



**CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ARTUR OTHON SILVA LIMA

**POLIURETANA RECICLADA COMO AGREGADO NA PRODUÇÃO DE
CONCRETO LEVE**

FORTALEZA

2020

ARTUR OTHON SILVA LIMA

POLIURETANA RECICLADA COMO AGREGADO NA PRODUÇÃO DE
CONCRETO LEVE

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao curso de Engenharia Civil
do Centro Universitário Christus, como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Elayne Valério
Carvalho.

Fortaleza

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Centro Universitário Christus - Unichristus
Gerada automaticamente pelo Sistema de Elaboração de Ficha Catalográfica do
Centro Universitário Christus - Unichristus, com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L732p Lima, Artur Othon Silva.
Poliuretana reciclada como agregado na produção de concreto
leve / Artur Othon Silva Lima. - 2020.
66 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro
Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil,
Fortaleza, 2020.

Orientação: Profa. Dra. Elayne Valério Carvalho.

1. Materiais alternativos. 2. Poliuretana. 3. Argila expandida. 4.
Concreto leve. 5. Sustentabilidade. I. Título.

CDD 624

AGRADECIMENTOS

Há tantas pessoas a agradecer, por terem me ajudado na produção e conclusão deste trabalho e dessa importante etapa da minha carreira, que é a conclusão da minha graduação.

Obrigado ao meu grupo de estudo de materiais alternativos para a construção civil (Kalil Nóbrega, Pedro Henrique e André Luis) por terem me ajudado no pontapé inicial no desenvolvimento do trabalho, e de modo especial a Elayne Valério que se tornou minha super-professora-orientadora-amiga e foi parte essencial para a conclusão de toda a minha pesquisa.

Obrigado a Debora Maciel e a Nara Khauca por, além da amizade, terem sido tão companheiras e muito cúmplice em todas as nossas etapas do curso de Engenharia Civil.

Aos meus amigos de graduação, de forma especial a Mariana, Ana Gilza e Assucena, por terem sido tão fundamentais para a convivência na universidade e aos meus amigos Xavier e Rayane, por serem meus apoios nos momentos extra-faculdade.

Agradeço a todos que passaram em minha vida durante esse período e que de certa forma me ajudaram a concluir mais esse objetivo.

RESUMO

A perspectiva de esgotamento de recursos naturais a nível mundial torna imprescindível a adoção de formas de exploração de matéria-prima mais conscientes e alternativas para indústria da construção civil, uma das maiores geradoras de impactos ambientais que resultam na formação de grandes áreas degradadas. Assim, a incorporação de resíduos poliméricos na produção de novos materiais de construção surge como estratégia a fim de minimizar o descarte inadequado de substâncias de difícil decomposição. Portanto, este estudo tem como objetivo avaliar a utilização de resíduos da espuma de poliuretana como agregado graúdo na produção de um concreto leve. Para isso, foi planejada a montagem de cinco traços, com diferentes proporções entre o resíduo da poliuretana e argila expandida, material comumente empregado na produção desse tipo de concreto. Para avaliar a resistência mecânica, realizou-se ensaios de resistência à compressão em períodos de 07 (sete) e 28 (vinte e oito) dias. Os resultados obtidos, no estado endurecido do concreto, apresentaram redução dos valores de densidade dos corpos de prova, inversamente proporcional a quantidade de espuma de poliuretana incorporada. Além disso, os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão apontaram para a diminuição do desempenho mecânico do material avaliado nos testes de 07 dias. Porém, o traço com 75% de poliuretana apresentou maior valor de resistência à compressão. Contudo, apesar do desempenho mecânico superior ao traço referência, a resistência desse produto é insuficiente para aplicação como concreto estrutural. Conclui-se, assim, que a incorporação da poliuretana com dimensões maiores na forma de agregado graúdo é viável para produção de concreto leve sem fins estruturais.

Palavras-chave: Materiais alternativos. Poliuretana. Argila expandida. Concreto leve. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The prospect of depletion of natural resources worldwide makes it essential to adopt more conscious and alternative ways of exploring raw materials for the construction industry, one of the biggest generators of environmental impacts that result in the formation of large degraded areas. Thus, the incorporation of polymeric waste in the production of new construction materials appears as a strategy to minimize the inappropriate disposal of substances that are difficult to decompose. Therefore, this study aims to evaluate the use of polyurethane foam residues as coarse aggregate in the production of lightweight concrete. For that, the assembly of five lines was planned, with different proportions between the residue of polyurethane and expanded clay, a material commonly used in the production of this type of concrete. To evaluate the mechanical resistance, tests of resistance to compression were carried out in periods of 07 (seven) and 28 (twenty-eight) days. The results obtained, in the hardened state of the concrete, showed a reduction in the density values of the specimens, inversely proportional to the amount of incorporated polyurethane foam. In addition, the results obtained in the compressive strength test pointed to a decrease in the mechanical performance of the material evaluated in the 07-day tests. However, the trace with 75% polyurethane showed a higher compressive strength value. However, despite the mechanical performance superior to the reference line, the strength of this product is insufficient for application as structural concrete. It is concluded, therefore, that the incorporation of polyurethane with larger dimensions in the form of coarse aggregate is viable to produce lightweight concrete without structural purposes.

Keywords: Alternative Materials. Polyurethane. Expanded clay. Lightweight Concrete. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visualização microestrutural do concreto de cimento Portland	21
Figura 2 - Breve Histórico da Utilização do Concreto Leve	24
Figura 3 - Concreto Leve (Tipos).....	26
Figura 4 - Microscopia da superfície interna da argila expandida	27
Figura 5 - Produção de Poliuretana. (A) di-isocianato de parafenileno e Etilenoglicol, utilizados na fabricação da Poliuretana; (B) a reação de polimerização a partir dos monômeros; e (C) a formação da espuma expansiva à base de poliuretana.....	29
Figura 6 - Reação de polimerização da Poliuretana.....	29
Figura 7 - Análise microscópica da Espuma de Poliuretana	30
Figura 8 - Metodologia do Trabalho	36
Figura 9 - Dimensões dos corpos de prova.....	41
Figura 10 - Montagem dos corpos de prova.....	43
Figura 11 - Corpos de Prova nos moldes cilíndricos	43
Figura 12 - Posicionamento da Carga Para Realização do Teste de Resistencia à Compressão.....	45
Figura 13 - Posicionamento da carga para o teste de resistência à tração por compressão diametral	46
Figura 14 - Tipo de ruptura dos corpos de prova	52
Figura 15 – Corpos de prova pós rompimento	52
Figura 16 - Corpos de prova após o ensaio de compressão diametral	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição dos Municípios com Coleta Seletiva no Brasil em 2018.....	17
Gráfico 2 – Massa dos corpos de provas aos 07 e 28 dias.....	48
Gráfico 3 – Densidade de cada traço desenvolvido apresentado pelos corpos de prova.	49
Gráfico 4 - Resistência a compressão dos corpos de prova	50
Gráfico 5 - Resistencia a tração por compressão diametral dos corpos de prova.....	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição das seções do presente trabalho	14
Quadro 2 - Classificação dos materiais descartados	17
Quadro 3 - Requisitos requeridos ao concreto	22
Quadro 4 - Tipos de concreto e suas principais características.	25
Quadro 5 - Tipos de Reciclagem para a Poliuretana.....	32
Quadro 6 - Caracterização da Areia Natural	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades químicas e físicas da Argila Expandida.....	37
Tabela 2 - Caracterização do cimento.....	39
Tabela 3 - Quantitativo dos materiais em cada traço de concreto desenvolvido.....	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Objetivos	13
1.1.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	13
1.1.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	13
1.2	Estrutura do Trabalho.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	Sustentabilidade e a construção civil	15
2.2	Concreto na indústria da construção civil.....	19
2.2.1	<i>Concreto de Cimento Portland.....</i>	19
2.2.2	<i>Concreto leve.....</i>	23
2.2.3	<i>Agregados para o concreto leve.....</i>	26
2.2.4	<i>Concreto leve sustentável</i>	28
2.3	Poliuretana.....	28
2.3.1	<i>Espuma expansiva de poliuretana</i>	31
2.3.2	<i>Aplicações.....</i>	33
2.3.3	<i>Impactos causados pelo descarte incorreto da poliuretana.....</i>	35
3	METODOLOGIA	36
3.1	Caracterização dos Materiais	37
3.1.1	<i>Argila Expandida.....</i>	37
3.1.2	<i>Poliuretana.....</i>	37
3.1.3	<i>Cimento Portland</i>	38
3.1.4	<i>Aditivo</i>	39
3.1.5	<i>Areia Natural.....</i>	39
3.1.6	<i>Água.....</i>	40
3.2	Métodos de Pesquisa	40
3.2.1	<i>Produção dos Corpos de Prova.....</i>	40
3.2.2	<i>Pré Molhagem da poliuretana e betonagem do concreto.....</i>	42
3.2.3	<i>Moldagem dos Corpos de Prova.....</i>	42
3.2.4	<i>Análise da Densidade</i>	44
3.2.5	<i>Avaliação do concreto no estado rígido</i>	44
3.2.6	<i>Avaliação microestrutural.....</i>	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48

4.1	Densidade	48
4.2	Resistencia à Compressão Axial.....	50
4.3	Resistencia à tração por compressão diametral.....	53
5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

O processo construtivo dentro da Engenharia está em constante transformação. Nas últimas décadas, houve um expressivo crescimento do número de pesquisas visando o desenvolvimento de novos materiais de construção civil, sendo impulsionado pelo avanço tecnológico. Muitas dessas investigações envolvem introduzir novos métodos, tornar o processo de produção mais sustentável e evitar o descarte inapropriado de resíduos.

Um exemplo é a União Europeia que introduziu políticas de reaproveitamento e reciclagem de materiais e resíduos em grandes quantidades, o que resultou em diversos benefícios como economia de custos e espaços na etapa de armazenamento, redução da demanda por materiais de construção de recursos naturais (CALDERÓN *et al.*, 2018). Nesse contexto, Chen *et al.* (2018) reutilizou material plástico reciclável como agregado na produção de pavimentos viários. Seus resultados indicam que o novo pavimento apresenta melhor resistência ao gelo, quando aplicado em regiões frias, melhorando o atrito entre os automóveis e o pavimento e, assim, diminuindo o número de acidentes de trânsito ocasionados por derrapagem.

Outra forma de tornar o processo construtivo mais sustentável, além da substituição parcial ou total dos materiais convencionais por materiais cuja produção gere menores impactos ambientais, é o reaproveitamento de materiais que seriam descartados na produção de novos componentes. Um exemplo é o uso de plásticos – um dos principais componentes dos resíduos em obras – na composição do concreto. Essa adição produz um concreto mais leve e menos oneroso, dando a esse tipo de resíduo a possibilidade de reciclagem (GADEA *et al.*, 2010).

O concreto originado do cimento Portland possui versatilidade, alta resistência à compressão e durabilidade, dando a ele, de forma mais ampla, um papel importante na engenharia. Contudo, é possível enumerar algumas limitações que podem ser encontradas durante seu processo construtivo, como seu peso próprio, baixas resistências à tração e a presença de alguns agentes químicos que favorecem processos de degradação (NEVILLE, 2015).

No sentido de resolver a problemática do peso próprio, que aumenta os custos com elementos estruturais, diversos tipos de concretos leves têm encontrado ampla aplicação, principalmente com o intuito de vedação. Diante disso, investigou-

se o aperfeiçoamento a fim de reduzir a massa específica e o peso próprio das cargas na fundação, resultando na diminuição do custo de produção da obra final. Outra finalidade atraente desse produto é a capacidade de melhorar o conforto térmico de um empreendimento, reduzindo sua absorção do calor. Dentro desta linha de desenvolvimento, podem-se destacar o Concreto Leve Estrutural (CLE) e o Concreto Modificado com Polímeros (PCM). Ao longo dos anos, cresceu a aceitação desses produtos no mercado que foram cada vez mais empregados em processos construtivos.

A adoção de um material plástico, como componente da produção do concreto é, portanto, viável, principalmente em casos em que são reutilizados os materiais que teriam como destino o descarte inadequado, aumentando os volumes de lixões e aterros sanitários. Isso se justifica porque os materiais plásticos são amplamente utilizados em diversos setores industriais. Em seu anuário, a ABIPLAST (2017) expõe que o setor da construção civil é responsável por 25,2 % do consumo de plástico no Brasil, ficando acima de setores como o de alimentos e de artigos de comércio em atacado e varejo, por exemplo. Estes valores expostos mostram que o setor que mais consome plástico é o da construção civil, sejam eles utilizados em substituições, como no caso da utilização de forros de Policloreto de Vinila (PVC) ao invés dos de gesso, da utilização de esquadrias plásticas em substituição às de madeira ou alumínio, ou até mesmo no caso do uso de dormentes ferroviários do tipo polimérico em vez dos mais comuns como o de madeira e o de concreto. Assim, é indiscutível a importância da indústria do plástico, que gera empregos e contribui para o desenvolvimento do setor de materiais de construção.

As principais resinas de plástico consumidas no Brasil são PVC, PET (Poli tereftalato de etila), EVA (Acetato-vinilo de etileno), EPS (Poliestireno expandido), Poliuretana e plásticos reciclados diversos. No campo da construção civil, são produzidas quantidades significativas de resíduos na forma de diferentes subprodutos, dos quais apenas 29,7% são reciclados, 39,5% são recuperados através de processos de recuperação de energia. Na maioria dos países, o principal destino desses resíduos são os aterros e lixões. Como uma estimativa aproximada, o montante de poliuretana é de 7,7% da demanda global, uma vez que tem ampla aplicação em isolamento de edifícios, indústria automotiva e espumas isolantes para geladeiras (CALDERÓN *et al.*, 2018) .

