

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
– PPGE3M**

**EFEITO DA ADIÇÃO DE PÓ DE VIDRO E SiC PARA A PRODUÇÃO DE
AGREGADOS LEVES A PARTIR DE ARGILA NÃO EXPANSIVA**

Themistocles de Sousa Campelo

Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

**Porto Alegre – RS
2023**

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

**EFEITO DA ADIÇÃO DE PÓ DE VIDRO E SiC PARA A PRODUÇÃO DE
AGREGADOS LEVES A PARTIR DE ARGILA NÃO EXPANSIVA**

Themistocles de Sousa Campelo

Engenheiro de Materiais

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito obrigatório para a obtenção de título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Porto Alegre

2023

CIP - Catalogação na Publicação

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 / Themistocles de Sousa Campelo. -- 2023.
95 f.
Orientador: Saulo Roca Bragança.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Agregados leves. 2. Argila. 3. Vidro reciclado.
4. Efeito Expansivo. 5. Concretos Leves. I. Bragança,
Saulo Roca, orient. II. Título.

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Ciência e Tecnologia de Materiais, e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela banca examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Saulo Roca Bragança

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Dr^a. Annelise Kopp Alves

Prof^a. Dr^a. Daiana Cristina Metz Arnold

Prof^a. Dr^a. Valdeci Bosco dos Santos

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Coordenador do PPGE3M

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Saulo Roca Bragança, pela sua orientação, tempo dispendido em nosso trabalho e pela sua paciência de explicar e debater alguns pontos do trabalho.

Ao professor Dr. André Zimmer, pela co-orientação e disponibilização da argila utilizada neste trabalho, bem como suas contribuições na discussão da nossa pesquisa.

Aos alunos de iniciação científica Bruno Hillbrecht, Guilherme Finkler e Leonardo Hahn pelo suporte e todo o trabalho em equipe desenvolvido ao longo da parte prática do mestrado.

À professora Dra. Annelise Kopp Alves, por me ensinar a utilizar os equipamentos do Lacer e todas as demais contribuições de suas aulas da disciplina de vidros, essencial no presente trabalho.

À professora Dra. Vânia Caldas de Sousa por ter me dado a oportunidade de ministrar aula na disciplina de materiais de construção mecânica II.

À Ma. Jaqueline Dilly, do LDSM - Laboratório de Design e Seleção de Materiais, pela sua valiosa ajuda na caracterização por Microscopia Eletrônica de Varredura.

À Dra. Sabrina Arcaro, da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), por gentilmente ter realizado as caracterizações térmicas dos materiais utilizados neste trabalho.

Ao Me. Adalberto Viana Rodrigues, pelas muitas dicas e preciosa ajuda em todo o decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Pedro Ivo, William Santos de Oliveira, Juliana Sacchetto e Júnior de Souza, com quem dividi um pouco do meu tempo nesses últimos meses. Aos amigos de Teresina Albert Silva e Lucas Ítalo pela ajuda e conselhos relativos ao mestrado.

Aos familiares, pelo apoio e compreensão nesses meses de ausência.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – PPGE3M, pela oportunidade de fazer parte do programa e todo o suporte material durante essa jornada.

Ao Laboratório de Design e Seleção de Materiais – LDSM e, principalmente, ao Laboratório de Materiais Cerâmicos – Lacer, onde despendi incontáveis horas de pesquisas, erros, acertos e muito aprendizado.

Ao CNPq, cujo apoio financeiro foi fundamental para a realização dessa pesquisa.

RESUMO

Os agregados leves de argila apresentam uma gama de aplicações, mas são utilizados principalmente na construção civil, na indústria têxtil, no paisagismo e na agricultura. Um dos grandes impedimentos à produção desse tipo de material é a necessidade de uma argila autoexpansível na queima e de boa qualidade, a qual não é facilmente encontrada na natureza. No presente trabalho, procurou-se avaliar as características necessárias a uma argila para a produção de agregados expandidos e, paralelamente, produzir agregados expandidos a partir de uma argila que não apresenta expansão durante a queima. Foram desenvolvidos agregados leves, moldados manualmente com 20% em peso de água, a partir de uma argila vermelha originária do vale do rio Caí-RS, adicionando-se 25% e 31% de vidro em pó e 0,312 a 1,25% de carbetto de silício, este último com o objetivo de promover a expansão dessa argila durante a queima, uma vez que a mesma não é autoexpansível. O resíduo de vidro atua aumentando a quantidade de fase vítrea com adequada viscosidade, e o carbetto de silício atua como agente piroexpansivo, o qual gera gases e aumenta a porosidade fechada na temperatura de queima dos agregados de argila. A utilização de ambos materiais foi responsável pelo fenômeno de inchamento que levou ao aumento de ~480% das esferas peletizadas. A argila foi caracterizada quanto as suas propriedades químicas, mineralógicas e térmicas. Os agregados foram caracterizados quanto à resistência à compressão, absorção de água e massa específica. O estudo permitiu a obtenção de agregados leves a partir de uma argila não expansiva, os quais apresentaram densidade entre 1,31 e 0,28 g/cm³ e resistência à compressão entre 6,83 e 0,78 MPa, oferecendo uma alternativa para solucionar a falta de disponibilidade local de matérias-primas à produção de agregados leves. Para avaliar o potencial de utilização desses agregados em concretos leves, foram elaborados corpos de provas com as composições de agregados desenvolvidos, caracterizando-se a resistência à compressão e a densidade. No traço testado, a composição de concreto leve com agregado S10-31 (31% vidro e 1,25% SiC) teve uma densidade de 1.956 kg/m³ e resistência à compressão de 14,29 MPa.

Palavras-chave: Agregados leves. Argila. Vidro reciclado. Efeito Expansivo. Concretos Leves.

ABSTRACT

Lightweight clay aggregates have a large range of applications, but are mainly used in civil construction, textile industry, landscaping and agriculture. One of the major impediments to the production of this type of material is the need for good quality and self-expanding clay, which is not easily found in nature. In the present work, it was evaluated the necessary characteristics of a clay for the production of lightweight aggregates (LWA) and, at the same time, it was produced LWA from a clay that does not show self-expansion during firing. LWA were manually molded with 20wt% of water, from a red clay originating from Vale do Rio Caí-RS, adding 25% and 31% of powdered waste glass and 0.312 to 1.25% of silicon carbide, with the objective of promoting the expansion of this not self-expanding clay during firing. Waste glass acts by increasing the amount of the glassy phase with adequate viscosity, and the silicon carbide acts as a pyroexpansive agent, which generates gases and increases the closed porosity at the firing temperature of the clay aggregates. The use of both materials was responsible for the swelling phenomenon (bloating) that led to an increase of ~480% of the pelleted spheres. The clay was characterized by its chemical, mineralogical and thermal properties. The aggregates were characterized by compressive strength, water absorption and density. LWA had a density between 1.31 and 0.28 g/cm³ and compressive strength between 6.83 and 0.78 MPa, offering an alternative to solve the lack of local availability of raw materials for LWA production. The use of these aggregates in lightweight concrete was evaluated by formulations prepared with two of the aggregate compositions, characterizing the compressive strength and estimating the density. In the tested mix, the concrete composition with S10-31 aggregate (31% glass and 1.25% SiC) had a density of 1956 kg/m³ and compressive strength of 14.29 MPa.

Keywords: Lightweight aggregates. Clay. Recycled glass. Expansive Effect. Lightweight Concrete.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Linha do tempo.....	19
Figura 02 – Catedral de Santa Sofia.....	20
Figura 03 – Pedras-pomes de diferentes origens.....	21
Figura 04 – Agregados de casca de dendê.....	23
Figura 05 – Agregados de tijolo triturado.....	23
Figura 06 – Agregados leves de argila expandida.....	24
Figura 07 – Agregados leves obtidos por sinterização.....	26
Figura 08 – Fluxograma da fabricação de agregados leves.....	27
Figura 09 – Seção transversal de um agregado queimado por 30 minutos.....	28
Figura 10 – Escória de aço em diferentes formas.....	30
Figura 11 – Escória de aço peneirada.....	30
Figura 12 – Cinzas volantes.....	31
Figura 13 – Agregados sinterizados de cinzas volantes.....	32
Figura 14 – Agregados leves de lodo de esgoto tratado.....	34
Figura 15 – Agregados leves produzidos a partir de resíduo de vidro.....	35
Figura 16 – Materiais utilizados na fabricação de agregados leves.....	37
Figura 17 – As três formas básicas de concreto leve.....	41
Figura 18 – Concreto sem finos	41
Figura 19 – Concreto de agregado leve de cinzas de dendê e silte.....	42
Figura 20 – Influência de diferentes agregados leves na tensão máxima e módulo de elasticidade do concreto leve.....	43
Figura 21 – Seção de uma amostra de concreto aerado.....	44
Figura 22 – Bloco de concreto aerado.....	45
Figura 23 – Relação de densidade e resistência à compressão.....	47
Figura 24 – Fator de eficiência de concreto.....	48
Figura 25 – Formação de microfissuras em um concreto leve.....	51

Figura 26 – Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.....	52
Figura 27 – Etapas do processamento do vidro sodo-cálcico.....	53
Figura 28 – Agregados antes da queima.....	56
Figura 29 – Difratoograma de raios X da argila utilizada.....	59
Figura 30 – DSC e TG da argila (a) e mistura da argila, vidro e SiC.....	60
Figura 31 – Agregados com 25% e 31,25% de vidro.....	63
Figura 32 – Agregados com SiC queimados a 1150 °C.....	65
Figura 33 – Microscopia óptica dos agregados A0, G25 e G31.....	67
Figura 34 – Microscopia óptica dos agregados com carbetto de silício.....	68
Figura 35 – Microscopia eletrônica de varredura dos agregados.....	70
Figura 36 – MEV da região das paredes internas dos agregados.....	71
Figura 37 – MEV da região da borda dos agregados.....	72
Figura 38 – Análise EDS da composição A0.....	74
Figura 39 – Análise EDS da composição G31.....	74
Figura 40 – Análise EDS da composição S10-31.....	75
Figura 41 – Resistência à compressão de agregados.....	77
Figura 42 – Corpos de prova de concreto com agregados.....	78
Figura 43 – Resistência à compressão dos concretos.....	80
Figura 44 – Resistência à tração direta (Fct) e módulo de elasticidade (Eci).....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Estimativa da resistência à tração para concreto leve estrutural.....	49
Tabela 02 – Taxa de absorção de água de agregados leves.....	50
Tabela 03 – Nomenclatura e composição dos agregados.....	55
Tabela 04 – Composição química da argila e vidro utilizados.....	59
Tabela 05 – Retração dos agregados de argila.....	61
Tabela 06 – Expansão de agregados com 25 e 31% de vidro.....	62
Tabela 07 – Densidade para amostras queimadas em temperaturas distintas.....	64
Tabela 08 – Absorção de água dos agregados de vidro com argila.....	64
Tabela 09 – Expansão obtida para os agregados com SiC queimados a 1150 °C.....	65
Tabela 10 – Densidade estimada dos agregados com SiC queimados a 1150 °C.....	66
Tabela 11 – Absorção de água dos agregados contendo SiC.....	66
Tabela 12 – Composição estimada por EDS.....	75
Tabela 13 – Densidade dos corpos de prova de concreto.....	77
Tabela 14 – Estimativa de densidades de concretos.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

DRX – Difração de Raios X

DSC – Calorimetria de Varredura Diferencial

Eci – Módulo de elasticidade E

EDS – Espectrometria de Energia Dispersiva por Raios X

Fck – Resistência do concreto à compressão

Fct – Resistência à tração direta

FRX – Fluorescência de Raios X

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

TG – Termogravimetria

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS DA PESQUISA.....	17
2.1 Objetivo Geral.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 DEFINIÇÃO E HISTÓRICO DOS CONCRETOS LEVES.....	18
3.2 AGREGADOS LEVES.....	20
3.2.1 Agregados leves naturais.....	21
3.2.2 Agregados leves artificiais.....	24
3.2.3 Argila expandida.....	27
3.2.4 Resíduos para a fabricação de agregados leves.....	29
3.2.5 Adições e sinterização.....	37
3.2.6 Propriedades dos agregados leves.....	39
3.3 CONCRETO LEVE.....	40
3.3.1 Tipos de concreto leve.....	40
3.3.1.1 Concreto leve sem finos.....	41
3.3.1.2 Concreto de agregados leves.....	42

3.3.1.3 Concreto aerado.....	43
3.3.2 Produção de concretos leves.....	45
3.3.3 Propriedades do concreto leve.....	46
3.3.3.1 Resistência à compressão e à tração.....	46
3.3.3.2 Absorção de água.....	49
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
4.1 MATERIAIS.....	52
4.1.1 Argila.....	52
4.1.2 Vidro.....	53
4.1.3 Grafite e bentonita.....	54
4.1.4 Carbetto de Silício.....	54
4.2 MÉTODOS.....	54
4.2.1 Preparação e queima dos agregados leves.....	54
4.2.2 Caracterizações.....	56
4.2.3 Preparação do concreto leve.....	57
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
5.1 CARACTERIZAÇÕES DA ARGILA.....	59
5.2 EXPANSÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	61
5.2.1 Agregados contendo 100% de Argila.....	61
5.2.2 Agregado de argila + vidro.....	62

5.2.3 Agregados de argila + vidro + SiC.....	64
5.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS AGREGADOS.....	67
5.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	76
5.4.1 Resistência à compressão dos agregados.....	76
5.4.2 Resistência à compressão dos corpos de prova de concreto.....	77
6. CONCLUSÕES.....	82
7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
8. REFERÊNCIAS.....	85

1. INTRODUÇÃO

Concretos leves (LCs) têm sido estudados como uma alternativa ao concreto comum e empregados em muitas aplicações na construção, como edifícios, pontes, pisos e paredes divisórias (Kalpana & Tayu, 2020). Dentre as diversas vantagens que os concretos leves apresentam em relação aos concretos de peso normal, destacam-se a maior relação resistência/peso, menor impacto de terremoto (devido à menor rigidez), melhor resistência ao fogo e menor coeficiente de condutividade térmica.

O uso de concretos nas estruturas proporciona redução de cargas mortas (a carga relativa ao peso próprio do elemento estrutural), que conseqüentemente promove uma redução na seção transversal de vigas, pilares, fundações e paredes nas estruturas. Um tipo de concreto leve é o concreto de agregados leves (LWAC), fabricado a partir da substituição total ou parcial de agregados de peso normal (como brita) por agregados leves naturais ou artificiais (Saridemir & Çelikten, 2020). Os materiais comumente utilizados na produção de agregados são as argilas expansíveis (Chung *et al.*, 2021). Essa característica presente em alguns tipos de argila se deve à presença de matéria orgânica ou mineral, capazes de gerar gases durante a queima, levando ao aumento volumétrico dos agregados esféricos (Hewlett & Liska, 2019).

Moreno *et al.* (2020a) define que a expansão se inicia com um pré-aquecimento onde ocorre grande perda de gás, porém, com pouca mudança no volume do agregado. Depois ocorre a formação de microporosidade fechada seguida da expansão propriamente dita, onde a viscosidade atingida permite que o gás ainda presente aumente o volume do agregado. Além dessas características, é essencial que a argila utilizada na produção de agregados leves tenha uma plasticidade adequada ao processo de moldagem.

Além das argilas, resíduos das mais diversas indústrias podem ser utilizados para a obtenção de agregados leves, como resíduos de tijolos (Zhao *et al.*, 2018) e sedimentos de dragagem (Peng *et al.*, 2017), bem como na obtenção de geopolímeros (Peyne *et al.*, 2018). O aproveitamento desses resíduos pode contribuir significativamente para a redução de volume gerado e acumulado, além da redução de custo do concreto. Lo *et al.* (2016) utilizaram argila expansível e cinzas volantes com alto teor de carbono para produzir agregados leves, que demandaram menor tempo de sinterização, além de resultarem em agregados adequados para aplicações em concretos estruturais. O módulo de elasticidade do concreto obtido a partir desses agregados foi bem inferior ao módulo de elasticidade de concretos comuns, resultado do módulo elástico inferior dos agregados leves. Resíduos de tijolos também podem ser

utilizados como agregado em concretos leves, conforme o trabalho de Zhao *et al.* (2018). No entanto, o uso de resíduos de tijolos na forma como foi trabalhada pelo autor pode ser problemática, devido à grande variabilidade do tamanho dos agregados e do formato irregular e pouco uniforme. Considerando as limitações dos possíveis materiais para agregados leves destacadas acima, nota-se que as argilas expansíveis ainda são os materiais mais adequados para a fabricação de agregados leves.

Um resíduo ainda pouco explorado na obtenção de agregados leves é o vidro reciclado. Além do uso em agregados leves, o vidro reciclado pode ser utilizado como precursor em geopolímero e para a fabricação de ecocimento e materiais de mudança de fase (PCMs – Phase Change Materials) compósitos. Embora o uso de pó de vidro reciclado em substituição parcial do cimento Portland (material cimentício suplementar) seja bastante estudado, como nos trabalhos de Yang, Lu & Poon (2021), Harrison, Berenjian & Seifan (2020) e Du & Tan (2017), o número de trabalhos utilizando vidro reciclado como agregado leve é relativamente baixo. Pode-se citar como exemplo o trabalho recente de Li *et al.* (2021a), que utilizou lama de efluentes (seca) e pó de vidro para obter agregados leves com densidade de partícula de $0,78 \text{ g/cm}^3$ e baixa absorção de água, adequados aos requisitos exigidos para os agregados.

Ducman, Mladenović & Šuput (2002) produziram agregados leves altamente porosos utilizando somente pó de vidro reciclado e agente expansivo, com densidade de $0,18 \text{ kg/m}^3$. Os autores também estudaram a reatividade álcali-sílica dos agregados obtidos, uma vez que a combinação de um alto conteúdo de sílica e estrutura amorfa (do vidro) pode ter efeito deletério e reagir com os álcalis do cimento, mesmo que estes estejam presentes em baixos níveis. Portanto, qualquer proposta de utilização de resíduo de vidro em agregados leves deve considerar a reatividade álcali-sílica. Outra característica que deve ser considerada é a absorção de água apresentada pelos agregados leves, que é um indicador importante do nível de porosidade dos agregados.

Ainda que resíduos de diferentes origens possam ser utilizados como material de partida na obtenção de agregados leves, as argilas expansíveis são os materiais mais utilizados na produção industrial desses agregados. A argila passa por um processo de queima em forno rotativo, onde ocorre a expansão das esferas, resultando em agregados de estrutura externa rígida e interior altamente poroso, que lhe confere uma baixa densidade.

Os agregados leves de argila, por vezes denominados LECA (Lightweight expanded clay aggregate), encontram aplicação na indústria têxtil, agricultura e construção civil, onde seu uso principal está relacionado a aterro leve em obras geotécnicas e na fabricação de concreto leve. Além dos concretos convencionais, os agregados leves de argila expandida são utilizados em concreto auto-adensável, concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço e em conjunto com outros tipos de fibras, promovendo a redução da densidade, melhora das propriedades de isolamento térmico e a cura interna do concreto (Roces *et al.*, 2021).

Deve-se destacar que nem todas as argilas são naturalmente expansivas, o que limita a produção de agregados leves a regiões que possuem reservas minerais desse tipo de argila. Uma possível forma de contornar esse problema seria a elaboração de agregados leves com argila e adições capazes de promover a expansão das esferas durante a queima.

Na literatura, há estudos evidenciando que o carbetto de silício (SiC) pode atuar como agente expansivo em porcelanas (Shui *et al.*, 2011; Xi *et al.*, 2014). Apesar do custo relativamente elevado (por se tratar de uma cerâmica avançada), relata-se a utilização do carbetto de silício em pequenas quantidades, o que pode tornar viável a sua utilização como agente piroexpansivo (Cuevas & Lopez, 2021), permitindo um efeito sinérgico com o vidro na expansão dos agregados leves durante a queima.

Considerando a necessidade de maior aproveitamento do vidro descartado, a não disponibilidade de argilas expansíveis em todas as localidades e a necessidade de produção de agregados leves para as aplicações anteriormente citadas, faz-se necessário um trabalho de pesquisa que desenvolva agregados leves a partir de argilas não expansíveis, bem como a avaliação de suas propriedades. Esse desenvolvimento será possível através do estudo e compreensão dos fatores que tornam uma argila expansível, que serão objeto de estudo do presente trabalho. A produção de agregados leves obtidos a partir de resíduo de vidro possibilitaria a utilização de argilas localmente disponíveis na produção de agregados leves, além dos benefícios ambientais implícitos. Portanto, a importância da pesquisa consiste na possibilidade de disponibilização de agregados leves, a partir da utilização de uma argila não expansível, e aproveitamento adequado de resíduos, a partir da utilização do vidro reciclado como um dos constituintes dos agregados. Outro aspecto a se considerar seria a redução da temperatura de queima dos agregados leves que poderia ser obtida com a adição de pó de vidro, que pode acarretar em redução de custos energéticos durante a produção dos agregados leves.

2. OBJETIVOS DA PESQUISA

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como principal objetivo a avaliação dos fatores para a produção de agregados leves a partir de uma argila não expansível, de modo a aumentar a gama de matérias-primas disponíveis para esse propósito, estudando-se a utilização de pó de vidro e agente piroexpansivo (SiC) como os respectivos meios para aumentar a quantidade de fase vítrea e sua expansão em diferentes temperaturas de queima.

2.2 Objetivos Específicos

Descreve-se, a seguir, os objetivos específicos da pesquisa:

- Produzir, em diferentes temperaturas, agregados leves com dois percentuais de vidro reciclado e quatro percentuais de carvão de silício, estabelecendo o teor ideal para a produção de agregados leves;
- Caracterizar a argila utilizada na fabricação dos agregados leves;
- Investigar a temperatura mais adequada para a queima dos agregados;
- Analisar o nível de expansão e a absorção de água dos agregados obtidos;
- Confeccionar, levando em conta traços previamente definidos, corpos de prova de concreto leve em moldes nas dimensões de $\varnothing 4$ cm x 8 cm, com os agregados produzidos;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas do concreto leve por meio de ensaio de resistência à compressão (NBR 5739, 2018), bem como estimar a resistência à tração direta e módulo de elasticidade (NBR 6118, 2014), em um período superior a 28 dias de cura, de acordo com as normas estabelecidas para esse tipo de material.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 DEFINIÇÃO E HISTÓRICO DOS CONCRETOS LEVES

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, sendo o material de preferência para a maioria das aplicações na construção civil, devido principalmente às suas propriedades como alta resistência à compressão, boa durabilidade, produção acessível e fácil aplicação (Cakir *et al.*, 2021). A constante evolução deste material levou ao desenvolvimento do concreto leve, que apresenta, como principais vantagens, a redução da carga morta em edificações, redução das forças causadas pela aceleração sísmica na estrutura e promoção do isolamento acústico e térmico (Mosallam *et al.*, 2022).

O conceito de concreto leve pode ser compreendido como uma definição relacionada ao seu peso, podendo essa definição variar de acordo com os autores considerados. Há, ainda, diferença significativa entre os preceitos normativos que versam sobre esse material. Por exemplo, o Instituto Americano do Concreto define o concreto leve como sendo aquele de “densidade substancialmente menor do que aquele feito com agregados de densidade normal; consiste inteiramente em agregado leve ou uma combinação de agregado leve e agregado de densidade normal; suas densidades de equilíbrio estão geralmente entre 1.120 e 1.920 kg/m³” (ACI, 2021), enquanto a NBR 12655 (ABNT, 2022) limita a densidade à 2.000 kg/m³. Esse valor máximo é o mesmo adotado pela Instituição de Normas Britânicas (BSI), que, por meio da norma BS EN 206-1 (2002), define o concreto leve como tendo uma densidade seca em estufa não inferior a 800 kg/m³ e não superior a 2.000 kg/m³, resultado da substituição total ou parcial de agregados naturais densos por agregados leves (Newman & Choo, 2003a). Os agregados graúdos são os principais constituintes responsáveis por conferir essa característica de menor densidade aos concretos (Chung *et al.*, 2021).

Pode-se considerar que o primeiro uso moderno do concreto leve se deu em 1918, sendo o Atlantis o primeiro navio a emergir do programa de construção naval com a entrada dos EUA na Primeira Guerra Mundial, e catorze cascos de navios de concreto leve foram construídos no total (Thienel, Haller & Beuntner, 2020). O bom desempenho na construção naval levou à adoção do concreto leve na engenharia estrutural.

Apesar do setor naval ter impulsionado o uso mais recorrente de concreto leve na construção civil, relatam-se que construções baseadas nesse material existem há mais de 2 mil anos, sendo o primeiro uso de concreto leve observado no México (ver Figura 1) e, posteriormente, no Império Romano (Chandra & Berntsson, 2002). Os romanos executaram

importantes construções, muitas delas atualmente consideradas patrimônio de valor histórico, a partir do concreto leve, e o desenvolvimento técnico do mesmo permanece em constante evolução até os dias atuais.

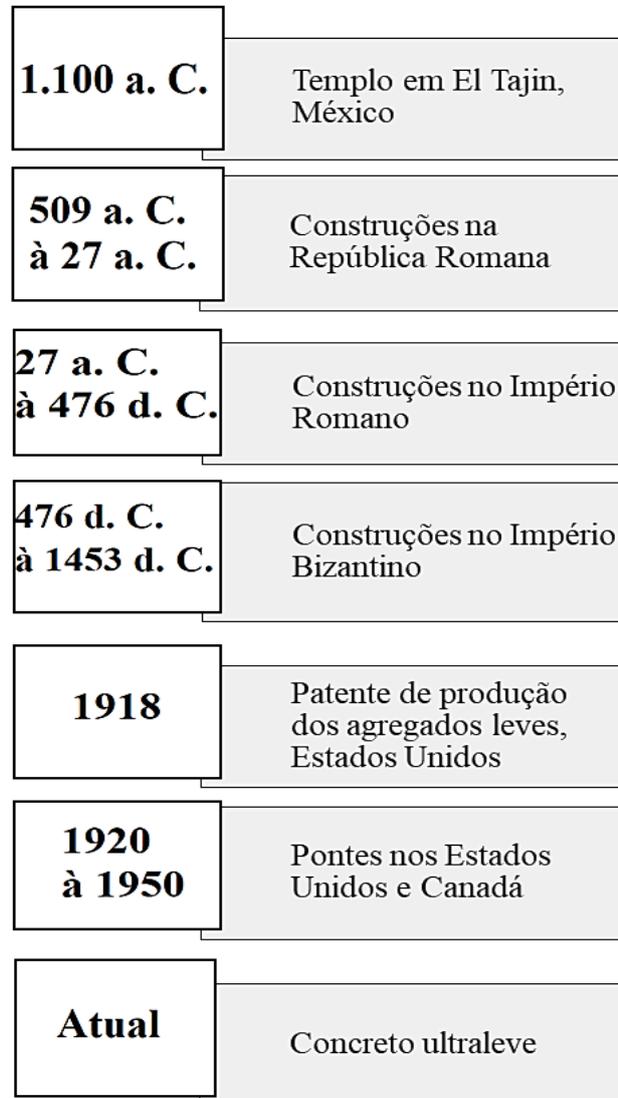


Figura 1: Linha do tempo. **Fonte:** Rossignolo, 2009; Thienel, Haller & Beuntner, 2020.

Dentre obras importantes que utilizaram concreto leve, pode-se citar o Panteão, onde o concreto leve foi utilizado na cúpula, o Coliseu de Roma e a Catedral de Santa Sofia (Mindess, 2019), construída durante o Império Bizantino em Constantinopla, atual Istambul, como mostra a Figura 2.



Figura 2: Catedral de Santa Sofia, Istambul. **Fonte:** Unsplash.com, 2014.

