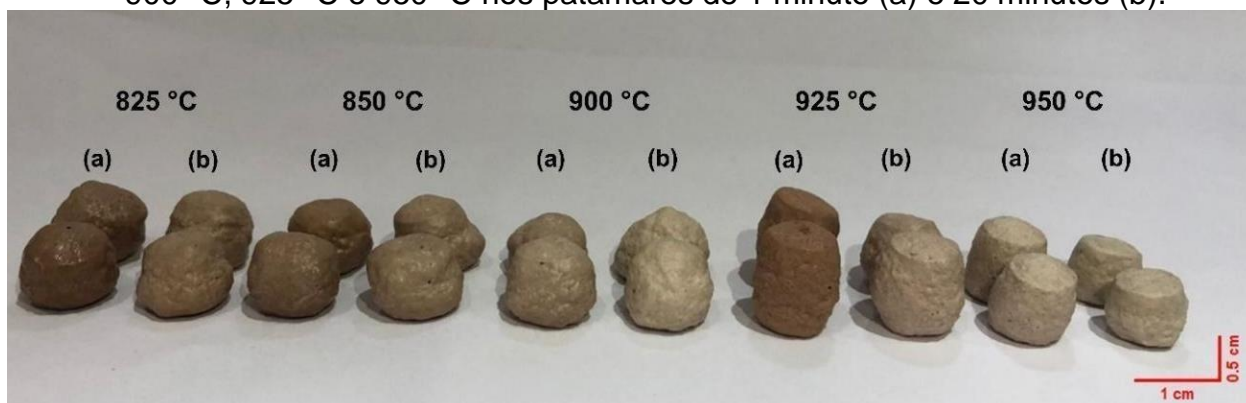
Óxidos analisados (%)	Vidro	Argila	Casca de ovo
SiO ₂	71,52	59,21	0,56
TiO ₂	< LQ	1,61	< LQ
Al ₂ O ₃	1,76	16,03	< LQ
Fe ₂ O ₃	0,44	11,17	< LQ
MnO	< LQ	0,20	< LQ
MgO	0,29	1,23	0,70
CaO	11,6	1,53	52,51
Na ₂ O	13,43	0,86	0,16
K ₂ O	0,14	1,36	< LQ
P ₂ O ₅	< LQ	0,18	0,23
SO ₃	0,35	< LQ	< LQ
Perda ao fogo, %	0,00	7,08	46,45

* < LQ = Abaixo do limite quantificável Fonte: Autora (2024).

4.2 ÍNDICE DE EXPANSÃO

Os agregados leves contendo 5% de casca de ovo apresentaram expansão em todas as temperaturas testadas (825 °C, 850 °C, 900 °C, 925 °C e 950 °C) e em ambos os patamares (1 e 20 minutos), conforme ilustrado na Figura 9.

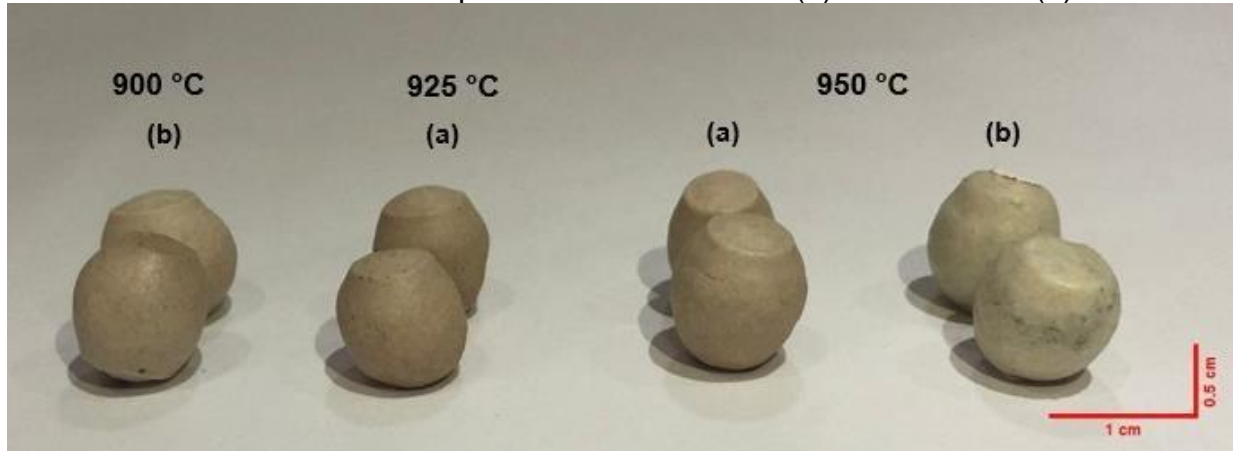
Figura 9 – Agregados com 5% de casca de ovo (C5) após a queima a 825 °C, 850°C, 900 °C, 925 °C e 950 °C nos patamares de 1 minuto (a) e 20 minutos (b).



Fonte: Autora (2024).

Os agregados contendo 2,5% de casca de ovo, por outro lado, apresentaram expansão somente a 900 °C, 925 °C e 950°C, como mostrado na Figura 10.

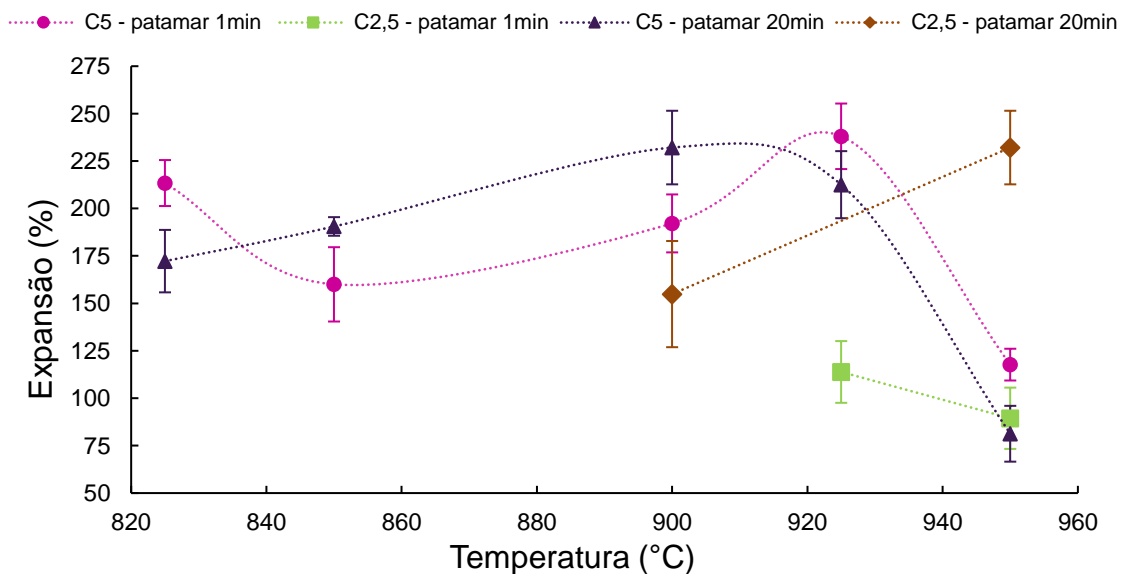
Figura 10 – Agregados com 2,5% de casca de ovo (C2,5) após a queima a 900 °C, 925 °C e 950 °C nos patamares de 1 minuto (a) e 20 minutos (b).



Fonte: Autora (2024).

Conforme Riley (1951), o fenômeno de expansão dos agregados leves está atrelado a duas condições principais: a formação de uma fase líquida com viscosidade suficiente para aprisionar gases e a liberação de gases a partir da decomposição de materiais orgânicos ou minerais durante a formação dessa fase líquida. Dessa forma, a maior parte dos agregados fabricados expandiu, indicando que as formulações atenderam a essas condições essenciais. No caso dos agregados contendo casca de ovo, os maiores valores de expansão foram observados nas temperaturas de 825 °C a 900 °C, como ilustra a Figura 11.

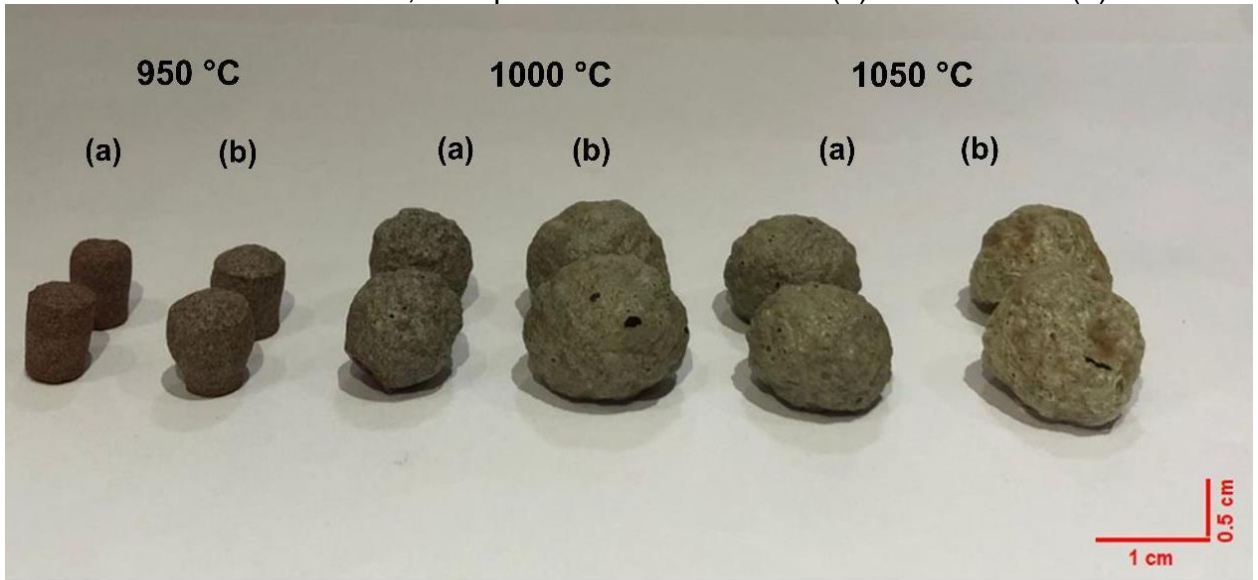
Figura 11 – Efeito das temperaturas e patamares no índice de expansão dos agregados leves fabricados com casca de ovo.



Fonte: Autora (2024).

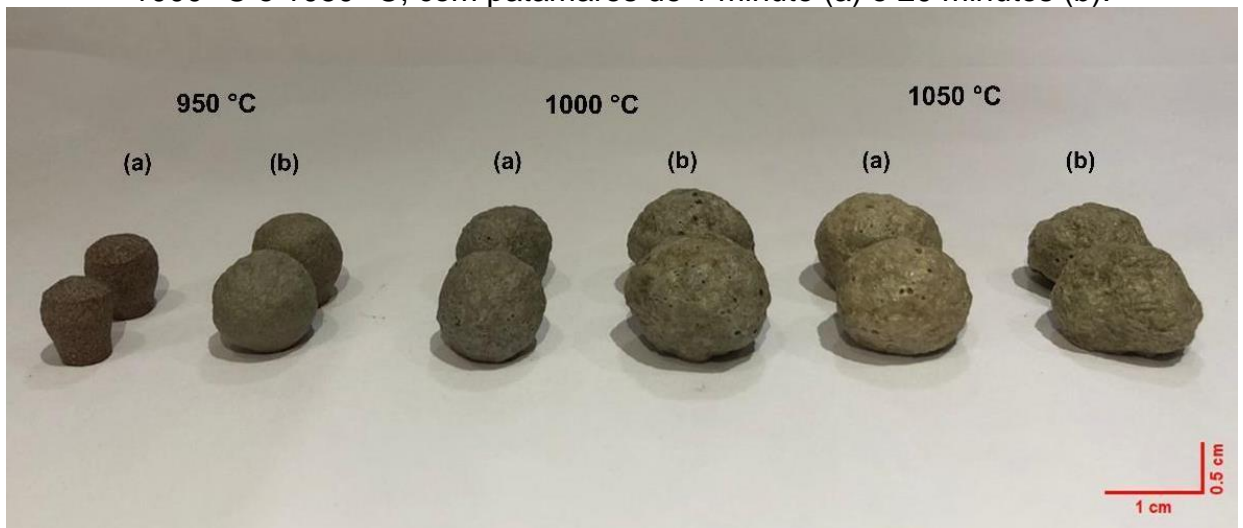
Duas das formulações contendo SiC também apresentaram expansão em todas as temperaturas testadas (950 °C, 1000 °C e 1050 °C) em ambos os patamares (1 e 20 minutos). As Figuras 12 e 13 ilustram os agregados com 45% e 55% de vidro, respectivamente.

Figura 12 – Agregados com 45% de vidro e 5% de SiC (S45) após a queima a 950 °C, 1000 °C e 1050 °C, com patamares de 1 minuto (a) e 20 minutos (b).



Fonte: Autora (2024).