A poliuretana foi inicialmente desenvolvida como substituta da borracha. Nos dias atuais, a espuma expansiva à base de poliuretana é usada como preenchimento e fixação de estruturas de vedação, como esquadrias, que possibilitam a substituição do contramarco de alvenaria, eliminando riscos de surgimento de manifestações patológicas, garantindo também uma maior leveza à edificação, aumentando a produtividade e diminuição dos custos gerais de produção construtiva.

Portanto, neste trabalho, avaliou-se a aplicação da espuma de poliuretana como agregado graúdo na produção de concreto leve. Para isso, foi realizado um estudo comparativo com corpos de prova de concreto, utilizando poliuretana e argila expandida. Foram verificados o desempenho mecânico e microestrutural.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um concreto leve incorporado com resíduo de espuma à base de poliuretana como agregado graúdo e avaliar seu desempenho físico, microestrutural e mecânico, comparativamente ao concreto leve com argila expandida.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Produzir corpos de prova de concreto com poliuretana e argila expandida como agregado leve;
- ✓ Analisar a densidade obtida pelo concreto produzido;
- ✓ Realizar ensaio no estado endurecido de resistência à compressão e à tração na compressão diametral para avaliar o desempenho mecânico do novo concreto leve produzido;
- ✓ Determinar a quantidade ideal de poliuretana no traço do concreto.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco seções principais, descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Descrição das seções do presente trabalho

Seção	Descrição
Introdução	Consta a justificativa e relevância do presente estudo, com uma abordagem inicial sobre o conteúdo pesquisado, juntamente com o objetivo do trabalho a ser desenvolvido.
Referencial teórico	É feita uma revisão dentro da literatura embasada em publicações acadêmicas, normas e livros diversos sobre o assunto a fim de fundamentar a parte teórica do trabalho.
Materiais e métodos	É apresentada a metodologia desenvolvida no trabalho, onde são expostos os materiais e os métodos fundamentados por normas e ensaios brasileiros e ilustrado como foi feito o trabalho.
Resultados	São apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento do trabalho e a discussão fundamentada na literatura.
Conclusão	São feitas as considerações finais, concluindo trabalhos realizados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Diversos aspectos devem ser considerados quando se trata do reaproveitamento de um material para substituição parcial ou total em um elemento construtivo, desde os benefícios técnicos e econômicos que o reaproveitamento poderá trazer, bem como a melhor estratégia de execução. Esta seção apresenta uma explanação de tópicos relacionados ao tema, fornecendo a fundamentação teórica necessária para maior entendimento do presente estudo.

2.1 Sustentabilidade e a construção civil

A sustentabilidade tem se tornado um aspecto de grande relevância no contexto atual marcado pelo crescente aumento da população e escassez de recursos. De acordo com estudos demográficos, a população mundial ultrapassará os 9 bilhões de pessoas em 2050 (PNUD, 2019) e, associado ao aumento populacional, teremos o aumento da demanda por alimento, água, energia e habitação.

A adoção de procedimentos sustentáveis de projeto, operação e manutenção orientados para a preservação do meio ambiente se tornará cada vez mais necessário e para atingir os objetivos do desenvolvimento sustentável, só será possível com o envolvimento das partes públicas, privadas e da sociedade.

Existem algumas vertentes para caracterizar os projetos como sendo sustentável. Carvajal-Arango *et al.*, (2019) categorizou em três principais aspectos: os de características de proteção ambiental, quando considera economia de consumo de energia e água, controle nas emissões atmosféricas e cuidados com a qualidade do solo, fauna e flora; econômico, quando considera as características referentes aos custos, qualidade e tempo de construção, produtividade, incertezas e riscos; e social, quando preza por segurança, saúde, condições de trabalho, relação e influência com a comunidade local .

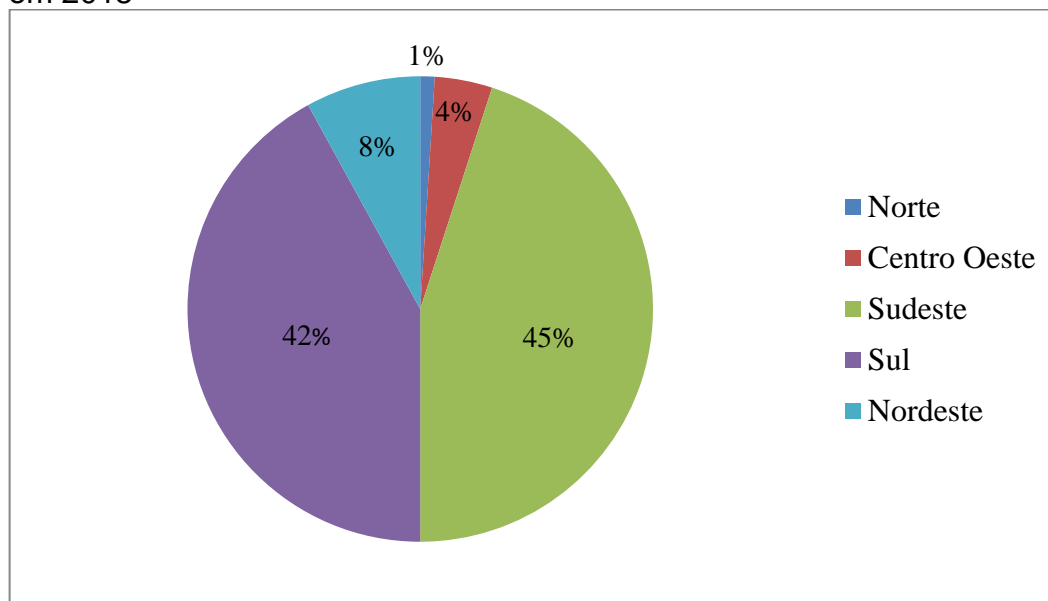
A sustentabilidade é um caminho a ser percorrido para evitar uma catástrofe em diversas áreas da sociedade e isso pode ser alcançado através da adoção de uma abordagem multidisciplinar que abrange vários recursos, como: economia de energia, melhor uso de materiais, reutilização e reciclagem e controle de emissões (OKE *et al.*, 2019).

Produzir sustentavelmente na área da construção civil pode ser um desafio em razão de diversos fatores, desde a necessidade de obtenção de diversos tipos de materiais naturais até o descarte correto de resíduos. Carvajal-Arango *et al.* (2019) afirma que a condição de sustentabilidade está diretamente associada à eficiência com que o sistema produtivo é capaz de transformar recursos ambientais em bem-estar social.

Para Kibert (2016), a aplicação das seguintes ferramentas é essencial para redução de impactos ambientais: minimizar o consumo e maximizar a reutilização de recursos; preferir recursos renováveis e recicláveis; proteger a natureza, criando um ambiente saudável e não tóxico; e buscar qualidade no ambiente construído. Já Machado, Link e Pereira (2019) afirmam que, para que seja fielmente aplicada a sustentabilidade em obras de construção civil, é preciso relacionar principalmente a gestão (desde o planejamento da obra, durante a construção até o seu final) com a destinação de forma responsável dos resíduos. Sempre pôr em prática ações que minimizem impactos ambientais que poderiam ser causados por descartes inadequados quanto por utilização de matéria prima de forma exagerada e abusiva.

Dados da CEMPRE (2018) citam que muitas cidades no país ainda não contam com a coleta seletiva de resíduos, ação que seria importante para a destinação correta dos resíduos da construção civil. Apenas 17% dos municípios brasileiros possuem coleta seletiva dispõe de algum programa de seleção de resíduos e a maioria desses municípios ficam localizados nas regiões Sul e Sudeste. O Gráfico 1 mostra a distribuição entre as regiões do país dos municípios que oferecem sistema de coleta seletiva.

Gráfico 1 - Distribuição dos Municípios com Coleta Seletiva no Brasil em 2018



Fonte: Adaptado de CEMPRE (2018).

Os resíduos da construção civil não são considerados tão perigosos quando comparados com os resíduos de serviços de saúde, por exemplo. Porém, a disposição irregular desses materiais pode gerar problemas ambientais, devido a possibilidade de presença de materiais químicos para poluir o lençol freático; problemas de saúde pública, por favorecer a proliferação de vetores de doenças; e problemas estéticos, por prejudicar o visual urbano de uma cidade. A norma NBR 10004 (ABNT, 2004) categoriza os materiais descartados conforme o risco para que possam ter uma destinação mais adequada. Essa classificação está exposta no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação dos materiais descartados

Classe	Definição
I	Perigosos. Aqueles que apresentam periculosidade ou uma das características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
II	Não Perigosos.
II-A	Não Inertes. São os que não se enquadram nem como perigosos, nem como inertes, podendo ter propriedades, tais como, biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
II-B	Inertes. Os que após o ensaio de solubilidade, não apresentou em nenhum dos constituintes alguma solubilidade a concentrações superiores aos padrões de solubilidade da água.

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2004a).

Os resíduos plásticos se enquadram na classificação de resíduos Classe II, ou seja, resíduos sólidos não perigosos. Apesar disso, quando descartados inadequadamente, os plásticos causam diversos danos ambientais. A maioria dos plásticos não é biodegradável; muito pelo contrário, são materiais extremamente duráveis e, portanto, boa parte dos plásticos produzidos e descartados hoje irá persistir no ambiente por muitas décadas (OLIVEIRA, 2012).

Tendo os materiais plásticos como principal tipo de resíduos pela indústria da construção civil, a ABIPLAST (2017) listou as principais vantagens de reciclagem dos plásticos. Fazendo uma analogia quantitativa, a reciclagem de uma tonelada de plástico reduz a emissão de 1,53 toneladas de gases do efeito estufa, economia de 75% de energia e de 450 L de água que seria usada na produção.

Os descartes da construção civil ainda são em sua maioria destinada para aterros de bota-fora, em margens de rios e córregos, de terrenos baldios, sem nenhum tratamento preliminar. Essa ação traz consequências ambientais como assoreamento e entupimento de curso d'água, além de favorecer o desenvolvimento de vetores nocivos à saúde pública (AMARIO, 2013).

Oke *et al.* (2019) realizou um estudo em que mostra que os profissionais da construção civil em vários locais do globo possuem médio conhecimento de práticas sustentáveis em maiores níveis e propõe a aplicação de regulamentos e formulação de legislação que apoie a construção sustentável.

Por outro lado, Marques, Bissoli-Dalvi e Alvarez (2018) citam alguns métodos que já são comuns na construção civil e que contribuem para os preceitos sustentáveis como o uso de protocolos e métodos com oferecimento de certificações a empreendimentos bem avaliados, dentre eles estão as cidades do Rio de Janeiro/RJ, que certifica os empreendimentos sustentáveis com o selo Qualiverde, e Belo Horizonte, que certifica com o Selo BH, bonificando a empresa e a construção com redução de impostos. O autor ainda destaca que, dentre todas as regiões, o Sul é onde possui a maior média de iniciativas de incentivos por municípios.

A construção civil é considerada uma grande recicladora de resíduos provenientes de outras indústrias e dela mesma, tendo como exemplos os resíduos como a escória granulada de alto forno e as cinzas volantes oriundos das indústrias siderúrgicas, entre outros, que são incorporados rotineiramente na produção de tipos de concretos e pavimentações (LIMA *et al.*, 2018).

2.2 Concreto na indústria da construção civil

Concreto é qualquer produto ou massa produzido a partir de um meio cimentante, formado a partir da reação entre um cimento, água e agregados, que dependendo do tipo que seja usado, é formado diferentes tipos de concreto, cada um com propriedades específicas (NEVILLE, 2015).

2.2.1 Concreto de Cimento Portland

Até o Século XIX, pouco se conhecia acerca da proporção adequada entre os materiais constitutivos dos concretos e argamassas, quando na França foi constatado experimentalmente que uma determinada relação entre o cimento e areia conduzia à máxima resistência para as argamassas. Foi a partir daí que o tipo de formação de concreto mais tradicional nas construções, teve sua descoberta, com intensificação de uso a partir do Século XX.

O cimento tem grande importância para a sociedade, por imprimir na civilização atual e em suas cidades uma espécie de “face” comum. As obras e construções contemporâneas, especialmente nos grandes centros, fazem amplo uso do cimento como elemento de ligação, concretagem e elementos estruturais, entre muitos outros usos (MAURY, 2012).

A utilização do cimento é considerada um método construtivo bastante difundido na atual sociedade, o qual é aplicado em mais diversos tipos de construções, desde pequenas obras até as grandes obras da engenharia moderna. Devido a essa versatilidade, recebeu diversos incentivos em pesquisas, fazendo com que o concreto de cimento Portland apresentasse um enorme desenvolvimento nas últimas décadas (HELENE; TUTIKIAN, 2011).

A mistura é formada por cimento do tipo Portland, água e agregados, além da possibilidade da inclusão de aditivos e adições minerais, que tem se tornado cada vez mais frequente nas fabricações dos concretos atuais. Eles são os principais responsáveis por consumirem a produção de cimento produzida no mundo.