A produção em larga escala de agregados leves foi iniciada por Stephen J. Hayde, que descobriu como ocorre a formação de agregados expandidos e patenteou o processo, adotado até hoje por companhias do mundo inteiro (Chandra & Berntsson, 2002). A utilização de agregados leves em concretos representou grande avanço em relação aos concretos de peso normal, já que estes são de quatro a seis vezes mais rígidos que a matriz de argamassa que envolve os agregados, o que resulta em elevadas concentrações de tensões no concreto quando submetido a carga. Já em concretos produzidos com agregados leves, a rigidez do agregado é relativamente semelhante à rigidez da matriz, resultando na eliminação das concentrações de tensão ou pelo menos reduzindo-as. As concentrações de baixa tensão no sistema de concreto leve explicam por que é possível obter um concreto de alta resistência a partir de uma partícula de resistência relativamente baixa. A concentração reduzida de tensão em torno dos agregados leves reduz substancialmente o número de microfissuras no concreto leve sob tensões aplicadas, em relação ao concreto de peso normal. Essa quantidade inferior de microfissuras, por sua vez, reduz a permeabilidade do concreto e aumenta sua capacidade de proteger da corrosão as armaduras de aço incorporadas no concreto (Mindess, 2019).

3.2 AGREGADOS LEVES

Embora diferentes autores adotem definições distintas, os agregados leves são frequentemente definidos como qualquer agregado que apresente densidade seca aparente inferior a 1.200 kg/m^3 , que será o valor tomado com parâmetro no presente trabalho. A baixa densidade dos agregados leves se deve à microestrutura celular ou altamente porosa. A pedra-pomes, rocha vulcânica natural de baixa densidade, tem sido usada como agregado leve desde

os tempos romanos mas, em decorrência da disponibilidade local, os agregados leves artificiais são mais frequentemente utilizados (Yuan *et al.*, 2021). Os agregados leves naturais são essencialmente de origem vulcânica (daí a sua limitação em relação à disponibilidade local), sendo a pedra-pomes e a escória os mais antigos de que se tem conhecimento; ambos foram usados extensivamente no período de domínio romano (Chandra & Berntsson, 2002).

3.2.1 Agregados leves naturais

Como mencionado anteriormente, os agregados leves naturais têm origem predominantemente vulcânica, e a pedra-pomes é o principal e mais largamente empregado. De morfologia semelhante a uma esponja, a pedra-pomes é moldada ao longo do rápido resfriamento e solidificação da matéria vulcânica (lava derretida). Essa estrutura porosa é obtida a partir da formação de bolhas ou aprisionamento de milhões de vazios minúsculos de ar quando os gases na lava derretida são aprisionados durante o resfriamento. A coloração da pedra-pomes é comumente cinza ou branca, sendo possível também variações de branco a dourado, marrom ou preto, conforme a Figura 3, o que depende principalmente da composição química (Rashad, 2019).

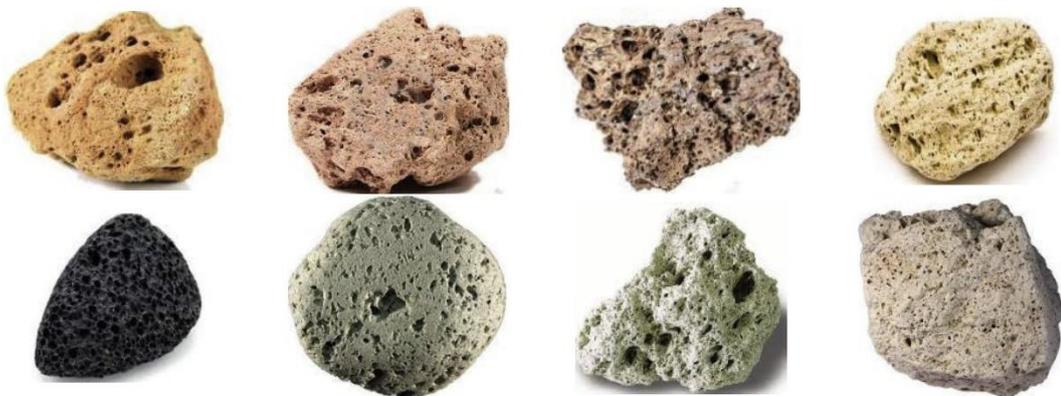


Figura 3: Pedras-pomes de diferentes origens. **Fonte:** Rashad, 2019.

A pedra-pomes tem um grande potencial de uso na produção de concreto leve, não só como agregado, mas também na forma de pó (agregado fino), promovendo redução da condutividade térmica e do peso unitário do concreto (Sarıdemir & Çelikten, 2020). Conforme demonstraram Karthika *et al.* (2021), o percentual adequado de substituição do agregado de peso normal por agregado de pedra-pomes é de até 50%, pois valores de substituição superiores foram prejudiciais à resistência à tração e resistência à flexão.

Ainda segundo Karthika *et al.* (2021) o agregado de pedra-pomes absorve mais água em comparação com o agregado graúdo normal (devido à presença de poros) e, portanto, a

resistência será reduzida, sendo necessária a utilização de superplastificantes. Fibras de aço e fibras de polipropileno podem ser utilizadas para melhorar a resistência à compressão e resistência à flexão de concretos leves de pedra-pomes (Badogiannis, Christidis & Tzanetatos). Além da redução de desempenho mecânico, a disponibilidade geográfica do agregado de pedra-pomes pode ser um fator limitante em sua adoção como agregado leve.

Outros dois tipos de materiais podem ser classificados, segundo Chandra & Berntsson (2002), como agregados leves naturais: as cascas de dendê (dendê) e resíduos de tijolos. A casca de dendê (COP) é um subproduto da produção de dendezeiros, que consiste em pequenas partículas duras de diferentes formas e tamanhos (ver Figura 4) que podem ser usadas como agregado no concreto, com densidade variando entre 1.725 e 2.050 kg/m³ (Traore *et al.*, 2018). O uso de cascas de dendê como agregado leve em concretos tem sido estudado por 25 anos, especialmente em países que são grandes produtores de dendê, como Malásia e Indonésia. A taxa de absorção de água das cascas de dendê é de 20 a 24%, que é 4 a 5 vezes maior do que os agregados de peso normal. Assim, o tratamento de superfície é realizado para agregados COP com composto de silício-hidrogênio (Si-H) (Nadh *et al.*, 2021). Além da elevada absorção de água, a adição de COP pode reduzir significativamente o desempenho mecânico do concreto, podendo atingir uma redução de 50% na resistência do concreto. Essa diminuição da resistência do concreto leve obtido com COP está ligada às propriedades intrínsecas da COP e à fraca adesão entre as cascas e a pasta de cimento, e, por isso, recomenda-se o tratamento das COPs antes de usá-las no concreto, como oxidação parcial do agregado, impermeabilização, tratamento com água quente, tratamento térmico, etc. (Traore *et al.*, 2018).

Resíduos de tijolos são gerados em serviços de demolição e construção ou mesmo na própria linha de montagem da indústria, quando não se enquadram nos padrões de qualidade exigidos e, conseqüentemente, são descartados. Esses resíduos são geralmente transportados para aterros sanitários para descarte ou dispostos em locais ao redor das fábricas de tijolos. Esses aterros, além de ocuparem espaços consideráveis e consumirem recursos que poderiam ser destinados a outras finalidades, poluem o solo e a água devido à dissolução de substâncias nocivas (Atyia, Mahdy & Elrahman, 2021).



Figura 4: Agregados de casca de dendê. **Fonte:** Hamada *et al.*, 2020.

Em alvenarias antigas, tijolos triturados, como os da Figura 5, ou argilas sinterizadas trituradas eram utilizados como agregados, cujas densidades estavam na faixa de 1.500–2.000 kg/m³. Embora alguns autores consideram esses resíduos como agregados de peso normal, algumas outras características, como porosidade e absorção de água, os colocariam na classe dos agregados leves (Chandra & Berntsson, 2002). Zhao *et al.* (2018) utilizaram resíduos de tijolos para produzir agregados leves, que atingiram uma densidade de 0,91 g/cm³. O concreto leve obtido pelos autores apresentou resistência à compressão de 40,00 MPa e densidade inferior a 1.850 kg/m³, atendendo, portanto, às características exigidas de um concreto leve.



Figura 5: Agregados de tijolo triturado. **Fonte:** Atyia, Mahdy & Elrahman, 2021.

Passos, Moreno Jr. & Souza (2020) estudaram o efeito da substituição de agregados de peso normal por agregados obtidos a partir de resíduos de tijolos e telhas. Os agregados estudados pelos autores, que apresentaram massa específica de 1,77 g/cm³ e absorção de água em torno de 19%, proporcionaram uma melhor resistência ao fogo do concreto e uma maior

estabilidade em relação ao lascamento, que não ocorreu mesmo em temperaturas superiores a 800°C. Entretanto, os agregados reciclados levaram à uma redução da resistência à compressão e módulo de deformação, e essas propriedades sofreram perdas conforme se aumentava o teor de substituição, inviabilizando, assim, a utilização de um maior percentual de agregados leves de resíduos de tijolo.

3.2.2 Agregados leves artificiais

Devido à rara disponibilidade de agregados leves naturais, tornou-se necessária a fabricação de agregados leves sintéticos, que são obtidos a partir de matérias-primas naturais como argila (agregados mostrados na Figura 6), ardósia, xisto e de subprodutos industriais como cinzas volantes, escória do aço, resíduos de mineração e vidro reciclado. A fabricação de agregados artificiais consiste essencialmente na transformação da matéria-prima (na forma de pó) em aglomerados, por meio do processo de pelletização, sendo esses aglomerados posteriormente tratados por diferentes técnicas, como sinterização (técnica mais comumente utilizada), colagem a frio e autoclavagem (Mohammed, ElKady & Abdel- Gawwad, 2021).



Figura 6: Agregados leves de argila expandida. **Fonte:** Ayati *et al.*, 2018.

Agregados leves artificiais obtidos a partir de resíduos podem ser produzidos por granulação, aglomeração ou pelletização e são vantajosos do ponto de vista ambiental, uma vez que evita-se exploração de recursos naturais e as atividades nocivas de mineração. Os agregados leves também promovem redução de custos porque os resíduos são transformados em produtos comercializáveis (Yliniemi *et al.*, 2016). A obtenção de agregados leves com

resíduos industriais envolve a expansão (inchaço) ou aglomeração. A expansão ocorre através do aquecimento do material até a temperatura de fusão, ponto em que a piroplasticidade do material e a formação de gás ocorrem simultaneamente. A aglomeração ocorre quando o material funde, unindo as partículas. A expansão da matéria-prima é induzida por tratamento térmico, que é realizado em diferentes tipos de fornos industriais, como fornos rotativos, fornos de eixo vertical, reatores de leito espumante, etc (Chandra & Berntsson, 2002).

Embora a fabricação de agregados leves apresente diferenças significativas conforme o tipo de matéria-prima utilizada (argila, resíduos industriais, etc.), pode-se considerar que as etapas mais importantes na produção industrial dos agregados são a formação dos grânulos (os agregados propriamente ditos) e a sinterização. As matérias-primas são moídas até atingirem uma granulometria fina e homogênea, sendo posteriormente misturadas em proporções específicas. Os agregados “verdes” (não queimados) são formados por extrusão ou aglomeração usando uma quantidade adequada de água. As propriedades físicas dos agregados “verdes” são importantes durante o manuseio e armazenamento e dependem do processo de granulação, das propriedades da argila e do teor de umidade. A influência dos parâmetros de granulação nas propriedades dos agregados “verdes” é complexa e, até o presente momento, um modelo abrangente que prevê o comportamento e o desempenho da granulação não está disponível (Ayati *et al.*, 2018). Como uma das principais etapas da fabricação de agregados, a granulação está diretamente relacionada às propriedades da argila. Conseqüentemente, o processo de granulação de diferentes argilas pode ter resultados muito distintos. Embora algumas pesquisas sobre granulação estejam disponíveis, como pesquisas sobre os parâmetros da granulação em disco, o processo difere entre os tipos de granulação ou mesmo entre mecanismos iguais, e há poucos estudos sobre a influência de diferentes argilas na granulação (Li *et al.*, 2020).

A sinterização geralmente é realizada em fornos rotativos, utilizando temperaturas entre 1100 °C e 1200 °C e tempos de permanência típicos de 3 a 20 minutos. Os fornos rotativos, preferencialmente acionados em contra fluxo (contra-corrente), são comprovadamente o equipamento mais adequado e já conhecidos na indústria cimenteira (Chandra & Berntsson, 2002). Geralmente, a temperatura de sinterização dos agregados leves ultrapassa 1150 °C para obter uma melhor expansão, mas para agregados leves obtidos com resíduos de mineração (metais pesados), a temperatura de sinterização exigida pode ser superior, em decorrência da necessidade de imobilização dos metais pesados (Li *et al.*, 2021b).

O processo de queima dos agregados leves é complexo e influenciado por vários fatores, relacionados especialmente com a composição da matéria-prima, condições do forno e temperatura utilizada. Durante a sinterização, ocorre o processo de expansão dos agregados, que requer geração de gás para formação de espuma e uma superfície capaz de coletar (aprisionar) o gás formado. O gás é gerado pela oxidação da matéria orgânica e carbono existente no interior da atmosfera redutora, onde a reação com o oxigênio externo é bloqueada durante a queima do agregado. Uma vez que a refratariedade da matéria-prima é distinta para diferentes tipos de materiais (argilas ou resíduos industriais), a temperatura de sinterização será superior para matérias-primas de maior refratariedade, sendo, portanto, difícil controlar a taxa de formação da superfície e a taxa de geração do gás (Lee *et al.*, 2019).

Em resumo, o agregado leve é formado quando duas condições são alcançadas simultaneamente: o desenvolvimento de uma fase altamente viscosa a uma temperatura próxima ao ponto de fusão (mas nunca atingindo, pois apenas algumas das fases se fundem) e a liberação de gás (geralmente CO_2 , CO , H_2O , H_2 , O_2 , SO_2 ou Cl_2) da decomposição de algumas espécies orgânicas e minerais (como calcita, dolomita, filossilicatos, sulfetos metálicos, cloretos ou minerais ferrosos, entre outros). Quando as duas condições são atendidas, o gás é aprisionado dentro da matriz viscosa, induzindo à formação de poros, processo geralmente acompanhado por um aumento significativo de volume (Moreno *et al.*, 2020b). A Figura 7 mostra o interior poroso de agregados leves, os quais foram obtidos em temperaturas que variaram de 1.100°C à 1.180°C . É possível observar claramente a estrutura porosa e a irregularidade desses poros ao longo da sessão do agregado.



Figura 7: Agregados leves obtidos por sinterização em 1100°C (a), 1140°C (b), 1180°C (c).

Fonte: Lee *et al.*, 2019.

A Figura 8 resume em um fluxograma o processo de fabricação de agregados leves.

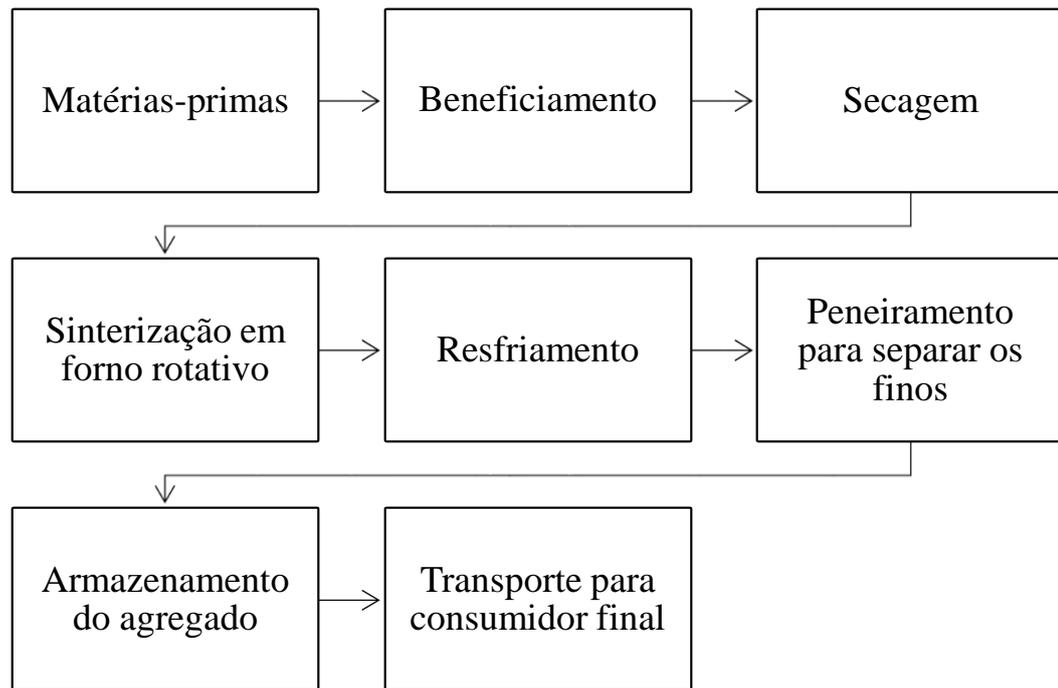


Figura 8: Fluxograma da fabricação de agregados leves. **Fonte:** Ayati *et al.*, 2018.

3.2.3 Argila expandida

Desde a descoberta, em 1913, de que algumas argilas e xistos expandiam quando queimadas, as argilas têm se popularizado como o material mais utilizado na fabricação de agregados leves. Em 1931, teve início na Dinamarca a produção do chamados LECA (Lightweight expanded clay aggregate), que viria a impulsionar o desenvolvimento de outros agregados leves de argila em países como Alemanha, Holanda e Reino Unido nas décadas seguintes (Newman & Choo, 2003a). A popularização das argilas como matéria-prima para agregados leves se deve essencialmente às suas propriedades expansivas. Certos tipos de argila ou xisto contêm matéria orgânica ou mineral que pode liberar gases no aquecimento, resultando em condições propícias ao inchaço ou expansão das partículas peletizadas (Hewlett & Liska, 2019). Essa expansão se dá em três estágios: um estágio de pré-aquecimento em que ocorre perda maciça de gás (aproximadamente 80% do total) com pouca alteração volumétrica; um breve estágio de transição, em que se inicia a sinterização (encolhimento) e a formação de microporosidade fechada, acompanhada por uma perda repentina de gás (aproximadamente 100% do total); e, por fim, a própria fase de expansão, na qual é atingida uma viscosidade adequada, permitindo que o gás residual disponível (menos de 0,1% em peso) aumente o volume do agregado devido ao crescimento do tamanho dos microporos formados na fase de transição e provavelmente também ao desenvolvimento de nova porosidade (Moreno *et al.*, 2020a). A forma final do agregado leve é mostrada na Figura 9.



Figura 9: Seção transversal de um agregado queimado por 30 minutos, onde é possível observar a estrutura interna altamente porosa. **Fonte:** Moreno *et al.*, 2020a.

Argilas de diferentes origens podem ser utilizadas na fabricação de agregados leves. Os LECA, por exemplo, são produzidos a partir de argila plástica especial com pouco ou nenhum teor de cal, que passa por secagem, aquecimento e queima em fornos rotativos a temperaturas muito elevadas, de aproximadamente 1.100–1.300 °C. Sua composição é variável, mas consiste essencialmente de SiO₂ (53,3% – 70%), Al₂O₃ (15,05% – 27%), Fe₂O₃ (1% – 14,3%), CaO (0,2% – 3,92%) e alguns álcalis como Na₂O e K₂O (Rashad, 2018). Diversos autores estudaram argilas alternativas de diferentes origens que podem ser utilizadas para obtenção de agregados leves, com desempenho satisfatório (por vezes, superando o de agregados comerciais). Moreno *et al.* (2020a) estudaram o uso de nove tipos de argilas do sul da Europa (mais especificamente de Portugal, Espanha e Itália) na produção de agregados leves. Os autores analisaram a capacidade de pelotização, tendência a estourar durante o aquecimento, temperatura de queima e propriedades tecnológicas das argilas, destacando que uma elevada proporção de filossilicatos em relação aos componentes não plásticos estaria diretamente relacionada ao estouro dos pellets durante o pré-aquecimento. Por fim, os autores relataram que a argila italiana vermelha estudada deu origem ao agregado mais leve de todos (densidade aparente de 0,47 g/cm³ e índice de expansão de 24,4%) com o menor gasto energético (sinterizadas a 1.175 °C) e resistência ao esmagamento de 2,3 MPa, superior à de um agregado leve comercial utilizado em concreto estrutural.

Li *et al.* (2021b) estudaram o efeito do sistema de granulação por disco em oito argilas de diferentes regiões chinesas, analisando o parâmetro de processo para cada argila. Os autores observaram que os desempenhos de granulação de argilas de diferentes lugares foram totalmente distintos: cada argila tinha seu próprio processo de granulação considerado ideal,

não sendo possível traçar um único perfil ideal para todas as argilas. O uso de argilas com resíduos também tem sido estudado, geralmente visando redução de custos, por meio da diminuição da temperatura de sinterização ou mesmo atuando no efeito de expansão. Uma argila vermelha foi utilizada em conjunto com cinzas de bagaço de cana de açúcar por Lyra *et al.* (2019), sinterizadas em forno micro-ondas. As cinzas do bagaço de cana de açúcar promoveram uma redução na densidade das amostras, resultando em agregados leves com desempenho semelhante ao LECA comercial disponível no Brasil.

3.2.4 Resíduos para a fabricação de agregados leves

Os resíduos e rejeitos de processos industriais podem ser uma fonte adequada de matéria-prima na fabricação de agregados leves. De fato, subprodutos industriais como cinzas volantes pulverizadas, escórias de alto forno e lodo já são utilizados na produção de agregados leves. A utilização desses resíduos representa um benefício significativo para o meio ambiente, uma vez que pode eliminar a necessidade de estocagem ou descarte de grandes quantidades de resíduos, além de reduzir a dependência de agregados naturais (Chandra & Berntsson, 2002). Entretanto, a utilização desses resíduos na fabricação de agregados leves apresenta limitações. É necessário que os resíduos sejam analisados antes de serem empregados na composição dos agregados. Além do mais, resíduos contendo metais pesados e materiais radioativos não podem ser utilizados.

A reutilização e reciclagem de subprodutos industriais e resíduos na construção civil é relativamente comum e têm aumentado nas últimas décadas, principalmente a escória de alto forno, um subproduto industrial da fabricação do aço, seja pela conversão de ferro em aço no forno básico a oxigênio (BOF) ou a fusão de sucata para produzir aço em forno elétrico a arco (EAF). Devido ao seu alto potencial de hidratação de CaO livre e instabilidade volumétrica, a reutilização da escória BOF é restrita e, como resultado, uma grande quantidade desse resíduo ainda é subutilizada (Lim *et al.*, 2019).

A escória de alto-forno, após processo de granulação e moagem, pode ser utilizada como adição mineral no cimento. Em sua forma original, como mostra a Figura 10, pode ser utilizada como agregado graúdo para fazer concreto, bem como agregado em estradas de pavimentação asfáltica (Mohammed *et al.*, 2016).



Figura 10: Escória de aço em diferentes formas (peso). **Fonte:** Mohammed *et al.*, 2016.

Os agregados leves produzidos com escória de alto forno apresentam propriedades compatíveis com as de agregados leves padrões. Jiang & Ling (2020) utilizaram pó de escória de forno básico a oxigênio (BOF) para preparar agregados artificiais (constituídos 100% de escória) por uma técnica de granulação úmida, que resultaram em agregados com resistência máxima de 5,24 MPa aos 14 dias e densidade aparente entre 900 kg/m³ e 1.280 kg/m³. Essa forma de escória é exibida na Figura 11.

Apesar da escória de ferro ser muito utilizada na construção, a escória de aço tem reciclabilidade limitada, em parte devido à falta de fases de silicato de cálcio de alta temperatura e adequadamente hidráulicas e, principalmente, devido aos seus elevados teores de cal livre (CaO) e óxido de magnésio (MgO), associados a efeitos expansivos deletérios e instabilidade de volume (Ghouleh, Guthrie & Shao, 2017).



Figura 11: Escória de aço peneirada. **Fonte:** Ghouleh, Guthrie & Shao, 2017.

A escória de ferrocromo também foi estudada na obtenção de agregados leves. Lihua *et al.* (2017) utilizaram essa escória com cinzas volantes e bauxita na produção de agregados leves, que foram sinterizados em temperaturas entre 1250 °C e 1300 °C. Os agregados leves preparados apresentaram uma superfície externa vidrada e uma estrutura interna contínua composta por cordierita e grãos de espinélio, o que conferiu aos agregados uma absorção de água inferior à 2% em peso, resistência à compressão variando de $22,58 \pm 1,15$ MPa a $6,48 \pm 0,83$ MPa e uma faixa de densidade de partículas de $2,04 \text{ g/cm}^3$ a $1,32 \text{ g/cm}^3$.

Outro resíduo industrial que também encontra aplicação em agregados leves são as cinzas volantes. Embora mais de 42% da eletricidade global seja fornecida por usinas termelétricas a carvão, que geram cinzas volantes como subproduto, a maior parte desse resíduo ainda é descartada (Alahrache *et al.*, 2016). Sendo um resíduo industrial, a composição das cinzas volantes é altamente variável, mas consiste essencialmente de SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e Fe_2O_3 (Kipkemboi *et al.*, 2020). As cinzas volantes são caracterizadas pela sua capacidade de reagir com a portlandita, produto da hidratação dos silicatos de cálcio do clínquer, através de reações pozolânicas (Pastor *et al.*, 2016). Portanto, esse resíduo, seja em sua forma típica ou mesmo na forma rica em carbono (como na Figura 12), pode ser considerado adequado para a fabricação de agregados leves (ver Figura 13), o que tem atraído a atenção de um número considerável de pesquisadores. A utilização de cinzas volantes em aplicações na construção civil resolveria o problema de descarte desses resíduos e contribuiria para reduzir a poluição do meio ambiente.

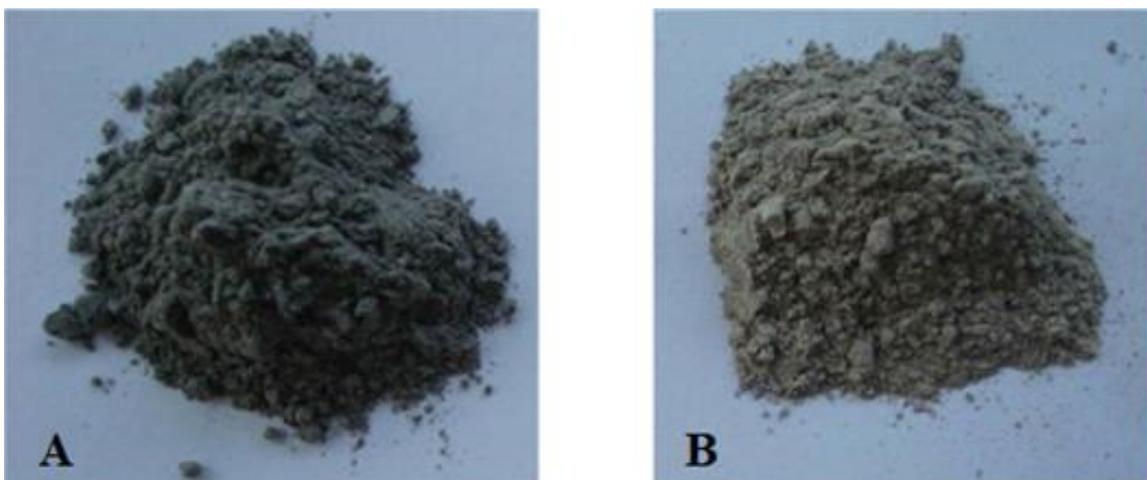


Figura 12: (a) Cinzas volantes de alto teor de carbono; (b) Cinzas volantes normais. **Fonte:** Lo *et al.*, 2016.