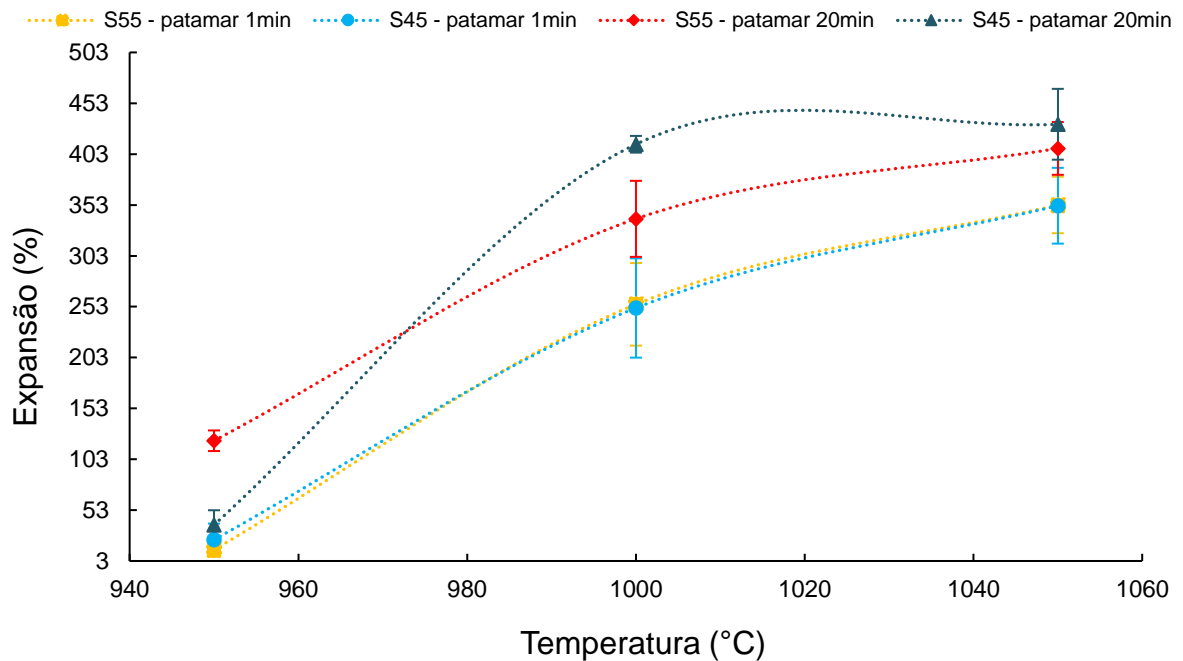
Figura 13 – Agregados com 55% de vidro e 5% de SiC (S55) após a queima a 950 °C, 1000 °C e 1050 °C, com patamares de 1 minuto (a) e 20 minutos (b).



Fonte: Autora (2024).

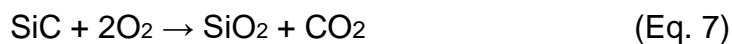
Observou-se uma forte influência da temperatura na expansão dos agregados contendo SiC, uma vez que, para as duas formulações (S45 e S55), os agregados sinterizados a maiores temperaturas apresentaram maior expansão, conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Efeito das temperaturas e patamares no índice de expansão dos agregados leves fabricados com SiC.



Fonte: Autora (2024).

Ao comparar os gráficos da Figuras 11 e 14, nota-se que, de maneira geral, os agregados com casca de ovo apresentam redução na expansão conforme a temperatura aumenta, enquanto o oposto ocorre nos agregados com SiC. Esse comportamento pode ser associado a fatores como composição química e às reações que ocorrem durante a sinterização. Em temperaturas elevadas, conforme observado pelos autores Xi et al., (2014), o SiC tende a oxidar, levando à formação de dióxido de silício e liberando gases como monóxido de carbono (Equação 7), o que promove a expansão.



A casca de ovo, por sua vez, é composta principalmente por carbonato de cálcio, que se decompõe e libera dióxido de carbono e forma óxido de cálcio (Equação 8).

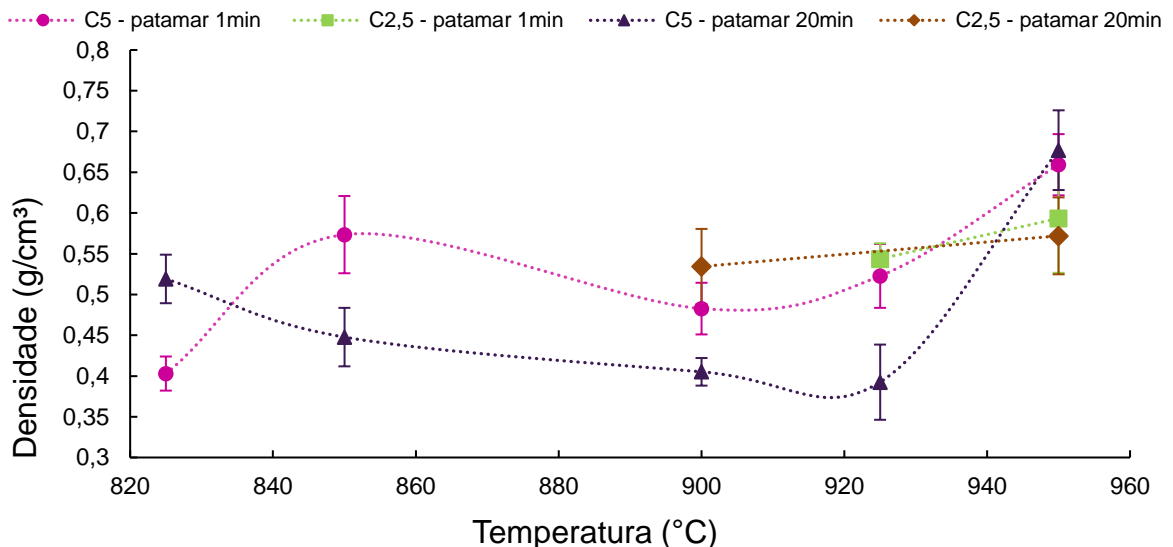


Conforme a temperatura aumenta, o óxido de cálcio pode reagir com outros componentes, levando à retração ao invés de expansão.

Retomando os resultados da análise granulométrica, embora as formulações C1 e S30 tenham apresentado o menor percentual retido, ambas não demonstraram expansão em nenhuma das temperaturas testadas, sugerindo que, como não foi uma variável controlada, pode ter influenciado nos resultados e no comportamento expansivo.

A densidade aparente dos agregados também variou conforme as diferentes formulações, temperaturas e tempos de patamar. No caso dos agregados produzidos com casca de ovo, as formulações com maior teor de casca (C5) apresentaram densidades aparentes mais elevadas em ambos os patamares, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Efeito das temperaturas e patamares na densidade aparente dos agregados leves fabricados com casca de ovo.



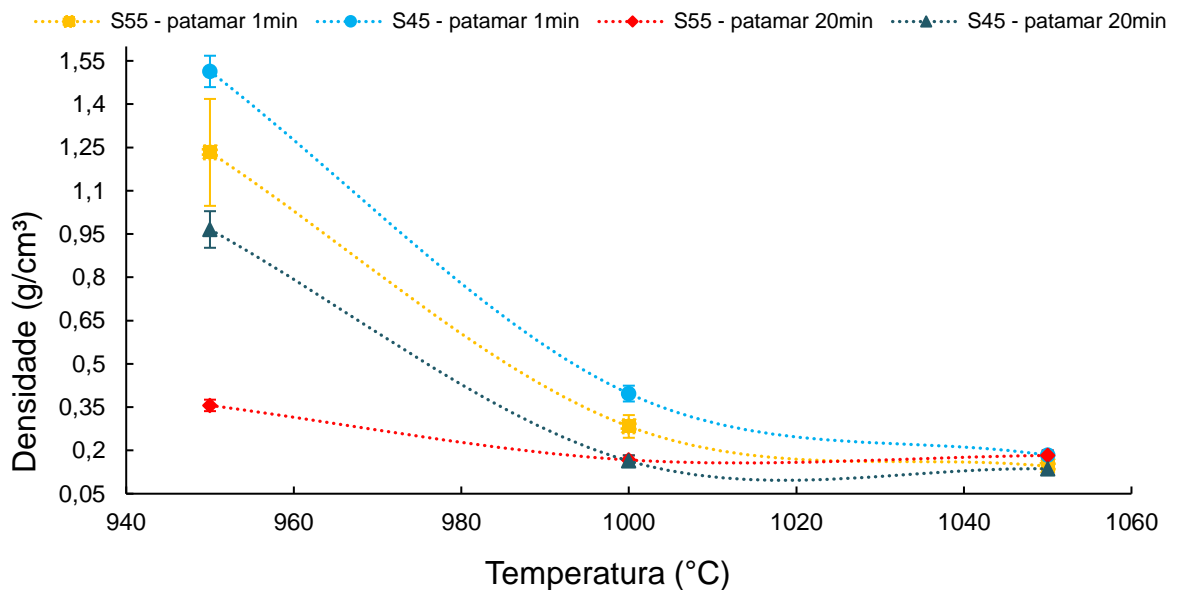
Fonte: Autora (2024).

A densidade aparente da formulação C5, de maneira geral, aumentou com a elevação da temperatura, principalmente no intervalo entre 825 °C a 850 °C, subindo de 0,40 g/cm³ para 0,57 g/cm³ e após uma leve queda até 925 °C (ficando em torno de 0,52 g/cm³), a densidade voltou a crescer, atingindo 0,66 g/cm³ a 950 °C no patamar de 1 minuto. Para o patamar de 20 minutos, o comportamento foi semelhante, porém com valores gerais menores. A densidade se manteve mais baixa, variando de 0,4 g/cm³ a 0,5 g/cm³, durante a maior parte do intervalo de temperaturas e aumentou levemente a partir de 925 °C, alcançando e ultrapassando a densidade obtida no patamar de um minuto (0,68 g/cm³).

A formulação C2,5 apresentou densidades aparentes semelhantes à C5. No patamar de 1 minuto, a densidade variou entre 0,54 g/cm³ e 0,59 g/cm³ ao longo de todo intervalo de temperaturas. Para 20 minutos, a densidade permaneceu praticamente constante em torno de 0,55 g/cm³, indicando pouca variação com a temperatura. Comparando C5 e C2,5, percebe-se que ambas as densidades aumentaram à medida que a temperatura se aproximou de 950 °C. De modo geral, o aumento do tempo de patamar, de 1 para 20 minutos, resultou em densidades aparentes menores.

Por outro lado, as formulações contendo SiC, apresentaram um comportamento oposto. Com o aumento da temperatura, a densidade aparente diminuiu, como pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 – Efeito das temperaturas e patamares na densidade aparente dos agregados leves fabricados com SiC.



Fonte: Autora (2024).

É possível observar uma tendência de diminuição da densidade para ambas as formulações, S45 e S55, à medida que a temperatura aumenta, com redução mais acentuada no patamar de 1 minuto. A densidade aparente da formulação S55 passou de 1,23 g/cm³ a 950 °C, para 0,14 g/cm³ a 1050 °C no patamar de 1 minuto. Já no patamar de 20 minutos, os valores foram menores, reduzindo de 0,36 g/cm³ a 950 °C para 0,18 g/cm³ em 1050 °C. Os agregados de composição S45 exibiram o mesmo comportamento, com densidades caindo de 1,51 g/cm³ a 950°C para 0,18 g/cm³ a 1050 °C em 1 minuto de patamar, e de 0,96 g/cm³ a 950 °C para 0,14 g/cm³ a 1050 °C no patamar de 20 minutos.

Todos os valores de densidade aparente obtidos foram menores que 2 g/cm³, conforme exigido pela ABNT NBR 12655 (2015), garantindo a adequação dos agregados leves. Além disso, os resultados também demonstram uma correlação inversa entre o índice de expansão dos agregados leves e sua densidade aparente, conforme visto nos gráficos de expansão e densidade. Essa relação ocorre devido a expansão dos agregados ter relação direta com a formação de porosidade interna, impulsionada pela liberação de gases no processo de queima. Assim, à medida que a estrutura do agregado se expande, a quantidade de espaços vazios aumenta e a densidade aparente diminui.

Dessa forma, é possível notar que, quando o tamanho do grão aumentou, a densidade aparente diminuiu e vice e versa. Nos LWAs com casca de ovo, as expansões foram maiores em temperaturas mais baixas, com densidades menores. Por exemplo, a formulação C5 apresentou densidades mais elevadas em temperaturas mais altas e, ao mesmo tempo, menores índices de expansão. Isso fica visível ao observar o primeiro e o último ponto dos gráficos das Figuras 10 e 14. A 825°C (primeiro ponto), para 1 minuto de patamar, C5 apresentou densidade de 0,40 g/cm³ e uma expansão de 213%; já a 950 °C (último ponto), para 1 minuto de patamar, C5 apresentou densidade de 0,66 g/cm³ e uma expansão de 117%.