A proporção de água-cimento e a distribuição granulométrica definem a fluidez da mistura, pelo modo em que a massa cimentícia envolve as diversas partículas de agregados em diversas dimensões. Essa mistura, nas primeiras horas, tem a capacidade de ser moldada e após o endurecimento adquire resistência

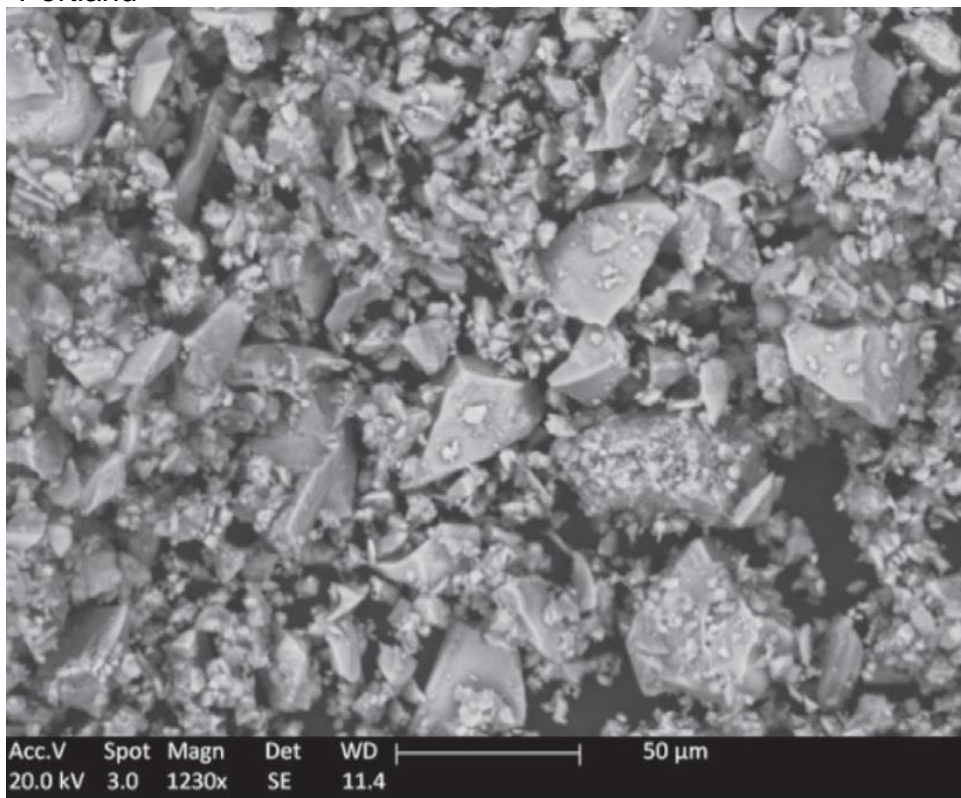
mecânica capaz de torna-lo um material de excelente desempenho estrutural (HELENE; ANDRADE, 2010).

O concreto de cimento Portland é um dos materiais que mais consome energia em sua produção, e representa cerca de 10% das emissões de CO₂ da substância para a atmosfera (DE PEREIRA *et al.*, 2018). A produção de cimento está associada à emissão de gases de efeito estufa, incluindo metano, óxido nitroso e dióxido de carbono na atmosfera e estima-se que a produção de uma tonelada de cimento exija cerca de 1,5 tonelada de matéria-prima e libere quase uma tonelada de dióxido de carbono na atmosfera (FARHAN; SHEIKH; HADI, 2019).

Os impactos gerados pelo processo produtivo do cimento podem ocorrer em praticamente todas as suas fases, desde a extração da matéria prima, produção, até a sua disposição final, revelando o papel da indústria do cimento como elevado potencial poluidor (LORENCETTI; MARÇAL, 2017). Por isso, a busca por novos ligantes com níveis mais baixos de emissão de CO₂, em comparação com os do cimento Portland, torna-se um desafio para as próximas pesquisas a serem desenvolvidas.

o cimento portland é composto principalmente por óxido de cálcio e dióxido de silício em maiores proporções, além de óxido de ferro, óxido de alumínio, óxido sulfúrico, entre outros (FIGUEIREDO; ÇOPUROĞLU; SCHLANGEN, 2019). A Figura 1 ilustra a formação do concreto de cimento Portland microestruturalmente.

Figura 1 - Visualização microestrutural do concreto de cimento Portland



Fonte: (FARHAN; SHEIKH; HADI, 2019).

O concreto possui duas fases distintas e características durante o período de formação. A primeira é definida como a fase fresca que corresponde ao intervalo de tempo necessário para que o concreto possa ser misturado, transportado, lançado e adensado, e tem uma duração aproximada de uma a cinco horas. A outra fase é quando o concreto já atingiu o seu endurecimento, obtendo propriedades de resistências semelhante as rochas (HELENE; ANDRADE, 2010).

Alguns requisitos básicos são esperados que o concreto produzido atenda. Em obras onde é utilizado o material existem testes e análises de verificação do mesmo em estados molhados e secos. Helene e Tutikian (2011) citam alguns desses requisitos mais necessários ao concreto e os principais métodos e testes de verificação que estão expressos no Quadro 3.

Quadro 3 - Requisitos requeridos ao concreto

Requisito	Descrição	Normas com Métodos de Testes e Controles
Resistencia mecânica	Capacidades de Resistencia a compressão, geralmente para concretos destinados a obras correntes; e de Resistencia a tração, comum em projetos de pavimento de concreto.	NBR 5738 (ABNT, 2015a); NBR 5739 (ABNT, 2018); NBR 12655 (ABNT, 2015b); NBR 6118 (ABNT, 2014); NBR 14931 (ABNT, 2004b); NBR 8953 (ABNT, 2015c).
Trabalhabilidade	Capacidade de serem coesos e viscosos, devendo assim permitirem que sejam transportados adequadamente até sua posição final sem apresentar segregação bicheiras, ninhos, exsudação, variações de cor e escorrimentos exagerados.	NBR NM 33 (ABNT, 1998a); NBR 67 (ABNT, 1998b); ASTM C143/C143M-10 ^a (ASTM, 2010).
Durabilidade	Capacidade de serem duráveis frente às solicitações às quais serão expostos durante sua vida útil	NBR 6118 (ABNT, 2014); NBR 12655 (ABNT, 2015b); NBR 14931 (ABNT, 2004b);
Deformabilidade	Capacidade de se deformarem, relacionado principalmente ao módulo de elasticidade, a retração hidráulica, a deformação inicial ou imediata e, principalmente, a deformação lenta (fluência)	NBR 8224 (ABNT, 2012); NBR 8522 (ABNT, 2017); NBR 131 (ABNT, 1997);

Fonte: Adaptado de Helene; Tutikian (2011).

Lima (2005) afirma que as principais propriedades do concreto sofrem alteração quando ele é exposto a altas temperaturas. Por isso, há grande necessidade de elementos de proteção que estejam sempre inseridas junto aos elementos de concreto a fim de proteger as devidas construções de sinistros de incêndios.

Além das características citadas anteriormente, Helene e Tutikian (2011) comentam sobre a tendência de requerer para o concreto propriedades sustentáveis, onde possa ser possível produzir os materiais evitando impactos ao meio ambiente e construir com menos uso de matéria prima, além de investimento em pesquisas sobre a reutilização de concretos na construção de diversos outros métodos construtivos.

2.2.2 Concreto leve

Concreto leve é definido como aqueles que possuem em sua composição agregados de menores densidades e menores massas específicas em comparação com os concretos convencionais. Dependendo do tipo de agregado, traço e dosagem da mistura, concretos produzidos com agregados leves podem atingir resistências moderadas e altas. Geralmente são produzidos a base de ligantes hidráulicos e possuem alta porosidade e absorção de água (GOMES *et al.*, 2015).

Além das características citadas, o concreto leve se diferencia do concreto convencional dada suas alterações quanto às propriedades térmicas, trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de deformação, retração e fluência. Angelin (2014) também cita que o concreto leve pode trazer uma maior produtividade para uma obra em razão de seu peso próprio baixo que ocasiona uma melhor facilidade de transporte das peças formadas nesse tipo de concreto, gerando dessa forma uma redução de custos.

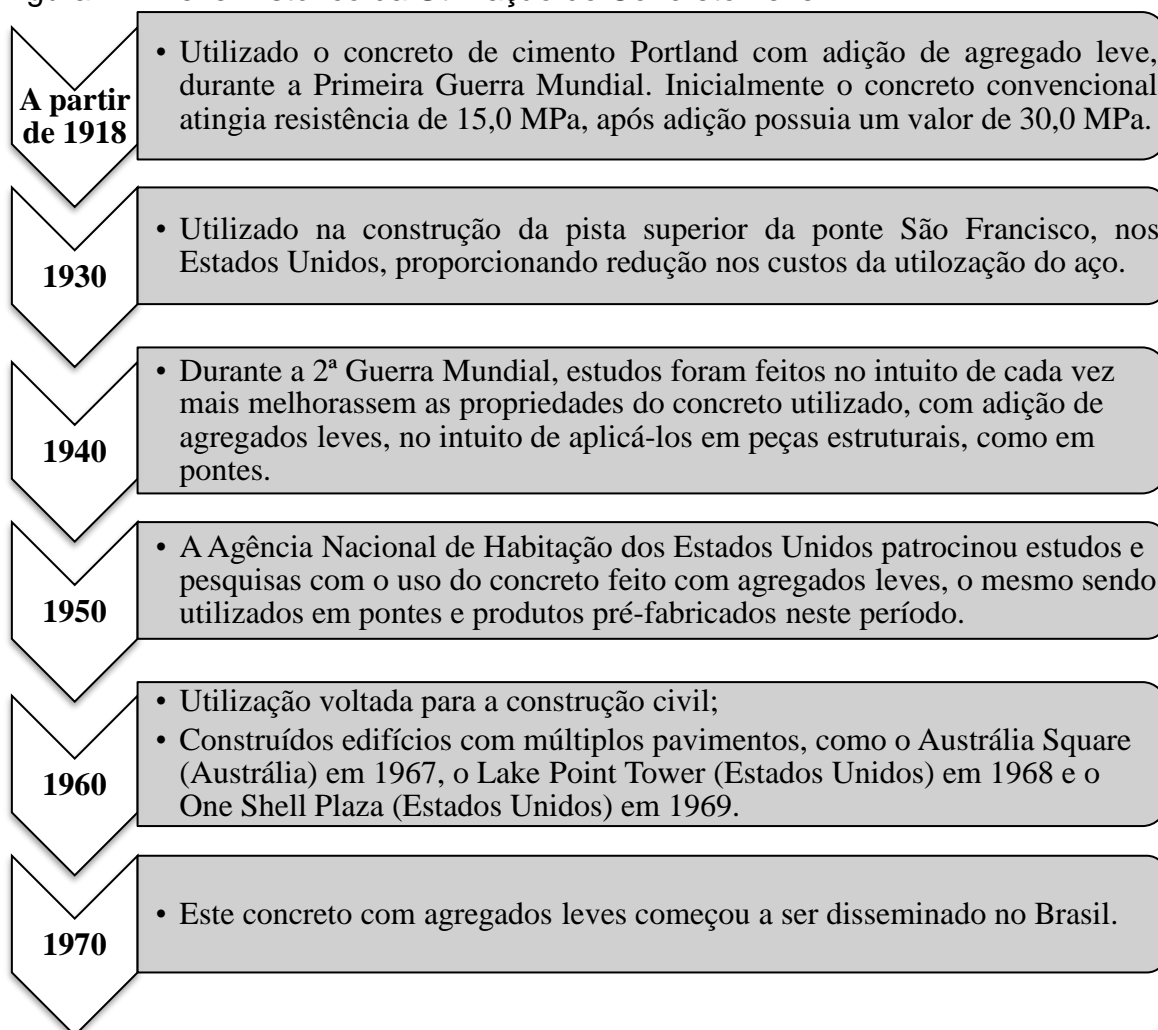
A produção do concreto leve deu-se da necessidade por materiais adequados nas proximidades das regiões vulcânicas. Uma das primeiras indicações do uso de concreto leve na história ocorre na atual cidade de El Tajin, no México, onde construtores pré-colombianos, em 1.100 anos a.C., utilizavam uma mistura a base de pedra pome, ligante de cinzas vulcânicas e cal (ROSSIGNOLO, 2009).

Durante o Império Romano e Bizantino, os romanos construíram vários dos monumentos históricos utilizando o concreto leve. Naquela época o agregado leve mais comumente utilizado era os adquiridos de materiais vulcânicos naturais. Somente a partir do Século XX, foram introduzidos o xisto e argila expandida, fazendo com que a prática da utilização de concreto leve fosse difundida e comercializada para todo o mundo (FERREIRA, 2015).

Com a finalização da Segunda Guerra Mundial, houve um grande impulso na determinação das propriedades do concreto a partir de estudos com diferentes tipos de agregados leves, visando a sua aplicação em peças estruturais, tais como tabuleiros de pontes e edifícios com vários andares.

Para ilustrar, a Figura 2 dispõe de informações referentes a algumas aplicações de concreto leve dentro da história, especificamente no Século XX, expondo diferentes utilizações no mundo.

Figura 2 - Breve Histórico da Utilização do Concreto Leve



Fonte: Adaptado de (SILVA, 2003).

A partir de 1970, no Brasil, foram realizados estudos e utilizações destas misturas. Neste mesmo período, fora implantada uma unidade de fabricação de agregados leves, com a finalidade de produção de elementos pré-fabricados leves e os mesmos utilizados diretamente na construção civil (ANGELIN, 2014).

O desenvolvimento tecnológico da produção de concreto leve como material estrutural, pós Século XX, foi proporcionado pelo aumento do desempenho dos constituintes do concreto, que permitiu a melhoria da sua capacidade resistente e criou espaço a novos tipos de aplicação estrutural. Sendo aplicado na construção de pontes, com enfoque maior na parte do tabuleiro, de coberturas de grandes vãos, sempre usufruindo da redução de peso próprio e espessura da estrutura (COSTA, 2012).

Durante o Século XXI, foram realizados ensaios em laboratórios, em diferentes estados brasileiros, no intuito de analisar o desempenho da adição de agregados leves diversos para este tipo de concreto. Isto é visto, dada pesquisa bibliográfica em artigos científicos que expõem tais resultados.