Na produção de agregados leves, adiciona-se às cinzas volantes carvão pulverizado para elevar o teor de carbono e, em seguida, os agregados são peletizados e tratados termicamente em uma grelha móvel (Chandra & Berntsson, 2002). Os agregados produzidos por peletização podem ser obtidos utilizando geopolímero como ligante e, segundo Shivaprasad & Das (2018), um teor mínimo de 3,5% à 4,5% de Na_2O é necessário para a produção de agregados de cinzas volantes peletizadas. O tratamento térmico mais comum para esses agregados se dá através da sinterização em fornos. Entretanto, alguns autores relataram o uso de “colagem a frio” (à temperatura ambiente), considerada a melhor abordagem econômica para consolidar os agregados leves devido ao menor consumo de energia em comparação com a sinterização, que requer temperaturas superiores a $1000\text{ }^\circ\text{C}$ (Patel *et al.*, 2018; Kockal & Ozturan, 2011).



Figura 13: Agregados sinterizados de cinzas volantes. **Fonte:** Sahoo, Selvaraju & Prakash, 2020.

Lo *et al.* (2016) utilizaram cinzas volantes de alto teor de carbono (HCFA) na produção de agregados leves, onde o carbono serviu como substituto parcial do combustível durante a queima, o que pode reduzir o tempo de sinterização do agregado leve e economizar energia. Os concretos produzidos com os agregados obtidos desenvolveram 91% da resistência à compressão de 28 dias em apenas 7 dias, fato que deveu-se ao melhor mecanismo de transferência de carga entre a pasta de cimento hidratada e o agregado leve. Os valores do módulo de elasticidade foram inferiores aos do concreto de peso normal, mas a resistência à tração do concreto (2,3 a 3,0 MPa) estava dentro dos padrões aceitáveis para

aplicações estruturais de acordo com ASTM C330/C330M-09 (2,2 MPa para um concreto de densidade de até 1.760 kg/m³).

A utilização de cinzas volantes em agregados leves também permite a obtenção de concretos estruturais, podendo atingir resistência à compressão de até 70 MPa (Nadesan & Dinakar, 2017). Além disso, concretos leves produzidos com agregados de cinzas volantes e vidro apresentam permeabilidade à água (penetração de 41 mm após 56 dias) e cloreto (aproximadamente 300 Coulombs aos 56 dias), respectivamente, comparável e ligeiramente menor do que o concreto peso normal, além de serem altamente resistentes aos ciclos de congelamento/degelo, com um fator de durabilidade mínimo de 86% (Kockal & Ozturan, 2011). Portanto, dentre os resíduos industriais, as cinzas volantes destacam-se como um dos principais materiais na obtenção de agregados leves, tanto pelo grande número de aplicações possíveis quanto pela sua disponibilidade.

Na literatura, além da escória de alto forno e cinzas volantes, outros materiais também são apresentados como matéria-prima para a fabricação de agregados leves. O lodo de esgoto é um subproduto do tratamento de águas residuais que contém diversas impurezas como compostos orgânicos, bactérias patogênicas e metais pesados, o que torna esse resíduo um problema ambiental que requer uma solução urgente. Os métodos tradicionais de tratamento do lodo de esgoto, como aterros sanitários, incineração e utilização agrícola, são restritos devido à oposição pública e pressão regulatória (Liu *et al.*, 2018). Tendo isso em vista, diversos autores têm buscado formas de aplicar esse resíduo, visando uma destinação adequada, e a produção de agregados leves tem sido amplamente estudada. Lau, Teo & Mannan (2017) produziram agregados leves a partir de lodo de esgoto tratado com cal, cinzas de casca de dendê e silicato de sódio, que foram sinterizados nas temperaturas de 1.160, 1.180 e 1.200 °C. A absorção de água dos agregados obtidos, de 4,11%, foi superior à de agregados de peso normal (1,43%), enquanto a resistência ao esmagamento (8,10 MPa) não foi muito diferente (de 8,11 MPa para agregados de peso normal). A Figura 14 mostra os agregados obtidos pelos autores.

Korol *et al.* (2020) investigaram a aplicação de lodo de esgoto, juntamente com argila e cinzas volantes, na fabricação de agregados leves. Os autores constataram que o aumento percentual do lodo de esgoto na composição dos agregados aumentou a porosidade e reduziu a massa específica, levando à uma queda na resistência à compressão. No entanto, para todos os materiais estudados, o desempenho mecânico foi superior em relação a muitos produtos comerciais. Os autores ressaltaram que o lodo de esgoto pode ser introduzido na fabricação de

agregados leves como componente principal ou auxiliar, e um ajuste adequado na composição permite uma fácil adaptação do desempenho e custo dos agregados. Para a utilização, é necessário que o resíduo passe por tratamentos de vários estágios para eliminar riscos ecológicos e microbiológicos (Korol *et al.* 2020).

Liu *et al.* (2018) estudaram a influência da temperatura de sinterização nas propriedades de agregados leves produzidos com lodo de esgoto e sedimento de rio. De acordo com os autores, a densidade dos agregados aumenta gradualmente (de 400 kg/m³ para 1.220 kg/m³) conforme a temperaturas de sinterização aumentou de 950 °C a 1125 °C, e os agregados necessitam ser sinterizados a aproximadamente 1100 °C para atingir uma densidade acima de 800 kg/m³, baixa absorção de água (inferior a 15%) e uma resistência à compressão de 13,7 MPa. As principais fases minerais apresentadas pelos agregados sinterizados foram o quartzo, albita e hematita, que contém os metais pesados, cuja estabilização é garantida em temperaturas de sinterização acima de 1050 °C.



Figura 14: Agregados leves de lodo de esgoto tratado com cal e cinzas casca de dendê.

Fonte: Lau, Teo & Mannan, 2017.

Apesar do lodo de esgoto ser um resíduo viável para a produção de agregados leves, Korol *et al.* (2020) ressaltam que diversos autores relataram que esse resíduo só pode ser introduzido na fabricação de diversos materiais de construção em quantidades razoáveis (o autor utilizou de 30 a 50% em peso), considerando a possibilidade de seu impacto adverso nas propriedades, devido à presença de impurezas como metais pesados.

Devido ao elevado volume de resíduos gerados, além do custo relativamente baixo, o vidro tem despertado interesse de pesquisadores como adição em composições de agregados

leves. Sendo o vidro um dos materiais mais versáteis do mundo devido às características como transparência óptica, inércia química, alta resistência intrínseca e baixa permeabilidade, ainda existem limitações em termos de atendimento aos critérios de qualidade para utilização do vidro em novos ciclos de manufatura. Portanto, a fração não reciclável geralmente é descartada e disposta em aterros sanitários. O volume estimado de vidro em aterros em todo o mundo é de cerca de 200 milhões de toneladas por ano (cuja maior parte é formada por vidro soda-cal, utilizado em embalagens de bebidas) e a taxa de reciclagem é muito baixa (Jiang *et al.*, 2019). Portanto, a utilização desse resíduo como componente em materiais de construção pode ser um fator atenuante para o problema de descarte.

Os agregados leves comuns apresentam problemas técnicos como absorção de água, possibilidade de fissuração superficial, alta permeabilidade e heterogeneidade na pasta resultando em um concreto pouco permeável. Agregados de vidro expandido, como os da Figura 15, se mostram uma solução promissora como agregados leves, uma vez que apresentam absorção de água relativamente baixa, alta resistência mecânica e alta resistência ao gelo.

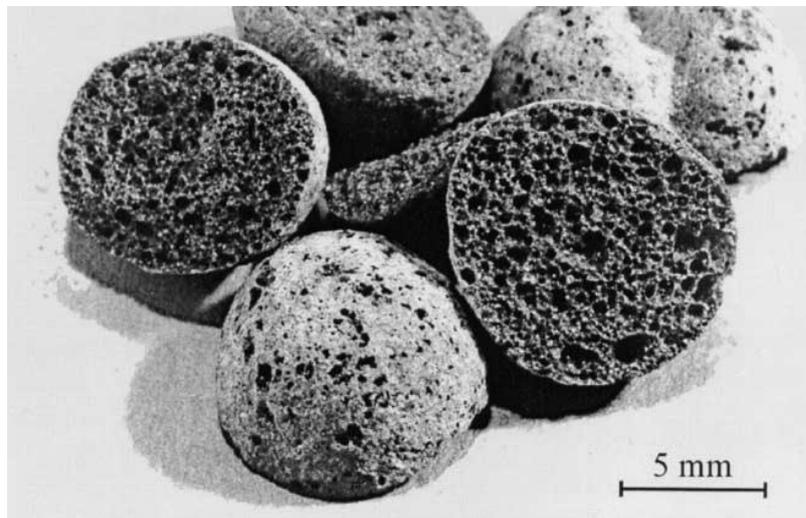


Figura 15: Agregados leves produzidos a partir de resíduo de vidro. **Fonte:** Ducman, Mladenovič & Šuput, 2002.

Os resíduos de vidro podem ser utilizados na produção de agregado após o processo de limpeza e britagem, usando um método de produção especial, no qual os resíduos finos de vidro moído são misturados com agentes expansivos adequados e se transformam em agregados de vidro expandido (Adhikary, Ashish & Rudžionis, 2021).

A produção dos agregados a partir do vidro é realizada através da mistura do vidro finamente moído com um agente expansivo adequado, sendo essa mistura posteriormente queimada a uma temperatura acima do ponto de amolecimento do vidro, de modo que uma viscosidade inferior a $10^{6,6}$ Pa.s seja alcançada. Os agentes expansivos podem ser Co_2O_3 , SrCO_3 , CaSO_4 , MnO_2 , talco e silicato de sódio alcalino, que desgaseificam dentro da faixa entre o ponto de amolecimento e a temperatura máxima de queima, permanecendo presos dentro da estrutura do vidro (Ducman, Mladenović & Šuput, 2002).

Na literatura, é mais recorrente a utilização de resíduos de vidro em conjunto com outros resíduos. O teor de sódio nos resíduos de vidro influencia o fluxo de fusão e a captura de gás durante a sinterização para produzir agregados leves, uma vez que o Na_2O presente também pode reduzir a viscosidade da fase líquida em altas temperaturas, o que é benéfico para a fabricação de produtos sinterizados. Além disso, quanto maior o teor de vidro adicionado à composição, menor a absorção de água. O uso de resíduos de vidro ($<600 \mu\text{m}$) também reduz significativamente a expansão do concreto devido à reação álcali-sílica (Chiou & Chen, 2013) e cria uma fase vítrea na superfície dos agregados que melhora suas propriedades físicas e mecânicas (Bouachera *et al.*, 2021). Li *et al.* (2020) utilizaram resíduo de vidro em percentuais de até 20% para produzir agregados com lodo de esgoto, constatando que a adição de 10% de pó de resíduo de vidro contribuiu para uma expansão de 54,91% e propriedades mecânicas adequadas. Os autores também observaram que o pó de vidro favoreceu o aparecimento da fase líquida na etapa de aquecimento entre $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ e $1300 \text{ }^\circ\text{C}$, contribuindo para a manutenção do gás gerado a partir da reação de redução do Fe_2O_3 (presente no lodo). Enquanto o gás gerado fica preso dentro da estrutura vítrea, com o aumento da temperatura de aquecimento, a quantidade de fase líquida aumenta e a viscosidade da fase líquida diminui, resultando na expansão do agregado.

Deve-se notar que não apenas o vidro, mas a grande maioria dos resíduos utilizados na produção de agregados leves são utilizados em conjunto com outros materiais. Skotniczny *et al.* (2022) avaliaram o desempenho mecânico de agregados leves obtidos com cinzas volantes de leito fluidizado e argila (resíduos remanescentes após a lavagem do calcário bruto), que apresentaram alta resistência ao esmagamento, de 5,9 MPa a 7,5 MPa. Os autores ressaltaram que os agregados podem ser usados na fabricação de concretos leves para construção civil e rodoviária. Tal como no trabalho mencionado, o uso de cinzas volantes e lodo de esgoto com outros resíduos é muito comum nos trabalhos disponíveis na literatura.

Outros resíduos que têm sido explorados recentemente como materiais alternativos na fabricação de agregados leves são as cinzas de bagaço de cana de açúcar (Souza *et al.*, 2021), cinzas de casca de dendê (Lau *et al.*, 2017), cinzas de incineração de resíduos sólidos municipais (Liu *et al.*, 2022), resíduo de vidro (Graziano *et al.*, 2022) e resíduo de bauxita (Zhang *et al.*, 2021). A Figura 16 esquematiza os principais materiais utilizados como matéria-prima na produção de agregados leves, bem como possíveis adições que podem ser incorporadas na composição dos agregados.

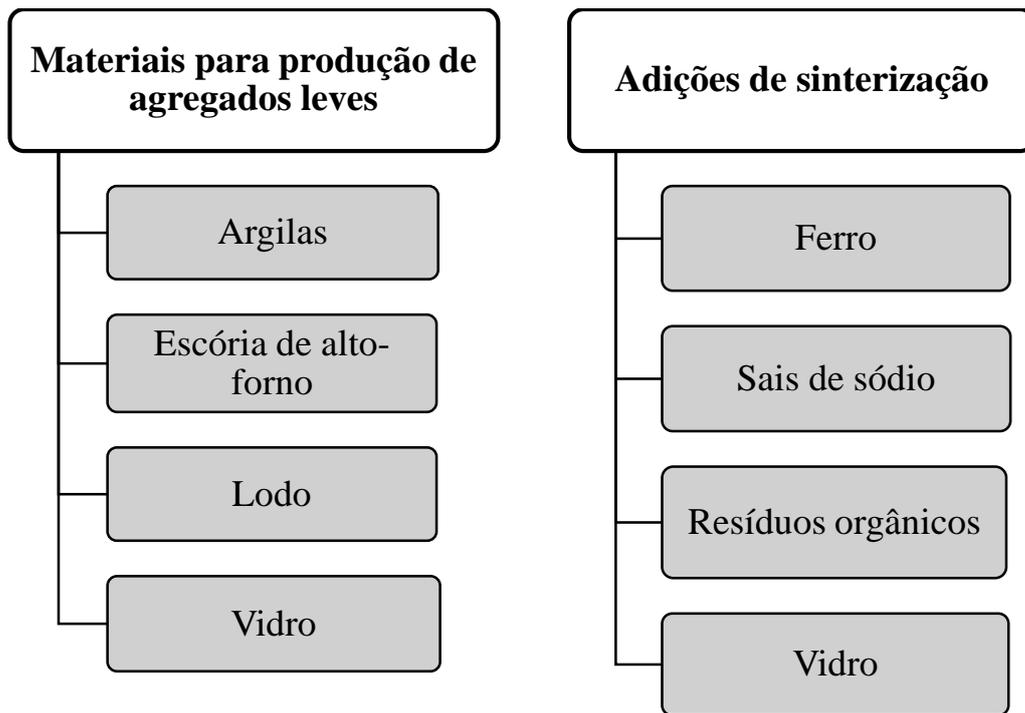


Figura 16: Materiais utilizados na fabricação de agregados leves. **Fonte:** elaboração própria.

3.2.5 Adições e sinterização

A sinterização é uma etapa crítica na fabricação de agregados leves, uma vez que é nesse processo que ocorre a expansão. Geralmente, utilizam-se temperaturas entre 1100 °C e 1200 °C, o que requer um gasto considerável de energia. Em decorrência desse consumo, e das consequências ambientais que este acarreta, é cada vez mais recorrente a busca por formas de minimizar a temperatura de sinterização dos agregados leves.

A temperatura de sinterização e características de expansão dos agregados leves são sensíveis à presença de adições como o ferro, sais de sódio e resíduos, como o de vidro. O conteúdo de ferro promove a expansibilidade, o que, segundo Moreno *et al.* (2020b), pode

estar associado ao fato de que no interior do agregado poderiam haver condições redutoras que favoreceriam a transformação de Fe_2O_3 em Fe_3O_4 e/ou FeO de acordo com as reações:



O FeO formado, por sua vez, pode contribuir no desenvolvimento de uma viscosidade adequada para reter gases, incluindo o oxigênio liberado pela redução do ferro. A argila também pode conter certa quantidade de água de cristalização, provavelmente envolvida no estágio piropástico quando alguns dos óxidos metálicos de alta viscosidade estão no ponto de fusão (Khatib, 2016).

O efeito da adição de diferentes sais de sódio (carbonato de sódio, sulfato de sódio dihidratado e cloreto de sódio) na formação de agregados de cinzas volantes e vidro foi estudado por Wei *et al.* (2020). Acredita-se que os silicatos de sódio são os principais componentes da camada viscosa durante a sinterização, capazes de envolver gases expansivos para aumentar o tamanho de agregados leves. A solubilidade da mistura de cinzas volantes e vidro em NaCl (cloreto de sódio) fundido durante a sinterização não é tão elevada quanto em Na_2O (óxido de sódio) e Na_2SO_4 (sulfato de sódio) fundidos, exigindo assim uma temperatura de sinterização mais alta para fabricar agregados leves. Os autores apontam o carbonato de sódio como o sal mais efetivo na geração de poros maiores e a temperatura de sinterização pode ser potencialmente reduzida para $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ através da adição adequada dos sais de sódio.

Os atuais fabricantes de agregados leves frequentemente adicionam à argila matéria orgânica, que é queimada no forno a cerca de $750 \text{ }^\circ\text{C}$, levando à formação de vazios para reduzir a densidade de partículas quando as temperaturas de queima são inferiores a $1.150 \text{ }^\circ\text{C}$. À medida que ocorre a combustão da matéria orgânica, os produtos gasosos são eliminados do nódulo de argila (Khatib, 2016). Moreno *et al.* (2019) utilizaram bagaço de azeitona como componente na fabricação de agregados leves, em percentuais de até 10% em peso. Segundo os autores, a adição de baixos percentuais de bagaço de azeitona, entre 1,25% e 2,5% em peso, pode reduzir significativamente a temperatura de queima (cerca de 15°C e $25 \text{ }^\circ\text{C}$ para argila preta e amarela, respectivamente) graças à sua decomposição altamente exotérmica (devido ao alto valor calorífico do resíduo), levando à uma economia considerável de energia associada a um menor consumo de combustível. O bagaço de azeitona também favorece o desenvolvimento de uma estrutura altamente porosa nas argilas não expansíveis, resultando em agregados leves com densidade em torno de $1,6 \text{ g/cm}^3$ e resistência à compressão de até

9,00 MPa, propriedades iguais ou superiores às encontradas no mercado para uso em concreto leve.

Resíduos de vidro também podem ser considerados aditivos de sinterização, uma vez que seu uso, mesmo em baixos percentuais, proporciona redução na temperatura de sinterização, fator fundamental para a redução de consumo de energia e, conseqüentemente, custos de produção. Além de reduzir a temperatura de sinterização, resíduos de vidro também proporcionam uma menor absorção de água e densidade aparente do agregado. Segundo Tuan *et al.* (2013) a adição de vidro pode proporcionar expansão em temperaturas a partir de 930 °C, o que pode acarretar em uma economia considerável de custos energéticos.

O carbetto de silício também pode atuar como adição de sinterização, se destacando por sua elevada capacidade de promover expansão. A oxidação de partículas de carbetto de silício (SiC) gera CO₂, que pode produzir poros (Xi *et al.*, 2014) e contribuir no efeito expansivo na fase vítrea ao ser adicionado na composição do agregado leve. Shui *et al.* (2011) utilizaram até 3% de SiC em corpos cerâmicos sinterizados em temperaturas de 1.000 a 1.240 °C, que apresentaram expansão e redução da densidade conforme o teor de SiC era aumentado. Entretanto, segundo os autores, as tendências de variação tornaram-se imperceptíveis acima de 2,0% em peso de SiC, o que indica que há um limite no qual esse material é efetivo na promoção da expansão.

3.2.6 Propriedades dos agregados leves

Algumas propriedades são mandatórias para que o agregado seja considerado leve, não somente a limitação da densidade seca aparente a 1.200 kg/m³. Essas propriedades são consequência direta do processamento adotado para a fabricação de agregados leves e do tipo de matéria-prima utilizada. A baixa densidade dos agregados leves é criada pelo ar aprisionado, que dá origem a um sistema de poros internos. Em decorrência dessa porosidade, os agregados leves tendem a perder parte do desempenho mecânico, mas as propriedades de isolamento e redução de ruído são aprimoradas (Chung *et al.*, 2021). Qualquer formulação de agregado leve deve considerar os requisitos mínimos de resistência mecânica, definidos pelas normas locais.

Devido à porosidade intrínseca, a absorção de água é muito maior em agregados leves, cerca de 5 a 20% em relação ao peso seco, do que em agregados de peso normal, onde a absorção é de 2% (Neville & Brooks, 2010). A elevada taxa de absorção do agregado reduz o teor de água na interface agregado/pasta de cimento e afeta criticamente a trabalhabilidade do

concreto leve. Como as características do agregado leve variam de acordo com as plantas de produção, processamento e matéria-prima utilizada, as características da superfície, tamanho e estrutura de poros do agregado leve diferem de um tipo para outro (Lo & Cui, 2002). A absorção de água do agregado leve tem forte influência nas propriedades do concreto, pois define a quantidade de água disponível para a hidratação do cimento, ou seja, a quantidade não absorvida ou “livre”. Consequentemente, para garantir que a relação água/cimento adequada seja atingida, é necessário considerar as condições de umidade do agregado ao calcular a quantidade de água de mistura: se o agregado estiver mais seco do que a superfície saturada, deve-se adicionar água extra e vice-versa. A liberação de água proporciona um efeito de cura interna do concreto, o que pode beneficiar a melhoria da microestrutura do material (Yuan *et al.*, 2021). Uma estratégia eficaz na redução da retração autógena e na prevenção de rachaduras no concreto leve em idade precoce é a utilização de agregado leve pré-umedecido (cura interna). A retração autógena e a retração de secagem geralmente ocorrem devido à queda de umidade no interior do material causada pela secagem ambiental e pela hidratação do cimento. A água armazenada nos poros do agregado leve pré-umedecido pode então auxiliar na cura, anulando assim os efeitos da perda de umidade (Wang *et al.*, 2017).

3.3 CONCRETO LEVE

3.3.1 Tipos de concreto leve

A densidade do concreto leve normalmente varia de 320 à 1.920 kg/m³ e existem três diferentes divisões de tipos de concreto leve de acordo com a resistência mecânica (Pacheco-Torgal *et al.*, 2015):

- Concretos de baixa densidade (0,7 – 2,0 MPa);
- Concretos de resistência moderada (7 – 14 MPa);
- Concretos estruturais (17 – 63 MPa);

A densidade referente à esses três tipos de concreto leve está na faixa de 300 – 800 kg/m³, 800 – 1.350 kg/m³ e 1.350 – ~1.920 kg/m³, respectivamente (Pacheco-Torgal *et al.*, 2015). Outra classificação dos concretos leves, ilustrada na Figura 17, diz respeito à forma de obtenção, que pode se dar através da não utilização de finos, utilização de agregados leves e introdução de vazios no concreto.

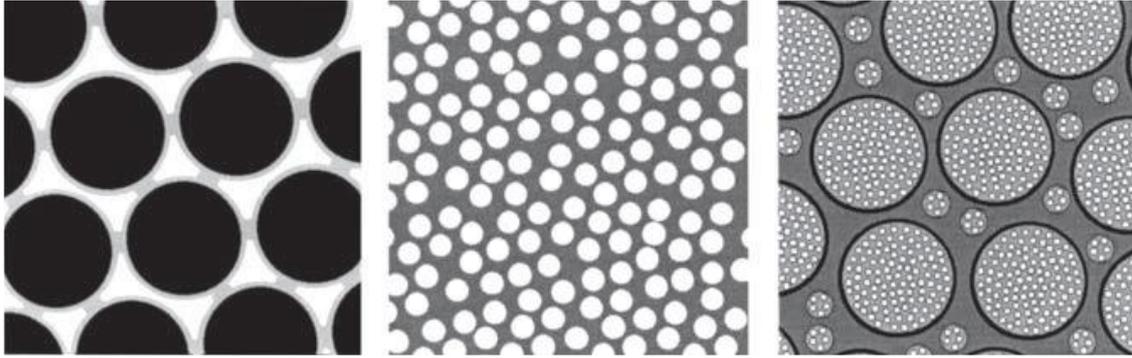


Figura 17: As três formas básicas de concreto leve. **Fonte:** Newman & Choo, 2003b.

3.3.1.1 Concreto leve sem finos

O concreto sem finos, como mostra a Figura 18, é obtido por meio da eliminação de agregados miúdos em sua composição e formado por uma rede de vazios interligados em sua microestrutura. O tamanho dos agregados utilizados na mistura de concreto sem finos normalmente varia de 20 mm a 10 mm. Esse tipo de concreto apresenta baixa retração por secagem, devido à ausência de agregados finos na mistura de concreto e, durante a segregação, a qualidade do concreto não muda. A principal aplicação desse tipo de concreto se dá em construção de pavimentos (JiaHao *et al.*, 2019). O concreto sem finos também pode acelerar a absorção de CO₂ através da carbonatação, tornando-o um material de construção sustentável. Esse tipo de concreto pode ser utilizado não apenas em obras de pavimentação de estradas, mas também para uma ampla variedade de aplicações verticais que provavelmente exigiriam seu uso na forma de painéis, onde uma grande superfície é exposta à atmosfera, não há necessidade de alto desempenho estrutural, e são desejadas características de isolamento acústico e/ou térmico, como telhas, argamassas de reboco e revestimento ou painéis acústicos (Tittarelli, Carsana & Ruello, 2014).



Figura 18: Concreto sem finos. **Fonte:** Tittarelli, Carsana & Ruello, 2014.

3.3.1.2 Concreto de agregados leves

Agregados leves são os principais responsáveis por conferir baixos níveis de densidade à esse tipo de concreto. Minerais naturais como argilas, xistos e ardósias, além de subprodutos industriais, como cinzas volantes e escórias de alto-forno, são as principais matérias-primas utilizadas para a produção de agregados leves. Agregados orgânicos sintéticos, como grânulos de poliestireno, também são usados para produzir concreto com funções de isolamento. A densidade dos agregados disponíveis atualmente é extremamente variável, o que possibilita obter uma ampla gama de concretos leves. Embora o custo desses agregados seja elevado, a utilização de concreto leve propicia diversas outras vantagens, como o menor custo do trabalho (uma vez que o manuseio do concreto leve é mais fácil), menores custos de demolição (menos energia é requerida para demolir o concreto leve, em comparação com o concreto normal, pois equipamentos menores podem ser usados) e menor quantidade de resíduo será gerada (Chandra & Berntsson, 2002). A Figura 19 mostra um exemplo de concreto leve obtido a partir de resíduo industrial.



Figura 19: Concreto de agregado leve de cinzas de biomassa de dendê e silte. **Fonte:** Kwek *et al.*, 2022.

As propriedades mecânicas do concreto leve são fortemente dependentes dos agregados leves utilizados. O impacto dos agregados não está relacionado apenas à sua densidade de partícula, mas também à espessura da superfície, porcentagem de poros dilatados e grãos quebrados. Cui *et al.* (2012), conforme mostra a Figura 20, observaram que o teor de agregados na composição do concreto tem forte influência nas propriedades finais: quanto maior o volume de agregados na mistura, mais frágil será a fratura do concreto leve.