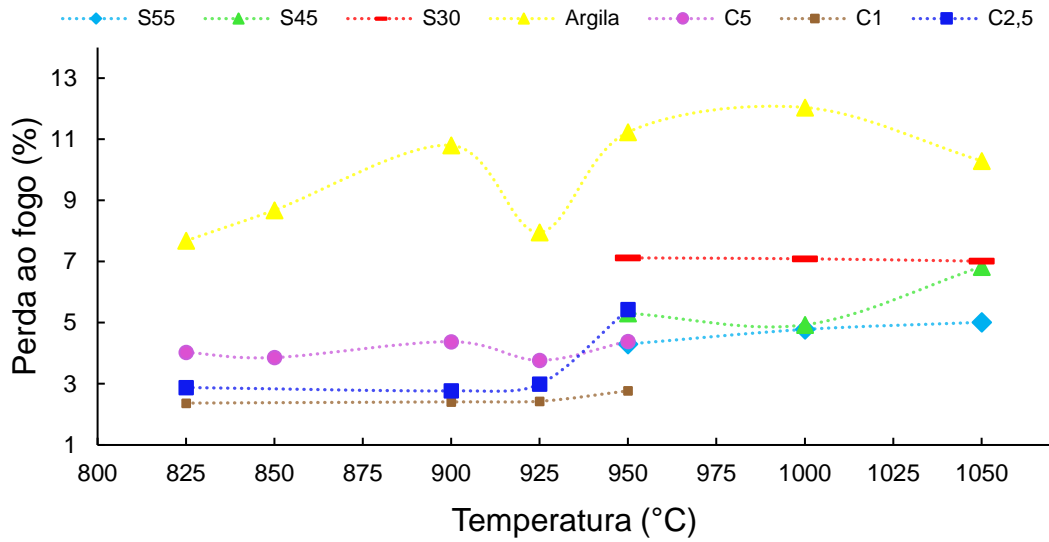
O comportamento dos agregados contendo SiC seguiu a tendência inversa, com menores expansões em temperaturas mais baixas e maiores densidades. Por exemplo, para 1 minuto de patamar, a 950 °C, a composição S55 apresentou densidade igual a 1,23 g/cm³ e expansão de 14%; já para 1050 °C, a densidade foi de 0,14 g/cm³ e expansão de 353%.

Esse comportamento foi observado também por Tuan et al. (2013) que utilizaram lodo de esgoto e vidro para a produção de agregados leves. Segundo os autores, a redução da densidade aparente se deve à formação de uma camada de menor viscosidade e a geração de mais gás durante o processo de expansão.

4.3 PERDA AO FOGO E ÍNDICE DE RETRAÇÃO

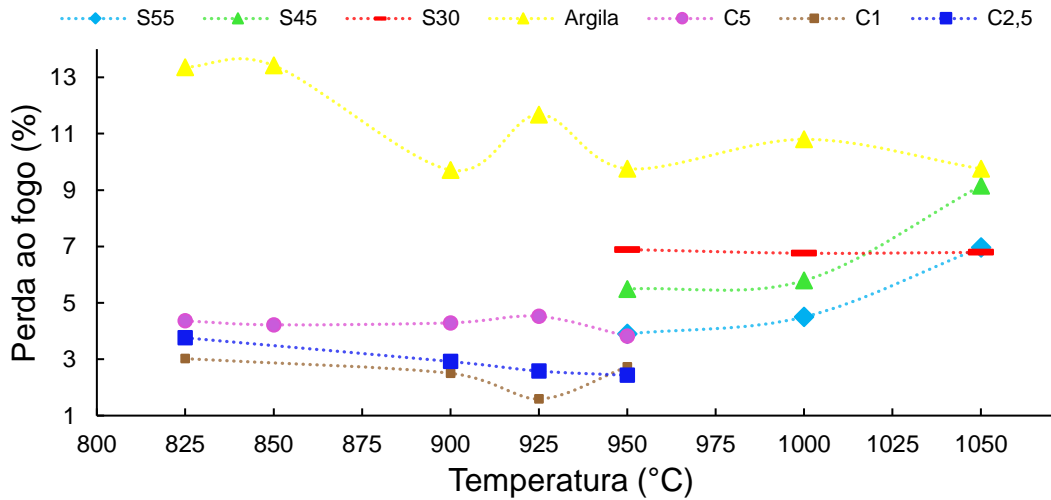
Os gráficos das Figuras 17 e 18 apresentam a relação entre a perda ao fogo e temperatura para as diferentes formulações de agregados leves.

Figura 17 – Efeito das temperaturas e patamar de 1 minuto na perda ao fogo dos agregados leves fabricados.



Fonte: Autora (2024).

Figura 18 – Efeito das temperaturas e patamar de 20 minutos na perda ao dos agregados leves fabricados.



Fonte: Autora (2024).

De maneira geral, pode-se perceber que as formulações com alto teor de vidro (C1, C2,5 e C5), apresentaram menores perdas ao fogo em ambos os tempos de patamar. Esse comportamento pode ser associado à estabilidade térmica do vidro, que é composto principalmente por óxidos inorgânicos que não volatilizam facilmente. Em contraste, as demais formulações, com maiores teores de argila (S30, S45 e S55), exibiram maiores perdas ao fogo que podem ser explicadas pela volatilização de componentes como carbonatos e até mesmo água presentes na argila.

A argila pura apresentou um comportamento distinto das demais formulações, com valores de perda ao fogo superiores. Esse aumento tem relação com a liberação de gases

e a decomposição de componentes voláteis. Ao comparar a curva da argila pura com as demais, percebe-se a influência da adição de outros materiais nas formulações. Na Figura 16, na temperatura de 950 °C, a argila apresentou perda de massa de cerca de 12%, enquanto as formulações contendo maiores teores de vidro exibiram valores bem menores, como no caso da C5, com perda de aproximadamente 4,4%.

As formulações com casca de ovo apresentaram baixa perda ao fogo em ambos os patamares (1 e 20 minutos). C1, C2,5 e C5 seguiram um padrão de perda ao fogo estável e contido, independentemente da temperatura, com perdas entre 1 e 5%. A maior perda ao fogo foi observada na formulação C5, seguida por C2,5 e C1, sugerindo que o teor de casca de ovo influencia a perda de massa. Assim, o efeito da casca de ovo sobre a perda ao fogo pode ser atribuído à presença de matéria orgânica e também à decomposição do carbonato de cálcio, que libera dióxido de carbono e também contribui para a perda ao fogo.

O tempo de patamar teve maior impacto nas formulações com alto teor de argila. Nos agregados contendo SiC, percebe-se o impacto dos diferentes teores de vidro na perda ao fogo. A formulação S30, com menores porcentagens de vidro, exibiu uma perda ao fogo estável, apresentando poucas variações nos dois patamares, mantendo-se na faixa de 7%. S45 e S55, por sua vez, demonstraram perdas maiores a 20 minutos.

A retração volumétrica dos agregados indica a contração de volume que ocorre devido à remoção de componentes voláteis e também à reorganização da estrutura interna do material. Os agregados feitos 100% de argila exibiram retração em todas as temperaturas estudadas, o que indica que se trata de argila não expansiva. A Tabela 10 resume os valores de retração volumétrica da argila pura para as diferentes temperaturas e tempos de patamar.

A retração observada na argila pura tem relação com a perda ao fogo, uma vez que, durante o aquecimento, a água residual e os materiais orgânicos são volatilizados, gerando uma estrutura inclinada à contração. Como a argila perde componentes de sua estrutura, ela tende a colapsar e diminuir o volume. Esse comportamento sugere que o aumento da temperatura favorece a formação de uma estrutura mais densa, mas com retração devido à remoção de voláteis.

Tabela 10 – Retração dos agregados contendo 100% de argila em diferentes temperaturas de sinterização.

Temperatura (°C)	Patamar – 1 minuto			Patamar – 20 minutos		
	Volume antes da queima (cm ³)	Volume após a queima (cm ³)	Retração volumétrica (%)	Volume antes da queima (cm ³)	Volume após a queima (cm ³)	Retração volumétrica (%)
825		0,47 (±0,023)	12,96		0,48 (±0,019)	11,11
850		0,42 (±0,018)	22,22		0,48 (±0,018)	11,11
900		0,39 (±0,022)	27,78		0,47 (±0,019)	13,8
925	0,54	0,44 (±0,021)	18,52	0,54	0,41 (±0,022)	24,58
950	(±0,005)	0,48 (±0,021)	10,94	(±0,005)	0,45 (±0,011)	16,18
1000		0,42 (±0,019)	22,22		0,38 (±0,017)	29,63
1050		0,45 (±0,018)	16,67		0,39 (±0,018)	27,78

Fonte: Autora (2024).

Para os agregados leves contendo casca de ovo, os com 1% apresentaram comportamento de retração em todas as temperaturas testadas, enquanto os com 2,5% retraíram em temperaturas e tempos específicos, conforme apresentam as Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Retração dos agregados contendo 1% de casca de ovo (C1) em diferentes temperaturas de sinterização.

Temperatura (°C)	Patamar – 1 minuto			Patamar – 20 minutos		
	Volume antes da queima (cm ³)	Volume após a queima (cm ³)	Retração volumétrica (%)	Volume antes da queima (cm ³)	Volume após a queima (cm ³)	Retração volumétrica (%)
825		0,27 (±0,007)	49,47		0,34 (±0,009)	37,18
900	0,54	0,37 (±0,010)	31,03	0,54	0,33 (±0,009)	39,87
925	(±0,005)	0,35 (±0,012)	35,55	(±0,005)	0,35 (±0,019)	35,16
950		0,37 (±0,013)	35,5		0,36 (±0,008)	33,9

Fonte: Autora (2024).

Tabela 12 – Retração dos agregados contendo 2,5% de casca de ovo (C2,5) em diferentes temperaturas de sinterização.

Temperatura (°C)	Patamar – 1 minuto			Patamar – 20 minutos		
	Volume antes da queima (cm ³)	Volume após a queima (cm ³)	Retração volumétrica (%)	Volume antes da queima (cm ³)	Volume após a queima (cm ³)	Retração volumétrica (%)
825		0,31 (±0,013)	43,22		0,3 (±0,001)	44,70
900	0,54	0,34 (±0,012)	36,74	0,54	-	-
925	(±0,005)	-	-	(±0,005)	0,28 (±0,002)	48,15

Fonte: Autora (2024).

Conforme observado nas Tabelas 11 e 12, os agregados contendo casca de ovo apresentaram maiores valores de retração quando comparados à argila pura, chegando a quase 50% de retração.

Nos agregados com 1% de casca de ovo, a retração é observada em todas as temperaturas testadas, mas de forma um pouco menos intensa que nas formulações com 2,5%, o que pode indicar que o teor de casca de ovo tem influência na intensidade da retração principalmente devido a quantidade de CO₂ gerada durante a queima. A não expansão dos agregados C2,5 na temperatura de 925 °C e 20 minutos de patamar pode ter relação com a rápida decomposição da casca de ovo e liberação de CO₂. Em 20 minutos, a reação de decomposição pode já ter se completado, e o sistema pode ter atingido uma estabilização.

Os agregados leves produzidos a partir de 30% de vidro e 5% SiC, exibiram menores valores de retração quando comparados às formulações C1 e C2,5, como apresenta a Tabela 13.

Tabela 13 – Retração dos agregados contendo 30% de vidro e 5% de SiC em diferentes parâmetros de queima.

Temperatura (°C)	Volume antes da queima (cm ³)	Patamar – 1 minuto		Volume antes da queima (cm ³)	Patamar – 20 minutos	
		Volume após a queima (cm ³)	Retração volumétrica (%)		Volume após a queima (cm ³)	Retração volumétrica (%)
950		0,44 (±0,016)	18,65		0,42 (±0,011)	21,98
1000	0,5	0,43 (±0,015)	20,54	0,5	0,46 (±0,019)	14,14
1050		0,42 (±0,016)	22,68		0,46 (±0,014)	15,43

Fonte: Autora (2024).

A formulação S30, com 65% de argila, exibiu valores de retração próximos aos da argila pura, indicando que o vidro, em menores proporções, não oferece o mesmo nível de estabilidade térmica.

Assim, os resultados apresentados nas Tabelas de 9 a 13 destacam o papel da composição e da temperatura na perda ao fogo e na retração volumétrica, com efeitos significativos dos teores de vidro, argila e casca de ovo no comportamento térmico dos agregados leves.