O concreto leve pode ser classificado de acordo com sua aplicação, seja ela estrutural, de vedação ou de enchimento. Cada tipo é descrito no Quadro 4.

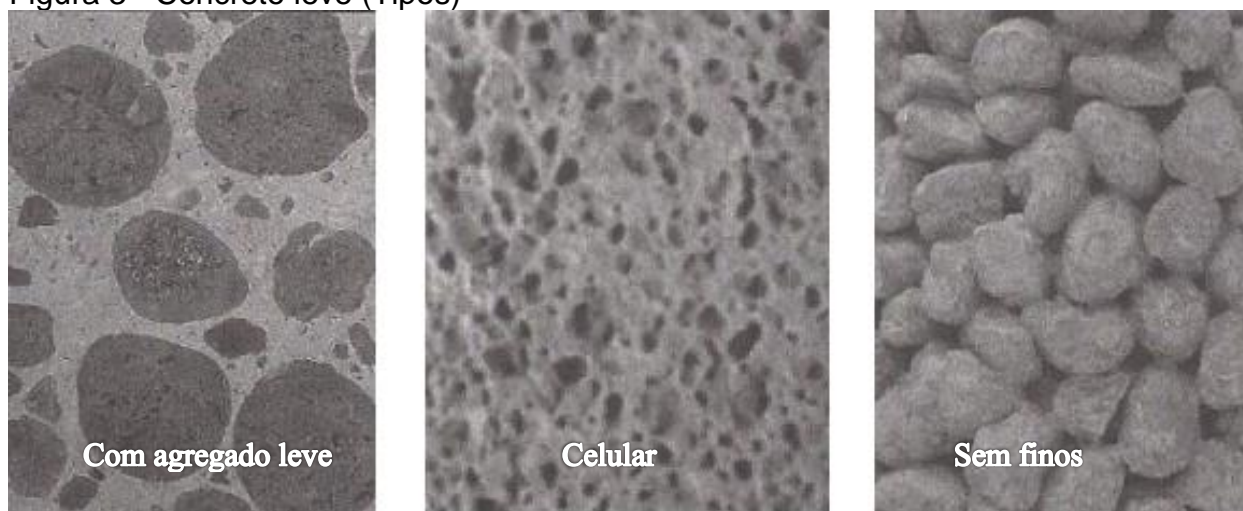
Quadro 4 - Tipos de concreto e suas principais características.

Tipo de concreto	Descrição
Estrutural	Por apresentar baixos valores referentes à massa específica, implica diretamente na redução do peso dos elementos cimentícios, este tipo de concreto vem sendo aplicado em estruturas com o intuito de diminuir as cargas a serem destinadas as fundações, por exemplo. (ANGELIN, 2014).
Vedação	Os blocos de concreto leve são utilizados no intuito de trocar calor entre o interior e o exterior da edificação. Alternativa esta escolhida dada as propriedades deste material utilizado, já que o mesmo reduz a absorção de calor em relação ao uso de blocos convencionais (SCOBAR, 2016).
Enchimento	Utilizados em função não estrutural, dada sua baixa resistência à compressão, como no enchimento de lajes e contrapiso.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Também podem ser classificados de acordo com o material utilizado em sua mistura, podendo ser do tipo concreto leve com agregado leve, concreto celular ou aerado e concreto sem finos. O primeiro substitui total ou parcialmente os agregados convencionais pelos leves atingindo resistências aceitáveis para fins estruturais. O segundo é resultado da ação de produtos acrescentados à pasta do concreto que reagem produzindo bolhas de ar. O terceiro tipo utiliza apenas aglomerantes e agregados graúdos, sendo sua resistência relacionada às propriedades e quantidade de agregados e cimento utilizados. Estas classificações podem ser ilustradas na Figura 3, de modo a visualizar como se comportam as partículas e os vazios entre elas, para cada tipo de concreto.

Figura 3 - Concreto leve (Tipos)



Fonte: Rossignolo (2009).

Essa configuração mostra que diferentes granulometrias implicam em diferentes propriedades para o concreto e como já dito sua resistência é alterada em cada tipo a partir dos materiais utilizados por ele.

2.2.3 Agregados para o concreto leve

Existem diversos agregados leves que podem ser utilizados em substituição total ou parcial aos agregados convencionais para que seja formado o concreto leve, desde que eles não possuam massa unitária no estado seco e solto acima de $1,12 \text{ g/cm}^3$ para os agregados miúdos e de $0,88 \text{ g/cm}^3$ para os agregados graúdos (GOMES *et al.*, 2015). Podem ser de origem natural ou artificiais.

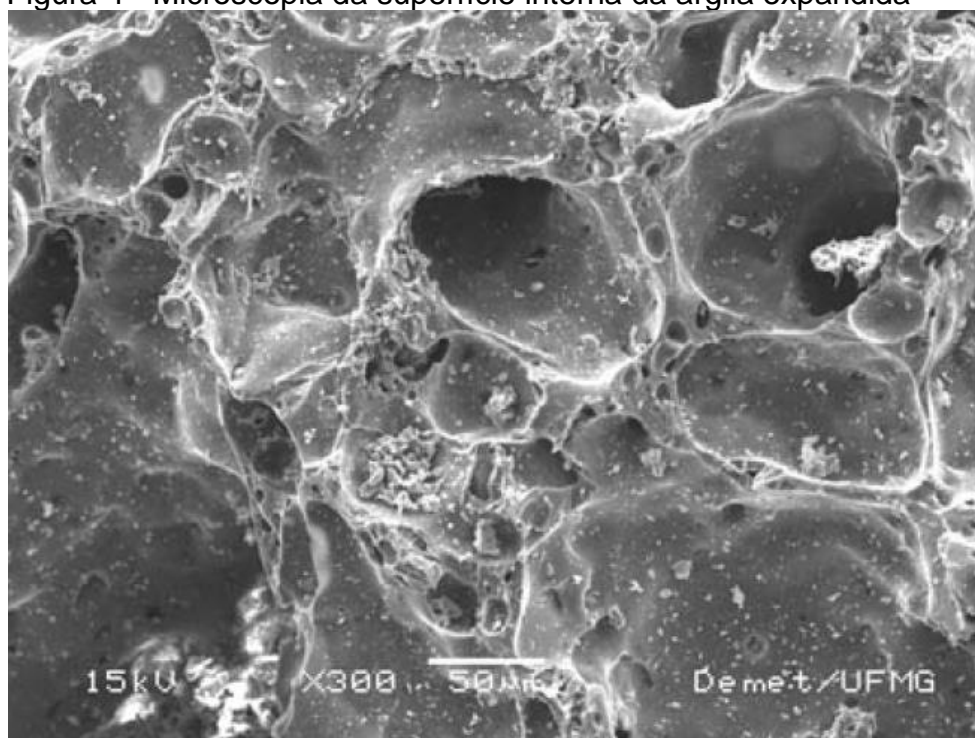
Os agregados leves naturais mais utilizados foram, os de origem vulcânica. Estes agregados têm, geralmente, uma densidade muito reduzida e, conseqüentemente, baixa resistência, mas, em contrapartida, possuem elevadas propriedades isolantes. A capacidade de absorção de água é elevada, devido à sua estrutura interna de elevada porosidade (COSTA, 2012). Entre os principais exemplos de agregados leves naturais, podemos citar a pedra-pomes, a escória vulcânica e o tufo vulcânico.

Os agregados leves produzidos artificialmente são obtidos, em sua maioria, através de tratamento químico e térmico de matérias primas. Possuem maior resistência a compressão e maior durabilidade quando comparados aos agregados leves naturais. Um dos agregados artificiais mais comumente utilizados e pesquisados

para obtenção do concreto leve são a argila expandida e o poliestireno expandido (EPS). A utilização de cada um deles trás características particulares quanto ao uso da água. Enquanto a argila expandida, com a alta porosidade presente na mesma contribui com a absorção da água pelo concreto, o EPS, por ter características hidrofóbicos, dificulta a absorção da água (ROSSIGNOLO, 2009). Dentre os outros exemplos de agregados leves artificiais estão os xistos betuminosos, a escória de alto forno, a cinza volante, a perlite e o vidro expandido.

A argila expandida é o produto obtido por aquecimento de alguns tipos de argila na temperatura em torno de 1200°C. Nesta faixa de temperatura uma faixa dos constituintes dos materiais se funde, gerando uma massa viscosa. Enquanto isso, a outra parte se decompõe quimicamente liberando gases que são incorporados pela massa viscosa, formando uma estrutura porosa quando seca, com volume expandido de até sete vezes do inicial (MORAVIA *et al.*, 2004). A seguir a Figura 4 ilustra microscopicamente a morfologia da superfície interna de uma argila expandida.

Figura 4 - Microscopia da superfície interna da argila expandida



Fonte: Moravia *et al.* (2004)

Os principais fatores que influenciam a resistência à compressão do concreto de agregado leve são as propriedades dos agregados e a composição do

concreto, por isso faz-se necessário um melhor estudo e entendimento dos agregados e suas propriedades mecânicas (GARCIA *et al.*, 2016).

2.2.4 Concreto leve sustentável

As propriedades requeridas aos agregados leves são semelhantes as obtidas pelos agregados reciclados de resíduos, também conhecido como agregados sustentáveis para a produção de concretos leves sustentáveis (GOMES *et al.*, 2015). Estudos da diversidade de propriedades desses agregados se fazem necessários em razão de diferentes formatos e composições desses agregados, para que seja conhecida as particularidades dos diferentes tipos de concretos leves sustentáveis.

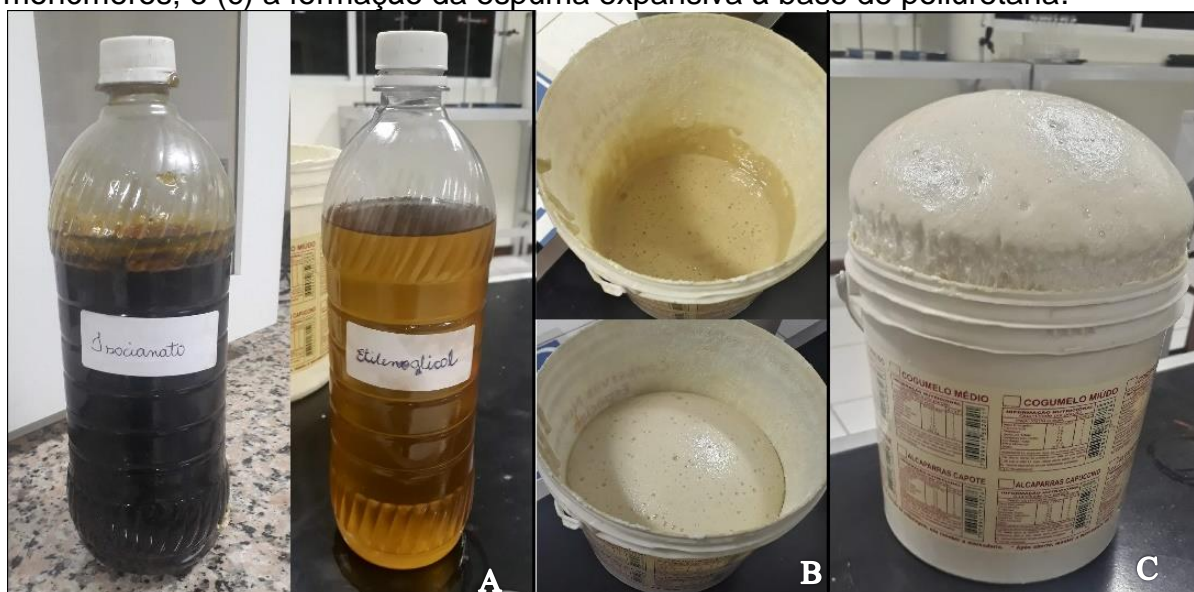
Nikbin e Golshekan (2018) fizeram um estudo de substituição de agregados convencionais por resíduos de Poliestireno Expandido (EPS) e obtiveram resultados de diminuição da densidade aparente, porém, o novo concreto produzido apresentou reduções de 73% de resistência a compressão e de 71% de resistência a tração, além da perda de resistência a tenacidade na fratura. Sayadi *et al.* (2016) também analisou que a inclusão de EPS no concreto, fornece ao mesmo uma menor condutividade térmica e uma menor resistência ao fogo.

O uso de resíduos de borracha é outra possibilidade para reaproveitamento a ser empregado como agregado no concreto leve. Hernandez; Barbosa (2016) observaram que quanto maior o teor de borracha na mistura, menores são a densidade e resistência mecânica no concreto e atendem aos parâmetros de auto adensibilidade, leveza e conforto térmico. Já Feng *et al.* (2019) que quando há a substituição de 30% de agregados por borracha, o concreto apresenta características de boa deformabilidades adequada para aplicações de vias de tráfego pesado.

2.3 Poliuretana

A poliuretana faz parte da classe dos polímeros moleculares e seu uso é muito difundido em diversos segmentos de indústrias. Esse material tem formação molecular através da combinação de um isocianato com uma hidroxila. Os tipos de cadeias poliméricas com os tipos de ligações uretânicas diversifica o resultado do tipo de poliuretana gerado (STALTER; MORAES; BREHM, 2016). A Figura 5 apresenta os monômeros e o processo de produção da poliuretana.