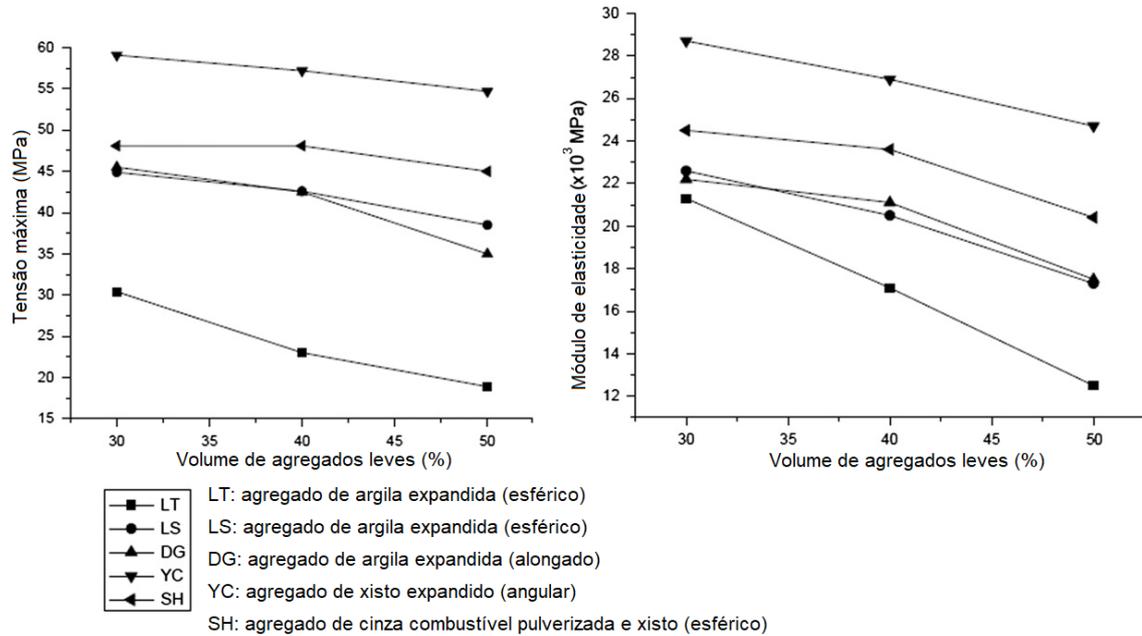


Figura 20: Influência de diferentes tipos e teores de agregados leves na tensão máxima e módulo de elasticidade do concreto leve. **Fonte:** Cui *et al.*, 2012.

A retração e a resistência à compressão são parâmetros essenciais para o dimensionamento de estruturas de concreto. Alterações deletérias de volume em condições restritas podem desencadear e propagar microfissuras, que podem prejudicar a durabilidade e comprometer o desempenho das estruturas de concreto. Para evitar esse tipo de problema, os agregados leves podem ser pré-umidificados, o que tem se mostrado como uma estratégia eficaz na redução da retração autógena e prevenção de rachaduras prematuras. Isso ocorre porque a água armazenada nos poros dos agregados leves pré-umidificados auxilia na cura do concreto, anulando assim os efeitos da retração autógena e a retração por secagem decorrentes da queda de umidade no interior do material devido à secagem ambiental e hidratação do cimento (Wang *et al.*, 2017). Portanto, a pré-umidificação (também conhecida como cura interna) é mais uma vantagem que os agregados leves proporcionam ao concreto, podendo inclusive ser utilizada em concretos de alto desempenho para redução da retração por secagem, além da retração autógena (Alaskar, Alshannag & Higazey, 2021).

3.3.1.3 Concreto aerado

O concreto leve aerado não contém agregados graúdos, e é obtido pela introdução de ar na composição de cimento que dará origem ao produto final. Geralmente, esse tipo de concreto é produzido por autoclavagem a temperaturas significativamente maiores que 100 °C em um ambiente pressurizado e aquecido a vapor de material silicioso, como pó de quartzo ou

cinzas volantes, e matéria-prima calcária, incluindo cal e cimento, bem como outros aditivos, como agentes espumantes e água.

Utilizam-se dois tipos principais de concretos aerados em todo o mundo: baseados em pó de quartzo ou baseados em cinzas volantes de Classe F, que são misturados com quantidades menores de cimento Portland, cal e água quente suficiente para formar uma pasta fina. O material silicioso constitui aproximadamente 60% em peso ou mais da pasta, o que torna o concreto leve aerado uma ótima possibilidade de aproveitamento de resíduos industriais ricos em sílica, como cinzas de casca de arroz, rejeitos de cobre, escórias de alto-forno, rejeitos de ferro e cinzas residuais de incineração de resíduos sólidos municipais (Peng *et al.*, 2021).

A Figura 21 evidencia o elevado nível de porosidade característico de um concreto aerado. A Figura 22 mostra um bloco típico de concreto aerado, que é uma das principais formas de aplicação desse tipo de concreto.

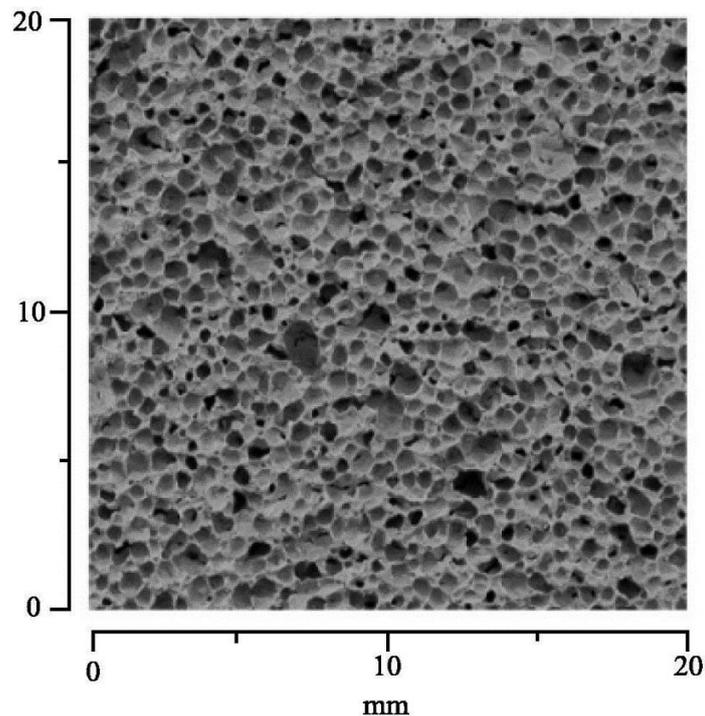


Figura 21: Seção de uma amostra de concreto aerado. **Fonte:** Chen *et al.*, 2021.

Por ser um material poroso, o concreto aerado inevitavelmente apresenta uma forte absorção de água, que causa inúmeros problemas como deterioração da resistência mecânica e do isolamento térmico, aumento da taxa de retração por secagem e fissuração (Shan *et al.*, 2022).

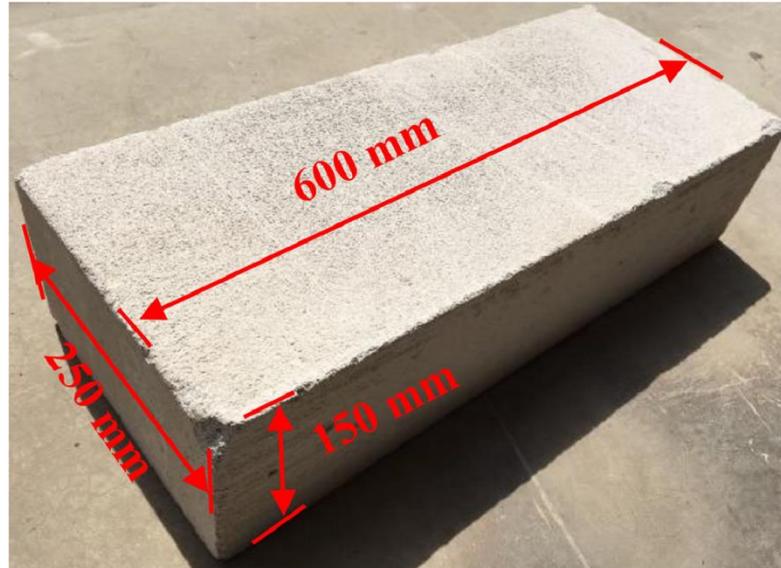


Figura 22: Bloco de concreto aerado. **Fonte:** Liu *et al.*, 2021.

3.3.2 Produção de concretos leves

Várias técnicas podem ser usadas para produzir concreto leve, principalmente através da incorporação de agregados leves ou de uma matriz leve. Para a maioria das construções domésticas e industriais, são aceitáveis resistências muito mais baixas nas quais a resistência à compressão necessária é menor que a resistência das partículas. Nesse caso, as misturas típicas de concreto de peso normal podem ser usadas como referência na preparação de misturas de concreto leve, pela simples substituição, em volume, do agregado de peso normal por agregado leve (Mindess, 2019). Os dois tipos de concreto aerado, ou seja, concreto espumoso (celular) e concreto aerado autoclavado, podem ser obtidos com a adição de agentes espumantes, entre os quais vários tipos de detergentes, sabão de resina, resinas de cola ou proteínas como a queratina. A espuma pode ser adicionada por meio de métodos mecânicos ou físicos. Em relação às espumas geradas mecanicamente, um agente espumante é batido em conjunto com a mistura, enquanto no método físico a solução já espumada é adicionada diretamente no processo de mistura. Este último método produz poros mais regulares e estáveis do que o primeiro, que gera poros irregulares (Pacheco-Torgal *et al.*, 2015).

Em relação à produção de concretos de agregados, um problema que demanda atenção é o possível efeito de segregação, que prejudica o desempenho do material. A zona de transição agregado/matriz cimentícia é uma região crítica na estrutura dos concretos, com forte influência na sua resistência mecânica, módulo de elasticidade e permeabilidade. O controle do processo de moldagem/vazamento do concreto dificulta a perda e a segregação de

materiais, evitando a concentração de agregados graúdos nas regiões mais fundas e uma superfície superior predominantemente de argamassa. Conseqüentemente, esse controle pode melhorar a interface entre o agregado graúdo e a matriz cimentícia dos concretos (Moravia, Gumieri & Vasconcelos, 2010). A porosidade natural dos agregados leves atua como um fator positivo em relação aos agregados de peso normal, pois essa porosidade aprimora a aderência dos agregados à matriz cimentícia, que conseqüentemente reduz os efeitos de segregação na zona de transição.

3.3.3 Propriedades do concreto leve

Em uma formulação de concreto leve, deve-se levar em conta as propriedades mecânicas do concreto resultante, que terão importância fundamental no desempenho do material. Os requisitos exigidos para o concreto são definidos em normas como a NBR-12655 (ABNT, 2022) no Brasil e 213R-03 (ACI, 2021) nos Estados Unidos. As propriedades mais importantes na avaliação do desempenho de concretos leves são discutidas a seguir.

3.3.3.1 Resistência à compressão e à tração

A densidade do concreto apresenta relação com a resistência à compressão. Um concreto de baixa densidade apresenta baixa resistência e um concreto de alta densidade geralmente tem alta resistência. O concreto leve estrutural normalmente tem resistência à compressão de pelo menos 10,00 a 70,00 MPa. Portanto, a resistência à compressão pode ser considerada uma função da densidade, evidenciada na Figura 23. Quando necessita-se aumentar a resistência do concreto, normalmente a densidade deve ser aumentada (Chandra & Berntsson, 2002). Vários ajustes podem ser adotados para aumento da resistência, por exemplo, pela troca de um agregado leve por outro agregado leve de maior densidade e resistência, pela adição de outra fração de menor tamanho de agregado leve, adição de areia fina normal, mais cimento ou adições minerais.

Segundo Rossignolo (2009), o maior valor de resistência à compressão já alcançado em um concreto leve foi de 102,00 MPa, e a estabilização dos valores finais de resistência à compressão é atingida mais rapidamente em concretos leves do que em concretos convencionais. Ainda segundo o autor, o agregado leve é um material determinante na resistência à compressão do concreto e, nos concretos leves estruturais, a influência das dimensões e granulometria dos agregados na resistência à compressão é maior do que nos concretos convencionais, uma vez que os valores da massa específica e da resistência à compressão dos agregados leves são inversamente proporcionais à sua dimensão.

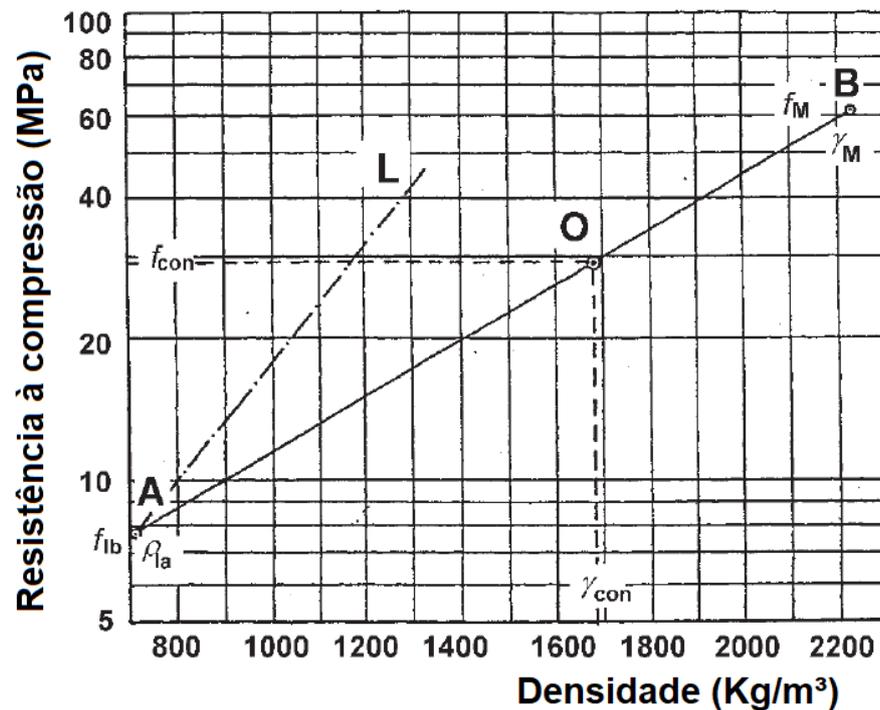


Figura 23: Relação de densidade e resistência à compressão de agregados leves, argamassa e concreto. AL descreve a relação entre a densidade e resistência do agregado leve e o ponto B representa a argamassa. O ponto O é a densidade e resistência do concreto leve. **Fonte:** Chandra & Berntsson, 2002.

Na elaboração de concretos leves, deve-se levar em consideração também a relação entre a resistência e o peso. Os concretos leves, apesar de geralmente apresentarem resistência à compressão inferior à de concretos de peso normal, possuem fator de eficiência superior, ou seja, sua relação resistência/densidade é maior do que a de concretos de peso normal (Moravia, Gumieri & Vasconcelos, 2010). A figura 24 ilustra claramente esse fator de eficiência superior dos concretos leves, em diferentes períodos. O valor do fator de eficiência F_e pode ser calculado da seguinte forma:

$$F_e = \frac{F_c}{(p/2,2)^{2,5}}$$

onde F_c e p são a resistência à compressão aos 28 dias e a densidade seca do material, respectivamente (Chung *et al.*, 2018).

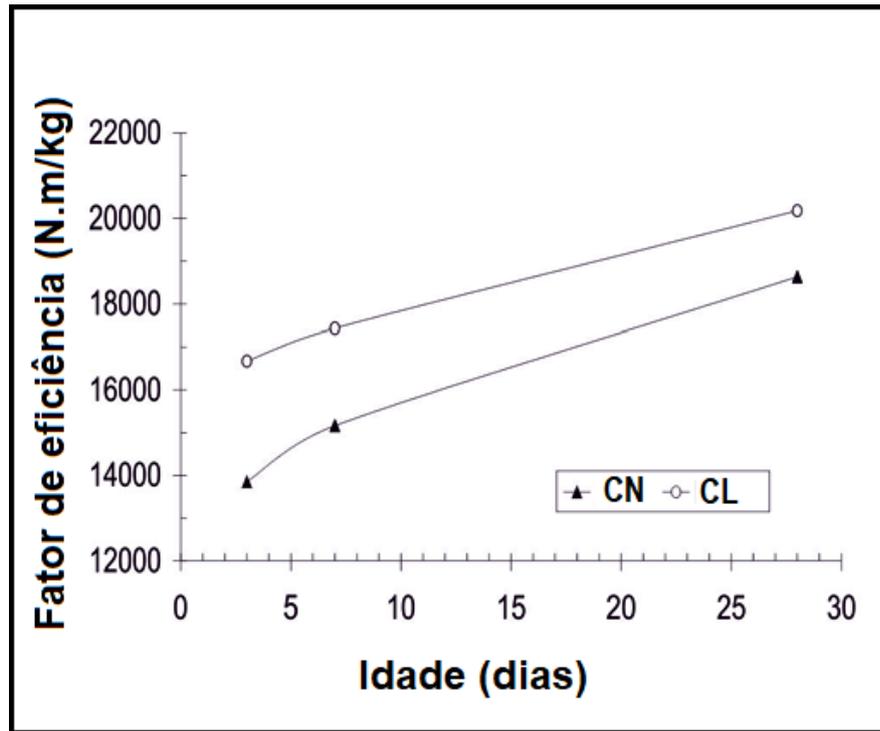


Figura 24: Fator de eficiência de concreto de peso normal (CN) e concreto leve (CL), em diferentes períodos. **Fonte:** Moravia, Gumieri & Vasconcelos, 2010.

Na avaliação da resistência à compressão do concreto, deve-se considerar que a mesma diminui com o aumento do tamanho da seção do corpo de prova, embora a taxa decrescente permaneça quase constante além de um certo limite de tamanho. Além disso, a resistência à compressão medida a partir de um corpo de prova cúbico é geralmente maior do que a registrada a partir de uma amostra cilíndrica (Sim *et al.*, 2013).

A resistência à tração é importante quando se considera a fissuração em elementos de concreto, e está sujeita aos fatores que também influenciam a resistência à compressão. Normas da Europa e Estados Unidos estabelecem fórmulas para a estimativa da resistência à tração de agregados leves e, geralmente, essas expressões são obtidas a partir daquelas definidas para os concretos de peso normal, sendo então aplicado um coeficiente empírico de segurança global que leva em consideração a menor densidade do concreto leve (Bogas & Nogueira, 2014). As expressões recomendadas pelas principais normas europeias e americanas estão indicadas na Tabela 1.

Tabela 1: estimativa da resistência à tração para concreto leve estrutural.

Referência	Relação entre f_{cm} e f_{ctm}^a
FIP (1983)	$f_{ctm,r} = c.f_{cm,cub}^{2/3}$ [MPa] $f_{ctm,sp} = 0,23f_{cm,cub}^{2/3}$ [MPa]
fib 8 (2000)	$f_{ctm} = c.f_{ck}^{2/3} (0,4+0,6\rho/2.200)$ [MPa]
ACI 318 (2009)	$f_{ctm,sp} = a.f_{cm,cyl}^{1/2}$ [MPa] $f_{ctm,r} = b.f_{cm,cyl}^{1/2}$ [MPa]
EN 1992-1 (2004)	$f_{ctm} = 0,30(f_{ck})^{2/3} \cdot (0,4+0,6\rho/2.200)$ [MPa] $f_{ctm} = 2,12.\ln(1 + f_{cm}/10) \cdot (0,4+0,6\rho/2.200)$ [MPa]
NS 3473 (1992)	$f_{ctm} = f_{ctm,CN} (0,15 + 0,85/2.200)$ [MPa]

Fonte: Bogas & Nogueira, 2014 (adaptado).

Onde:

^a- f_{ctm} , $f_{ctm,r}$, $f_{ctm,sp}$ - Resistência à tração axial média, módulo de ruptura e resistência à tração por divisão;

^a- f_{ck} , $f_{cm,cyl}$ - Resistência à compressão característica e média do concreto determinada em cilindros $\varnothing 150 \times 300$ mm

^a- $f_{cm,cub}$; ρ - Resistência à compressão média determinada em cubos de 150×150 mm e densidade seca do concreto

As principais diferenças entre o concreto de agregado leve e o concreto de peso normal devem-se ao caminho da fratura (a fratura atravessa os agregados leves, ao invés de contorná-los, como ocorre com os agregados de peso normal) e conteúdo total de água (é maior para o concreto leve devido à absorção do agregado). Portanto, deve-se considerar esses efeitos ao testar a resistência do concreto leve (Newman & Choo, 2003b). Segundo o trabalho de Bogas & Nogueira (2014), a resistência à tração do concreto com agregado leve de argila expandida equivale a 0,8 – 0,85 da resistência à tração de concreto de peso normal de igual resistência, diminuindo para cerca de 0,7 em concretos leves com areia leve. A resistência à tração do concreto leve é consideravelmente afetada pela resistência, textura da superfície e tamanho dos agregados utilizados, porque a resposta à tração do concreto é governada principalmente pela capacidade de intertravamento do agregado e pela ação de reticulação coesiva entre partículas de agregado e pasta (matriz cimentícia) ao longo de micro e macro fissuras (Choi *et al.*, 2014).

3.3.3.2 Absorção de água

A constituição da mistura de concretos leves deve sempre evidenciar a água adicionada para levar em conta a absorção de água do agregado leve, embora a água não

aumente o volume do concreto em si. Também é imprescindível levar em conta a alta absorção de água do agregado leve fino, que varia de 25 a 40% em peso. Ignorar a absorção de água causará uma absorção descontrolada de água da matriz pelos agregados graúdos e finos, que levará, conseqüentemente, à formação de microfissuras graves na matriz (como mostra a Figura 25), que reduzem a resistência e comprometem a durabilidade. A absorção ocorre durante o estado plástico da matriz do concreto leve e não pode ser compensada por efeitos de cura interna posteriores (Thienel, Haller & Beuntner, 2020). A condição de umidade do agregado é uma propriedade crítica que afeta a trabalhabilidade, resistência e demanda de água/cimento. Em concretos de agregado leve, a relação água/cimento real costuma ser menor em relação ao seu valor nominal, sendo difícil determiná-la. A redução dessa relação água/cimento no concreto fresco geralmente é considerada um fenômeno negativo, pois pode levar à perda da trabalhabilidade da mistura. Conseqüentemente, pode ser necessária a saturação em água do agregado a ser utilizado no concreto, para proteger o concreto fresco da redução a/c e da perda de trabalhabilidade da mistura (Domagała, 2015).

A absorção de água dos agregados é expressa como a proporção da massa seca em estufa absorvida após 30 min e 24 h. Para agregados leves, essa taxa para o período de 24 horas normalmente fica entre 5 e 15% da massa seca, em comparação com cerca de 0,5 – 2% para a maioria dos agregados naturais. Uma estimativa aproximada da correção a ser feita para a água absorvida pelos agregados leves durante e imediatamente após a mistura pode ser feita com base no valor de absorção de 30 min, que normalmente fica na faixa de 3 a 12%. (Newman & Choo, 2003b). As taxas de absorção de água para alguns tipos de agregados leves podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2: taxa de absorção de água de agregados leves.

Tipo de agregado	Forma	Absorção de água (%)
Argila expandida	Arredondada	12–14
Ardósia expandida	Angular/irregular	10–15
Xisto expandido	Arredondada	12–14
Pedra-pomes	Angular/irregular	30–40
Cinza volante	Arredondada	9–15

Fonte: Newman & Choo, 2003b (adaptado).

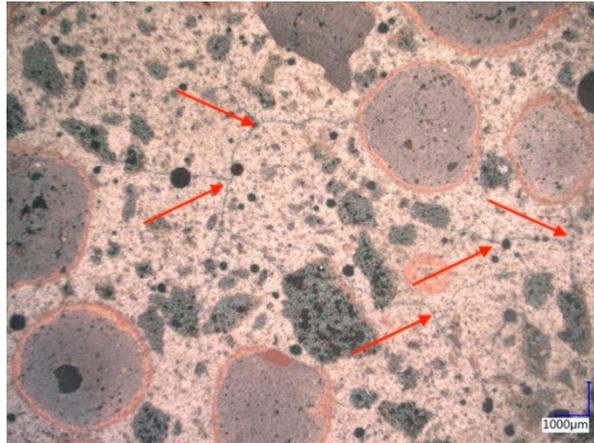


Figura 25: Formação de microfissuras devido à absorção de água por agregados leves na matriz (marcadas com setas vermelhas) de um concreto leve de alta resistência. **Fonte:** Thienel, Haller & Beuntner, 2020.

Os agregados leves possuem diversas aplicações além do concreto leve. Na geotecnia, são utilizados em substituição da parte indesejável do solo que é removida. Os LECAs podem ser aplicados para melhorar as propriedades do solo, uma vez que é leve, resistente e ecológico (Zurki *et al.*, 2023). Lee *et al.* (2021) estudou a utilização de agregados leves na filtragem de água, onde apresentaram melhor desempenho de filtração do que a areia comum devido aos microporos. Outras formas de utilização recentes dos agregados leves incluem isolamento térmico em telhados (Huang *et al.*, 2020) e suporte de materiais de mudança de fase, para aplicação em argamassas de assentamento, argamassas de revestimento e outros materiais de construção (Wadee *et al.*, 2022).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Os agregados foram produzidos a partir de uma argila não expansiva, pó de vidro e carbeto de silício, além da água para fornecer plasticidade durante a moldagem dos agregados. Previamente, foram desenvolvidas formulações de agregados contendo grafite e bentonita para testar a expansão resultante com esses materiais. As etapas são resumidas no fluxograma da Figura 26.



Figura 26: Fluxograma do desenvolvimento do trabalho, com a argila natural do município de Feliz (RS), na região do vale do rio Caí, ao topo. **Fonte:** o autor (2023).

4.1.1 Argila

A argila utilizada no trabalho é proveniente da região do vale do rio Caí, mais especificamente do município de Feliz (RS). A secagem da argila foi realizada em estufa a

105 °C. Posteriormente, toda a argila foi desagregada manualmente com marreta e moída em moinho de bolas até passar pela peneira #40 (425 µm), granulometria na qual foi realizado o ensaio de plasticidade (NBR 6457, 2016), com o objetivo de avaliar o percentual de água mais adequado a ser utilizado na moldagem dos agregados. A argila permaneceu em repouso por 24 h na temperatura ambiente, sendo posteriormente transferida para estufa a 50 °C, a fim de não absorver água até o momento das suas caracterizações. A argila como foi recebida pode ser observada no Fluxograma da Figura 26.

4.1.2 Vidro

Para a obtenção do pó de vidro, garrafas de vidro sodo-cálcico, previamente lavadas, foram trituradas e posteriormente moídas em moinho de bolas, até o pó resultante atingir um tamanho de partícula inferior à 180 µm, baseando-se no tamanho de partícula adotado por Li *et al.* (2020). Essa granulometria foi assegurada por peneiramento. O material utilizado nas etapas de trituração e moagem, bem como o pó de vidro resultante, podem ser vistos na Figura 27.

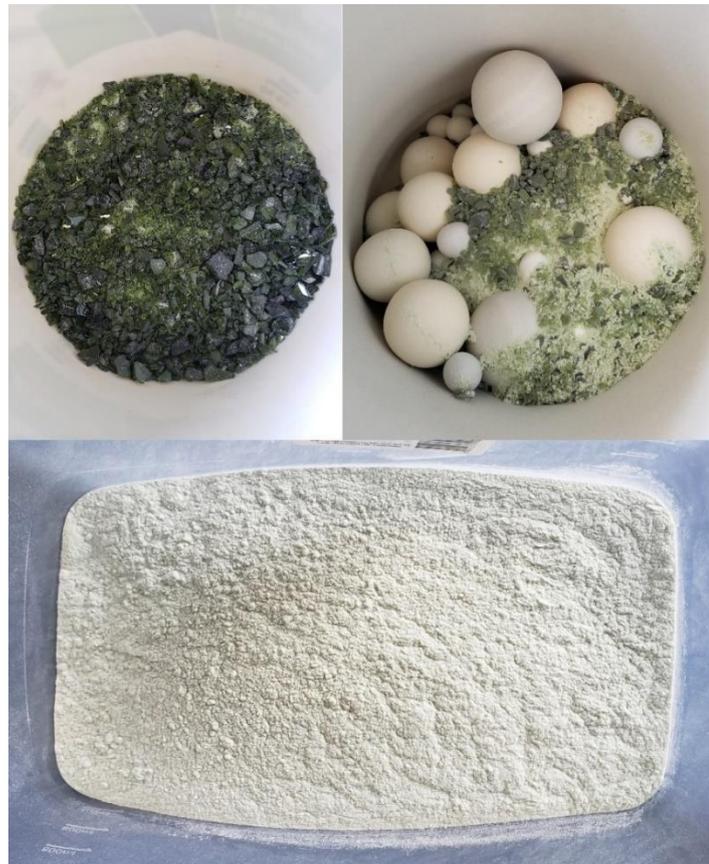


Figura 27: Vidro sodo-cálcico nas etapas de trituração, moagem e o pó resultante. **Fonte:** o autor (2022).