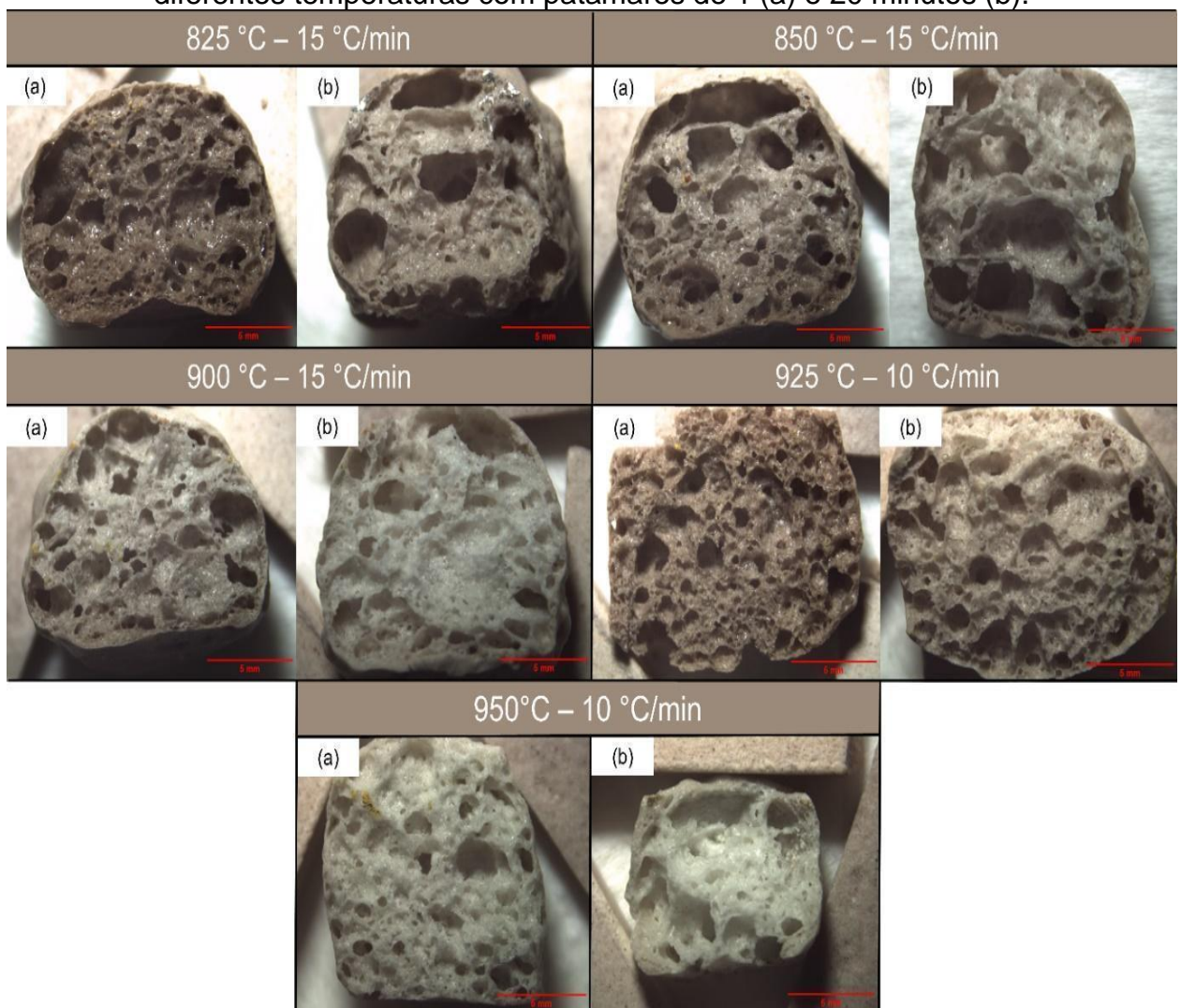
4.4. POROSIDADE

Os efeitos da adição de casca de ovo, carbetto de silício e vidro na formação dos agregados leve são mostrados de maneira detalhada na análise da microestrutura interna,

observada através da microscopia óptica. As Figuras 19 e 20 ilustram a estrutura dos agregados contendo 5% e 2,5% casca de ovo, respectivamente.

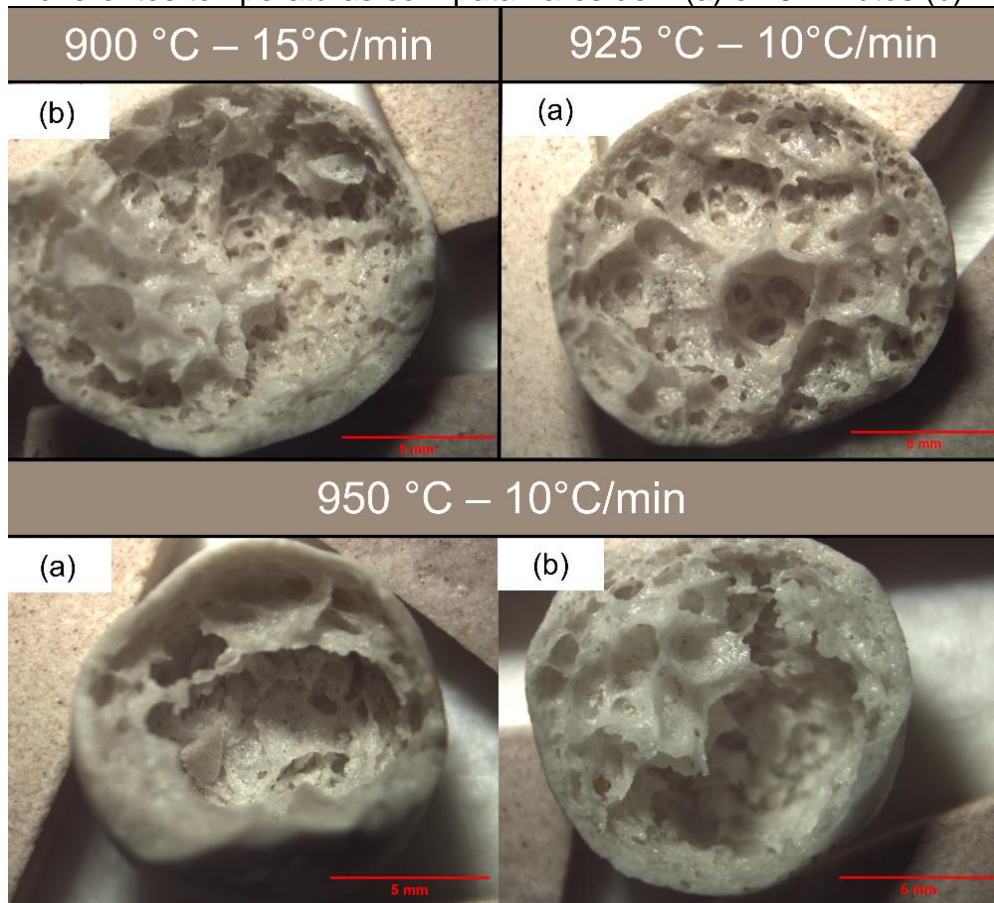
Na Figura 19 (formulação C5), observa-se que, em temperaturas mais baixas, como 825 °C e 850 °C, os poros são maiores e parecem estar distribuídos de maneira mais irregular, resultando em espaços vazios amplos. Conforme a temperatura aumenta, de 900 °C a 925 °C, os poros grandes tornam-se menos frequentes e mais uniformes, indicando que os espaços vazios estejam sendo gradualmente preenchidos e compactados, com início da fusão das partículas de vidro e argila. A 950 °C, especialmente no patamar de 1 minuto, observa-se uma redução no tamanho e maior uniformidade dos poros, o que sugere uma estrutura mais densa.

Figura 19 – Microestrutura dos agregados leves com 5% de casca de ovo (C5) em diferentes temperaturas com patamares de 1 (a) e 20 minutos (b).



Fonte: Autora (2024).

Figura 20 – Microestrutura dos agregados leves com 2,5% de casca de ovo (C2,5) em diferentes temperaturas com patamares de 1 (a) e 20 minutos (b).



Fonte: Autora (2024).

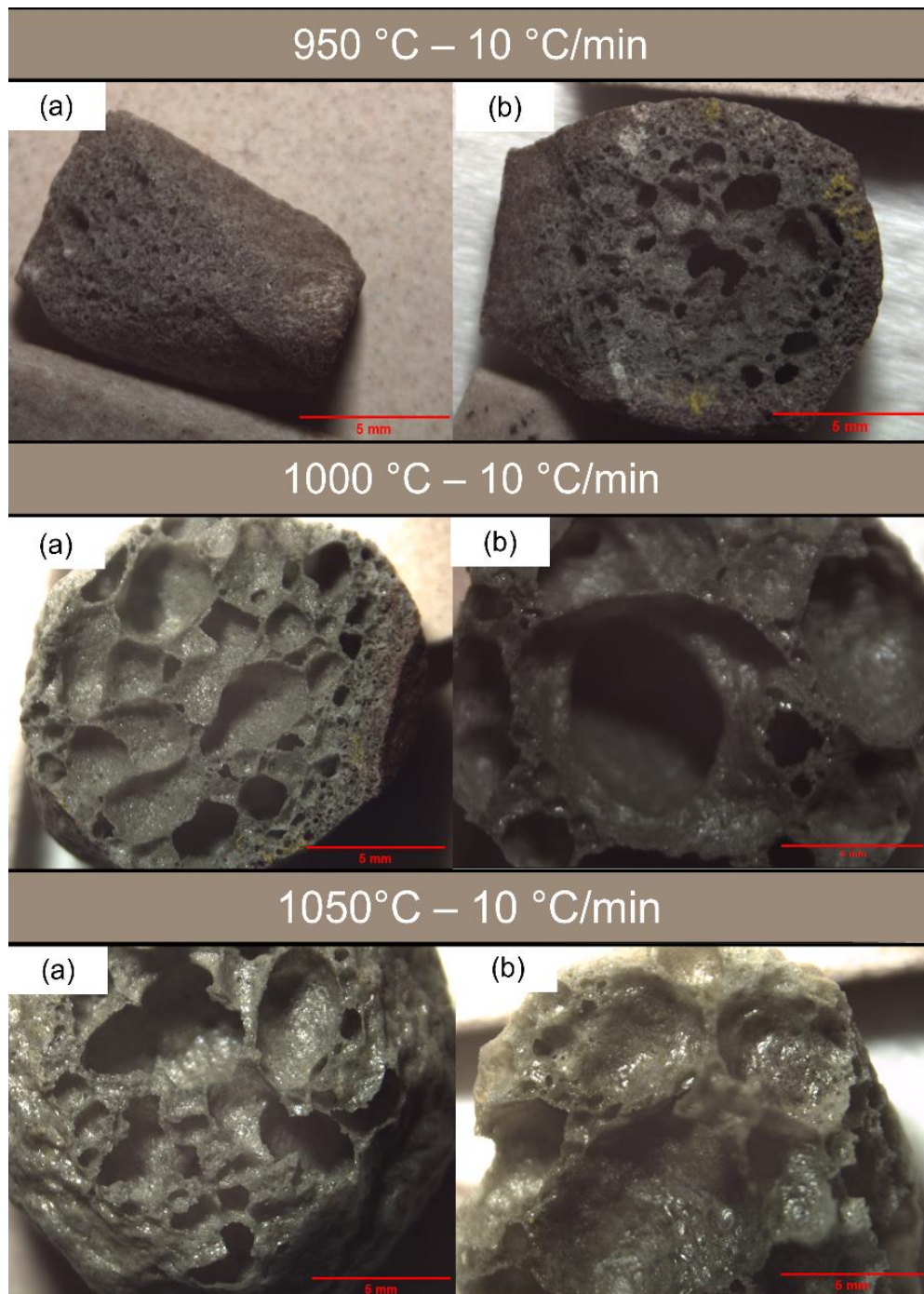
Além disso, a coloração das amostras também se altera ao longo do processo. Em temperaturas mais baixas (825 °C e 850 °C), os agregados apresentam uma tonalidade mais escura, enquanto em temperaturas mais altas (900 °C, 925 °C e 950 °C), a coloração se torna mais clara. Isso pode ser associado à decomposição de componentes orgânicos residuais e à fusão do vidro, que resulta em uma superfície mais homogênea.

A composição C2,5 (Figura 20), por sua vez, exibiu poros grandes em todas as temperaturas, indicando que, à medida que a temperatura aumenta, ocorre a coalescência dos poros, resultando na formação de grandes espaços vazios. Esses poros enormes indicam uma baixa densificação e, conseqüentemente, resistência mecânica reduzida. Mesmo na temperatura mais alta, essa formulação não conseguiu atingir a compactação desejada. Assim, embora tenha ocorrido liberação de gás proveniente da casca de ovo, como a matriz não estava totalmente consolidada, os poros cresceram sem restrições, resultando em uma estrutura porosa com baixa uniformidade.