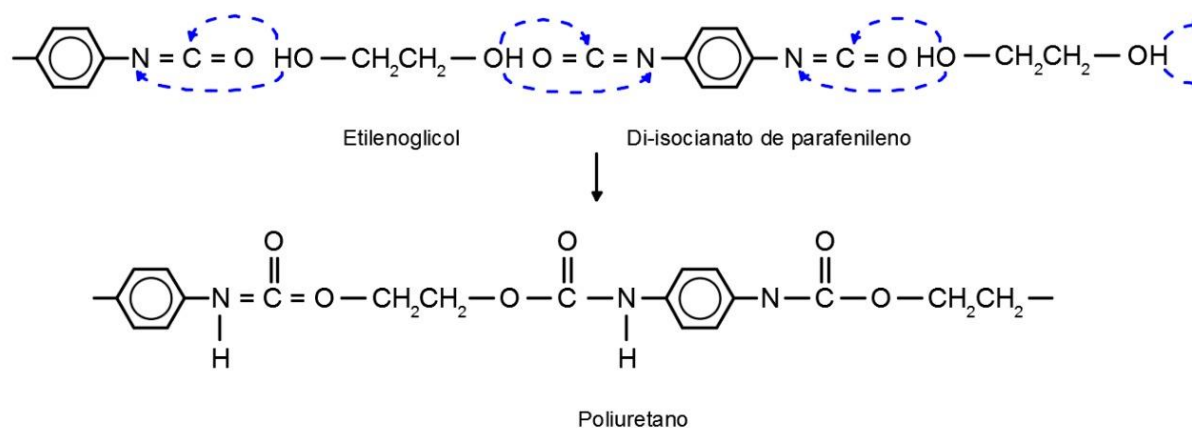
Figura 5 - Produção de poliuretana. (a) di-isocianato de parafenileno e etilenoglicol, utilizados na fabricação da poliuretana; (b) a reação de polimerização a partir dos monômeros; e (c) a formação da espuma expansiva à base de poliuretana.



Fonte: Autor.

Essa classe de material é composta tipicamente de materiais de baixo peso molecular. Segundo Costa *et al.* (2017), a espuma de poliuretana é resultado das bolhas formadas pelo gás liberado quando ocorre a polimerização. A Figura 6 esquematiza essa combinação molecular que causa essa polimerização.

Figura 6 - Reação de polimerização da Poliuretana

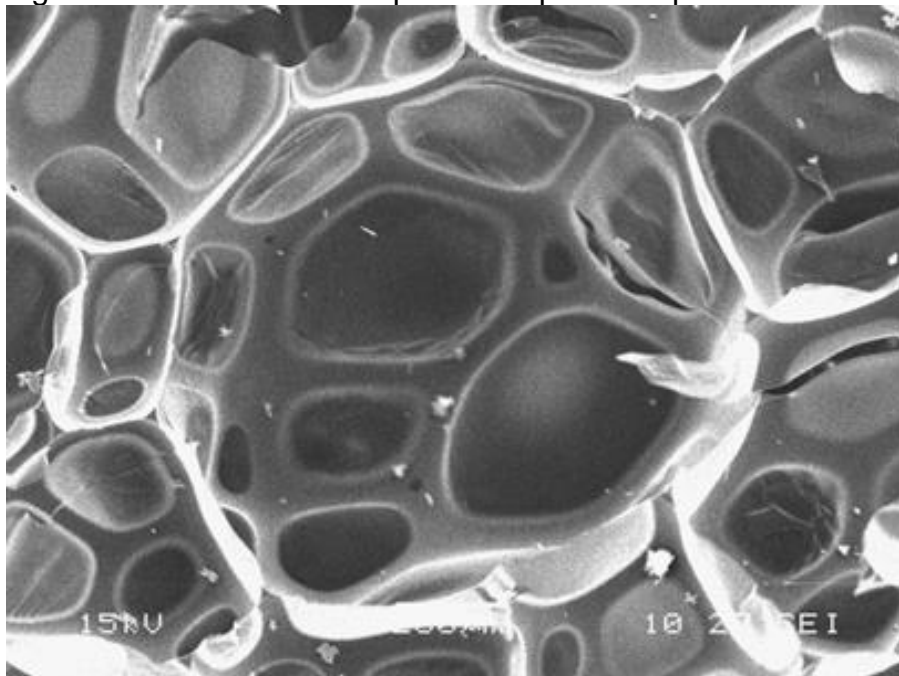


Fonte: Adaptado de Cangemi; Santos; Claro Neto (2009)

Essas bolhas moldam microcompartimentos cheios de ar, que são interligados em uma conformação tridimensional formando a espuma. A Figura 7

mostra a microestrutura da espuma de poliuretana, sendo possível observar os citados compartimentos de ar.

Figura 7 - Análise microscópica da espuma de poliuretana



Fonte: Junco *et al.* (2012).

A presença desses micros compartimentos de ar compõem a espuma de poliuretana conferindo a esse material uma boa aptidão como isolante acústico e térmico, além de ser bastante leve e moldável.

O uso de outros monômeros para a produção de poliuretana tem sido estudado, priorizando materiais naturais. Por exemplo, o Moreira e Silveira (2018) desenvolveram uma pesquisa na qual a produção da poliuretana foi realizada com o óleo da mamona, fornecendo para o produto uma melhora na solicitação a tração.

A poliuretana é formulada e processada em diferentes formas: termorrígidos termoestáveis, elastômeros macios e duros, revestimento, fibras, espumas flexíveis, rígidas e semirrígidas. Isso concede a poliuretana uma grande versatilidade o que possibilita de que sejam aplicados em diferentes locais, tendo como exemplo, a aplicação em pequenas aberturas e na uniformização de superfícies irregulares (JUNCO *et al.*, 2012).

O uso e produção da poliuretana está em constante crescimento. No ano de 2000 a produção anual era de 1 milhão de toneladas, passando para 3,5 milhões

de toneladas em 2007, e atingindo a marca de 7,5 milhões de toneladas em 2011 (YANG *et al.*, 2012).

Dessa forma, existe também a tendência de aumento nos volumes de resíduos desse material descartado na natureza e, conseqüentemente, cresce a preocupação com melhores técnicas de descarte. Stalter, Moraes e Brehm (2016) afirmam que o fato de a poliuretana ser um polímero termofixo, ou seja, pode ser moldado apenas uma vez, contribui para os altos níveis de resíduos do material.

Siqueira, Stramari e Folgueras (2004) afirmam que muitas das destinações propostas acabam se tornando onerosas ou inviáveis devido às propriedades físico-químicas da poliuretana, em razão da mesma ser composta por mais de 90% de ar e o restante de plástico. É, portanto, economicamente inviável o reaproveitamento desse material como matéria-prima. Outro processo que se torna demasiadamente caro é o aterro do material, o que se justifica pelo grande volume ocupado, devido à sua baixa densidade, bem como o seu longo tempo de decomposição, que é aproximadamente de 150 anos.

Cangemi, Santos e Claro Neto (2009) ainda citam que o estudo do material poliuretana é uma oportunidade de combinar vários assuntos e várias disciplinas, já que trata de assuntos diversos como o papel dos plásticos na sociedade moderna, meio ambiente, custos de produção, saúde dos trabalhadores na indústria e novidades na área médica com os biomateriais.

2.3.1 Espuma expansiva de poliuretana

A partir da poliuretana é possível produzir uma variedade de materiais e, dentre eles, a forma de espuma é mais consumida. A espuma de poliuretana é obtida através da reação química da mistura entre um tipo de poliálcool polimérico e o isocianato que libera oxigênio, responsável pelo crescimento e formato da espuma (PLASTBRINQ, 2019).

Por ser a forma mais utilizada desse polímero, um grande montante de resíduos de espuma de poliuretana é gerado anualmente. Em 2011, das 7,5 milhões de toneladas de poliuretana produzida, 675.000 toneladas de resíduos desse material foram geradas (YANG *et al.*, 2012).

As indústrias automotiva e da construção são uma das principais consumidoras da espuma expansiva de poliuretana, sendo utilizados na formação de

painéis de espuma presentes em várias partes dos automóveis e na vedação de estruturas, por exemplo. O uso desse material dá-se principalmente pelas vantagens em comparação com outros tipos de materiais. Em comparação com os metálicos, por exemplo, a espuma de poliuretano apresenta uma maior resistência a corrosão e um menor peso e custo de fabricação.

Durante a produção da espuma de poliuretano é gerado uma proporção de 15% de resíduos. Em 2011, a produção de poliuretano atingiu 7,5 milhões de toneladas e a espuma de poliuretano representou 60%, enquanto cerca de 675.000 toneladas de espuma de poliuretano foram abandonadas (YANG *et al.*, 2012).

A poliuretano, como os demais polímeros sintéticos, possui baixa degradabilidade e causa uma série de impactos ambientais. Em razão da tendência de consumo na atual sociedade, com a busca por substituição constante de eletrodomésticos e equipamentos, gerando o abandono dos mais velhos. E, por esses eletrodomésticos e equipamentos terem, em sua maioria, composição de Poliuretano, há a contribuição para o aumento do montante de resíduos desse material.

Quando estas são destruídas e esmagadas, são convertidas em partículas de baixa densidade que podem ser úteis na fabricação de materiais leves. Assim, as principais formas de auxiliar o processo de degradação da poliuretano e minimizar a quantidade de resíduos desse material no meio ambiente são reuso/reciclagem.

Stalter, Moraes e Brehm (2016) diferenciou três formas diferentes de executar a reciclagem da Poliuretano, na qual são dispostas e definidas no Quadro 5.

Quadro 5 - Tipos de Reciclagem para a Poliuretano

Tipo	Definição
Reciclagem Mecânica	Faz se necessário a redução da massa de poliuretano para pedaços e partículas menores (flocos, pellets ou pó) para serem reintroduzidos na produção de outros materiais.
Reciclagem Química	Realização da glicólise na molécula de poliuretano onde a ligação uretania presente é quebrada e os poliois obtidos dessa quebra, podem ser utilizados quimicamente para a produção de novas espumas.
Reciclagem Energética	Por derivarem do petróleo, tem um valor de energia recuperável comparada ao do carvão, e que pode ser usado na produção de nova energia

Fonte: Adaptado de Stalter; Moraes; Brehm (2016).

Contudo, se o processo de reciclagem energética, através da incineração, for gerado por uma combustão incompleta, será produzido um gás venenoso altamente poluente para a atmosfera e prejudicial ao meio ambiente, por isso o método mais adequado é a reutilização ou reciclagem.

Becker (2002) cita que algumas indústrias já fazem o reaproveitamento dos resíduos da Poliuretana, tendo como caso exemplo a indústria alemã Pure que recicla os próprios resíduos para a fabricação de novos painéis de construção. Gonçalves (2007) também afirma que o conteúdo energético da maioria dos plásticos é comparado ao de combustíveis de primeira linha, como a gasolina, em razão da descendência do petróleo.

Os métodos de reciclagem química ou mecânica da poliuretana mostra-se viável e de interesse para a manutenção do meio ambiente. Os resíduos de espuma de poliuretana devem ser efetivamente descartados e reciclados, o que não é apenas o requisito de evitar a poluição e a proteção do meio ambiente, mas também a necessidade de reduzir os custos de produção e melhorar a utilização do material.

2.3.2 Aplicações

Desde a invenção do poliuretana, ele tem sido amplamente utilizado nas indústrias de adesivos, couro sintético, borracha, engenharia civil e engenharia de petróleo devido à sua formulação flexível, excelente desempenho do produto e várias formas (CONG *et al.*, 2019). Siqueira; Stramari; Folgueras (2004) exemplificam que os fabricantes de refrigeradores passaram a substituir a lã de vidro e rocha pelo poliuretano expandido na fabricação de seus produtos, o que possibilitou a redução da espessura de parede do refrigerador e maior leveza dos equipamentos.

As espumas flexíveis abrangem a maior parte do mercado brasileiro de Poliuretana, com cerca de 71% onde são destinados para a produção de colchões e estofados automotivos). Em segundo lugar estão as espumas rígidas, com um montante aproximado de 13%, são destinados para ao mercado de transporte e construção civil (BECKER, 2002).

Na construção civil, a espuma de poliuretana é utilizada principalmente nas fases de assentamento, vedação, isolamento e fixação de materiais (COSTA *et al.*, 2017b). Tendo como exemplo a utilização para a fixação de esquadrias, na vedação de sistemas de gessos acartonados, e têm sido amplamente usadas em painéis de

isolamento térmico, incluindo isolamento de paredes e telhados, além de espaço para recheio em torno de portas e janelas. Além disso, é utilizada em outros setores industriais, como material componente da produção de móveis, eletrodomésticos, embalagens e automóveis (PLASTBRINQ, 2019). Diversos estudos são realizados para analisar a aplicação da poliuretana em diversos meios.

Aranha (2019) fez um estudo da aplicação da Poliuretana em sistemas acústicos. A espuma de poliuretano foi o material que apresentou a maior oscilação média em termos do coeficiente de absorção sonora para médio-altas frequências. Contudo, também apresentou um desempenho extremamente favorável: semelhantemente à lã de rocha, o material, quando testado por sinais com frequências de 500Hz apresentou uma absorvidade de 0,6. Acima de 1400 Hz a espuma apresentou um coeficiente de absorção sonora superior a 0,8 para praticamente todas as frequências de teste.

Costa *et al.* (2017a) realizou um estudo da espuma de Poliuretano em aplicações como utilização nos sistemas de gesso acartonado, utilização para fixação de esquadrias e utilização no kit porta pronta. O recurso do poliuretano tem-se a relação custo/benefício favorável ao usuário, pois, pode contribuir para redução de perda de material, no setor de construção civil, inclusive pode reduzir o consumo de energia elétrica, quando aplicado como isolante térmico. O tempo de aplicação de produtos à base de poliuretano pode influenciar o tempo de execução da obra, se comparada a métodos tradicionais, como por exemplo, no assentamento de janelas.