4.1.3 Grafite e bentonita

O grafite, por conter carbono, pode afetar a geração de gás durante a queima do agregado. Já a bentonita apresenta características expansivas sob determinadas condições (Menezes *et al.*, 2008). Para avaliar a influência desses dois materiais na argila estudada, foram desenvolvidos, como pré-teste, agregados com 10%, 15% e 20% de bentonita – denominados respectivamente B1, B2 e B3 – e agregados contendo 1%, 2% e 3% de grafite, denominados C1, C2 e C3.

4.1.4 Carbetto de silício

O carbetto de silício (SiC) utilizado foi doado pela empresa SiCBRAS (Simões Filho, Bahia). Para a utilização no presente trabalho, a redução do tamanho do pó de SiC foi realizada em almofariz, até que o material fosse capaz de passar na peneira de 45 μm (#325), uma vez que essa dimensão é relatada como sendo mais propícia à geração de poros (Xi *et al.*, 2014). Conforme Xi *et al.*, (2014) e testes previamente realizados, utilizou-se os percentuais (a úmido) de 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,00% de SiC. Esses percentuais, desconsiderando o teor de água (massa seca), correspondem a, respectivamente, 0,312%, 0,625%, 0,937% e 1,25%, que foram tomados como base para a nomenclatura das composições.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Preparação e queima dos agregados leves

Antes de dar início à elaboração dos agregados, foram realizados ensaios de plasticidade (NBRs 6457 e 6459 da ABNT, 2016) ou Limites de Atterberg, para aferir o nível de plasticidade mais adequado para a moldagem dos agregados. Para isso, tomou-se como base o valor do Limite de Plasticidade (LP), que representa o menor teor de umidade na qual a argila se comporta plasticamente. Em agregados leves, é desejável que o mínimo de umidade esteja presente, uma vez que o tempo de secagem pode ser reduzido. A argila utilizada foi obtida de duas frentes de lavra distintas, sendo, portanto, necessário a realização de ensaios distintos para cada uma delas. As mesmas foram denominadas argila A e argila B, e os limites de plasticidade obtidos foram, respectivamente, 31,0% e 33,3% (resultando em um limite médio de 32,15%). Como a adição de vidro prejudica a trabalhabilidade da argila (o vidro é um material não plástico), tornando-a menos plástica, utilizou-se um teor de umidade inferior ao obtido no ensaio. Para as proporções de 25 e 31,25% de vidro utilizadas no presente trabalho, observou-se que um teor de 25% de água é o mais adequado para a obtenção dos

agregados, sendo esse o percentual em peso adotado. As argilas das duas frentes de lavras distintas foram misturadas (na proporção 1:1) para a produção dos agregados. Esses agregados foram queimados à 1200 °C com tempo de patamar de 20 minutos, conforme Li *et al.*, 2020.

Os agregados leves foram moldados manualmente (ver Figura 28) com pesos em torno de 2 gramas (cada um) a partir da mistura de argila e pó de vidro, além de 25% em peso de água, com a adição de diferentes percentuais de SiC, conforme a Tabela 3. Os agregados passaram por secagem em estufa a 105 °C por 24 horas e depois foram queimados a uma taxa de 10 °C/min até as temperaturas de 1150 °C (para agregados com SiC) °C e 1200 °C (para agregados somente com vidro, conforme Li *et al.*, 2020), e tempo de patamar de 20 minutos para todos os agregados (forno Jung tipo câmara TB-9665). A temperatura menor de queima dos agregados com SiC foi selecionada com base em testes previamente realizados. O resfriamento foi realizado dentro do forno com a redução gradual de temperatura durante no mínimo 12 horas. Os agregados produzidos foram estudados quanto à expansão de queima, densidade e absorção de água. A expansão foi avaliada através da medição com paquímetro de amostras antes e após a queima, e a densidade foi estimada a partir das dimensões e pesos dos agregados. As medidas foram feitas em duas direções diferentes e baseadas em cinco amostras de cada composição (totalizando 55 amostras) de agregado, obtendo-se ao final uma média do diâmetro.

Tabela 3: nomenclatura e composição dos agregados

Nome da formulação	Percentual de vidro	Percentual de SiC
A0	0,00	0,000
G25	25,00	0,000
G31	31,25	0,000
S03-25	25,00	0,312
S06-25	25,00	0,625
S09-25	25,00	0,937
S10-25	25,00	1,250
S03-31	31,25	0,312
S06-31	31,25	0,625
S09-31	31,25	0,937
S10-31	31,25	1,250



Figura 28: Agregados moldados antes de passarem pelo processo de queima. **Fonte:** o autor.

4.2.2 Caracterizações

Para o estudo da estrutura cristalina da argila por difração de raios X, a amostra foi utilizada em uma granulometria inferior à 45 μm (#MESH 325) e calcinada à 550 $^{\circ}\text{C}$ por duas horas em forno Sanchis tipo câmara. A calcinação foi feita para eliminação da matéria orgânica na argila e consequente redução de ruídos nos difratogramas. Foi utilizado um difratômetro Phillips X'pert MDP, radiação Cu-K α , $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$, operando a 40 kV e 40 mA (configurações padrão utilizadas no Lacer para análises DRX). Os difratogramas foram analisados através do software X'pert Highscore. A composição química da argila e do vidro foram avaliadas por fluorescência de raios X (Rigaku RIX 2000 WDS, tubo de raios X de Rh). Para essa análise, a argila (não calcinada) e vidro também foram moídos até passar na peneira de 45 μm .

As análises térmicas (TG e DSC) da argila e da composição de argila, vidro e SiC foram realizadas no aparelho STA 449 F3 Jupiter (Netzsch) em atmosfera de ar sintético e taxa de 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (Li *et al.*, 2020). As amostras foram preparadas em forma de pó (mesh #40), homogeneizando-se a argila, vidro e SiC na proporção da formulação S10-31 (31,25% de vidro e 1,25% de SiC).

A porosidade interna e microestrutura dos agregados foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em microscópio modelo TM 3000 (Hitachi), voltagem de aceleração de até 15 KV. Os agregados foram serrados ao meio (não sendo submetidos à metalização para evitar danos às amostras), depositados sobre fita de carbono amorfo, e

analisou-se a estrutura do interior do agregado e próxima à borda. A estrutura interna dos agregados também foi avaliada por microscopia óptica, em microscópio modelo SZX16 (Olympus), no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM) - UFRGS. Para estimar a composição química próxima à superfície dos agregados e no interior dos poros, foi realizado o estudo por energia dispersiva de raios X (EDS), em espectroscópio da marca Oxford Instruments, modelo SwiftED3000.

A absorção de água foi avaliada a partir da medição do peso de três agregados para cada composição. Os agregados foram submersos em água e seus respectivos pesos foram medidos após os períodos de 1, 3, 5, 24 e 72 horas. A resistência à compressão dos agregados foi estimada com base na adaptação do ensaio de compressão proposto por Hiramatsu & Oka, 1966, representado na equação (1). Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios universal modelo 20000 n°10741 (EMIC), com uma velocidade da cruzeta de 0,25 mm/s e célula de carga de 2.000 Kg.

$$\text{Resistência à compressão} = \frac{2,8P_c}{\pi \cdot X^2} \quad (1) \quad (\text{Hiramatsu \& Oka, 1966})$$

Onde P_c é a carga de ruptura e X é o diâmetro do agregado.

4.2.3 Preparação do concreto leve

Para a avaliar a utilização dos agregados leves obtidos nesse trabalho, foram produzidos oito corpos de prova de concretos leves. Foram escolhidas as composições com maior teor de vidro (G31) e de maior teor de vidro e de SiC (S10-31). Essas composições de concreto leve têm como intuito avaliar o efeito do par vidro/SiC. Os corpos de prova foram produzidos com o traço, em volume, de 1:1,5:1:0,5 (cimento, areia, agregado leve e água) e nas dimensões de $\varnothing 4$ cm x 8 cm. O tamanho reduzido dos corpos de prova foi utilizado devido à limitada disponibilidade de matérias-primas para os agregados, que, por sua vez, foram produzidos em tamanho inferior para a incorporação no concreto. O traço, bem como o fator água/cimento fixo de 0,5, foi adotado conforme traço testado anteriormente em laboratório, que apresentou melhor resistência à compressão. O cimento utilizado foi o Cauê CPV ARI e areia especial Delga para filtros (tamanho médio). Os componentes do concreto foram pesados em balança eletrônica e adicionados em uma bacia plástica, sendo homogeneizados em seguida por um misturador elétrico de argamassa adaptado. O adensamento dos corpos de prova nos moldes foi feito com barra metálica, sendo desmoldados cinco dias depois. Os corpos de prova foram cobertos por TNT e a cura ocorreu em temperatura ambiente.

Os corpos de prova obtidos foram submetidos a testes de resistência à compressão (NBR 5739, 2018) e, a partir dos resultados dos ensaios, foram estimados os valores de resistência à tração direta e módulo de elasticidade (NBR 6118, 2014). Os ensaios foram realizados após um período de 53 dias (em decorrência de indisponibilidade do equipamento de ensaio na data em que o concreto completou 28 dias de idade, em uma máquina universal de ensaios WDW-100 (Jinan Shijin Group Corporation). A velocidade de carregamento adotada foi de 5kN/s e a célula de carga foi de 250 kN.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÕES DA ARGILA

A argila foi caracterizada por fluorescência de raios X e Difração de raios X, cujos resultados são apresentados na Tabela 4 e Figura 29, respectivamente. É possível observar que os elementos constituintes da argila se apresentam em percentuais semelhantes à argila estudada por Zorzi *et al.* (2012), obtida na mesma região (vale do rio Caí, RS). A sílica constitui aproximadamente 54% da argila, seguida pelo Al_2O_3 (~17%), Fe_2O_3 (~13%), MgO (~1,8%) e TiO_2 (~1,8%). Outros óxidos como o de cálcio (CaO) e potássio (K_2O) também estão presentes, em menor quantidade. A perda ao fogo (P.F.) foi de aproximadamente 9,10%.

Tabela 4: composição química (% em peso) da argila e vidro utilizados.

Material	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	K_2O	MgO	CaO	Na_2O	P.F.
Argila	54,04	17,25	1,78	12,86	1,09	1,78	1,24	---	9,10
Vidro	70,29	1,56	0,10	0,55	0,55	3,06	13,10	10,56	0,20

A composição mineralógica, bem como os principais picos relativos à cada fase constituinte da argila identificados, podem ser observados na Figura 29. Destaca-se a presença de picos bem definidos relativos à caulinita (C), goethita (G) e, principalmente, quartzo (Q). A fase hematita (H) também pode ser observada em picos discretos (Zorzi *et al.*, 2012).

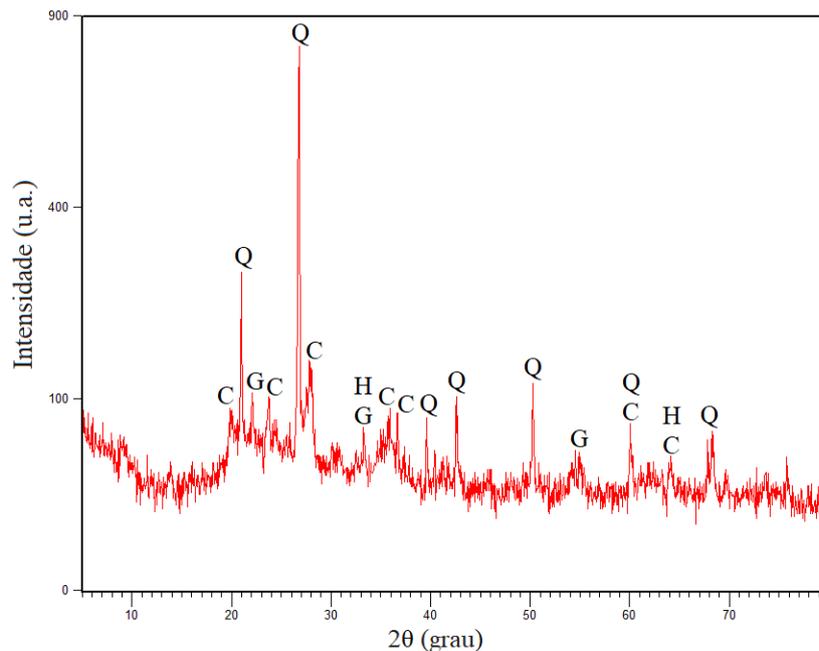


Figura 29: Difratograma de raios X da argila utilizada na produção dos agregados. Caulinita (C), goethita (G), quartzo (Q) e hematita (H).

A Figura 30 representa a decomposição térmica da (a) argila e da (b) composição de argila, vidro e SiC (67,5% argila, 31,25% vidro e 1,25% SiC). Nota-se que a perda de massa tem início antes de se atingir a temperatura de 100 °C, o que pode estar relacionado à eliminação de água residual. De acordo com Cruz *et al.* (2015), o pico endotérmico que ocorre a aproximadamente 440 °C está relacionado à desidroxilação da caulinita e formação de metacaulinita, onde ocorre a última grande perda de massa, finalizada em torno de 555 °C. A partir dessa temperatura, a perda de massa é muito baixa, permanecendo sempre próxima do percentual total de perda de massa. O pico exotérmico detectado em torno de 890 °C sem perda significativa de massa pode ser explicado pela reação da metacaulinita para formar α -Al₂O₃ e/ou espinélio. Por fim, há um último pico exotérmico em torno de 1.080 °C, que pode estar associado à formação de mulita sob a influência de óxido de ferro (Cruz *et al.*, 2015).

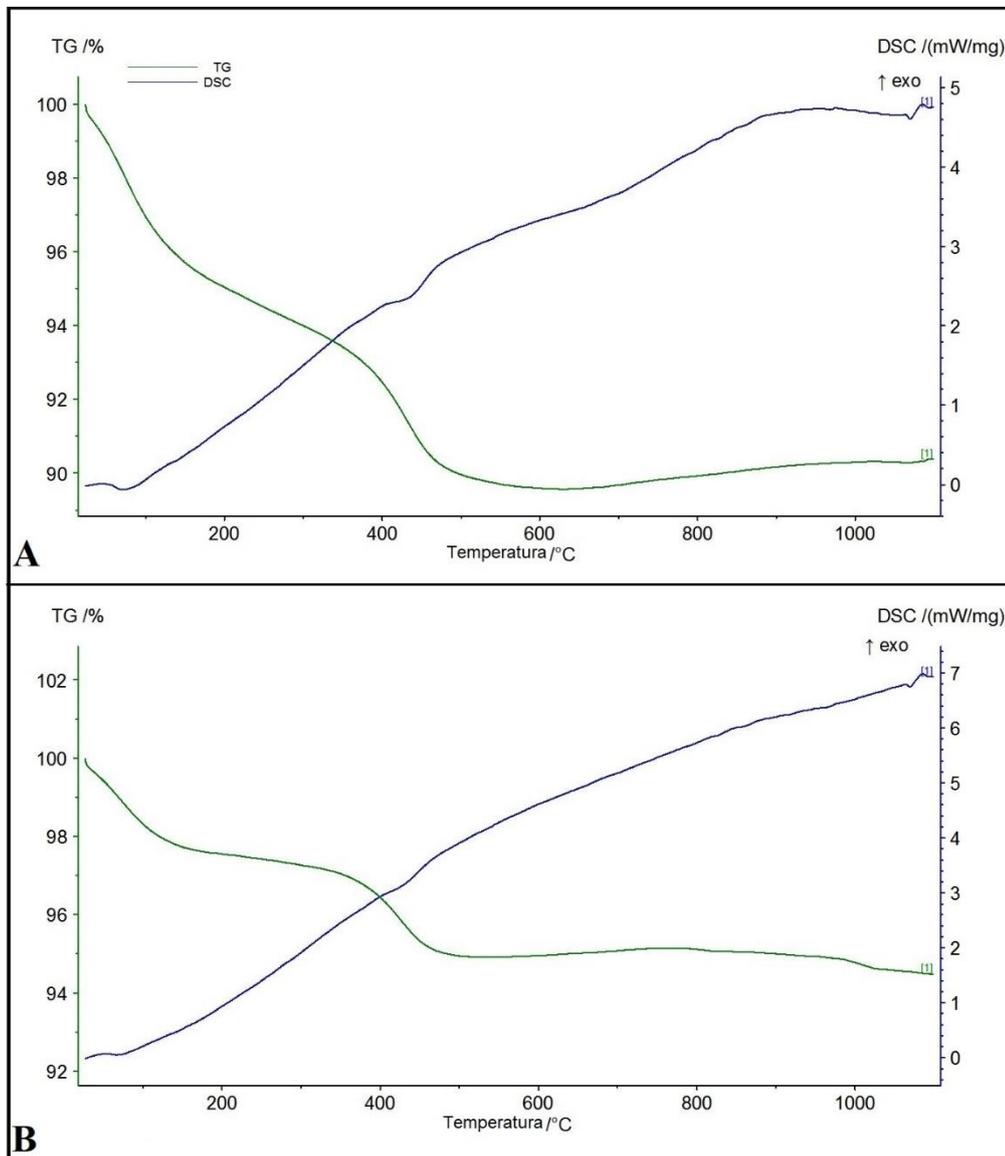


Figura 30: DSC e TG da argila (a) e mistura da argila, vidro e SiC (b).

A perda total de massa da argila até 1100 °C foi de aproximadamente 9,63% e, na composição de argila, vidro e SiC, essa perda total foi de aproximadamente 5,52%, devido ao menor teor de argila nessa composição (67,5%). Esta perda de massa da argila em torno de 9% corrobora o percentual de perda ao fogo obtido na caracterização por fluorescência de raios X (apresentado na Tabela 4). Portanto, quanto menor o teor de argila na composição, menor a perda total de massa, que está associada principalmente à desidroxilação da argila. Quanto ao SiC, não foi possível detectar a sua decomposição até 1100°C.

5.2 EXPANSÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

5.2.1 Agregados contendo 100% de Argila

Os agregados constituídos 100% de argila apresentaram retração em todas as temperaturas de queima estudadas, portanto, trata-se de uma argila não expansiva. Os valores de retração dos agregados de argila, bem como dos agregados contendo bentonita (B1 – B3) e grafite (C1 – C3), estão resumidos na Tabela 5. A temperatura utilizada na queima foi de 1200 °C, a uma taxa de 10 °C/minuto e tempo de patamar de 20 minutos.

Tabela 5: retração dos agregados para uma temperatura de queima de 1200 °C. Os diâmetros estão em centímetros.

Composição	Diâmetro pré-queima (cm)	Diâmetro pós-queima (cm)	Retração Linear (%)	Retração volumétrica (% vol.)	Densidade (g/cm ³)
A0	1,24 (±0,02)	00,93 (±0,02)	24,57	57,12	3,12
B1	1,28 (±0,06)	1,19 (±0,05)	07,06	19,73	-
B2	1,29 (±0,32)	1,22 (±0,21)	05,20	14,80	-
B3	1,24 (±0,14)	1,20 (±0,18)	03,52	10,19	-
C1	1,33 (±0,23)	1,15 (±0,12)	13,63	35,58	-
C2	1,36 (±0,05)	1,20 (±0,02)	12,14	32,18	-
C3	1,35 (±0,41)	1,22 (±0,33)	10,00	27,11	-

A densidade dos agregados foi estimada medindo-se o diâmetro e o peso dos agregados após a queima. Para a composição de argila A e argila B, adotada no presente trabalho, a densidade média foi de 3,12 g/cm³. Esse valor está muito acima do valor de densidade máximo exigido para agregados leves. A norma UNE-EN-13055 (2016) estabelece que o agregado expandido deve ter uma densidade $\leq 1,2$ g/cm³. A adição de grafite e de bentonita, embora tenham reduzido a retração dos agregados na queima, não foi capaz de promover a expansão dos agregados.

5.2.2 Agregado de argila + vidro

O estudo das formulações com a argila do vale do Caí-RS mostrou que essa argila não apresenta características autoexpansíveis para as temperaturas estudadas e, portanto, não poderia ser utilizada para a produção de agregados leves expandidos. Assim, foi selecionado o pó de vidro sodo-cálcico como formador de fase vítrea e regulador da viscosidade/tensão superficial necessárias à formação de agregados leves.

A adição de vidro proporcionou uma redução considerável na densidade dos agregados. Inicialmente, foram adotadas três temperaturas de queima para verificar a partir de qual temperatura o vidro promove efeito expansivo, apresentadas na Tabela 6. Observou-se que a expansão tem início na temperatura de 1150 °C para as composições com 31,25% de vidro e em 1175 °C para composições com 25%. Entretanto, somente a partir de 1200 °C observou-se um nível de expansão relativamente satisfatório, embora os agregados já comecem a sofrer alguma deformação sobre o próprio peso (achatamento) nesta faixa de temperatura.

Tabela 6: % em volume de expansão (+) ou retração (-) apresentada pelas esferas de argila com 25 e 31% de vidro após a queima.

Temperatura	1150 °C	1175 °C	1200 °C
25%	-2,12%	9,34%	33,67%
31,25%	3,63%	16,27%	29,40%

De acordo com Li *et al.* (2020), o conteúdo de vidro não promove mudança significativa de volume até 1100 °C, podendo até mesmo ocorrer retração quando a temperatura é elevada até 1150 °C, que pode ser atribuída ao aparecimento de fase líquida de baixa viscosidade (durante a queima), que entra nos poros fazendo com que o corpo de prova retraia por efeito de capilaridade (Reed, 1995). Em temperaturas mais elevadas, o conteúdo de vidro deve ser adequado para a produção de agregados expandidos, mas, principalmente, a viscosidade e a tensão superficial devem ser compatíveis com a temperatura de queima, para que seja possível a retenção de gás presente nos poros e/ou gerado na decomposição de determinadas fases. Por outro lado, se o conteúdo de vidro for muito elevado, ou se a viscosidade (e tensão superficial) for muito baixa, pode ocorrer que não haja retenção de gás e, conseqüentemente, não ocorre a expansão dos agregados. Portanto, o percentual de vidro adotado deve ser selecionado de forma cautelosa, para que a fusão seja atingida propiciando a

almejada expansão. Após sucessivos testes com diferentes percentuais de vidro, considera-se que a faixa de 25 a 31,25% de vidro é adequada para a argila estudada.

A Figura 31 apresenta os agregados dessas composições, evidenciando a camada vitrificada na superfície dos agregados. Segundo Li *et al.* (2021a), essa camada vitrificada na superfície dos agregados expandidos começa a surgir a uma temperatura de 1160 °C e fica evidente acima de 1170 °C, utilizando um percentual de 10% de vidro. Como os percentuais utilizados no presente trabalho são maiores, a formação da camada vitrificada foi observada já em 1150 °C. Essa superfície vitrificada contribui para reduzir significativamente a absorção de água e, na ausência dessa camada vitrificada externa, a absorção de água é afetada pela estrutura porosa dos agregados. Além disso, a porosidade determina a densidade dos agregados.



Figura 31: Agregados com 25% (fileira inferior) e 31% (fileira superior) de vidro após a queima a 1200 °C.

Fonte: o autor.

Pelos valores presentes na Tabela 7, pode-se inferir que a densidade é inversamente proporcional à quantidade de vidro incorporada nos agregados, bem como à temperatura de queima. Baseando-se nos resultados observados na Tabela 6, estabeleceu-se os percentuais de 25 e 31,25% para a composição dos agregados na produção dos agregados com carbetto de silício.

Tabela 7: densidade para amostras queimadas em temperaturas distintas.

Teor de vidro	Densidade pós-queima (g/cm ³)			
	1100 °C	1150 °C	1175 °C	1200 °C
25%	1,93	1,72	1,61	1,31
31,25%	1,84	1,69	1,43	1,25

A Tabela 8 apresenta os valores de absorção de água (após o período de imersão por 24 horas), onde se observa claramente a influência do vidro na redução da absorção de água (para agregados queimados a 1200 °C). Nota-se que a argila utilizada no presente trabalho já apresenta uma baixa absorção de água, que foi reduzida em mais de 66% com a adição de 31,25% em peso de pó de vidro. Essa redução considerável é geralmente atribuída à camada vitrificada gerada pela fusão do vidro, mostrada na Figura 31, que limita drasticamente a entrada de água para o interior poroso do agregado.

Tabela 8: Absorção de água para agregados de vidro com argila queimados a 1200 °C.

% de vidro	Absorção de água (% em peso)
0	1,90
18,75	1,37
25,00	1,04
31,25	0,63

O uso de vidro leva ao aumento da expansão dos agregados, mas essa expansão é relativamente pequena, quando comparada a trabalhos anteriores. Rodrigues (2018) conseguiu uma expansão de 415% utilizando uma argila autoexpansível. Outros autores afirmam que é possível uma expansão de até sete vezes em relação ao volume inicial do agregado (Rossignolo, 2009).

5.2.3 Agregados de argila + vidro + SiC

A fim de potencializar o efeito expansivo, adotou-se a incorporação de pequenos percentuais de carbetto de silício e ampliou-se o teor de vidro adicionado (ver Tabela 3). A Figura 32 apresenta os agregados para a queima realizada a 1150 °C e a expansão resultante para cada uma das oito composições estudadas pode ser observada na Tabela 9.

Tabela 9: expansão obtida para os agregados com SiC queimados a 1150 °C.

Composição	Expansão (% de volume)
S03-25	167,21
S06-25	239,28
S09-25	306,60
S10-25	357,49
S03-31	345,31
S06-31	435,52
S09-31	478,02
S10-31	415,53

**Figura 32:** Agregados com vidro e vários percentuais de SiC (0,312 – 1,25%) queimados a 1150 °C.**Fonte:** o autor.

Até mesmo em pequenos percentuais, a adição de carbetos de silício tem um efeito significativo no fenômeno de expansão. Os agregados com SiC apresentaram alta porosidade e baixa densidade (Tabela 10), resultantes de uma expansão mais elevada. Nota-se que nas composições com 25% de vidro, o carbetos de silício tem efeito crescente sobre a expansão dos agregados. Com 0,312% de SiC, os agregados com 25% de vidro expandiram 167%, enquanto os agregados com 1,25% de SiC expandiram 357%, um aumento de mais de 2 vezes. Nas composições com 31,25% de vidro, apenas 0,312% de SiC já foi suficiente para provocar uma expansão de 345%, o que evidencia o efeito sinérgico do vidro com o SiC na

promoção da expansão. A expansão dos agregados continua a crescer até 0,937% de SiC, quando se atingiu a expansão máxima obtida no presente trabalho, de 478%. Entretanto, ao se elevar o percentual de SiC para 1,25%, nota-se uma redução no percentual de expansão. É possível que, com o elevado teor de vidro nessa composição, a viscosidade da fase líquida dos agregados seja baixa para conseguir reter o gás gerado. Por outro lado, uma análise da estrutura interior dos agregados (mostrada posteriormente) mostra que grandes poros são formados nas composições contendo a partir de 0,937% de SiC, provavelmente resultado da união de vários poros menores. Esse fenômeno de formação de poros maiores pode limitar a expansão do agregado durante a queima, uma vez que é mais difícil a superfície externa do agregado ainda em estado viscoso reter todo o gás que foi liberado e gerou esse poro maior.

Tabela 10: densidade estimada dos agregados com SiC queimados a 1150 °C.

Composição	Densidade (g/cm³)
S03-25	0,634
S06-25	0,478
S09-25	0,413
S10-25	0,456
S03-31	0,375
S06-31	0,323
S09-31	0,281
S10-31	0,364

A absorção de água após 24 horas para os agregados com 0,312 a 1,25% de SiC é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11: absorção de água dos agregados contendo SiC.