As Figuras 21 e 22 apresentam a estrutura dos agregados contendo 45% e 55% de vidro, respectivamente. Ambas apresentaram um comportamento semelhante. A 950 °C e

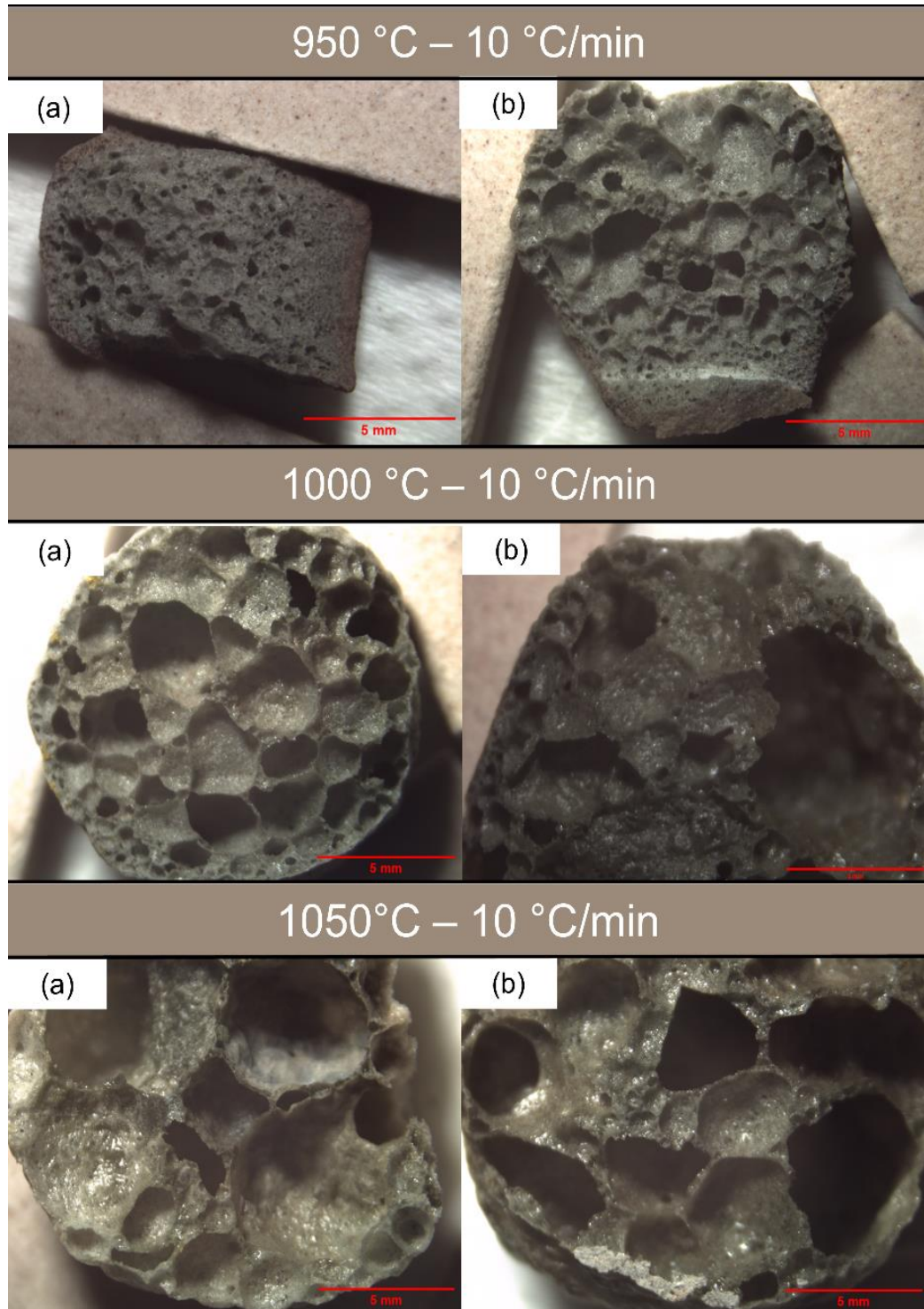
1 minuto de patamar, observa-se pouca expansão e formação de poros pequenos, já no patamar de 20 minutos, os poros aumentam de tamanho. A partir da temperatura de 1000 °C, ambas as formulações mostram poros progressivamente maiores, sugerindo baixa resistência. À medida que a temperatura e o tempo de patamar aumentam, os poros maiores consomem os menores.

Figura 21 – Microestrutura dos agregados leves com 45% de vidro e 5% SiC (S45) em diferentes temperaturas com patamares de 1 (a) e 20 minutos (b).



Fonte: Autora (2024).

Figura 22 – Microestrutura dos agregados leves com 55% de vidro e 5% SiC em diferentes temperaturas com patamares de 1 (a) e 20 minutos (b).



Fonte: Autora (2024).

Complementando a análise, as Tabelas 14 e 15 mostram o tamanho médio dos poros, obtido por meio do software *ImageJ*, para os patamares de 1 e 20 minutos, respectivamente.

Tabela 14 – Tamanho médio dos poros para 1 minuto de patamar.

Formulação	Temperatura (°C)	Diâmetro médio (mm)	Maior poro (diâmetro, mm)	Menor poro (diâmetro, mm)	Desvio padrão (mm)
C5	825	0,172	1,994	0,018	0,161
	850	0,152	1,132	0,018	0,126
	900	0,161	1,736	0,017	0,159
	925	0,149	3,014	0,019	0,172
	950	0,139	2,447	0,018	0,134
C2,5	925	0,177	3,089	0,018	0,150
	950	0,173	3,981	0,018	0,151
	950	0,121	1,43	0,017	0,144
S45	1000	0,175	5,716	0,018	0,269
	1050	0,224	6,44	0,018	0,297
	950	0,152	1,283	0,018	0,160
S55	1000	0,165	3,888	0,018	0,149
	1050	0,164	5,618	0,018	0,237

Fonte: Autora (2024).

Tabela 15 – Tamanho médio dos poros para 20 minutos de patamar.

Formulação	Temperatura (°C)	Diâmetro médio (mm)	Maior poro (diâmetro, mm)	Menor poro (diâmetro, mm)	Desvio padrão (mm)
C5	825	0,181	3,321	0,018	0,176
	850	0,311	0,535	0,083	3,589
	900	0,161	3,119	0,016	0,143
	925	0,157	2,884	0,018	0,163
	950	0,154	1,898	0,018	0,157
C2,5	900	0,184	1,104	0,018	0,147
	950	0,176	3,967	0,018	0,194
	950	0,175	1,409	0,018	0,165
S45	1000	0,284	4,840	0,018	0,211
	1050	0,195	5,727	0,018	0,180
	950	0,154	1,580	0,018	0,174
S55	1000	0,144	7,312	0,018	0,215
	1050	0,177	6,646	0,018	0,389

Fonte: Autora (2024)

As Tabelas 14 e 15 complementam a análise da microestrutura dos agregados, fornecendo dados sobre o diâmetro médio dos poros, além dos diâmetros dos maiores e menores poros e o desvio padrão dos valores para patamares de 1 e 20 minutos. Esses dados permitem uma análise mais detalhada do comportamento das diferentes

formulações e do impacto das condições de sinterização, temperatura e tempo de patamar na formação dos poros.

A formulação C5 apresentou variações no diâmetro médio dos poros conforme a temperatura aumenta. Observa-se que, no geral, para o patamar de 1 minuto, os poros apresentaram diâmetros menores, como por exemplo, a 825 °C, indo de 0,172 mm para 0,181 mm. O mesmo ocorre em temperaturas mais altas, a 950 °C, subindo de 0,139 mm para 0,154 mm. Isso indica que, em patamares menores, a estrutura apresenta maior uniformidade estrutural. Para a formulação C2,5, observou-se que, como no caso da C5, no patamar de 1 minuto os poros apresentaram tamanho médio menor quando comparados ao patamar de 20 minutos.

Nas formulações com adição de SiC, o comportamento dos poros difere da casca de ovo, especialmente em temperaturas mais altas. De maneira geral, percebe-se que, em temperaturas maiores, como 1050 °C, os poros apresentaram maiores diâmetros. Isso sugere que um patamar mais longo permite uma maior fusão das partículas, resultando em poros maiores. Esse comportamento indica também que o SiC, ao permanecer mais tempo em altas temperaturas, intensifica a formação de poros.

A comparação entre os patamares de 1 minuto e 20 minutos evidencia que tempos de sinterização mais longos tendem a aumentar o tamanho dos poros, já que o calor prolongado permite uma fusão mais intensa das partículas.

4.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados encontrados para absorção de água variaram de 7% a 28% para a formulação C5 e 0,82% a 7% na formulação C2,5. Essa oscilação da capacidade de absorção de água dos agregados leves pode ser atribuída a mudanças na sua porosidade intergranular (Ayati et al., 2018). As Figuras 23 e 24 apresentam a influência da temperatura e dos patamares na absorção dos agregados contendo 2,5% e 5 % de casca de ovo, respectivamente.

Figura 23 – Absorção de água (%) dos agregados contendo 2,5% de casca de ovo (C2,5) em 1 e 20 minutos de patamar.

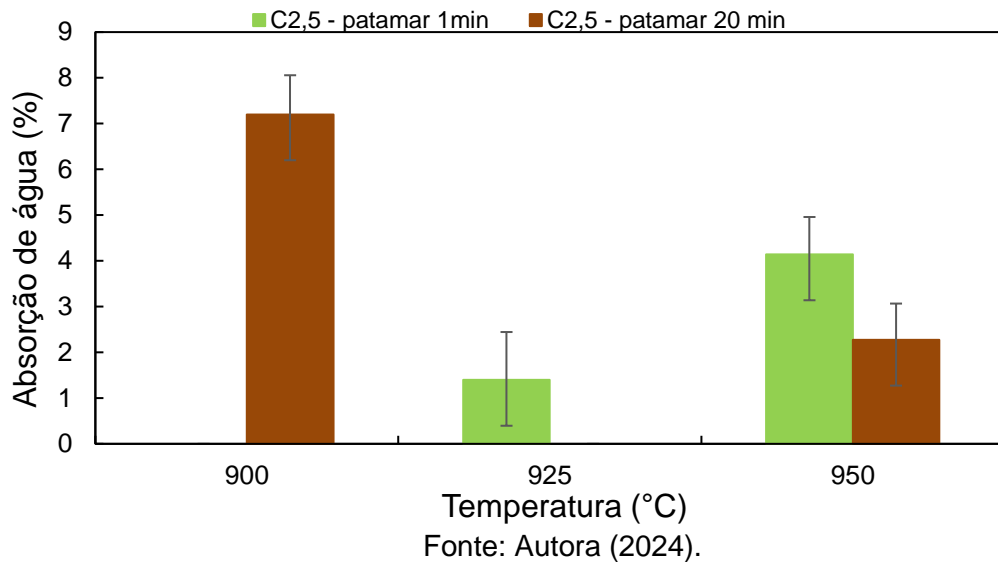
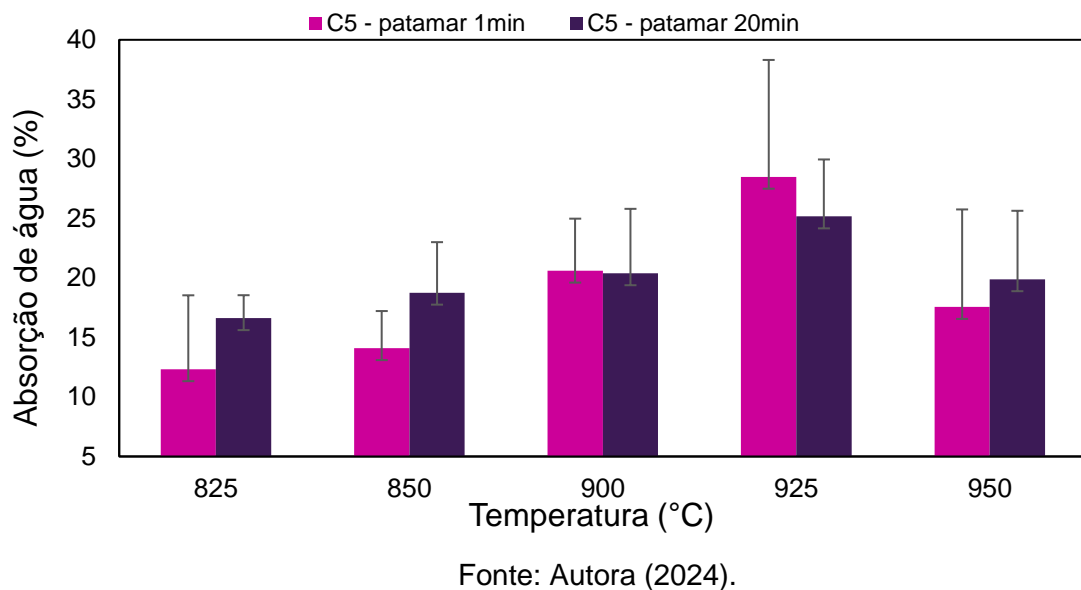


Figura 24 – Absorção de água (%) dos agregados contendo 5% de casca de ovo (C5) em 1 e 20 minutos de patamar.

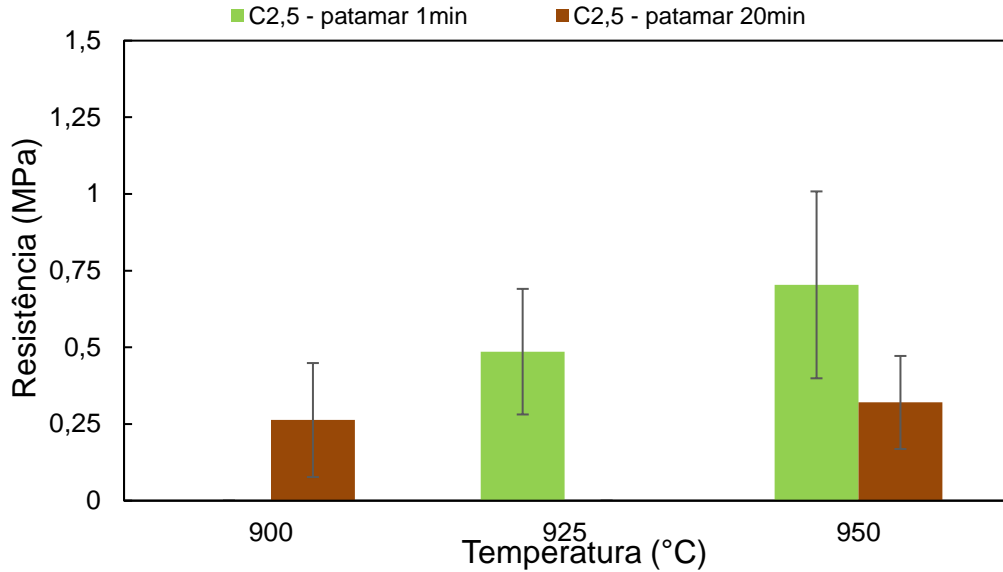


Para os agregados contendo 5% de casca de ovo, percebe-se que para a temperatura de 925 °C, ocorreu a maior absorção, tanto para 1 minuto quanto para 20 minutos de patamar, chegando a 28%. A formulação C2,5 apresentou menores porcentagens de absorção de água, chegando a 7,19%.