Shirosaki (2019) estudou sobre a resina poliuretana à base de mamona em painéis com madeira tratada do tipo *Pinus*. O tratamento das partículas de *Pinus* com sais de cromo, cobre e boro, juntamente com esse tipo de resina de poliuretana foi mais eficaz na impermeabilização da madeira, além de garantir melhores propriedades físico-mecânicas frente a madeira in natura. Os resultados mostram a viabilidade técnica da produção de painéis de partículas com a resina poliuretana a base de óleos vegetais mistos. Os valores de tração perpendicular foram muito superiores aos exigidos nos documentos normativos, tornando interessante a utilização da resina para confecção de painéis onde esta é uma propriedade importante.

Um estudo realizado por Jing *et al.* (2019) também cita o uso de poliuretana nos lastros de ferrovia na China, trazendo para esse equipamento uma melhor

estabilidade e resistência a dilatação e contração causadas por variações de temperatura.

2.3.3 Impactos causados pelo descarte incorreto da poliuretana

A poliuretana tem tido a aplicação e uso frequente em vários setores, em razão da versatilidade e propriedades físico-químicas que apresenta. Porém, quando são descartados no fim de suas vidas úteis, geram grandes volumes de lixo para o meio ambiente.

Mesmo com suas variadas aplicações, a poliuretana pode ser vista como um problema ambiental em razão do processo de descarte e geração de resíduos causados por ela. Dependendo de onde esse resíduo seja lançado, a poluição e degradação do meio ambiente podem ser muito graves.

Se jogado ao mar, por exemplo, pode causar a morte de criaturas marinhas que se alimentarem do material. Quando destinado a aterros sanitários, em razão do material ser de difícil decomposição, ele se amontoará, necessitando que seja disponibilizado cada vez mais espaços para a formação de aterros sanitários.

A combustão ou o aquecimento gerando subproduto da queima de poliuretana leva a formação de uma substância ácida de elevado efeito tóxico. Gonçalves (2007) afirma que o principal problema na incineração de resíduos do tipo plástico é a mistura imperfeita do ar com o combustível, em que é criado um ambiente propício para as emissões de produtos de combustão incompleta.

Espumas flexíveis de poliuretana, quando submetidas a um processo de decomposição térmica, podem gerar CO, CO₂, hidrocarbonetos leves e, a temperaturas maiores que 800 °C, cianeto de hidrogênio (HCN) e outros compostos contendo nitrogênio. Estes compostos podem ser tóxicos, dependendo de sua concentração e tempo de exposição (SILVEIRA *et al.*, 2007).

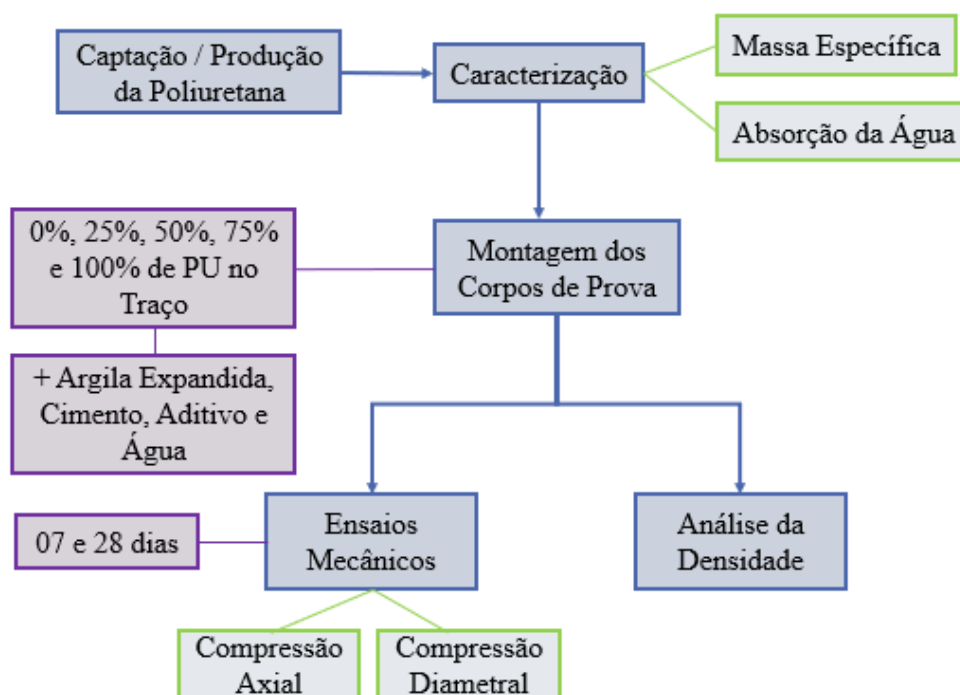
Já Lamaison, Heiderich e Filho (2014) citam o desastre causado pelo incêndio da Boate Kiss, no qual a queima do revestimento formado por espuma de poliuretana gerou a produção do gás cianeto, apontado nos laudos técnicos como a causa de morte das pessoas nesse incêndio. Por isso, é de extrema importância uma destinação correta desses resíduos, para mitigar impactos.

3 METODOLOGIA

A classificação da pesquisa desenvolvida no presente trabalho segue a adotada por Nascimento e Sousa (2015). Quanto a natureza, é classificada como aplicada, pois é dirigida a busca de uma certeza para determinada aplicação prática em uma situação particular. Quanto a abordagem, tem classificação quantitativa, pois são empregadas medidas padronizadas e sistematizadas. Os objetivos a serem alcançados no desenvolvimento da pesquisa tem classificação como descritivos e explicativos, pois além de buscar descrever características também é identificado atributos e fatores de um procedimento de pesquisa experimental.

As atividades desenvolvidas iniciam com a busca de resíduos de poliuretana e aplicação de ensaios de caracterização desses resíduos a fim de que sejam conhecidos sua massa específica e a taxa de absorção da água. São montados corpos de provas utilizando a poliuretana como agregado graúdo de concreto leve para a realização do ensaio mecânico com teste de compressão e teste de resistência a tração na flexão, e a medição da densidade apresentada pelo concreto. Todo o processo está expresso resumidamente no fluxograma apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Metodologia do Trabalho



Fonte: Autor

3.1 Caracterização dos Materiais

Os materiais utilizados na produção dos Corpos de Prova de concreto são: argila expandida e/ou poliuretana como agregado graúdo; cimento Portland, aditivo plastificante, areia e água. Eles estão descritos nos subtópicos a seguir.

3.1.1 Argila Expandida

A argila expandida utilizada é da marca Cinexpan e do tipo 1506 ($D_{\text{máx}}=12,5\text{mm}$), tipo mais indicada para o uso na produção de concreto leve. Sendo os seus valores físicos e mecânicos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades químicas e físicas da Argila Expandida

Propriedades químicas		Propriedades físicas	
Parâmetro	%	Parâmetro	Especificação
Silício (SiO_2)	63,19	Densidade Aparente	$600 \pm 10 \text{ kg/m}^3$
Alumínio (Al_2O_3)	18,02	Massa Específica	$1,11 \text{ kg/dm}^3$
Ferro (Fe_2O_3)	7,63	Classes	6 – 15 mm
Titânio (TiO_2)	0,92	Granulométricas	
Calcio (CaO)	0,64	Resistencia Mecânica	2,31 MPa
Magnésio (MgO)	3,26	Condutividade Térmica	0,10 a 0,16 W/(mK)
Sódio (Na_2O)	0,61	Isolamento Acústico	44dB
Potássio (K_2O)	4,91		
Óxido de Fosforo (P_2O_4)	0,20		
Óxido de Manganês (MnO)	0,08		
Óxido de Bário (BaO)	0,09		
Perda ao fogo	0,20		

Fonte: CINEXPAN (2000)

3.1.2 Poliuretana

Foram feitos os testes na poliuretana a fim de que fossem conhecidos as taxas de absorção da água e massa específica, conforme NBR NM 53 (ABNT, 2009). A poliuretana expandida é triturada e selecionada na peneira de 400 mm para a realização dos testes.

Para o teste de absorção, é selecionado uma pequena quantidade de poliuretana seca (m_s), e é deixada imersa em água durante 24 h. Passado esse período, é retirado o excesso de água e realizada novamente a pesagem, a fim de

saber o valor da massa úmida (m_u). Os valores são aplicados na Equação 1 para que seja conhecida a taxa de absorção de água (A) em porcentagem.

$$A = \left(\frac{m_u - m_s}{m_u} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Para o teste de massa específica, uma quantidade poliuretana seca (m_{se}) é umidificada com uma quantidade de água (m_a). Após um período de 1 hora imersa em água, é retirada o excesso de água e medida a massa da amostra em condição saturada (m_{sa}). Os valores são aplicados na Equação 2 para que seja conhecida a massa específica (m_e) em g/cm³ da amostra de poliuretana.

$$m_e = \left(\frac{m_{se}}{m_{sa} - m_a} \right) \quad (2)$$

A partir dos resultados obtidos foi possível o cálculo da quantidade de água para a pré molhagem da poliuretana e a quantidade de substituição por massa específica entre argila expandida e poliuretana em cada traço.

3.1.3 Cimento Portland

O cimento utilizado na produção dos corpos de prova foi o tipo CP-II de fabricação da Empresa Apodi. A escolha desse tipo foi em razão do mesmo ter a utilização bastante comum em diversos tipos de obras, pois proporciona uma redução no tempo de execução, e confere uma maior durabilidade dos concretos e argamassas produzidos por ele (APODI, 2020).

As características físicas e químicas desse tipo de cimento estão especificadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização do cimento

Propriedade	Especificação
Área Específica	3.844 cm ³ /g
Massa Específica	2,97g/cm ³
Finura – Resíduo na peneira de 0,075mm (#200)	3,50%
Finura – Resíduo na peneira de 0,044mm (#325)	12,80%
Início da pega	2:15h
Fim da pega	3:15h
Resistencia aos 7 dias	24,9Mpa
Resistencia aos 28 dias	37,5Mpa

Fonte: Adaptado de AZEVEDO (2019)

3.1.4 Aditivo

Para que fosse melhorado a coesão e a consistência do concreto produzido, foi adicionado um aditivo super plastificante Glenium 51, produto da empresa BASF. O uso do aditivo permite uma economia em média de 40% de água no traço do concreto. Assim, além de aumentar as resistências mecânicas, proporciona concretos homogêneos, coesos e com menor permeabilidade. O mesmo possui uma densidade de 1,10 g/cm³, pH entre 5-7 e é composto basicamente por éter policarboxílico (BASF, 2019).

3.1.5 Areia Natural

A areia utilizada na produção do concreto é a obtida do leito de rio, e distribuída e armazenada em depósito de construção da cidade de Fortaleza/CE. Azevedo (2019) seguindo as especificações previstas pela ABNT, especificamente, normas regulamentadoras quanto ao módulo de finura, massa específica, massa unitária em estado solto e compactado, além do teor de material pulverulento, realizou a caracterização física do material, obtendo-se os valores expostos no Quadro 6.

Quadro 6 - Caracterização da Areia Natural

Ensaio Realizado	Resultado	Norma
Módulo de Finura	1,97	NBR NM 248
Massa Específica	2.346,85 kg/m ³	NBR NM 52
Massa unitária – Estado Solto	1.441 kg/m ³	NBR NM 45
Massa unitária – Estado compactado	1.523 kg/m ³	NBR NM 45
Teor de material pulverulento	3,59%	NBR NM 46

Fonte: AZEVEDO (2019)

3.1.6 Água

A água utilizada é proveniente do sistema de distribuição da Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (CAGECE), oriundo do sistema de abastecimento presente na cidade de Fortaleza/CE.

3.2 Métodos de Pesquisa

3.2.1 Produção dos Corpos de Prova

Os ensaios e montagem dos corpos de prova foram realizados no Centro de Concreto e Argamassa, anexo ao Núcleo de Práticas Tecnológicas do Centro Universitário Christus (Unichristus), localizado no município de Fortaleza-CE.

Os materiais, citados nos itens anteriores, utilizados para a produção desses corpos de prova foram adicionados em devidas proporções de teste e conforme cada tipo de traço. Os corpos de prova produzidos são do tipo cilíndricos de dimensões padrões, especificadas na Figura 9.

Figura 9 - Dimensões dos corpos de prova



Fonte: Autor

Para a produção dos corpos de prova, utilizou-se o traço de concreto leve 1: 2,92: 1,38: 0,69: 0,002 (cimento: areia: argila expandida: água: aditivo) desenvolvido por Sacht; Rossignolo; Santos (2010) e usado como referência, fazendo as adaptações necessárias para o presente trabalho. Foi nomeado como Traço 1, tendo como agregado gráudo formado 100% de argila expandida, o traço de referência de concreto leve convencional. Os valores apresentados por esse traço referência serviram como comparativo para os valores de testes apresentados pelos outros traços.

Nos demais traços foram feitas substituição da quantidade de agregado gráudo de argila expandida por poliuretana. Sendo o traço 02 com substituição de 25%; o traço 3, 50%; o traço 4, 75% e o traço 5 tendo a quantidade de agregado gráudo totalmente substituído por poliuretana. Para isso foi utilizado o método de substituição por volume, com o emprego da Equação 3, em que m_{PU} é a massa de poliuretana em kg; m_{AE} a massa de argila expandida em kg; Y_{PU} a massa específica da poliuretana em kg/m^3 e Y_{AE} a massa específica da argila expandida em kg/m^3

$$m_{PU} = m_{AE} \cdot \left(\frac{Y_{PU}}{Y_{AE}} \right) \quad (3)$$

A quantidade de cada material e o valor do percentual de cada agregado nos traços de concreto são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantitativo dos materiais em cada traço de concreto desenvolvido.