	Absorção de água (% em peso)			
	0,312%	0,625%	0,937%	1,25%
25,00% vidro	10,74	12,42	13,74	16,07
31,25% vidro	11,04	13,63	17,55	19,11

Nota-se o efeito inverso ao observado para os agregados contendo apenas argila e vidro: a absorção de água é maior para um percentual maior de vidro (31,25%). O carbetto de silício claramente tem efeito preponderante nessa propriedade, uma vez que torna o agregado mais poroso (em termos de porosidade aberta) e, conseqüentemente, mais suscetível a absorver água. Como mostra a Figura 32, o vidro e o carbetto de silício se combinam sinergicamente promovendo uma expansão mais elevada do que aquela observada para

agregados somente com argila ou as misturas de argila e vidro. Por exemplo, Rodrigues (2018) apresenta um agregado com absorção de água de 12,1 % para 72h de imersão.

Cabe destacar a baixa temperatura de produção dos agregados produzidos no presente trabalho. Foi obtida uma redução da temperatura de queima em 100°C, com a queima em 1150°C, em relação a temperatura de queima praticada na maioria dos trabalhos de pesquisa. Por exemplo, Rodrigues (2018) realizou a queima em 1250°C para uma argila autoexpansível. Em geral, a temperatura de queima dos agregados na indústria é em torno de 1250°C (Cinexpan, 2018).

5.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS AGREGADOS

O efeito da adição de vidro e carvão de silício na formação dos agregados de argila é mostrado detalhadamente na análise da microestrutura interna dos agregados, a qual foi estudada por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura.

As Figuras 33 e 34 apresentam a estrutura interna dos agregados, desde a formulação 100% de argila até a composição contendo 31% de vidro e 1,25% de SiC. Observa-se que o agregado de argila (A0), sem qualquer aditivo, apresenta um certo nível de porosidade fechada e homogênea, que pode ser vista ao longo de toda a seção do agregado. O número de poros é grande e bem distribuído, mas os tamanhos são insuficientes para tornarem o agregado leve. De fato, essa porosidade no agregado A0 só pôde ser observada através das análises microscópicas. Com a adição de 25% em peso de pó de vidro (G25), observa-se um aumento nos tamanhos de poro, o que tem impacto direto na redução de densidade do agregado. Na composição G31, esse aumento no tamanho de poros é ainda mais acentuado, o que pode ser constatado pelo maior número de poros de tamanho superior ao da composição G25. Essa porosidade maior nas amostras G25 e G31 corroboram o efeito expansivo do vidro apresentado na Tabela 6.

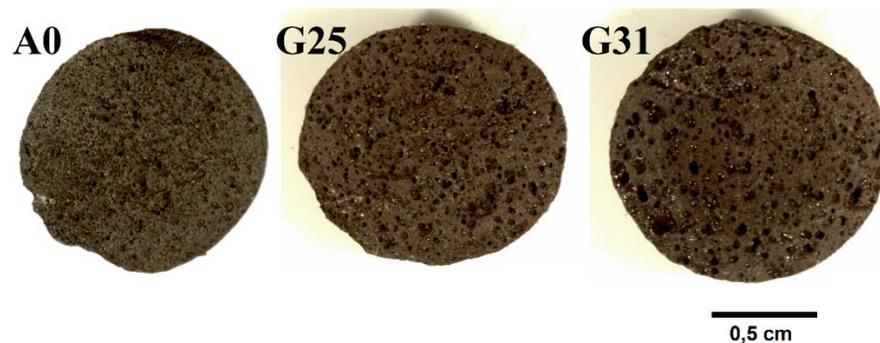


Figura 33: Microscopia óptica dos agregados obtidos das formulações A0, G25 e G31.

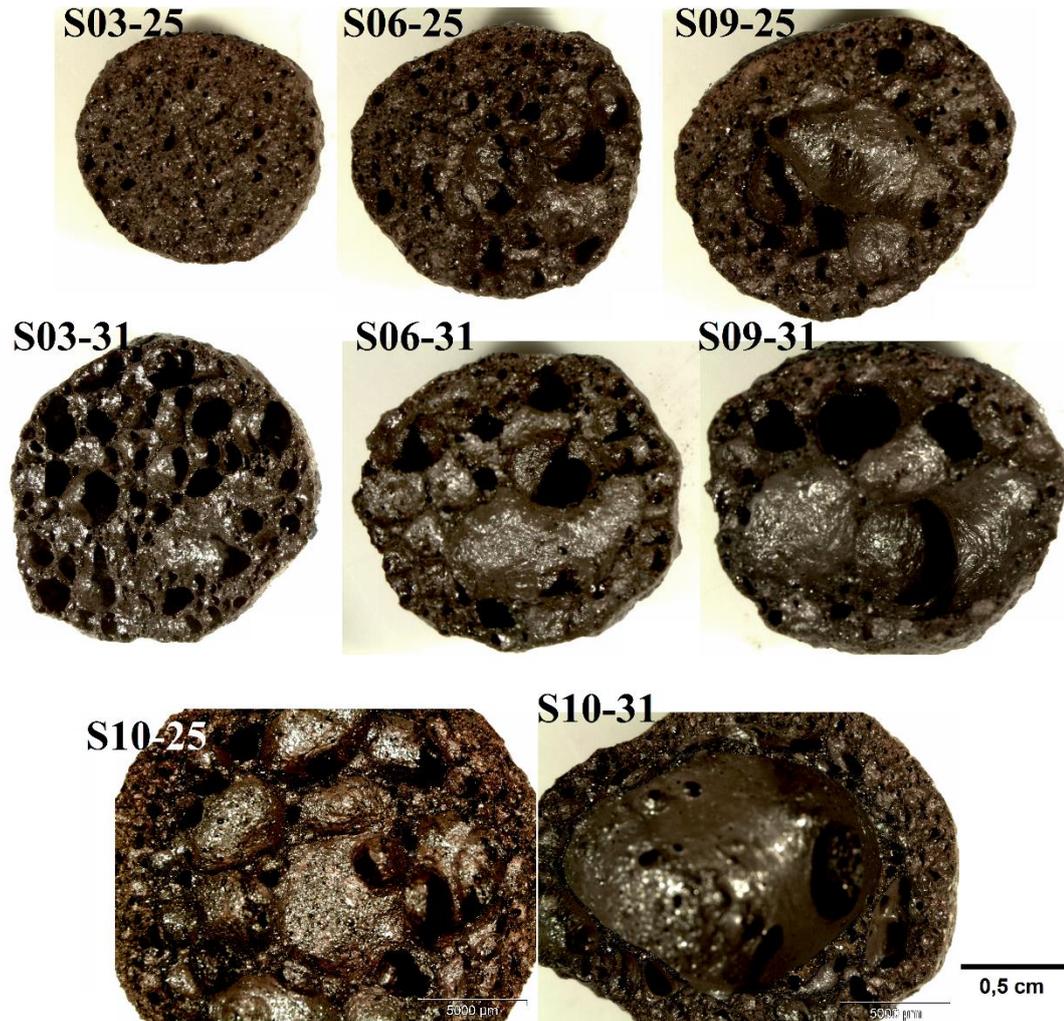


Figura 34: Microscopia óptica dos agregados obtidos das formulações com carvão de silício.

A adição de carvão de silício (Figura 34) demonstrou ter um forte impacto na estrutura interna dos agregados. Com a adição de 0,312% de SiC (e 25% de vidro), há a presença de poros maiores do que nas composições A0, G25 e G31, ainda que uma estrutura relativamente contínua seja predominante. Essa estrutura contínua ainda pode ser observada na composição S06-25, na qual poros de tamanho médio começam a surgir. Em S09-25 já se observa a formação de poros grandes ou vazios em formas irregulares a partir da união de poros, e a estrutura contínua com poros mais homogêneos orienta-se no sentido da parede externa do agregado. Nas composições com 31% de vidro, os poros maiores predominam na estrutura interna dos agregados, e a fração contínua com poros fechados e homogêneos já não é tão frequente. Essa fração só está presente nas paredes entre os poros maiores, onde poros relativamente esféricos e homogêneos são observados. Com o aumento do conteúdo de SiC, os poros maiores se unem até formarem espaços ocios independentes no centro do agregado, com uma parede relativamente contínua formando uma crosta entre o exterior e interior do

agregado. Esse tipo de estrutura, em que o agregado é basicamente oco internamente e cercado por uma crosta contínua consistente, é nitidamente visível na composição S10-31. Essa estrutura muito provavelmente é resultado da maior quantidade de gases gerados nessa proporção, uma vez que o conteúdo de carvão de silício em S10-31 é o mais elevado entre as composições estudadas. Claramente, o maior percentual de vidro (aproximadamente 31% nessa composição) contribui para a formação desse tipo de estrutura.

A atuação do SiC é explicada por Xi *et al.* (2012). A relação entre o carvão de silício e a fase vítrea tem origem em uma camada de sílica que envolve a superfície das partículas de SiC devido à oxidação na atmosfera oxidante, resultando na resistência à oxidação do SiC, uma vez que a taxa de difusão de oxigênio através da camada de sílica é muito lenta. A porosidade mais elevada (tanto o número de poros quanto o tamanho dos mesmos) decorre da oxidação do SiC pelo envolvimento de componentes formadores de silicato ou fundentes em alta temperatura sob condições alcalinas de sal fundido, levando a um aumento significativo na reação química do SiC com o oxigênio, formando uma grande quantidade de CO₂ e CO gasosos. O gás produzido não é descarregado em tempo hábil e pode permanecer no corpo cerâmico, resultando na geração de poros fechados. A elevação da temperatura reduz a viscosidade, que torna o corpo cerâmico suscetível à deformação, aumentando a pressão do gás no poro fechado acima da pressão capilar, que conseqüentemente gera a expansão do corpo cerâmico (Xi *et al.*, 2012). Isso faz com que decomposição do SiC, liberando óxidos de carbono, ocorra em temperaturas maiores que outros compostos, como o carbono amorfo e o grafite. Assim, há uma sinergia, como já mencionado, entre a viscosidade e quantidade da fase vítrea e a temperatura de formação de CO/CO₂, de modo a propiciar a expansão dos agregados e formação de sua porosidade.

A formação de poros excessivamente grandes apresentada nas micrografias indica claramente que existe um limite adequado de carvão de silício a ser adotado sem causar prejuízo nas propriedades mecânicas dos agregados. Shui *et al.* (2011), estudando a influência de SiC em corpos de porcelanato, sustentam que, acima de 2,0 % em peso, o conteúdo de carvão de silício já não é tão significativo na redução da densidade do corpo sinterizado e no aumento do tamanho de poros. Portanto, na introdução de carvão de silício como agente de expansão na elaboração de agregados leves, deve-se sempre levar em conta esse percentual considerado adequado, de modo que os poros não fiquem excessivamente grandes e prejudiquem demasiadamente as propriedades mecânicas do material. Além do mais, deve-se atentar para o fato de que a granulometria do carvão de silício é um fator de influência na

promoção da expansão, sendo esta maior quanto menor for o tamanho de partícula, uma vez que tamanhos menores (em torno de 8 μm) de pó produzem um número maior de poros. Por outro lado, tamanhos de partícula maiores (45 μm) de carvão de silício resultam em uma superfície lisa com menos bolhas (Xi *et al.*, 2014). No presente trabalho utilizou-se somente tamanhos inferiores à 45 μm . Esse tamanho é adequado, mas o efeito expansivo poderia ser substancialmente mais elevado (alcançado já em menores teores de SiC) se tamanhos menores de partícula fossem adotados na composição dos agregados leves caso o comportamento na queima dos agregados seguisse os apontamentos referidos no trabalho de Shui *et al.* (2011).

A caracterização por microscopia eletrônica de varredura foi feita no interior e próximo à superfície externa dos agregados. As imagens relativas ao interior dos agregados são apresentadas na Figura 35.

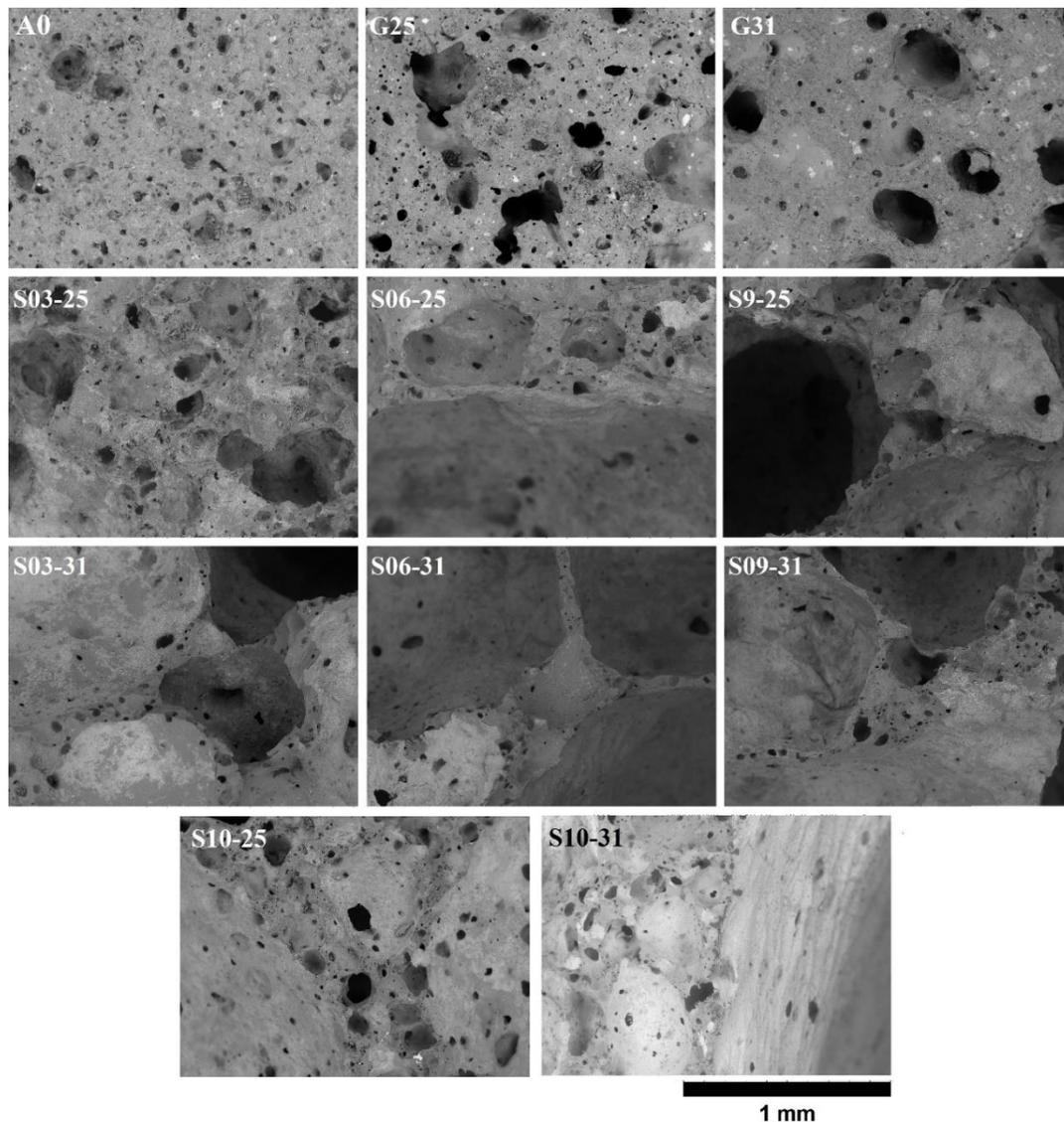


Figura 35: Microscopia eletrônica de varredura dos agregados obtidos.

A adição de vidro promoveu um aumento substancial no tamanho dos poros dos agregados, que se apresentam de forma irregular (não esférica), porém, bem distribuídos ao longo do corpo do agregado. Com o aumento do percentual de vidro para 31,25% (G31), nota-se um claro aumento no tamanho dos poros em relação à composição G25. Embora a estrutura de matriz densa com poros isolados e relativamente esféricos seja totalmente predominante nos agregados sem vidro, observa-se nitidamente pelas microscopias que essa mesma estrutura ainda está presente nos agregados com 25 e 31,25% de vidro. Pequenos poros estão incrustados na matriz densa entre os poros maiores, o que evidencia a distribuição de tamanho de poros não homogênea.

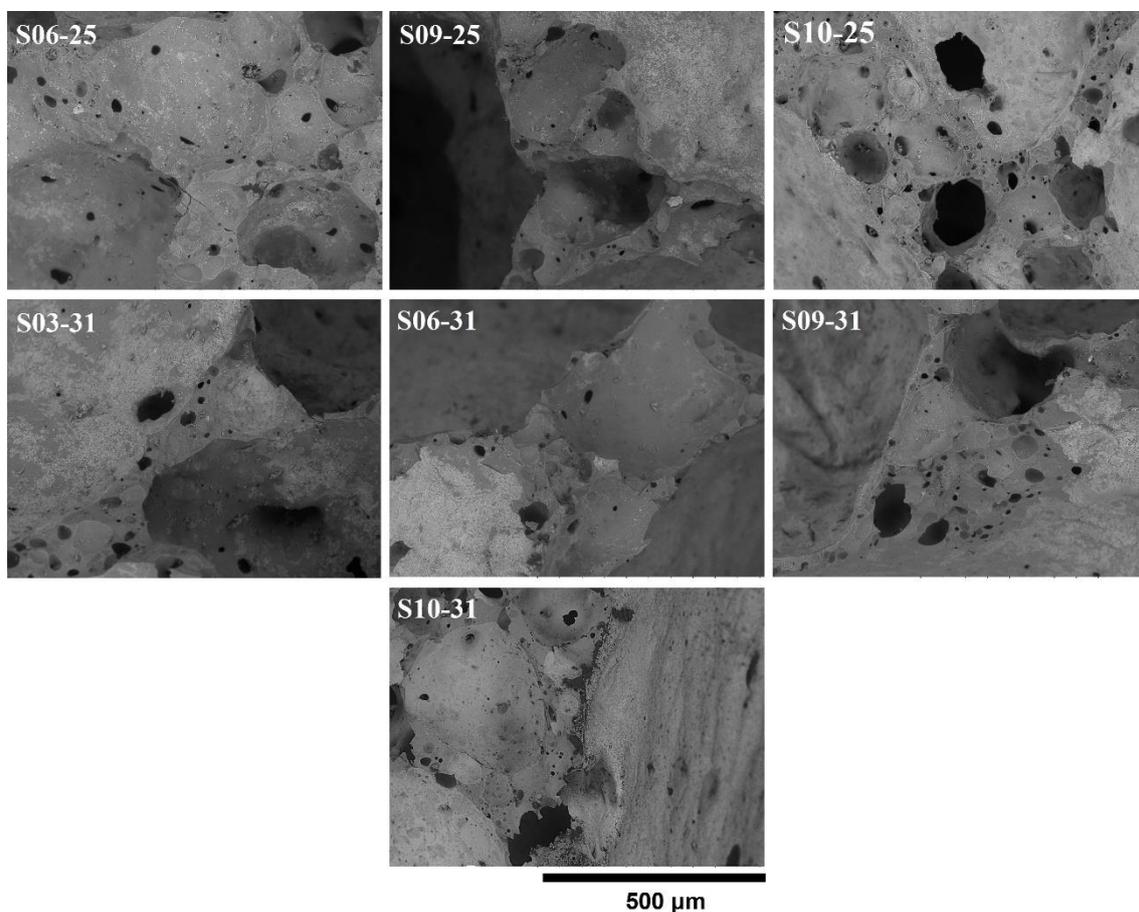


Figura 36: MEV da região das paredes presentes entre os grandes poros. Superfície interna dos agregados.

Na composição S03-25 (Figura 35), boa parte dos poros ainda se apresenta de forma independente. A partir dos agregados S06-25, já é possível identificar um certo nível de comunicação entre os poros, quando os vazios concentrados em certos pontos da matriz do agregado se tornam evidentes. Esses grandes vazios (poros grandes) se intensificam conforme o teor de SiC vai aumentando, até se unirem e formarem a estrutura típica das composições

contendo 31% de vidro: grandes poros com paredes entre eles relativamente finas, contendo poros muito menores. A Figura 36 evidencia bem esse tipo de estrutura interna.

A Figura 37 mostra as microscopias da região da borda dos agregados. As amostras A0, G25 e G31 estão em aumento de 100x. Já as amostras contendo carbetto de silício são representadas com aumento de 50x, dado que um aumento maior não permitiria ter uma visão completa da borda. Observa-se claramente que, dentre as composições sem SiC, a amostra G31 (que contém maior conteúdo de vidro) apresenta menor número de poros, mas ao mesmo tempo os tamanhos são maiores. Além disso, a presença de grandes vazios é mais acentuada na composição G31.

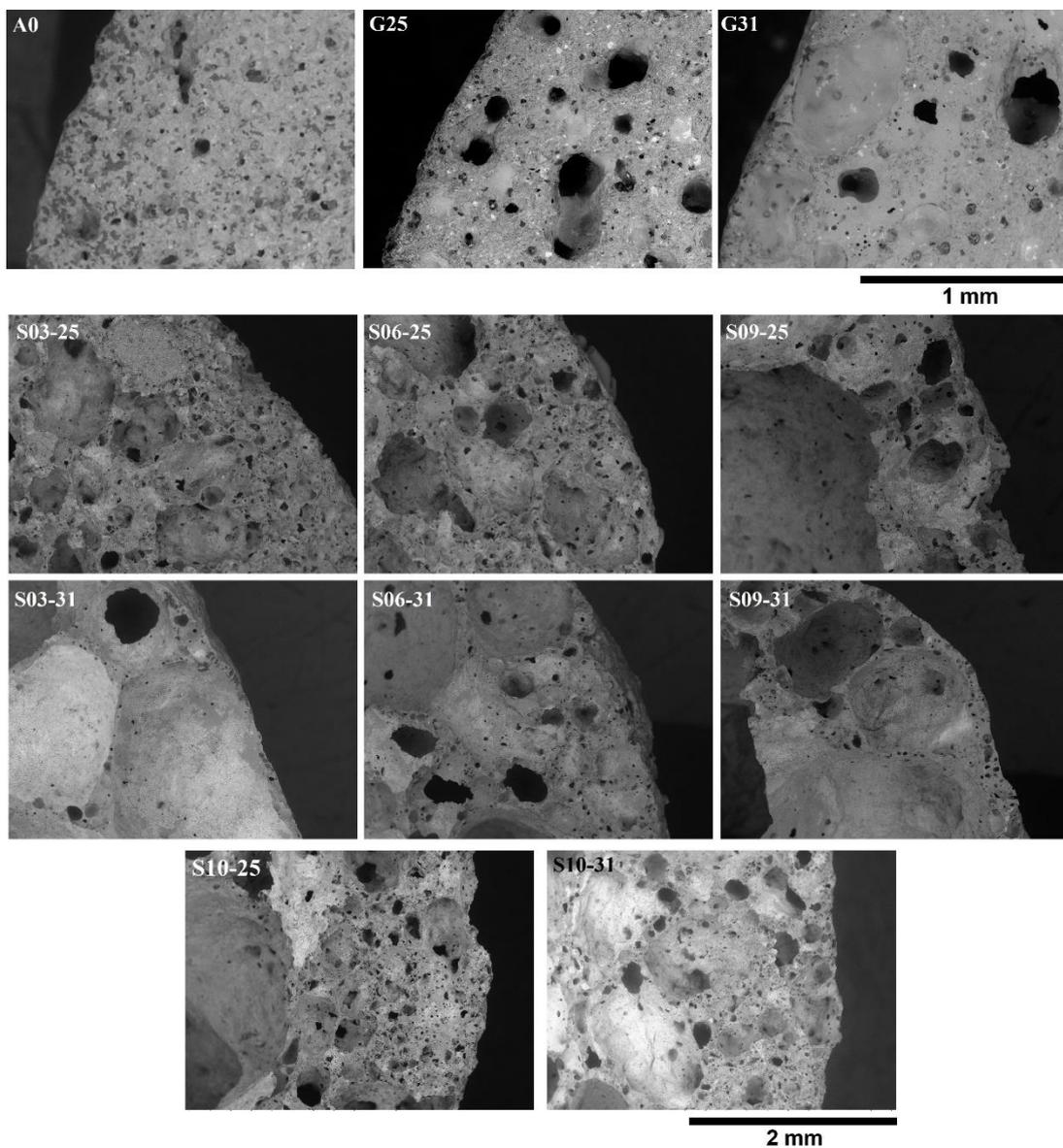


Figura 37: Microscopia eletrônica de varredura da borda dos agregados.

O volume médio da porosidade dos agregados aumentou conforme o teor de vidro também aumentou, devido à ligação entre os poros decorrente do preenchimento de alguns desses vazios pela maior quantidade de vidro disponível (Li *et al.*, 2020). Com a adição de carbetto de silício, nota-se uma tendência ao aumento dos grandes poros desenvolvidos a partir dos poros menores. Além disso, é visível, especialmente a partir da composição S06-25, que o aumento no teor de carbetto de silício promove uma superfície mais rugosa do agregado. Os poros também se apresentam de forma cada vez mais irregular, não possuindo mais a esfericidade que é típica na composição A0 e, em menor grau, na composição G25.

A Figura 37 mostra nitidamente que, na estrutura interna dos agregados, existe uma concentração de pontos ou microrregiões que parecem destoar da matriz homogênea. Esses pontos foram analisados por EDS, em três composições consideradas representativas do total de formulações estudadas: A0, G31 e S10-31, apresentadas, respectivamente, nas figuras 38, 39 e 40.

Na Figura 38, o primeiro ponto (região mais clara) na composição A0 é rico em ferro, que constitui 54,66% da composição (em peso) nessa região. Já o segundo ponto, na região de cor mais escura, possui um alto teor de silício, que constitui 26,18%. O terceiro ponto, que predomina na matriz do agregado, possui composição semelhante à do segundo ponto, mas com um teor mais elevado de alumínio e sódio.

Na Figura 39 (composição G31), o ponto mais claro ainda é constituído principalmente de ferro (42,53%), mas com um maior conteúdo de titânio (12,42%). O segundo ponto apresenta 34,68% de silício, o que é consequência direta da adição do vidro. O terceiro ponto é constituído de 26,32% em peso de silício.

A composição S10-31 (Figura 40), que é a composição com maior conteúdo de SiC no presente trabalho, mostrou ser menos rica em ferro do que as demais composições: apenas 13,72% em peso nessa região mais clara é constituída de ferro e 21,92% de silício. O teor de silício foi relativamente constante nos outros dois pontos, enquanto o percentual de ferro foi mais elevado no segundo ponto (17,77%). As regiões claras foram as que mais refletiram elétrons, e são compostos predominantemente por ferro e depois titânio, provenientes da argila. Já o valor de sódio aumenta quando há vidro na formulação. Destas figuras, há indícios de que os argilominerais reagiram com o vidro formando uma composição homogênea nos diversos pontos de análises.

A Tabela 12 fornece a composição percentual em peso dos elementos nos pontos discutidos. Pode-se aferir que, nas amostras A0 e G31, os pontos mais claros (ponto 1) são ricos em ferro, enquanto os demais pontos são de composição semelhante, com o oxigênio e silício constituindo aproximadamente 75% em peso nessas regiões. Na amostra S10-31, os percentuais em peso dos elementos não variaram de forma tão consistente quanto nas demais amostras, com os teores de silício e sódio permanecendo relativamente constantes nos três pontos estudados.