Diversos fatores podem interferir na resistência mecânica dos agregados leves, incluindo absorção de água, densidade, tamanho e distribuição dos poros e até mesmo o formato da amostra (Ayati et al., 2018). Esses fatores, em grande parte, são afetados pela temperatura de sinterização, que desempenha um papel crucial na formação da microestrutura dos agregados (Lau et al., 2017). Nas Figuras 25 e 26, são apresentados

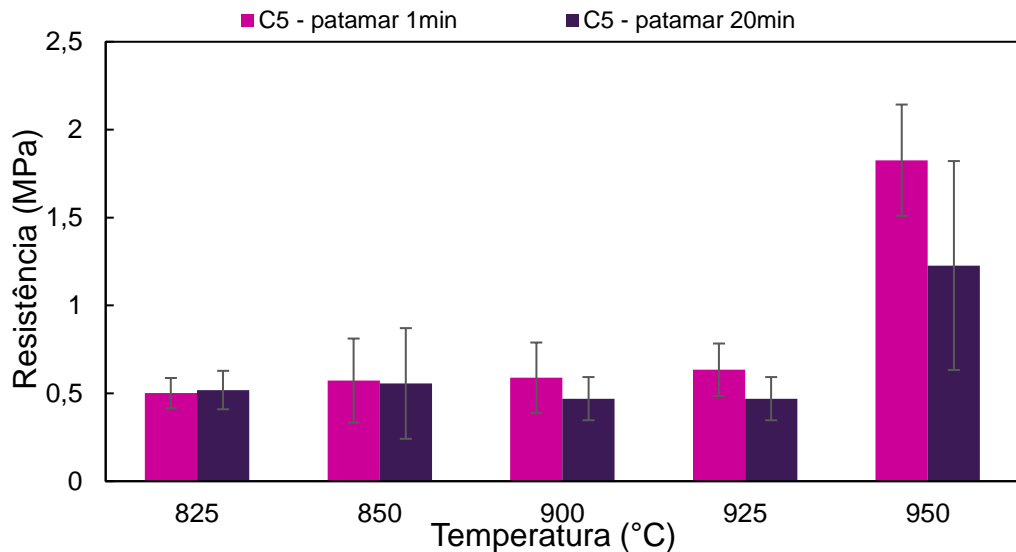
os resultados de resistência à compressão para os agregados leves contendo 2,5 e 5% de casca de ovo, respectivamente.

Figura 25 – Resistência à compressão dos agregados contendo 2,5% de casca de ovo (C2,5).



Fonte: Autora (2024).

Figura 26 – Resistência à compressão dos agregados contendo 5% de casca de ovo (C5).



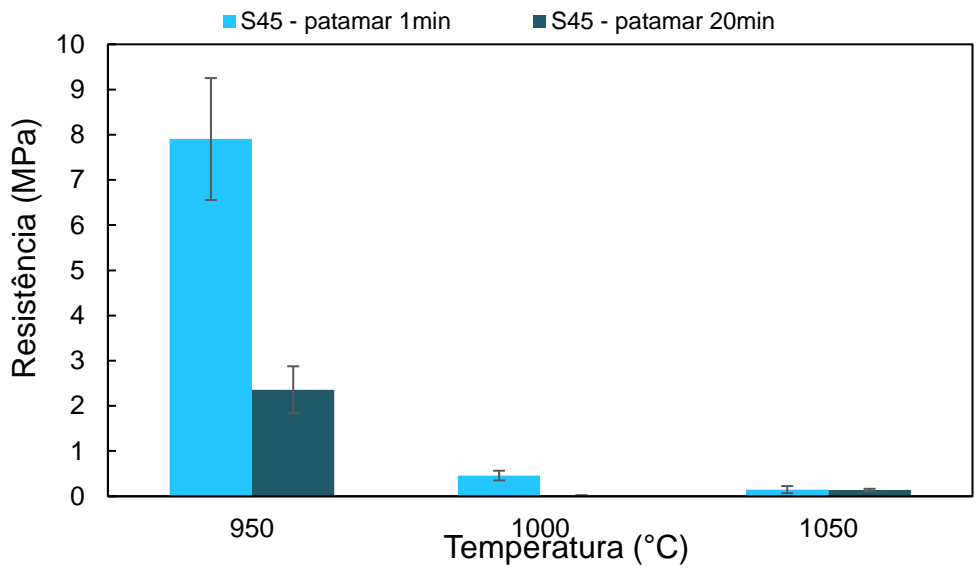
Fonte: Autora (2024).

Em ambos os casos (formulações C2,5 e C5), o aumento da temperatura resultou em melhorias na resistência mecânica, tanto para 1 minuto quanto para 20 minutos de patamar. Comparando os gráficos das Figuras 25 e 26, observa-se que a formulação C2,5 apresentou resistência inferior à formulação C5. Esse comportamento está alinhado com as análises de porosidade, uma vez que C2,5 apresentou diâmetros médios superiores

aos da C5, indicando uma estrutura menos resistente. Além disso, nota-se um aumento nas resistências dos agregados sinterizados no patamar de 1 minuto, possivelmente devido aos menores diâmetros médios dos poros obtidos nesse tempo, favorecendo uma maior resistência mecânica.

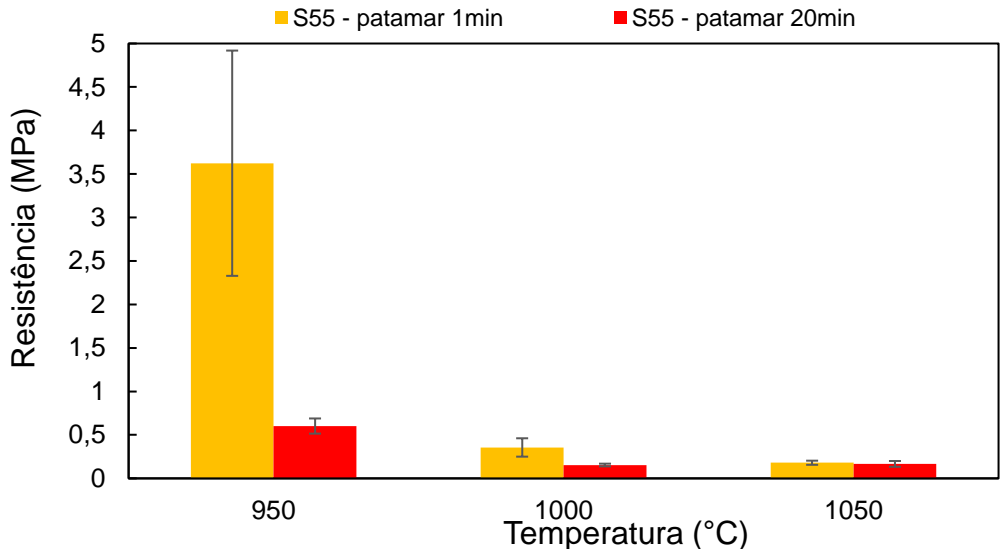
No caso dos agregados contendo SiC, o comportamento observado foi o oposto, tanto para as formulações S45 quanto para S55, visto que a maior resistência foi observada nas menores temperaturas, conforme ilustram as Figuras 27 e 28.

Figura 27 – Resistência à compressão dos agregados contendo 45% vidro e 5% de SiC (S45).



Fonte: Autora (2024).

Figura 28 – Resistência à compressão dos agregados contendo 55% vidro e 5% de SiC (S55).



Fonte: Autora (2024).

Percebe-se que um comportamento semelhante das duas formulações, S45 e S55, que apresentaram a maior resistência a 950 °C e 1 minuto, chegando a 7,9 MPa para S45 e 3,62 MPa para S55. A formulação S45, em 1000 °C e 20 minutos, apresentou a mais baixa das resistências, 0,02 MPa. A resistência dos agregados pode ser relacionada ao tamanho médio dos poros, já que a porosidade impacta significativamente nas propriedades mecânicas.

Observando o comportamento da formulação C5 com base nas Tabelas 14 e 15 e na Figura 27, percebe-se uma tendência inversa entre os dois parâmetros: conforme o diâmetro médio dos poros aumenta, a resistência à compressão diminui, e vice-versa. Em geral, agregados com poros menores tendem a apresentar uma estrutura mais compacta e também mais resistente, pois os poros reduzidos diminuem os pontos de fraqueza. Em contrapartida, agregados com poros maiores possuem mais espaços vazios e uma estrutura menos densa, o que compromete a capacidade de suportar cargas. Nota-se que a resistência apresenta um aumento significativo na temperatura de 925 a 950 °C, enquanto o diâmetro dos poros diminui nessa faixa.

Nos agregados com SiC, observa-se novamente uma relação inversa entre o diâmetro médio dos poros e a resistência mecânica, embora com algumas variações devido à presença de SiC. Percebe-se que na temperatura de 950 °C e 1 minuto de patamar, a formulação S55 apresenta resistência de cerca de 3,6 MPa, enquanto o diâmetro médio dos poros é o mais baixo, de aproximadamente 0,152 mm e com o aumento da temperatura até 1000 °C, a resistência diminui, acompanhada por um leve aumento no diâmetro dos poros (0,164 mm). Esse comportamento indica que o SiC, ao ser exposto a temperaturas elevadas, pode intensificar a formação de poros, resultando em uma estrutura com menor capacidade de suportar cargas.

4.6 ANÁLISE DE CONE DE FUSÃO

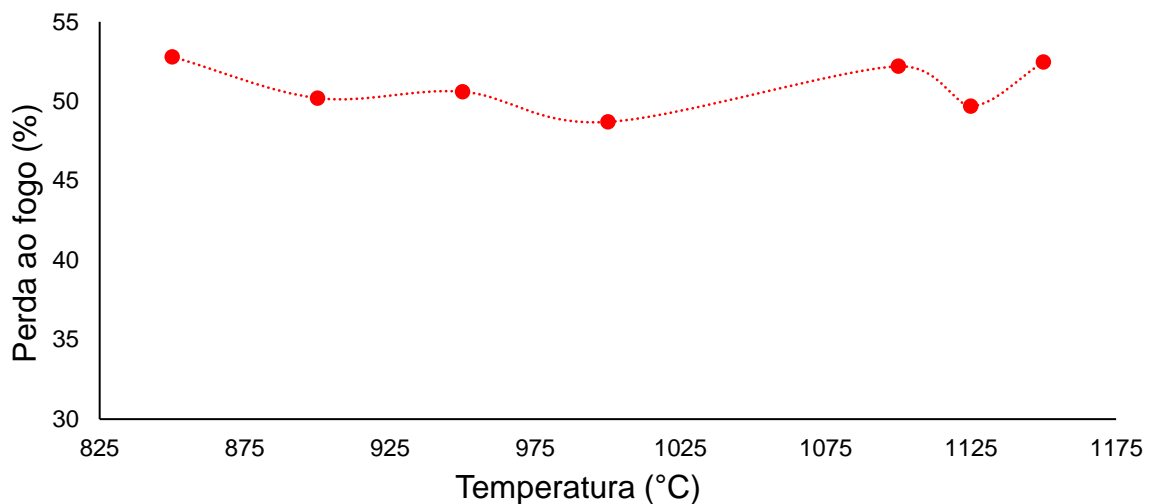
A viscosidade da fase líquida da mistura é um dos principais fatores que influenciam na expansão dos agregados, pois determina a capacidade da matriz de reter os gases liberados durante o processo de sinterização. Dessa forma, para compreender melhor o comportamento das formulações, foram realizados testes com cone de fusão com diferentes porcentagens de casca de ovo (para as formulações C1, C2,5 e C5).

Por ser um material orgânico, durante o processo de queima, a casca do ovo tende a se decompor e liberar gases, assim, para evitar a formação de poros e dar ênfase na

observação dos cones, optou-se por calcinar a casca do ovo previamente, avaliando sua perda ao fogo para ajustar a quantidade adequada de casca nas formulações do cone.

Foram realizados testes de calcinação da casca do ovo nas temperaturas de 850 °C, 900 °C, 950 °C, 1000 °C, 1100 °C, 1125 °C e 1150 °C, conforme apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Resultados das análises de calcinação da casca de ovo em diferentes temperaturas.