Traço	Cimento	Areia	Aditivo	Água	PU	AE
1					-	4,80kg
2					44g	3,60kg
3	4,1kg	12kg	31mL	2,83L	87g	2,40kg
4					131g	1,20kg
5					175g	-

Traço 1 = 100% de AE e 0% de PU; **Traço 2** = 75% de AE e 25% de PU; **Traço 3** = 50% de AE e 50% de PU; **Traço 4** = 25% de AE e 75% de PU; **Traço 5** = 0% de AE e 100% de PU.

Fonte: Autor.

3.2.2 Pré Molhagem da poliuretana e betonagem do concreto

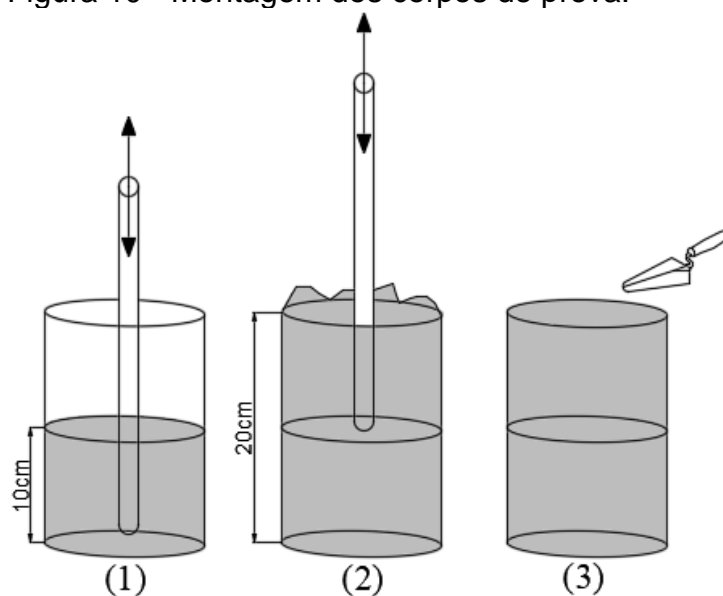
Seguindo a NBR NM 15116 (ABNT, 2004), faz-se necessário fazer uma compensação na quantidade de água na massa do concreto em razão da PU possuir altos níveis absorção de água, realizando uma pré-molhagem com 60% dessa taxa, por um período de 10 minutos. Os ensaios para que seja obtido a taxa de absorção da PU foi baseada nas diretrizes da NBR NM 53 (ABNT, 2009).

Diante dos resultados, é realizada essa pré molhagem para posteriormente todos os materiais referentes a cada traço serem encaminhados para a mistura na betoneira, até a obtenção de uma massa de concreto uniforme.

3.2.3 Moldagem dos Corpos de Prova

Para a moldagem dos corpos de prova foram seguidas as diretrizes presentes na NBR 5738 (ABNT, 2015): primeiramente, (1) é preenchido metade do molde cilíndrico com a massa de concreto, e aplicado 12 golpes de compactação com a haste cilíndrica, (2) completa o molde cilíndrico com a massa de concreto e aplica mais 12 golpes de compactação com a haste cilíndrica, de forma que esses golpes não atinjam a camada mais inferior, por último (3) é feita a regularização do topo do molde, de forma a retirar os excessos de massa de concreto do topo do molde cilíndrico. Todo o processo é ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Montagem dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

As diretrizes da norma NBR 5739 (ABNT, 2018), determina que sejam realizados testes no concreto em idades específicas: 07 e 28 dias. Por isso, foram preparados seis corpos de prova para cada traço (Figura 11), sendo reservado três corpos de prova para realização dos testes em cada período de idade.

Figura 11 - Corpos de Prova nos moldes cilíndricos



Fonte: Autor

Após um período de 24 horas, cada corpo prova montado foi desmoldado e imerso em um recipiente cheio de água, a fim de que seja feito o processo de cura saturada até o momento da realização dos testes.

3.2.4 *Análise da Densidade*

Decorrido o período necessário de cada idade de cura, os corpos são retirados do meio saturado. Após a retirada dos corpos de prova da cura em água, realizou-se a secagem e as medições das dimensões de cada corpo e prova – diâmetro (D) e altura (h) – e numa balança de precisão foi medida os valores de massa (m).

Os valores obtidos foram usados para o cálculo da densidade (d) de cada traço em kg/m³, por meio da Equação 4.

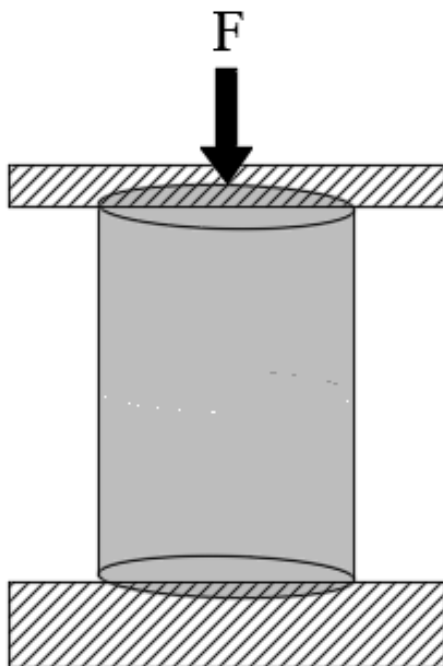
$$d = \frac{m \cdot 4}{\pi \cdot D^2 \cdot h} \quad (4)$$

3.2.5 *Avaliação do concreto no estado rígido*

Os ensaios adotados para serem realizados no concreto rígido foram o teste de resistência à compressão e à tração por compressão diametral, realizados na prensa elétrica de modelo FT 01 com N/S do fabricante FtForTests. Para os ensaios, foram realizados testes em três corpos de prova de cada traço, aos 07 dias e aos 28 dias de idade de montagem.

Baseando-se na NBR 5739 (ABNT, 2018), a Figura 12 ilustra o posicionamento do corpo de prova na prensa para a aplicação da carga e realização do teste de resistência a compressão.

Figura 12 - Posicionamento da Carga Para Realização do Teste de Resistência à Compressão



Fonte: Autor.

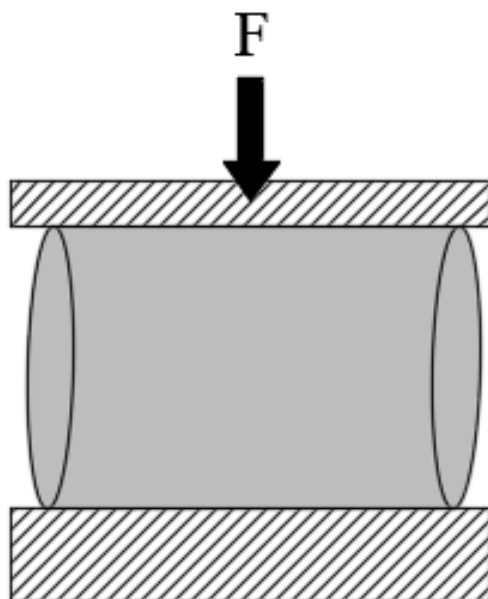
O valor da carga de ruptura (F) é apresentado na prensa, e através da Equação 5 é encontrado o valor em Mpa de resistência a compressão (R_c).

$$R_c = \frac{F \cdot 4}{\pi \cdot D^2}$$

(5)

Nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, os rompimentos dos corpos de prova tem a aplicação da carga no diâmetro do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 13 e seguindo a norma NBR 7222 (ABNT, 2011).

Figura 13 - Posicionamento da carga para o teste de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Autor.

O valor da carga de ruptura (F) é apresentado na prensa, e através da Equação 6 é encontrado o valor em Mpa de resistência por compressão diametral (R_t), em que D é o diâmetro e h é a altura dos corpos de prova.

$$R_t = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot h} \quad (6)$$

3.2.6 Avaliação microestrutural

Após o rompimento dos corpos de prova nos testes realizados no estado rígido, seriam separados pedaços de amostras do concreto de cada traço e em cada idade de rompimento para a realização das avaliações microestrutural (FTIR, TGA e MEV).

Para a FTIR, as amostras são maceradas em almofariz de ágata e prensadas em forma de pastilhas, sendo registrados os espectros pelo aparelho Shimadzu FTIR 8300. Para a TGA, com faixa de temperatura entre 0 e 900°C, com razão de aquecimento de 10°C/min, e medições feitas pelo aparelho TGA Q50 V20.13 Build 39 da TA Instruments (CARVALHO, 2013). As medidas de MEV serão realizadas

na Central Analítica (UFC) em um Microscópio Eletrônico de Varredura Quanta 450 FEG– FEI com voltagem de 20kV com EDS/EBSD.

Os testes seriam realizados nos laboratórios da Universidade Federal do Ceará (UFC), porém não foram possíveis de serem realizados porque, no primeiro semestre do presente ano 2020, o mundo passou por uma pandemia do COVID-19, causada pelo coronavírus SARS-CoV-2, no qual houve uma paralisação das atividades e aglomeração de pessoas nos mais diversos setores de serviços como tentativa de barrar a disseminação e contaminação da doença (SAÚDE, 2020). Dessa forma, os laboratórios onde seriam realizados tais ensaios ficaram impossibilitados de funcionar a tempo da conclusão do presente trabalho.

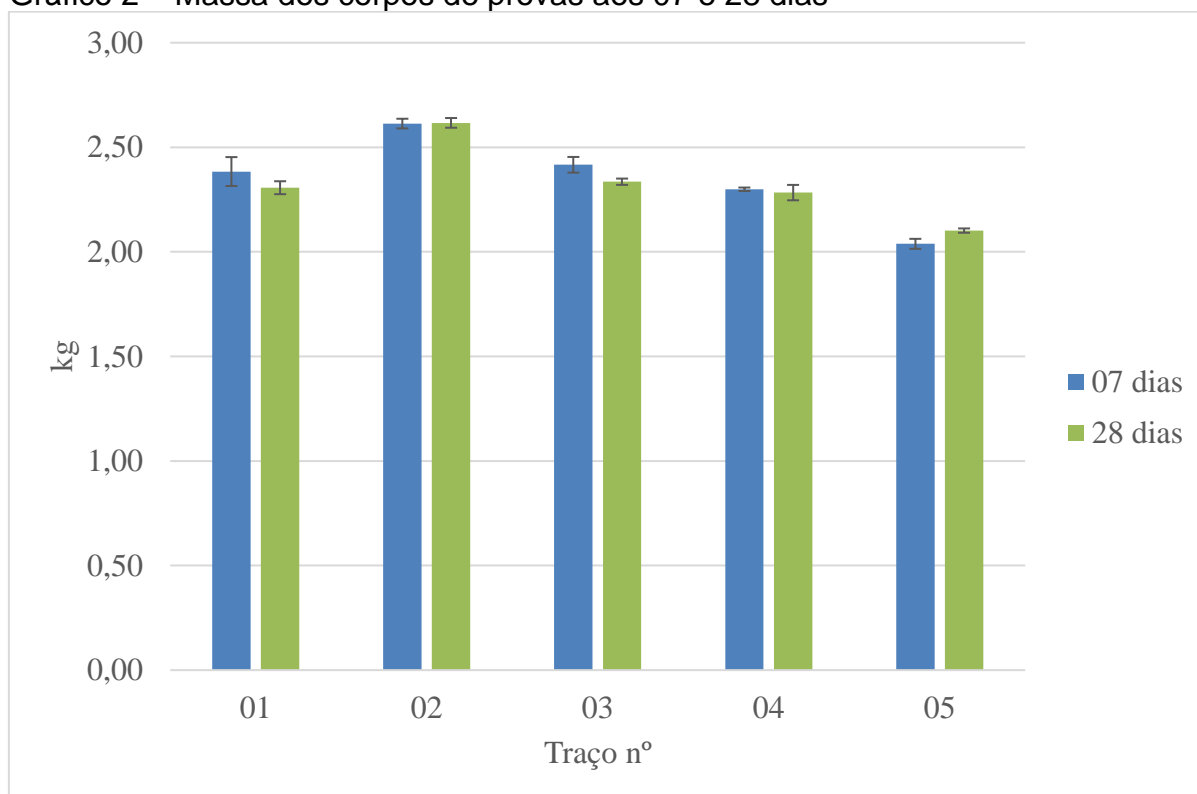
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados procedimentos experimentais com o objetivo avaliar o desempenho do concreto leve incorporado com espuma de PU quanto às propriedades físicas e à resistência mecânica, comparativamente ao concreto com argila expandida. Os resultados obtidos para os ensaios densidade, resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral do concreto desenvolvido foram descritos a seguir.