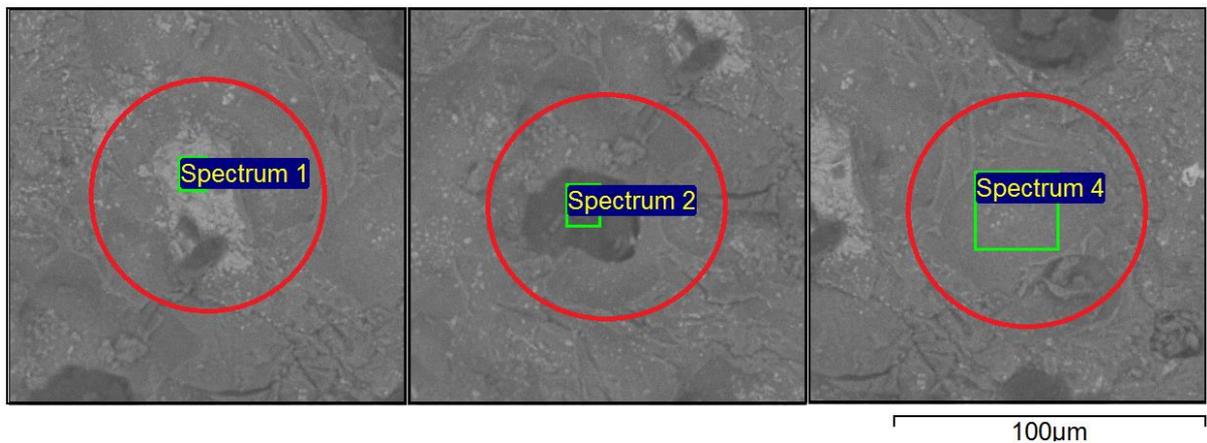


Figura 38: Destaque dos pontos destoantes da matriz na estrutura interna do agregado A0. A primeira coluna mostra os pontos de cor mais clara (ponto 1), a segunda representa os pontos de cor mais escura (ponto 2) e a terceira mostra os pontos de composição predominante na matriz (ponto 3).

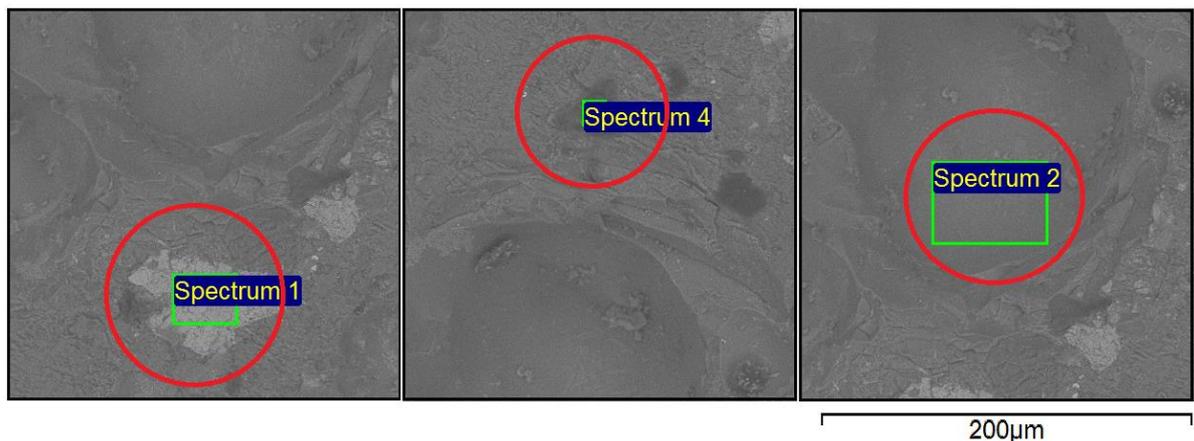


Figura 39: Destaque dos pontos destoantes da matriz na estrutura interna do agregado na composição G31.

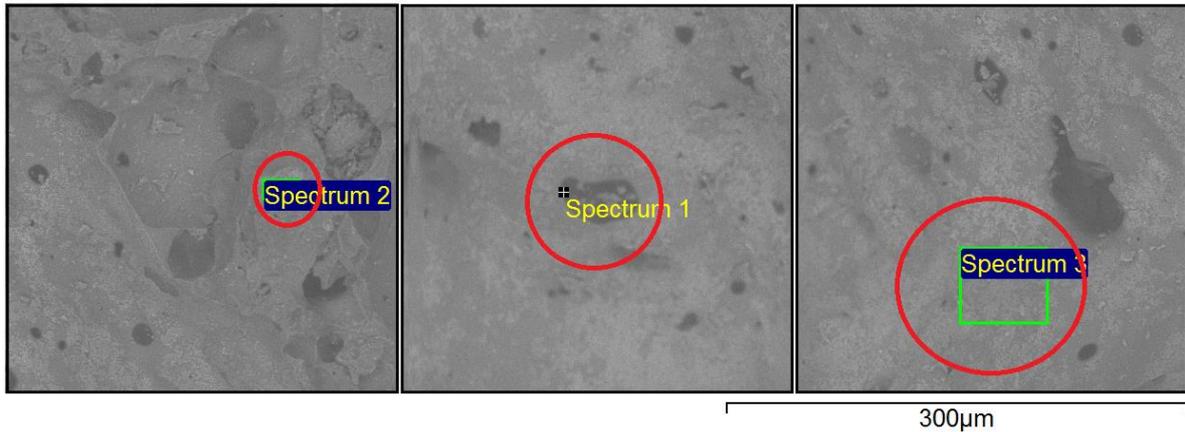


Figura 40: Destaque dos pontos destoantes da matriz na estrutura interna do agregado na composição S10-31.

Apesar das conhecidas limitações da análise EDS, é possível se afirmar que, conforme a região estudada, inclusive certas peculiaridades apresentadas na microestrutura, a composição química varia bastante por toda microestrutura, o que tem duas implicações. Primeiramente, a produção e expansão dos agregados ocorre em condições de não equilíbrio. Segundo, as variações de composição têm forte influência sobre a viscosidade, de modo que o crescimento de poro, por vezes de forma aparentemente desordenada, pode ser uma consequência dessas heterogeneidades composicionais.

O estudo da composição nesses pontos e a própria visualização das microscopias do interior do agregado evidenciam que a estrutura interna não é homogênea e os componentes não estão igualmente distribuídos ao longo do agregado. Isso pode ser consequência de pelo menos duas condições: 1) a diferença na granulometria dos pós utilizados na elaboração dos agregados e 2) a forma de mistura dos pós, que, no presente trabalho, se deu apenas de forma manual.

Tabela 12: composição estimada nos pontos apresentados nas Figuras 37, 38 e 39.

%	A0			G31			S10-31		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Oxigênio	22,94	49,14	50,09	34,67	41,23	50,59	47,89	48,16	55,08
Sódio	0,56	0,76	1,05	1,52	4,75	3,74	3,94	3,05	3,44
Magnésio	0,42	0,96	0,86	-	1,17	1,17	0,69	1,12	1,31
Alumínio	4,06	7,45	8,08	1,87	5,62	5,33	8,7	5,3	5,48
Silício	7,05	26,18	26,66	6,35	34,68	26,32	21,92	19,9	19,41
Potássio	0,29	1,08	2,01	-	1,76	-	1,02	1,06	0,56
Cálcio	-	1,03	1,73	0,6	2,99	2,7	1,25	2,73	1,58
Titânio	10,01	1,25	0,86	12,42	-	-	0,82	0,78	0,7
Ferro	54,66	12,12	8,61	42,53	5,35	10,11	13,72	17,77	12,4

5.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

5.4.1 Resistência à compressão dos agregados

Os resultados dos ensaios de compressão para algumas composições de agregados são apresentados na Figura 41. Nota-se que o agregado constituído apenas de argila possui uma boa resistência à compressão, de aproximadamente 10,7 MPa, bem superior à dos agregados de argila vermelha desenvolvidos por Moreno *et al.* (2020b), que alcançaram entre 6,1 e 2,3 MPa. A baixa porosidade, bem como a dimensão microscópica desses poros (Figura 33), explica a resistência alcançada. Inicialmente, a adição de vidro reduz a resistência para 6,83 MPa com a incorporação de 25% em peso de vidro (G5). Com a adição de um percentual maior, 31,25% (G31), o agregado apresentou praticamente a mesma resistência à compressão, atingindo 6,70 MPa.

Pelo que se pode observar nas Figuras 33 (microscopia ótica), 35 e 37 (microscopia eletrônica de varredura), a estrutura interna desses agregados (G25 e G31), tanto em volume de poros como na dimensão dos mesmos, é muito semelhante, bem como suas densidades (Tabela 7). A adição de vidro leva ao aumento da porosidade e à redução da densidade, o que explica a diferença nas resistências mecânicas. A formulação do agregado com 100% de argila tem uma densidade de 3,12 g/cm³, e G25 e G31 têm densidades de 1,72 g/cm³ e 1,69 g/cm³, respectivamente (queimados a 1150 °C).

Com a adição de carvão de silício, a resistência à compressão dos agregados reduziu consideravelmente. As diferenças na resistência à compressão resultam da contribuição de poros maiores conforme o teor de SiC aumenta, o que fica evidente quando se observa a densidade desses agregados (Tabela 10). A composição S03-25 alcançou 1,65 MPa de resistência à compressão. As composições S06-25, S09-25 e S03-31 permaneceram sempre maior ou igual à 1,00 MPa.

A partir de S06-31, a resistência à compressão dos agregados começa a ficar abaixo de 1,00 MPa, chegando, por fim, à 0,78 MPa na composição S10-31. Para essas três últimas composições (S6-31, S9-31 e S10-31), a densidade variou pouco (respectivamente 0,323, 0,281 e 0,364 g/cm³), o que explica porque a resistência à compressão permaneceu muito próxima. Esses valores em torno de 1,00 MPa são próximos ao obtido por Li *et al.* (2021a) e outros agregados leves comerciais, como Arlita, que apresenta resistência à compressão de 0,981 MPa (Gunning, Hills & Carey, 2009). Valores encontrados por Rodrigues (2018) para

uma argila expansiva foram de 0,80 MPa e de 1,21 MPa para a medição do agregado da Cinexpan.

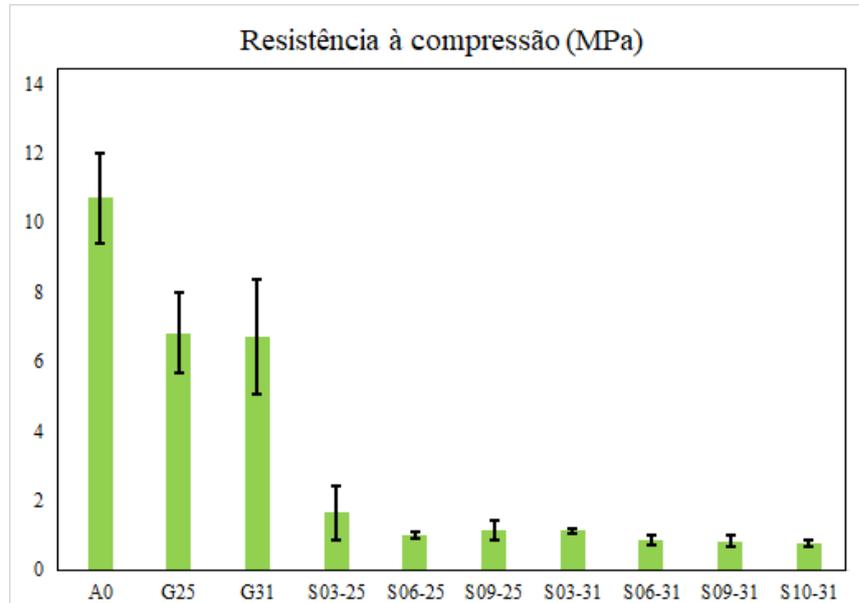


Figura 41: Resistência à compressão de agregados com diferentes percentuais de SiC (0,312 – 1,25%).

Levando em conta os resultados da Figura 41, a partir da composição S06-25, conforme o percentual de SiC foi variando não foi observada uma mudança expressiva na resistência (a variação fica praticamente no desvio padrão). Esse resultado demonstra que a partir de um certo teor de carbetos de silício não há alterações significativas na geração do defeito crítico (poro) ou a própria medição do equipamento não distingue de forma acurada os valores.

5.4.2 Resistência à compressão dos corpos de prova de concreto

A densidade teórica dos corpos de prova cilíndricos, que podem ser vistos na Figura 42, contendo agregados de composição G31 e S10-31, é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13: densidade dos corpos de prova de concreto.

Agregado	Temperatura de queima	Densidade* (kg/m ³)
G31	1200 °C	2.316
S10-31	1150 °C	1.956

*densidade teórica = (%cimento x d cimento) + (% areia x d areia) + (% agregado x d agregado). Considera-se a total evaporação da água. Logo, a densidade teórica será igual $(0,25 \times 3,12) + (0,375 \times 2,65) + (0,25 \times 0,73) = 1,956$ g/cm³ = 1.956 kg/m³. Para o concreto G31: $(0,25 \times 3,15) + (0,375 \times 2,65) + (0,25 \times 2,17) = 2,316$ g/cm³.



Figura 42: Corpos de prova obtidos com agregados G31 e S10-31. **Fonte:** o autor.

Conforme define a NBR 12655, o concreto leve deve ter uma densidade de, no máximo, 2.000 kg/m^3 . Como o concreto com os agregados da composição G31 não atingiu esse valor mínimo, o traço deve ser ajustado para que a densidade seja reduzida a fim de se obter um concreto leve (aumentando-se o volume de agregados empregados na formulação). A densidade dos agregados utilizados no concreto foi de $0,73 \text{ g/cm}^3$ (S10-31) e $2,17 \text{ g/cm}^3$ (G31). Conforme o trabalho de Rodrigues (2018), é possível obter uma massa específica de 1.520 kg/m^3 para concretos com agregados leves, mesmo em tamanhos reduzidos de agregados. No presente trabalho, optou-se por minimizar o teor de agregado leve em benefício da resistência do concreto. Entretanto, o percentual de agregado utilizado no traço pode ser ampliado para que o concreto obtenha uma densidade ainda mais baixa. Também deve-se considerar a produção de agregados em tamanhos maiores, uma vez que os produzidos no presente trabalho, para a confecção dos corpos de prova, foram de tamanhos inferiores aos agregados leves comerciais devido à quantidade limitada de matéria-prima. A Tabela 14 apresenta as estimativas de como seria a densidade do concreto se fossem utilizados tamanhos maiores (agregados apresentados nas Tabelas 7 e 10) ou um teor mais elevado de agregado (outro traço). Utilizando-se tamanhos maiores e um traço com 2 vezes mais agregados, tanto a formulação S10-31 quanto a G31 são capazes de satisfazer aos

requisitos de densidade para um concreto leve, atingindo valores de 1.564 kg/m³ e 1.919 kg/m³, respectivamente.

Tabela 14: Estimativa de densidades de concretos que seriam obtidas se fossem utilizados tamanhos maiores de agregados ou um traço com maior percentual de agregados.

Agregado	Densidade (g/cm³)	Traço	Densidade do concreto (kg/m³)
S10-31	0,36	1:1,5:1:0,5	1.864
G31	1,25	1:1,5:1:0,5	2.086
S10-31 (menor)	0,73	1:1,5:2:0,5	1.711
G31 (menor)	2,17	1:1,5:2:0,5	2.287
S10-31	0,36	1:1,5:2:0,5	1.564
G31	1,25	1:1,5:2:0,5	1.919

A resistência à compressão média do concreto com o agregado S10-31 foi de 14,29 MPa, enquanto a resistência à compressão média do concreto com agregado G31 foi de 17,77 MPa. A Figura 43 apresenta os valores Fck para os corpos de prova estudados. Apesar de os ensaios terem sido realizados após 53 dias, a resistência à compressão de concretos com agregados leves tipicamente já se estabiliza no período de 7 dias. Isso ocorre porque normalmente, aos 7 dias de idade, os valores da resistência à compressão da matriz cimentícia ultrapassam os valores da resistência à compressão do agregado leve, especialmente se o cimento utilizado for de alta resistência inicial, ou seja, a resistência definitiva do concreto não se beneficia na mesma proporção com o aumento da resistência à compressão da matriz cimentícia (Angelin, Lintz & Barbosa, 2017).

O concreto convencional tipicamente apresenta densidade em torno de 2.400 kg/m³, o que coloca os concretos obtidos no presente trabalho em uma categoria intermediária entre o concreto leve e o concreto convencional. Segundo Maycá (2008), para a utilização como concreto leve estrutural, a massa específica do concreto leve deve situar-se entre 800 a 2000 kg/m³ e deve possuir resistência à compressão mínima de 17,5 MPa, valor muito próximo ao do concreto com agregado G31. Já o concreto com o agregado S10-31 pode ser utilizado nas demais aplicações, como blocos vazados sem função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima ou abaixo do nível do solo, uma vez que esse tipo de material demanda uma resistência mínima de 6 MPa, conforme a NBR 6136 (ABNT, 2016).

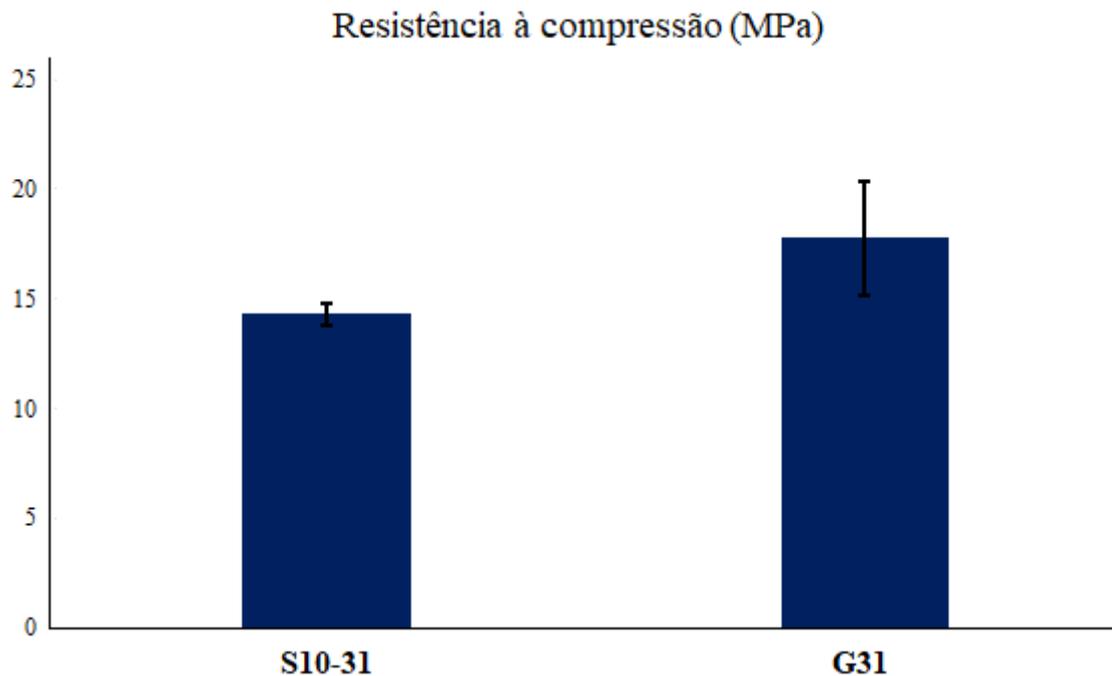


Figura 43: Resistência à compressão média dos corpos de prova com agregados S10-31 e G31.

Outra importante característica do concreto é a resistência à tração direta (F_{ct}), propriedade de difícil obtenção por meio de ensaios mecânicos convencionais, uma vez que é difícil submeter o corpo de prova somente a esforços de tração. Entretanto, os valores de resistência à tração direta podem ser estimados a partir dos valores de resistência à compressão, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014). Ainda segundo essa norma, o módulo de elasticidade (E_{ci}) também pode ser estimado com base no valor de resistência à compressão. A estimativa se dá pelas seguintes equações:

$$F_{ct} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (4.1)$$

$$E_{ci} = 5.600 f_{ck}^{1/2} \quad (4.2)$$

Onde f_{ck} representa a resistência à compressão em MPa. Para os corpos de prova desenvolvidos no presente trabalho, os valores de resistência à tração direta (F_{ct}) e módulo de elasticidade (E_{ci}) estimados com base no ensaio de resistência à compressão são apresentados na Figura 44.

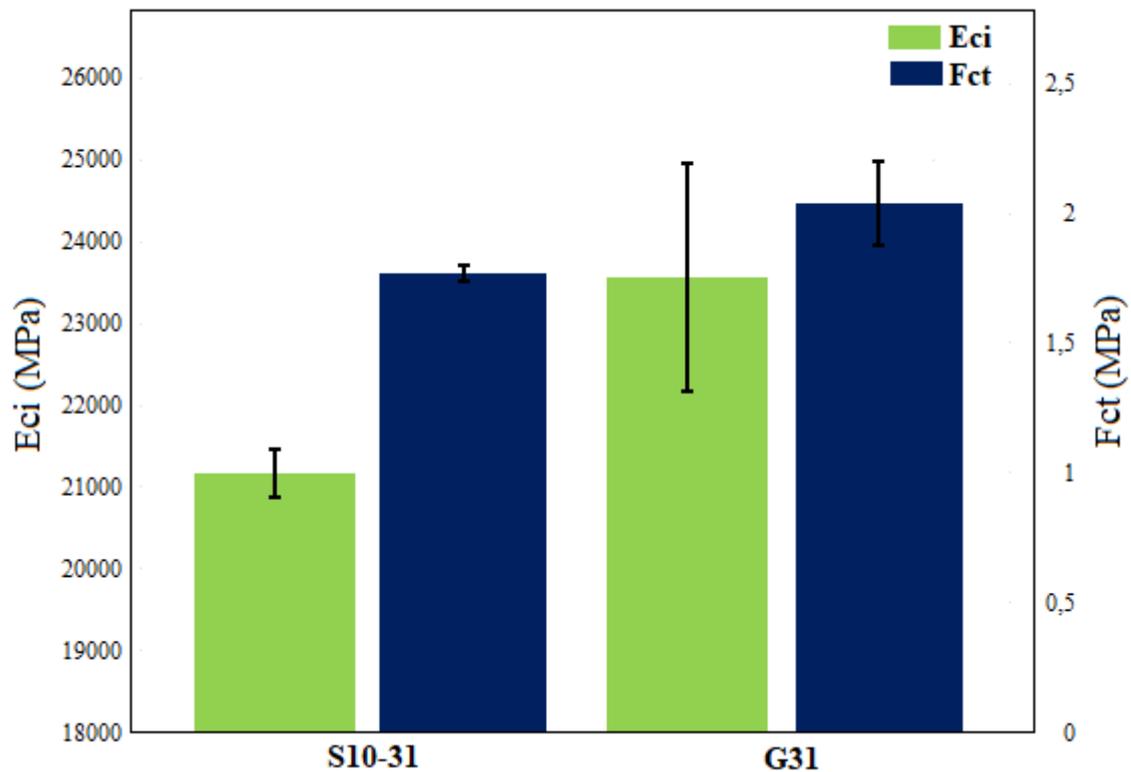


Figura 44: Resistência à tração direta (Fct) e módulo de elasticidade (Eci) médios estimados para os corpos de prova.

Apesar da dificuldade de realização de ensaios de tração em concretos e da obtenção dos valores de resistência à tração direta para esse tipo de material, essa propriedade é essencial porque, em certas estruturas, as solicitações predominantes são de tração na flexão (como é o caso de aplicações de concreto em pavimentos de rodovias e de aeroportos, lajes e vigas) ou tração pura (tirantes). Em geral, a possibilidade de fissuras só ocorre depois que a capacidade de tração do concreto tiver sido esgotada, tornando essa uma importante propriedade em relação à durabilidade de membros estruturais (Oluokun, 1991). Os valores de resistência à tração direta obtidos no presente trabalho ficaram em torno de 1,7 à 2,3 MPa, próximos ao valor de 2,00 MPa já relatado na literatura para concreto convencional (Flores, Stello & Marangon, 2017). Os agregados desenvolvidos podem ser promissores na aplicação em concretos, mas ainda necessitam de avaliações e ensaios para satisfazerem plenamente os critérios de normas técnicas como a NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 16917 (ABNT, 2021).

6. CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida e testada no presente trabalho comprova que argilas que não expandem naturalmente na queima (argilas não autoexpansíveis), como uma argila vermelha comum utilizada na fabricação de tijolos e telhas, podem ser utilizadas na produção de agregados leves, o que significa um aumento expressivo da disponibilidade de matéria-prima para a produção de agregados leves. O efeito expansivo é alcançado através da adição de resíduo de vidro em pó, em percentuais superiores a 25% em peso, e carbetos de silício, em percentuais superiores a 0,312% em peso. Estes percentuais influenciam as temperaturas nas quais é possível obter o efeito expansivo nos agregados leves. No presente trabalho, a expansão almejada foi obtida na temperatura de 1150 °C. Destaca-se que essa temperatura é cerca de 100°C mais baixa em comparação a temperatura apresentada em diversos trabalhos e na indústria.

O vidro reciclado propicia a formação de maior quantidade de fase vítrea no agregado durante a queima, e o carbetos de silício tem papel preponderante na formação de gás ($\text{SiC} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{CO}_2$) e no aumento de tamanho de poros (expansão). Os dois materiais se combinam potencializando o efeito expansivo. Esse efeito expansivo depende, portanto, da quantidade de fase vítrea, bem como sua viscosidade e tensão superficial na temperatura adequada de queima, e a quantidade de gás retida na porosidade e/ou gerada na queima. Portanto, os dois componentes são fundamentais para tornar uma argila não expansiva em matéria-prima para a produção de agregados leves.

A temperatura de queima deve ser definida com cautela, uma vez que a faixa de viscosidade na qual ocorre a expansão sem que ocorram elevados níveis de deformação do agregado é muito estreita. Principalmente, o conteúdo de carbetos de silício e de vidro não pode ser muito elevado ao ponto de promover deformação excessiva no corpo do agregado.

Diferentemente de outros materiais orgânicos, como o grafite – também testado neste trabalho –, uma camada de sílica envolve a superfície das partículas de SiC, devido à oxidação na atmosfera oxidante. Isso torna o SiC resistente à oxidação, pois a taxa de difusão de oxigênio através da camada de sílica é muito lenta. Altas temperaturas sob condições alcalinas levam à um aumento substancial na reação química do SiC com o oxigênio, formando uma grande quantidade de gases CO_2 e CO , que não são eliminados prontamente e podem permanecer no corpo cerâmico, resultando na geração de poros. Considera-se essa

questão importante para explicar a diferença de comportamento entre o grafite e o carbetto de silício como agentes piroexpansivos.

No presente trabalho, considera-se que um percentual de 31,25% de vidro e 0,937% de SiC (formulação S09-31) são ideais para maximizar a expansão sem grande prejuízo à forma dos agregados. Essa composição apresentou uma densidade de $0,281 \text{ g/cm}^3$, muito abaixo do valor exigido para agregados leves, que é de $1,20 \text{ g/cm}^3$, tornando esse material um excelente substituto para os agregados leves comercialmente disponíveis.

Foi demonstrado que os agregados desenvolvidos no presente trabalho podem ser utilizados em concretos com densidade menor que a de concretos convencionais, uma vez que os valores teóricos de densidade média foram de 1.956 kg/m^3 e 2.316 kg/m^3 para os concretos obtidos com os agregados de composição S10-31 e G31, respectivamente. A resistência à compressão atingiu $14,29 \text{ MPa}$ para os corpos de prova com agregados S10-31 e $17,77 \text{ MPa}$ para os corpos de prova com agregados G31. Para esses corpos de prova, a relação água/cimento utilizada foi de 0,5 e a relação agregado/cimento (em volume) foi de 1. O traço pode ser modificado (aumentando o percentual de agregados incorporados no concreto) para que o concreto atinja níveis de densidade ainda mais baixos, permitindo um controle sobre as propriedades desejadas.