Fonte: Autora (2024).

A Figura 29 indica que a perda de massa entre 850 °C e 1150 °C é relativamente estável, sugerindo que a maior parte dos voláteis presentes na casca foi liberada antes dessa faixa de temperatura, conforme visto também pelos autores Salib et al. (2022). A perda ao fogo foi de cerca de 50%, e, assim, utilizou-se metade da quantidade inicial de casca calcinada nas formulações (para C5, empregou-se 2,5% de casca; para C2,5, 1,25%; e para C1, 0,5%).

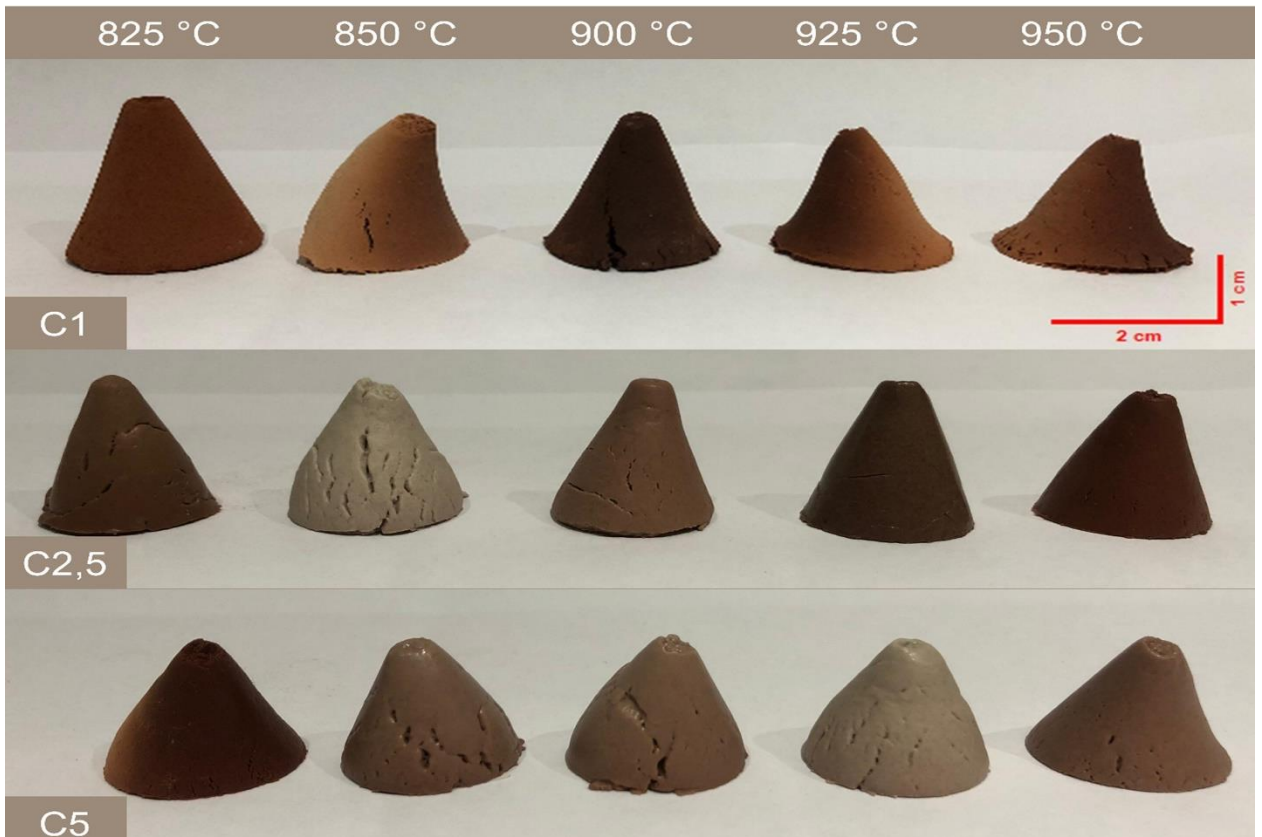
O cone de fusão é uma maneira simples de observar o comportamento de viscosidade da mistura. Quando a viscosidade é mais baixa, o material flui mais facilmente, resultando em uma maior deformação do cone, ou seja, quanto mais o cone deforma, menor é a viscosidade da formulação. Para realizar os ensaios, mediu-se os cones antes e após a sinterização, a fim de observar a deformação, conforme mostrado na Tabela 16 e Figura 30.

Tabela 16 – Medida de deformação dos cones antes e após a sinterização e retração linear (patamar de 1 minuto).

Formulação	Temperatura (°C)	Altura inicial (mm)	Patamar – 1min	
			Altura final (mm)	Retração linear (%)
C1	825	41,21	32,37	21,45
	850		30,60	25,75
	900		27,66	32,88
	925		28,27	31,40
	950		29,51	28,39
C2,5	825		28,24	31,47
	850		27,54	33,17
	900		28,51	30,82
	925		27,31	33,73
	950		27,54	33,17
C5	825		26,24	36,33
	850		26,47	35,77
	900		27,02	34,43
	925		26,89	34,75
	950		26,17	36,5

Fonte: Autora (2024).

Figura 30 – Análise de cone de fusão das formulações C1, C2,5 e C5, no patamar 1 minuto.



Fonte: Autora (2024).

Os testes demonstraram que as reações de formação dos agregados com casca de ovo são rápidas, com o patamar de 1 minuto apresentando resultados superiores ao de 20 minutos, o que fica evidenciado principalmente pela análise de porosidade dos agregados. Assim, os ensaios de cone de fusão focaram no patamar de 1 minuto.

A expansão ou retração dos agregados leves está fortemente relacionada à viscosidade da fase líquida gerada durante o aquecimento. Com base na Tabela 15, a composição C1 apresentou as menores retrações, sugerindo uma viscosidade mais alta que dificultou a expansão, já que a matriz viscosa impediu a retenção de gases. A formulação C2,5, com retrações um pouco maiores, expandiu apenas acima de 900 °C, mostrando maior deformação, mas insuficiente para expansão em temperaturas menores. Já a formulação C5 teve os maiores índices de deformação.

Diversos autores sugerem que, além da viscosidade, outros fatores como o tipo e a quantidade de gases liberados, a velocidade de aquecimento e a distribuição de partículas também desempenham papéis importantes no comportamento dos agregados, conforme apresenta o Quadro 2.

Quadro 2 – Principais teorias sobre o mecanismo de expansão de agregados leves, segundo outros autores.

Referências	Objetivos	Principais teorias sobre o mecanismo de expansão de agregados leves
González-corrochano et al., (2009)	Reciclagem de cinzas volantes, óleo de motor e lodo de agregados de lavagem, através da fabricação de agregados leves.	A expansão depende em grande parte da formação de uma fase viscosa adequada que retém e libera gases ao mesmo tempo.
Nguyen et al., (2021)	Produção de agregados leves a partir de resíduos de construção e demolição combinado com cinza volante e Escória de Alto Forno Granulada Moída.	A condição ótima de sinterização depende da composição dos materiais e o tamanho da partícula também pode ser usado como um indicador do efeito de inchaço.
Dondi et al., (2016)	Revisão da composição e propriedades de agregados leves produzidos a partir de resíduos e outras matérias-primas não convencionais.	O controle durante a queima é um fator crucial e envolve a composição química e de fase, tamanho de partícula e pelota, viscosidade da fase vítrea, cronograma de queima, atmosfera e projeto do forno e uso de aditivos.
Soltan et al., (2016)	Reciclagem de resíduos de granito de pedra ornamental perigosa na produção de agregados leves.	O processo de expansão é fortemente influenciado pela composição química dos materiais utilizados, que controlam a quantidade e a viscosidade da fase líquida formada durante a queima.

Huang et al., (2007)	Utilização de resíduos de mineração, cinzas volantes e lodo de metais pesados de uma usina de águas residuais para fabricação de agregados leves.	A temperatura de sinterização é o principal determinante do peso unitário do agregado leve sinterizado.
Tang et al., (2023)	Produção de agregados leves usando um alto teor de resíduos sólidos sem agente espumante adicional.	A expansão é influenciada de maneira significativa pela temperatura de sinterização e pela viscosidade em alta temperatura.

Fonte: Autora (2024).

Conforme pode ser observado no Quadro 2, a viscosidade da mistura durante a sinterização é crucial para a expansão dos agregados, influenciando diretamente na retenção de gases. Os autores González-Corrochano et al., (2009) e Tang et al., (2023) destacaram que uma viscosidade apropriada permite a formação de uma matriz que retém e libera gases simultaneamente, promovendo a expansão e é possível observar esse fato principalmente na formulação C5, que mostrou maior deformação (entre 34,43% e 36,5%), indicando uma viscosidade ideal para expansão.

Os testes realizados com diferentes formulações e temperaturas de calcinação das cascas de ovo mostraram que uma viscosidade inadequada compromete a sinterização e a expansão dos agregados, conforme apontado também por Dondi et al., (2016) e Nguyen et al., (2021). A composição C1, que apresentou retrações de 21% a 32%, reflete uma viscosidade mais elevada que, segundo os autores, dificulta a expansão devido à retenção insuficiente dos gases.

Dessa forma, a análise revela que a sinterização das formulações que não apresentaram expansão pode ter sido comprometida pela viscosidade inadequada, que impede o escoamento e bloqueia a expansão. Assim, um equilíbrio na composição das matérias-primas é essencial para promover uma expansão adequada dos agregados.

4.7 RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES E CONDIÇÕES DE QUEIMA DOS AGREGADOS LEVES

A Tabela 17 apresenta um mapeamento das propriedades dos agregados leves produzidos a partir das diferentes formulações (C5; C2,5; S55 e S45) com 1 minuto de patamar em variadas temperaturas. A tabela foi organizada para ilustrar os intervalos de valores das propriedades medidas em cada condição e utiliza uma escala de cores onde os tons próximos ao vermelho favorecem a resistência mecânica.

Tabela 17 – Intervalo das propriedades dos agregados leves produzidos com patamar de 1 minuto.

	Temperatura, °C	Resistência, MPa	Densidade, g/cm ³	Expansão, %	Diâmetro médio dos poros, mm	Maior diâmetro, mm
C5	825					
	850					
	900					
	925					
	950					
C2,5	925					
	950					
S55	950					
	1000					
	1050					
S45	950					
	1000					
	1050					

Fonte: Autora (2024).

A análise da tabela revela que a resistência dos agregados leves é o resultado de uma combinação de fatores, incluindo densidade, expansão e diâmetro dos poros, todos influenciados pela temperatura de queima e o patamar. Assim, para obter agregados leves com alta resistência, é essencial controlar a densidade e minimizar o diâmetro dos poros, evitando uma expansão excessiva durante o processo.

Essa combinação de fatores pode ser constatada observando-se a formulação C5, que, a partir de 900 °C, apresenta uma maior expansão, o que leva a uma menor densidade e maior diâmetro de poros e, como consequência, uma menor resistência. Nas formulações S45 e S55, observa-se que o aumento da temperatura de sinterização aumenta os valores de expansão e o diâmetro médio dos poros, o que, por sua vez, reduz a resistência do agregado. Já a formulação C2,5 apresentou resistência relativamente baixa, associada a maiores diâmetros de poros e porosidade. Assim, o aumento dos valores referentes a densidade aliados a menores valores de expansão e diâmetro dos poros, conduzem a maiores resistências.

4 CONCLUSÕES

O presente estudo investigou a produção de agregados leves utilizando os resíduos casca de ovo, vidro e discos de corte, com ênfase nos efeitos das diferentes formulações e parâmetros de sinterização sobre as propriedades finais dos agregados. A incorporação desses resíduos possibilitou a expansão e criação de uma estrutura porosa e leve.

Observou-se que temperaturas muito altas durante o processo de sinterização podem gerar expansão dos gases aprisionados nos poros e aumentar a porosidade total e, como consequência, criar poros maiores que diminuem a resistência do material. Além disso, constatou-se que o tempo de permanência também tem forte influência na microestrutura dos agregados, com as formulações que continham casca de ovo apresentando melhores resultados em patamares menores, sugerindo que a reação ocorre rapidamente nessas condições.

Desse modo, os agregados produzidos atendem às normas para agregados leves, apresentando densidades inferiores a 2000 kg/m^3 . Assim, os resultados apontam que a utilização dos resíduos casca de ovo, vidro e discos de corte na produção de agregados leves é uma prática promissora para esta finalidade, contribuindo para a utilização de resíduos sólidos e minimizando a necessidade da extração de minerais naturais.

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para contribuição e aprofundamento do estudo realizado, sugere-se uma continuidade da investigação com uma abordagem mais ampla de análise térmica, que poderá fornecer uma visão detalhada e que permitirá mais explicações sobre as reações de expansão e sinterização. A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) também permitiria observar as mudanças microestruturais que ocorrem durante o processo de expansão dos agregados.

Sugere-se também explorar uma faixa de temperaturas ainda mais extensa, para determinar com maior precisão o ponto de transição térmica e o comportamento das formulações nos limites superior e inferior de expansão. Além disso, seria interessante realizar testes com mais patamares. No presente estudo, foram utilizados testes com patamares de 1 e 20 minutos, mas a inclusão de um patamar intermediário poderia revelar variações e contribuir para uma análise mais detalhada dos efeitos do tempo de exposição térmica.