Conforme os testes de resistência à compressão, o conteúdo de vidro e de carbetto de silício têm forte influência nas propriedades mecânicas dos agregados, embora essa diferença não seja tão grande a partir da composição S06-25. Diferentes composições podem ser adotadas e direcionadas de acordo com as especificações da aplicação desejada: aplicações estruturais exigem uma maior resistência mecânica e, conseqüentemente, um menor percentual de SiC deve ser utilizado. Já em aplicações que demandam agregados com maior porosidade, pode ser incorporado um maior conteúdo de SiC e vidro. Os agregados desenvolvidos apresentam potencial de aplicação em concretos, mas ainda necessitam de mais avaliações segundo as normas NBR 5739 e NBR 16917, para satisfazerem plenamente todos os requisitos necessários à sua aplicação comercial na construção.

Esse estudo demonstrou a possibilidade de produção de agregados leves com diferentes propriedades físicas e graus de expansão, permitindo o aproveitamento de resíduo de vidro e a utilização de argilas não expansivas, o que pode ser de grande valia em regiões onde a disponibilidade de matérias-primas é limitada.

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Um dos principais inconvenientes na utilização de SiC em agregados leves é a baixa resistência à compressão que os agregados podem atingir em determinadas composições, consequência direta do elevado tamanho de poros em teores superiores a 1% de SiC. Portanto, sugere-se que o tamanho de grão do SiC seja reduzido para granulometria inferior à 20 μm , visto que os escassos trabalhos na literatura que versam sobre a utilização de carbetos de silício como agente expansivo recomendam essa granulometria para melhores resultados.

A faixa de temperatura em que ocorre o efeito expansivo da argila com a adição de vidro e carbetos de silício não é facilmente definida, o que torna necessário a realização de mais estudos sobre a termodinâmica do processo de expansão, bem como a realização de alguma caracterização que mostre cada um dos estágios durante a expansão do agregado leve. O nível de expansão também pode variar conforme o forno utilizado (seja por aquecimento via resistências ou via radiação), portanto também pode ser analisado a influência do tipo de forno no nível de expansão dos agregados.

Apesar de a combinação de carbetos de silício e vidro proporcionarem um excelente efeito expansivo em agregados leves, a utilização de outros materiais de menor custo em substituição ao SiC pode permitir a adoção em larga escala dos procedimentos definidos no presente trabalho para a produção industrial dos agregados a partir de argilas não expansivas.

Os agregados leves são utilizados em diversas aplicações que não se limitam à construção civil. Portanto, pode ser extremamente útil avaliar o comportamento dos agregados obtidos em outras aplicações, como na indústria têxtil (estonagem), geotecnia e agricultura.

8. REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, Brasil, 2022.

_____. **NBR 16917**: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, Brasil, 2021.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, Brasil, 2018.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

_____. **NBR 6136**: Bloco vazado de concreto simples para alvenaria – Requisitos. Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

_____. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

American Concrete Institute. CONCRETE TERMINOLOGY (ACI CT-21), **ACI 213R-03** p.38. Farmington Hills, Michigan, Estados Unidos, 2021.

ADHIKARY, S. K., ASHISH, D. K., RUDŽIONIS, Ž. **Expanded glass as light-weight aggregate in concrete – A review**. Journal of Cleaner Production 313: 127848, 2021.

ALAHACHE, S., WINNEFELD, F., CHAMPENOIS, J.B., HESSELBARTH, F., LOTHENBACH, B. **Chemical activation of hybrid binders based on siliceous fly ash and Portland cement**. Cement and Concrete Composites 66: 10-23, 2016.

ALASKAR, A., ALSHANNAG, M., HIGAZEY, M. **Mechanical properties and durability of high-performance concrete internally cured using lightweight aggregates**. Construction and Building Materials 288: 122998, 2021.

ANGELIN, A. F., LINTZ, R. C. C., BARBOSA, L. A. G. **Uso da argila expandida e sílica ativa no melhoramento dos desempenhos mecânicos, físicos e térmicos de concretos leves estruturais**. Matéria, e- 11938, 2017.

ATYIA, M. M., MAHDY, M. G., ELRAHMAN, M. A. **Production and properties of lightweight concrete incorporating recycled waste crushed clay bricks**. Construction and Building Materials 304: 124655, 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.

- BADOGIANNIS, E. G., CHRISTIDIS, K. I., TZANETATOS, G. E. **Evaluation of the mechanical behavior of pumice lightweight concrete reinforced with steel and polypropylene fibers.** *Construction and Building Materials* 196: 443–456, 2019.
- BOGAS, J. A., NOGUEIRA, R. **Tensile Strength of Structural Expanded Clay Lightweight Concrete Subjected to Different Curing Conditions.** *KSCE Journal of Civil Engineering* 18(6):1780-1791, 2014.
- BOUACHERA, R., KASIMI, R., IBNOUSSINA, M., HAKKOU, R., TAHA, Y. **Reuse of sewage sludge and waste glass in the production of lightweight aggregates.** *Materials Today: Proceedings* 37: 3866–3870, 2021.
- British Standard. **BS EN 206-1 Part 2: Complementary requirements for constituent materials, designed and prescribed concrete, production and conformity.** BSI, Londres, Inglaterra, 2002.
- CHANDRA, S., BERNTSSON, L. **Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology, and Applications**, p.2, 5, 25, 91-99. Noyes Publications, Norwich, Estados Unidos, 2002.
- CHEN, G., LI, F., GENG, J., JING, P., SI, Z. **Identification, generation of autoclaved aerated concrete pore structure and simulation of its influence on thermal conductivity.** *Construction and Building Materials* 294: 123572, 2021.
- CHIOU, I. J., CHEN, C. H. **Effects of waste-glass fineness on sintering of reservoir-sediment aggregates.** *Construction and Building Materials* 38: 987–993, 2013.
- CHOI, S-J., YANG, K-H., SIM, J-I., CHOI, B-J. **Direct tensile strength of lightweight concrete with different specimen depths and aggregate sizes.** *Construction and Building Materials* 63: 132–141, 2014.
- CHUNG, S-Y., ELRAHMAN, M. A., STEPHAN, D., KAMM, P. H. **The influence of different concrete additions on the properties of lightweight concrete evaluated using experimental and numerical approaches.** *Construction and Building Materials* 189: 314–322, 2018.
- CHUNG, S-Y., SIKORA, P., KIM, D. J., MADAWY, M. E., ABD ELRAHMAN, M. A. **Effect of different expanded aggregates on durability-related characteristics of lightweight aggregate concrete.** *Materials Characterization* 173: 110907, 2021.
- CINEXPAN; **Catálogo Técnico Argila expandida 1506 Brita 0**, Várzea Paulista SP, 2018.
- CRUZ, R. C. D., PEROTTONI, C. A., ZORZI, J. E., EMILIANO, J. V. **Technological Characterization of Heavy Clay from the Caí River Valley in Brazil.** *Interceram - International Ceramic Review* 64: 14–19, 2015.
- CUEVAS, K., LOPEZ, M. **The effect of expansive agent and cooling rate in the performance of expanded glass lightweight aggregate as an internal curing agent.** *Construction and Building Materials* 271: 121505, 2021.
- CUI, H. Z., LO, T. Y., MEMON, S. A., XU, W. **Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete.** *Construction and Building Materials* 35: 149–158, 2012.

DOMAGAŁA, L. **The effect of lightweight aggregate water absorption on the reduction of water-cement ratio in fresh concrete.** *Procedia Engineering* 108: 206 – 213, 2015.

DU, H., TAN, K.H. **Properties of high volume glass powder concrete.** *Cement and Concrete Composites* 75: 22-29, 2017.

DUCMAN, V., MLADENVIČ, A., ŠUPUT, J. S. **Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali–silica reactivity.** *Cement and Concrete Research* 32: 223–226, 2002.

European Committee for Standardization. **EN 13055: Lightweight aggregates.** Bruxelas, Bélgica, 2016.

FERIT ÇAKIR, F., VOLKAN ACAR, V., M. RACI AYDIN, M. R., AKSAR, B., YILDIRIM, P. **Strengthening of reinforced concrete beams without transverse reinforcement by using intraply hybrid composites.** *Case Studies in Construction Materials* 15: e00700, 2021.

Figura 2: <https://unsplash.com/photos/3-QB-YKxTKY> <<Acesso em 18/01/2022>>

Figura 4: HAMADA, H. M., THOMAS, B. S., TAYEH, B., YAHAYA, F. M., MUTHUSAMY, K., Yang, J. **Use of oil palm shell as an aggregate in cement concrete: A review.** *Construction and Building Materials* 265: 120357, 2020.

FLORES, J. M., STELLO, C C., MARANGON, E. **Estudo da resistência à tração de corpos de prova de concreto armado.** 9º SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO – SIEPE, Universidade Federal do Pampa, Santana do Livramento, 21 a 23 de novembro de 2017.

GHOULEH, Z., GUTHRIE, R. I. L., SHAO, Y. **Production of carbonate aggregates using steel slag and carbon dioxide for carbon-negative concrete.** *Journal of CO2 Utilization* 18: 125–138, 2017.

GRAZIANO, S. F., ZANELLI, C., MOLINARI, C., GENNARO, B., GIOVINCO, G., CORREGGIA, C., CAPPELLETTI, P., MICHELE DONDI, M. **Use of screen glass and polishing sludge in waste-based expanded aggregates for resource-saving lightweight concrete.** *Journal of Cleaner Production* 332:130089, 2022.

GUNNING, P. J., HILLS, C. D., CAREY, P. J. **Production of lightweight aggregate from industrial waste and carbon dioxide.** *Waste Management* 29: 2722–2728, 2009.

HARRISON, E., BERENJIAN, A., SEIFAN, M. **Recycling of waste glass as aggregate in cement-based materials.** *Environmental Science and Ecotechnology* 4: 100064, 2020.

HEWLETT, P. C., LISKA, M. **Lea’s Chemistry of Cement and Concrete** 5ª ed., p. 762, Butterworth-Heinemann. Oxford, Reino Unido, 2019.

HIRAMATSU, Y., OKA, Y. **Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece.** *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 3, pp. 89-99, 1966.

HUANG, Y. Y., TIEN-JIHMA, T. J., WANG, Y. S., WANG, C. K. **The application of non-Crassulacean acid metabolism edible plant and lightweight expanded clay aggregate to**

achieve joint benefits of thermal insulation mitigation and passive cooling strengthening of extensive green roofs in subtropical regions. *Solar Energy* 201: 944-964, 2020.

JIAHAO, L., LIAN, F. C., HEJAZI, F., AZLINE, N. **Study of properties and strength of no-fines concrete.** *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 357: 012009, 2019.

JIANG, Y., LING, T-C., MO, K. H., SHI, C. **A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products.** *Journal of Environmental Management* 242: 440–449, 2019.

KALPANA, M., TAYU, A. **Experimental investigation on lightweight concrete added with industrial waste (steel waste).** *Materials Today: Proceedings* 22: 887–889, 2020.

KARTHIKA, R. B., VIDYAPRIYA, V., SRI, K. V. N., BEAULA, K. M. G., HARINI, R., SRIRAM, M. **Experimental study on lightweight concrete using pumice aggregate.** *Materials Today: Proceedings* 43: 1606–1613, 2021.

KHATIB, J. M. **Sustainability of Construction Materials** p. 231-232. Woodhead Publishing, Duxford, Reino Unido, 2016.

KIPKEMBOI, B., ZHAO, T., MIYAZAWA, S., SAKAI, E., NITO, N., HIRAO, H. **Effect of C3S content of clinker on properties of fly ash cement concrete.** *Construction and Building Materials* 240: 117840, 2020.

KOCKAL, N. U., OZTURAN, T. **Durability of lightweight concretes with lightweight fly ash aggregates.** *Construction and Building Materials* 25: 1430–1438, 2011.

KOROL, J., GŁODNIOK, M., HEJNA, A., PAWLIK, T., CHMIELNICKI, B., BONDARUK, J. **Manufacturing of Lightweight Aggregates as an Auspicious Method of Sewage Sludge Utilization.** *Materials* 13: 5635, 2020.

KWEK, S. Y., AWANG, H., CHEAH, C. B., MOHAMAD, H. **Development of sintered aggregate derived from POFA and silt for lightweight concrete.** *Journal of Building Engineering* 49: 104039, 2022.

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.

LEE, K. H., LEE, J. H., WIE, Y. M., LEE, K. G. **Bloating Mechanism of Lightweight Aggregates due to Ramping Rate.** *Advances in Materials Science and Engineering* 2647391, 2019.

LEE, K. H., LEE, K. G., LEE, Y. S., WIE, W. M. **Manufacturing and application of artificial lightweight aggregate from water treatment sludge.** *Journal of Cleaner Production* 307: 127260, 2021.

LI, B., JIAN, S., ZHU, J., GAO, X., GAO, W. **Effect of sintering temperature on lightweight aggregates manufacturing from copper contaminated soil.** *Ceramics International* 47: 31319–31328, 2021b.

- LI, H., ZHANG, J., ZHENG, W., CUI, T., YANG, Y. **Study on the Properties and Process Parameters of Different Clays in Disc Granulation.** *Materials* 13: 1714, 2020.
- LI, X., HE, C., LV, Y., JIAN, S., JIANG, W., JIANG, D., WU, K., DAN, J. **Effect of sintering temperature and dwelling time on the characteristics of lightweight aggregate produced from sewage sludge and waste glass powder.** *Ceramics International* 47: 33435–33443, 2021a.
- LI, X., HE, C., LV, Y., JIAN, S., LIU, G., JIANG, W., JIANG, D. **Utilization of municipal sewage sludge and waste glass powder in production of lightweight aggregates.** *Construction and Building Materials* 256:119413, 2020.
- LIHUA, Z., YUNSHENG, Z., CHUANBEI, L., LAIBAO, L., KAIJING, T. **Study on microstructure and bond strength of interfacial transition zone between cement paste and high-performance lightweight aggregates prepared from ferrochromium slag.** *Construction and Building Materials* 142: 31–41, 2017.
- LIM, Y. C., LIN, S-K., JU, Y-R., WU, C-H., LIN, Y-L., CHEN, C-W., DONG, C-D. **Reutilization of dredged harbor sediment and steel slag by sintering as lightweight aggregate.** *Process Safety and Environmental Protection* 126: 287–296, 2019.
- LIU, C., HOU, J., HAO, Y., HAO, H., MENG, X. **Effect of high strain rate and confinement on the compressive properties of autoclaved aerated concrete.** *International Journal of Impact Engineering* 156: 103943, 2021.
- LIU, J., LI, Z., ZHANG, W., JIN, H., XING, F., TANG, L. **The impact of cold-bonded artificial lightweight aggregates produced by municipal solid waste incineration bottom ash (MSWIBA) replace natural aggregates on the mechanical, microscopic and environmental properties, durability of sustainable concrete.** *Journal of Cleaner Production* 337: 130479, 2022.
- LIU, M., WANG, C., BAI, Y., XU, G. **Effects of sintering temperature on the characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment.** *Journal of Alloys and Compounds* 748: 522–527, 2018.
- LO, T. Y., CUI, H. Z. **Advances in Building Technology - Proceedings of the International Conference on Advances in Building Technology** 4–6 Volume I: 859-864, Hong Kong, China, 2002.
- LO, T. Y., CUI, H., MEMON, S. A., NOGUCHI, T. **Manufacturing of sintered lightweight aggregate using high-carbon fly ash and its effect on the mechanical properties and microstructure of concrete.** *Journal of Cleaner Production* 112: 753-762, 2016.
- LYRA, G. P., SANTOS, V., SANTIS, B. C. D., RIVABEN, R. R., FISCHER, C., PALLONE, E. M. J. A., ROSSIGNOLO, J. A. **Reuse of sugarcane bagasse ash to produce a lightweight aggregate using microwave oven sintering.** *Construction and Building Materials* 222: 222–228, 2019.
- MAYCÁ, J.; CREMONINI, R. A.; RECENA, F. A. **Contribuição ao estudo da argila expandida nacional como alternativa de agregado graúdo para concretos leves estruturais (CLE).** Curso de Especialização em Construção Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2008.

- MINDESS, S. **Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete**, 2^a ed., p.309-313, 317-318, Woodhead Publishing, Oxford, Reino Unido, 2019.
- MENEZES, R. R., ÁVILA JÚNIOR, M. M., SANTANA, L. N. L., NEVES, G. A., FERREIRA, H. C. **Comportamento de expansão de argilas bentoníticas organofílicas do estado da Paraíba**. *Cerâmica* 54: 152-159, 2008.
- MOHAMMED, M. S., ELKADY, H., ABDEL- GAWWAD, H. A. **Utilization of construction and demolition waste and synthetic aggregates**. *Journal of Building Engineering* 43: 103207, 2021.
- MOHAMMED, T. U., RAHMAN, M. N., MAHMOOD, A. H., HASAN, T., APURBO, S. M. **Utilization of Steel Slag in Concrete as Coarse Aggregate**. *Sustainable Construction Materials and Technology*, Las Vegas, USA, August 7-11, 2016.
- MORAVIA, W. G., GUMIERI, A. G., VASCONCELOS, W. L. **Efficiency Factor and Modulus of Elasticity of Lightweight Concrete with Expanded Clay Aggregate**. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais* v. 3, 2: 195-204, 2020.
- MORENO-MAROTO, J. M., UCEDA-RODRÍGUEZ, M., COBO-CEACERO, C. J., COTES-PALOMINO, T., MARTÍNEZ-GARCÍA, C., ALONSO-AZCÁRATE, J. **Studying the feasibility of a selection of Southern European ceramic clays for the production of lightweight aggregates**. *Construction and Building Materials* 237: 117583, 2020b.
- 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, 2020a.
- MORENO-MAROTO, J. M., UCEDA-RODRÍGUEZ, M., COBO-CEACERO, C. J., HOCES, M. C., LARA, M. A. M., COTES-PALOMINO, T., GARCÍA, A. B. L., MARTÍNEZ-GARCÍA, C. **Recycling of ‘alperujo’ (olive pomace) as a key component in the sintering of lightweight aggregates**. *Journal of Cleaner Production* 239: 118041, 2019.
- MOSALLAM, S. J., BEHBAHANI, H. P., SHAHPARI, M., ABAEIAN, R. **The effect of carbon nanotubes on mechanical properties of structural lightweight concrete using LECA aggregates**. *Structures* 35: 1204-1218, 2022.
- NADESAN, M. S., DINAKAR, P. **Mix design and properties of fly ash waste lightweight aggregates in structural lightweight concrete**. *Case Studies in Construction Materials* 7: 336–347, 2017.
- NADH, V. S., VIGNAN, G. S., HEMALATHA, K., RAJANI, A. **Mechanical and durability properties of treated oil palm shell lightweight concrete**. *Materials Today: Proceedings* 47: 282–285, 2021.
- NEVILLE, A. M., BROOKS, J. J. **Concrete Technology 2nd Edition**, p.43. Pearson Education, Essex, Inglaterra, 2010.

- NEWMAN, J., CHOO, B. S. **Advanced Concrete Technology: Constituent Materials** p.246. Butterworth-Heinemann, Burlington, Estados Unidos, 2003a.
- NEWMAN, J., CHOO, B. S. **Advanced Concrete Technology: Processes** p.84-85. Butterworth-Heinemann, Burlington, Estados Unidos, 2003b.
- OLUOKUN, F. A. **Prediction of Concrete Tensile Strength from Its Compressive Strength: Evaluation of Existing Relations for Normal Weight Concrete.** ACI Materials Journal. May-June 88, 3: 302–309, 1991.
- PACHECO-TORGAL, F., LOURENÇO, P. B., LABRINCHA, J. A., KUMAR, S., CHINDAPRASIRT, P. **Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks**, p.215-216, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Number 55, Cambridge, Reino Unido, 2015.
- PASSOS, L., MORENO Jr., A. L., SOUZA, A. A. A. **Concreto leve com agregado graúdo proveniente de resíduo cerâmico sob elevadas temperaturas.** Revista Ibracon de Estruturas e Materiais v. 13, 2: 433-454, 2020.
- PASTOR, J.L., ORTEGA, J.M., FLOR, M., LÓPEZ, M. P., SÁNCHEZ, I., CLIMENT, M. A. **Microstructure and durability of fly ash cement grouts for micropiles.** Construction and Building Materials 117: 47-57, 2016.
- PATEL, J. K., PATIL, H., PATIL, Y., VESMAWALA, G. **Production and performance of alkali-activated cold-bonded lightweight aggregate in concrete.** Journal of Building Engineering 20: 616–623, 2018.
- PENG, Y., LIU, Y., ZHAN, B., XU, G. **Preparation of autoclaved aerated concrete by using graphite tailings as an alternative silica source.** Construction and Building Materials 267: 121792, 2021.
- PEYNE, J., GAUTRON, J., DOUDEAU, J., ROSSIGNOL, S. **Development of low temperature lightweight geopolymer aggregate, from industrial Waste, in comparison with high temperature processed aggregates.** Journal of Cleaner Production 189: 47-58, 2018.
- RASHAD, A. M. **A short manual on natural pumice as a lightweight aggregate.** Journal of Building Engineering 25: 100802, 2019.
- RASHAD, A. M. **Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview.** Construction and Building Materials 170: 757–775, 2018.
- REED, J. S. **Principles of Ceramics Processing 2^a ed.**, p.610, Wiley-Interscience, Nova York, Estados Unidos, 1995.
- ROCES, E., MUÑIZ-MENÉNDEZ, M., GONZÁLEZ-GALINDO, J., ESTAIRE, J. **Lightweight expanded clay aggregate properties based on laboratory testing.** Construction and Building Materials 313: 125486, 2021.
- RODRIGUES, A. V. **Aplicação de uma argila expansiva de jazida do Rio Grande do Sul à produção de agregados para concretos leves.** 2018. Dissertação (Mestrado em

Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RODRIGUES, A. V., BRAGANÇA, S. R. **An evaluation of the increased expansion of clay aggregates fired at 1300°C to maximize lightness for non-structural concrete.** Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio. 2021.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**, p.19-21, 57-58. São Paulo: Pini, 2009.

SAHOO, S., SELVARAJU, A. K., PRAKASH, S. S. **Mechanical characterization of structural lightweight aggregate concrete made with sintered fly ash aggregates and synthetic fibres.** Cement and Concrete Composites 113: 103712, 2020.

SARIDEMIR, M., ÇELIKTEN, S. **Investigation of fire and chemical effects on the properties of alkali-activated lightweight concretes produced with basaltic pumice aggregate.** Construction and Building Materials 260: 119969, 2020.

SARIDEMIR, M., ÇELIKTEN, S. **Investigation of fire and chemical effects on the properties of alkali-activated lightweight concretes produced with basaltic pumice aggregate.** Construction and Building Materials 260: 119969, 2020.

SHAN, C., YANG, Z., SU, Z., RAJAN, R., ZHOU, X., WANG, L. **Preparation and characterization of waterproof autoclaved aerated concrete using molybdenum tailings as the raw materials.** Journal of Building Engineering 49: 104036, 2022.

SHIVAPRASAD, K. N., DAS, B. B. **Determination of optimized geopolymerization factors on the properties of pelletized fly ash aggregates.** Construction and Building Materials 163: 428–437, 2018.

SHUI, A., XI, X., WANG, Y., CHENG, X. **Effect of silicon carbide additive on microstructure and properties of porcelain ceramics.** Ceramics International 37: 1557–1562, 2011.

SIM, J-I., YANG, K-H., KIM, H-Y., CHOI, B-J. **Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete.** Construction and Building Materials 38: 854–864, 2013.

SKOTNICZNY, G., KOZIOŁ, M., KOROL, J., PONETA, P. **Production and Evaluation of Synthetic Lightweight Aggregates Based on Mixture of Fluidized Bed Fly Ash and Post-Mining Residues.** Materials 15: 660, 2022.

SOUZA, N. S. L., ANJOS, M. A. S., SÁ, M. V. V. A., FARIAS, E. C., SOUZA, M. M., BRANCO, F. G., PEREIRA, A. **Evaluation of sugarcane bagasse ash for lightweight aggregates production.** Construction and Building Materials 271: 121604, 2021.

THIENEL, K-C., HALLER, T., BEUNTNER, N. **Lightweight Concrete—From Basics to Innovations.** Materials 13: 1120, 2020.

TITTARELLI, F., CARSANA, M., RUELLO, M. L. **Effect of hydrophobic admixture and recycled aggregate on physical–mechanical properties and durability aspects of no-fines concrete.** Construction and Building Materials 66: 30–37, 2014.

TRAORE, Y. B., MESSAN, A., HANNAWI, K., GERARD, J., PRINCE, W., TSOBNANG, F. **Effect of oil palm shell treatment on the physical and mechanical**

- properties of lightweight concrete.** *Construction and Building Materials* 161: 452–460, 2018.
- TUAN, B. L. A., HWANG, C. L., LIN, K. L., CHEN, Y. Y., YOUNG, M. P. **Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete.** *Construction and Building Materials* 47: 334–339, 2013.
- WADEE, A., WALKER, P., MCCULLEN, N., FERRANDIZ-MAS, V. **Lightweight aggregates as carriers for phase change materials.** *Construction and Building Materials* 360: 129390, 2022.
- WANG, X. F., FANG, C., KUANG, W. Q., LI, D. W., HAN, N. X., XING, F. **Experimental investigation on the compressive strength and shrinkage of concrete with pre-wetted lightweight aggregates.** *Construction and Building Materials* 155: 867–879, 2017.
- WANG, X. F., FANG, C., KUANG, W. Q., LI, D. W., HAN, N. X., XING, F. **Experimental investigation on the compressive strength and shrinkage of concrete with pre-wetted lightweight aggregates.** *Construction and Building Materials* 155: 867–879, 2017.
- WEI, Y-L., CHENG, S-H., CHEN, W-J., LU, Y-H., CHEN, K., WU, P-C. **Influence of various sodium salt species on formation mechanism of lightweight aggregates made from coal fly ash-based material.** *Construction and Building Materials* 239: 117890, 2020.
- XI, X., SHUI, A., LI, Y., WANG, Y., ABE, H., NAITO, M. **Effects of magnesium oxychloride and silicon carbide additives on the foaming property during firing for porcelain ceramics and their microstructure.** *Journal of the European Ceramic Society* 32: 3035–3041, 2012.
- 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.
- YANG, S., LU, J.-X., POON, C.S. **Recycling of waste glass in cement mortars: Mechanical properties under high temperature loading.** *Resources, Conservation and Recycling* 174: 105831, 2021.
- YI JIANG, Y., LING, T-C. **Production of artificial aggregates from steel-making slag: Influences of accelerated carbonation during granulation and/or post-curing.** *Journal of CO₂ Utilization* 36: 135–144, 2020.
- YLINIEMI, J., NUGTEREN, H., ILLIKAINEN, M., TIAINEN, M., WESTSTRATE, R., NIINIMÄKI, J. **Lightweight aggregates produced by granulation of peat-wood fly ash with alkali activator.** *International Journal of Mineral Processing* 149: 42–49, 2016.
- YUAN, Q., LIU, Z., ZHENG, K., MA, C. **Civil engineering materials – From Theory to Practice**, p.70-71, 193, Woodhead Publishing, Cambridge, Estados Unidos, 2021.
- ZHANG, C., WANG, G., WU, C., LI, J., WU, S., JIANG, W., WANG, X., WANG, W., FENG, M. **Investigation of hierarchical porous cold bonded lightweight aggregates produced from red mud and solid-waste-based cementitious material.** *Construction and Building Materials* 308: 124990, 2021.

ZHAO, Y., GAO, J., CHEN, F., LIU, C., CHEN, X. **Utilization of waste clay bricks as coarse and fine aggregates for the preparation of lightweight aggregate concrete.** Journal of Cleaner Production 201: 706-715, 2018.

ZORZI, J. E.; ECHEVERREGARAY, S. G.; EMILIANO, J. V.; PEROTTONI, C. A.; CRUZ, R. C. D. **Caracterização de matérias-primas cerâmicas do Vale do Rio Caí.** Cerâmica 58: 509-515, 2012.

ZUKRI, A., NAZIR, R., HASBOLLAH, D.Z.A., MUSTAPHA, A.H., **Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA) as replacement materials for geotechnical application.** Physics and Chemistry of the Earth. Article in press, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103366>.