Ainda, testes com formulações com maiores concentrações de casca de ovo podem oferecer mais informações sobre o efeito dessa matéria-prima no processo de expansão dos agregados. Por fim, seria relevante incorporar os agregados leves produzidos em misturas de concreto, avaliando propriedades como densidade, resistência à compressão e isolamento térmico.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12655: Concreto — Preparo, controle e recebimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ADITYA, Sanprit; STEPHEN, Jaspin; RADHAKRISHNAN, Mahendran. Utilization of eggshell waste in calcium-fortified foods and other industrial applications: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 115, p. 422-432, 2021.

AYATI, B., FERRÁNDIZ-MAS, V., NEWPORT, D., CHEESEMAN, C. Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate. *Construction and Building Materials* 162: 124–131, 2018.

ADHIKARY, Suman Kumar; RUDZIONIS, Zymantas. Influence of expanded glass aggregate size, aerogel and binding materials volume on the properties of lightweight concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 32, p. 712-718, 2020.

BERNHARDT, Markus et al. The effect of additives on the properties of lightweight aggregates produced from clay. **Cement and concrete composites**, v. 53, p. 233-238, 2014.

BIJEN, J. M. J. M. Manufacturing processes of artificial lightweight aggregates from fly ash. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 8, n. 3, p. 191-199, 1986.

BORJA, Edilberto Vitorino de. Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis. 2011.

BOUACHERA, Rachida et al. Reuse of sewage sludge and waste glass in the production of lightweight aggregates. *Materials Today: Proceedings*, v. 37, p. 3866-3870, 2021.

CAMPELO, Themistocles de Sousa. Efeito da adição de pó de vidro e SiC para a produção de agregados leves a partir de argila não expansiva. 2023.

CEMPRE. Vidro – O mercado para reciclagem. [S. l.]: Compromisso empresarial para reciclagem, 2011. Disponível em: http://www.cempre.org.br/ft_vidros.php. Acesso em 30 jun. 2022. CEMPRE. Resíduos de vidro. [S. l.]: Compromisso empresarial para reciclagem, 2022. Disponível em: www.cempre.org.br. Acesso em 30 jun. 2024.

CINEXPAN. Enchimento leve com nata de cimento. Disponível em: https://www.cinexpan.com.br/enchimento-leve-com-nata-de-cimento.html?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw65-zBhBkEiwAjrqRMOX0RqID3WYI57ufefBd7Akx6zSkOcYjVFBNoYlw7DQSZ-ZtVIQ3LBoC8moQAvD_BwE. Acesso em: 11 jun. 2024.

CHIOU, Jia et al. Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash. **Waste Management**, v. 26, n. 12, p. 1453-1461, 2006.

CHINDAPRASIRT, Prinya; JATURAPITAKKUL, Chai; RATTANASAK, U. Influence offineness of rice husk ash and additives on the properties of lightweight aggregate. **Fuel**, v. 88, n. 1, p. 158-162, 2009.

CHONG, B. W. et al. Properties of concrete with eggshell powder: A review. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 120, p. 102951, 2020.

COUGNY, Gérard. Specifications for clayey raw materials used to produce expanded light-weight aggregates. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur**, v. 41, p. 47-55, 1990.

DE GENNARO, Roberto et al. Use of zeolite-rich rocks and waste materials for the production of structural lightweight concretes. **Applied Clay Science**, v. 41, n. 1-2, p. 61-72, 2008.

DE MASCHEVILLE LENGLE, Hélio Costet; VICENZI, Juliane; BERGMANN, Carlos Pérez. Caracterização Comparativa de Fundentes para Emprego na Indústria Cerâmica.

DE SOUZA SANTOS, Pérsio; SANTOS, Helena Souza. **Ciência e tecnologia de argilas**. E. Blucher, 1992.

DONDI, M. et al. Lightweight aggregates from waste materials: Reappraisal of expansion behavior and prediction schemes for bloating. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 394-409, 2016.

DUTRA, R. P. S.; PONTES, L. R. Obtenção e análise de cerâmicas porosas com a incorporação de produtos orgânicos ao corpo cerâmico. **Cerâmica**, v. 48, p. 223-230, 2002.

EOM, Jung-Hye; KIM, Young-Wook; RAJU, Santosh. Processing and properties of macroporous silicon carbide ceramics: A review. **Journal of Asian Ceramic Societies**, v. 1, n. 3, p. 220-242, 2013.

IBRAHIM, Jamal Eldin FM et al. Preparation of innovative eco-efficient composite bricks based on zeolite-poor rock and Hen's eggshell. **Journal of Building Engineering**, v. 45, p. 103491, 2022.

FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. Characterization of avian eggshell waste aiming its use in a ceramic wall tile paste. **Cerâmica**, v. 52, p. 240-244, 2006.

GONZÁLEZ-CORROCHANO, B.; ALONSO-AZCÁRATE, J.; RODAS, M. Characterization of lightweight aggregates manufactured from washing aggregate sludge and fly ash. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 10, p. 571-581, 2009.

GOMES NETO, David de Paiva; AGNESINI, Marcos Vinício da Costa. Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados de pequena espessura: estudo de caso. 1998.

HAMA, Sheelan M. Improving mechanical properties of lightweight Porcelanite aggregate concrete using different waste material. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 6, n. 1, p. 81-90, 2017.

HAMADA, Hussein M. et al. The present state of the use of eggshell powder in concrete: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101583, 2020.

HINCKE, Maxwell T. et al. The eggshell: structure, composition and mineralization. **Front Biosci**, v. 17, n. 1, p. 1266-1280, 2012.

HIRAMATSU, Y. Determinação rápida da resistência à tração de rochas com corpos de prova irregulares. **J. Mineração. Metalúrgico. Inst. Japão.**, v. 81, pág. 1024-1030, 1965.

HUANG, Su-Chen et al. Production of lightweight aggregates from mining residues, heavy metal sludge, and incinerator fly ash. **Journal of hazardous materials**, v. 144, n. 1-2, p. 52-58, 2007.

KHALID, N. H. A. et al. Characterization of palm oil fuel ash and eggshell powder as partial cement replacement in concrete. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2018. p. 032002.

KORAT, L. et al. Characterisation of the pore-forming process in lightweight aggregate based on silica sludge by means of X-ray micro-tomography (micro-CT) and mercury intrusion porosimetry (MIP). **Ceramics International**, v. 39, n. 6, p. 6997-7005, 2013.

KOURTI, Ioanna; CHEESEMAN, Christopher R. Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from lignite coal fly ash and recycled glass. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 11, p. 769-775, 2010.

KURPINSKA, Marzena; KUŁAK, Leszek. Predicting performance of lightweight concrete with granulated expanded Glass and Ash aggregate by means of using Artificial Neural Networks. **Materials**, v. 12, n. 12, p. 2002, 2019.

LAU, P. C., TEO, D. C. L., MANNAN, M. A. Characteristics of lightweight aggregate produced from lime-treated sewage sludge and palm oil fuel ash. **Construction and Building Materials** 152: 558–567, 2017

LI, Xiangguo et al. Utilization of municipal sewage sludge and waste glass powder in production of lightweight aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 256, p. 119413, 2020.

MARIOSI, Fabrício Ravello et al. Eggshells as agro-industrial waste substitute for CaCO₃ in glass foams: A study on obtaining lower thermal conductivity. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 18, n. 3, p. 838-849, 2021.

MENDES, Mara Regina et al. Desenvolvimento de agregados leves a partir de subproduto da mineração de carvão e de lodo de estação de tratamento de efluentes de indústria têxtil. 1998.

MORAVIA, Wagner G. et al. Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve. **Cerâmica**, v. 52, p. 193-199, 2006.

Moreno-maroto, J. M.; Cobo-ceacero, C. J.; Uceda-rodríguez, M.; Cotes-palomino, T.; García, C. M.; Alonso-azcárate, J. Unraveling. The expansion mechanism in lightweight aggregates: demonstrating that bloating barely requires gas. **Construction and building materials** 247: 118583, 2020.

MUN, K. J. Development and tests of lightweight aggregate using sewage sludge for nonstructural concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 7, p. 1583- 1588, 2007.

MURTHI, P.; LAVANYA, V.; POONGODI, K. Effect of eggshell powder on structural and durability properties of high strength green concrete for sustainability: A critical review. **Materials Today: Proceedings**, v. 68, p. 1311-1318, 2022.

NANDHINI, K.; KARTHIKEYAN, J. Aproveitamento eficaz de resíduos de pó de casca de ovo em argamassa de cimento. **Materiais Hoje: Procedimentos**, v. 428-432, 2022.

NGUYEN, Hung Phong et al. Development and characterization of lightweight aggregate recycled from construction and demolition waste mixed with other industrial by-products. **Construction and Building Materials**, v. 313, p. 125472, 2021.

OWUAMANAM, Stephen; SOLEIMANI, Majid; CREE, Duncan E. Fabrication and characterization of bio-epoxy eggshell composites. **Applied Mechanics**, v. 2, n. 4, p. 694-713, 2021.

PARTHASARATHI, N.; PRAKASH, M.; SATYANARAYANAN, K. S. Experimental study on partial replacement of cement with egg shell powder and silica fume. **Rasayan Journal of Chemistry**, v. 10, n. 2, p. 442-449, 2017.

PETRELLA, A. et al. Resíduos de vidro reciclado como agregado para concreto leve. **Atas da Instituição dos Engenheiros Civis-Materiais de Construção**, v. 160, n. 4, pág. 165-170, 2007.

POKORNY, Andrea; VICENZI, Juliane; PEREZ BERGMANN, Carlos. Influence of heating rate on the microstructure of glass foams. **Waste Management & Research**, v. 29, n. 2, p. 172-179, 2011.

RILEY, Charles M. Relation of chemical properties to the bloating of clays. **Journal of the American ceramic society**, v. 34, n. 4, p. 121-128, 1951.

ROSA, Sérgio Eduardo Silveira da; COSENZA, José Paulo; BARROSO, Deise Vilela. Considerações sobre a indústria do vidro no Brasil. **BNDES Setorial**, n. 26, p.[101]-137, set. 2007., 2007.

SALIB, Cíntia Quissini et al. Projeto de sistema de produção de hidrogênio reutilizando resíduos visando geração de energia elétrica. 2021.

ŠEPUTYTĖ-JUCIKĖ, Jurga; SINICA, Marijonas. The effect of expanded glass and polystyrene waste on the properties of lightweight aggregate concrete. **Engineering structures and technologies**, v. 8, n. 1, p. 31-40, 2016.

SOLTAN, Abdel Monem Mohamed et al. Lightweight aggregates from mixtures of granite wastes with clay. **Journal of Cleaner Production**, v. 117, p. 139-149, 2016.

TANG, Pei et al. Self-foaming high strength artificial lightweight aggregates derived from solid wastes: expansion mechanism and environmental impact. **Construction and Building Materials**, v. 370, p. 130698, 2023.

TCHUENTE, Flore Mpombo et al. Microstructural and mechanical properties of (Ca, Na)-poly (sialate-siloxo) from metakaolin as aluminosilicate and calcium silicate from precipitated silica and calcined chicken eggshell. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 662-675, 2019.

TOMPA, Alex S. A comparative study of the ultrastructure and mineralogy of calcified land snail eggs (Pulmonata: Stylommatophora). **Journal of Morphology**, v. 150, n. 4, p. 861-887, 1976.

TUAN, Bui Le Anh et al. Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete. *Construction and building materials*, v. 47, p. 334-339, 2013.

UJIN, Fazeera; ALI, Kamran Shavarebi; HARITH, Zarina Yasmin Hanur. Viability of eggshells ash affecting the setting time of cement. **International Journal of Civil and Environmental Engineering**, v. 10, n. 3, p. 342-346, 2016.

WEI, Yu-Ling; CHENG, Shao-Hsian; KO, Guan-Wei. Effect of waste glass addition on lightweight aggregates prepared from F-class coal fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 773-782, 2016.

WEI, Chong Beng et al. Properties of mortar with fine eggshell powder as partial cement replacement. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 1574-1581, 2021.

WANG, Xingrun et al. Development of lightweight aggregate from dry sewage sludge and coal ash. **Waste management**, v. 29, n. 4, p. 1330-1335, 2009.

XI, X., XU, L., SHUI, A., WANG, Y., NAITO, M. Effect of silicon carbide particle size and CaO content on foaming properties during firing and microstructure of porcelain ceramics. *Ceramics International* 40: 12931–12938, 2014.

YERRAMALA, Amarnath. Properties of concrete with eggshell powder as cement replacement. **The Indian concrete journal**, v. 88, n. 10, p. 94-105, 2014.

Yousefi, Ali et al. Thermal and mechanical properties of cement mortar composite containing recycled expanded glass aggregate and nano titanium dioxide. **Applied sciences**, V. 10, N. 7, P. 2246, 2020.

YU, Q. L.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Development of cement-based lightweight composites—Part 1: mix design methodology and hardened properties. **Cement and concrete composites**, v. 44, p. 17-29, 201