4.1 Densidade

Com o intuito de comparar os valores de peso próprio e calcular a densidade do concreto leve desenvolvido, em diferentes proporções de espuma de poliuretano e argila expandida, mediu-se a massa apresentada por cada um. Os corpos de prova foram avaliados em períodos de 7 e 28 dias. Os resultados obtidos podem ser observados no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Massa dos corpos de provas aos 07 e 28 dias

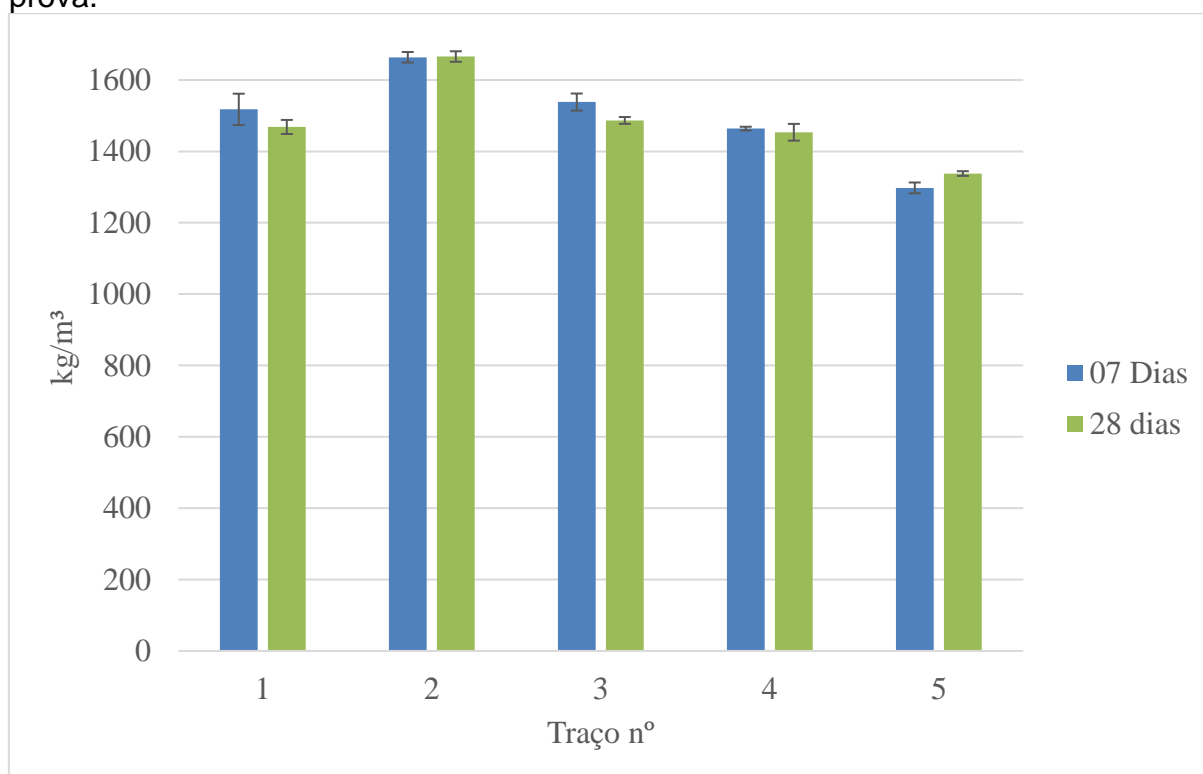


Fonte: Autor.

Observa-se que, comparando os valores obtidos para a massas dos cinco traços (Gráfico 2), os traços com maiores concentrações de poliuretana têm menor peso próprio. Esperava-se, portanto, que para o Traço 1 se obtivesse o maior valor de massa. Sugere-se que as proporções do traço em questão não tenham sido medidas corretamente no momento de confecção dos corpos de prova, levando a inconsistências nos resultados.

Diante dos valores obtidos de massa, é calculada a densidade apresentada para cada traço desenvolvido. Tais resultados são expostos no Gráfico 3, comparativamente.

Gráfico 3 – Densidade de cada traço desenvolvido apresentado pelos corpos de prova.



Fonte: Autor.

Observando os valores (Gráfico 3) é possível perceber uma redução na densidade nos traços do concreto produzido à medida que aumenta a concentração poliuretana. Consequentemente, o Traço 5, produzido com a substituição completa de agregado graúdo convencional pela poliuretana, apresentou a menor valor na densidade. Quando comparado com um concreto comum, em que se apresenta uma densidade média de 2.500 kg/m³ (PAN; LI; LIU, 2014), a redução no valor da

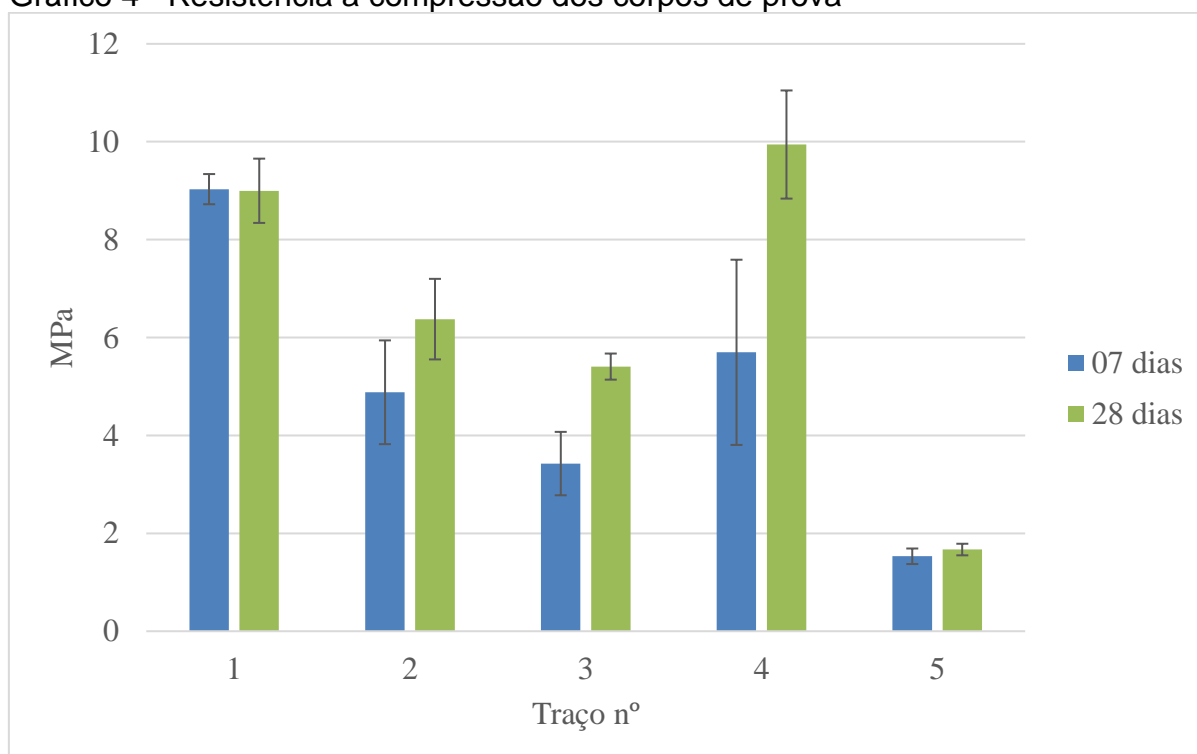
densidade é significativa. Como já mencionado, o Traço1, traço referência, apresentou resultados que indicam erro operacional.

Essa densidade menor apresentada pelo concreto experimental produzido a partir do Traço 5 resultaria em uma menor carga efetiva em uma construção em que fosse empregado. Conseqüentemente, o emprego desse concreto leve é economicamente vantajoso, pois além de incorporar um resíduo a materiais de construção, reduzindo os custos de produção, diminui a carga total sobre os sistemas estruturais de construções, como vigas, pilares e fundações.

4.2 Resistência à Compressão Axial

Com o objetivo de verificar a qualidade do concreto leve avaliado, cujo padrão referencial garanta as suas expectativas mínimas de utilização, realizou-se os ensaios de resistência à compressão axial. Assim, os resultados obtidos para corpos de prova confeccionados com os diferentes traços são apresentados de forma comparativa no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Resistência a compressão dos corpos de prova



Fonte: Autor.

É possível observar que o maior valor médio de resistência a compressão é obtido para o Traço 4, sendo inclusive superior ao valor de resistência apresentado pelo traço referência. Contudo, o alto valor de desvio-padrão apresentado indica que essa diferença, que produz resultados inconsistentes, pode ser atribuída a erros operacionais. Tal variação pode ser explicada pela provável má compactação da massa cimentícia que, idealmente, deve ser realizada em uma mesa vibradora, garantindo um melhor adensamento da massa do concreto dentro do molde do corpo de prova. Outra fonte de erro provável é a desregulagem da prensa, que no período em que foram realizados os ensaios, estava com problemas de calibração e aferição.

A fim de fazer uma comparação com os resultados encontrados na literatura sobre o assunto, foram observadas algumas divergências de valores exatos para resistência a compressão de um concreto. Nos trabalhos pesquisados, nenhum fornecia um valor exato. Harith (2018) afirma que para aplicações estruturais, o concreto leve deve ter uma resistência a compressão superior a 17Mpa. Já a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) exige uma resistência a compressão no concreto de no mínimo 20Mpa. Portanto, os resultados indicam que o concreto produzido com PU, em todos os traços testados, não deve ser empregado com fins estruturais.

Laudos de ensaios produzidos pela fabricante de argila expandida indicam o concreto leve, para enchimento leve argamassado, deve ter resistência média à compressão de 10 Mpa (CINEXPAN, 2013a). Já o concreto leve para enchimento leve rígido, deve apresentar resistência à compressão média de 2 Mpa (CINEXPAN, 2013b). Assim, pode-se afirmar que o concreto leve incorporado com espuma de poliuretano apresentou o desempenho adequado para fins não estruturais.

Quanto aos ensaios de resistência à compressão de corpos cilíndricos, a NBR 5739 (ABNT, 2018) ainda classifica o concreto quanto à forma de ruptura do corpo de prova como cônica, cônica e bipartida, cônica e cisalhada, cisalhada e colunar. Para os ensaios realizados, classificou-se as rupturas dos corpos de prova avaliados como (1) cônicos cisalhados, (2) colunar e (3) cisalhada. A Figura 14 mostra as rupturas típicas apresentadas nos corpos de prova dos diferentes traços.

Figura 14 - Tipo de ruptura dos corpos de prova



Fonte: Autor.

Após os corpos de prova dos traços de concreto leve experimental que continham poliuretana atingirem o Estado Limite Último nos testes de compressão, esses ainda apresentavam uma certa conformidade estrutural, não se deformando por total, mesmo após ser retirado do sistema da prensa, como pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Corpos de prova pós rompimento



Fonte: Autor.

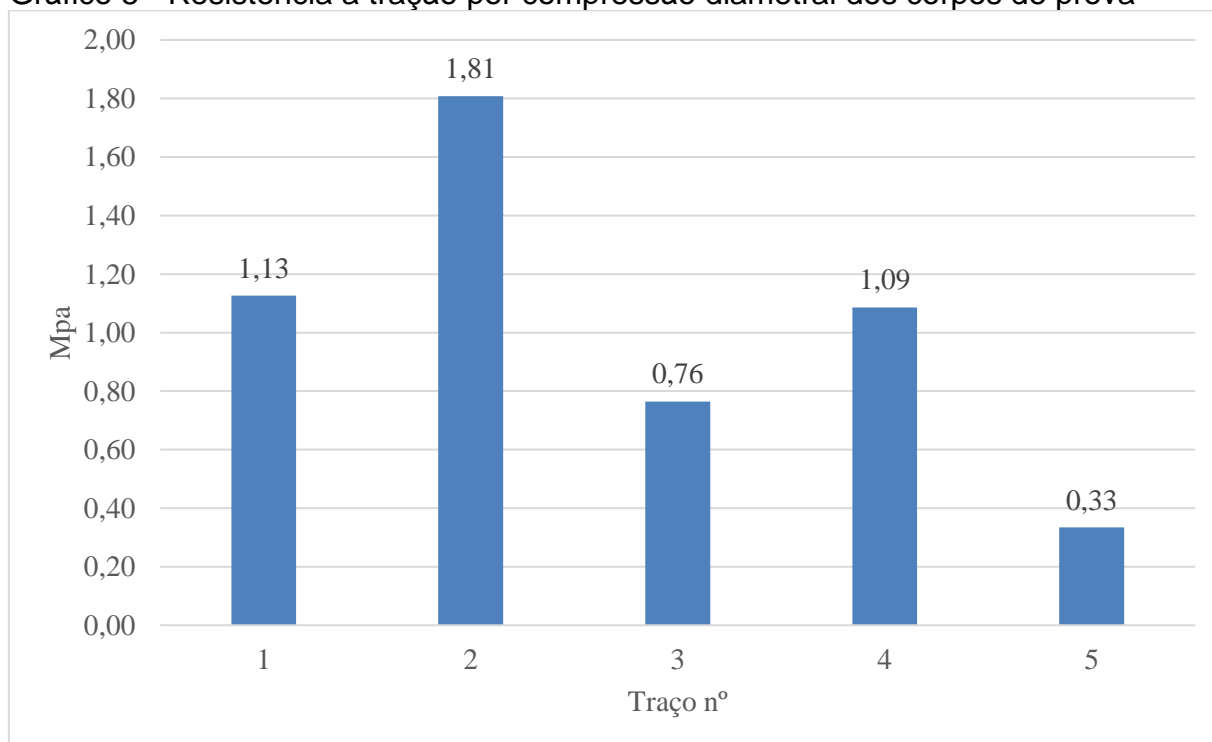
Nos concretos comuns e no concreto leve formado apenas com argila expandida como agregada, pós teste de compressão, os corpos de prova despedaçam-se logo após serem retirados do sistema da prensa de teste. Dessa forma, sugere-se que a espuma de poliuretano quando usada como agregada no concreto leve experimental forneceu a ele um maior nível de tenacidade, o que não é comum aos concretos convencionais.

4.3 Resistência à tração por compressão diametral

Após a idade de 28 dias da produção do traço e montagem dos corpos de prova, realizou-se o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011).

Os valores obtidos a partir da carga aplicada pela prensa relacionados com a dimensão do corpo de prova resultam no quanto cada traço suporta de tração por compressão diametral. O Gráfico 5 apresenta os valores obtidos, comparativamente, dessa relação em Mpa.

Gráfico 5 - Resistência a tração por compressão diametral dos corpos de prova



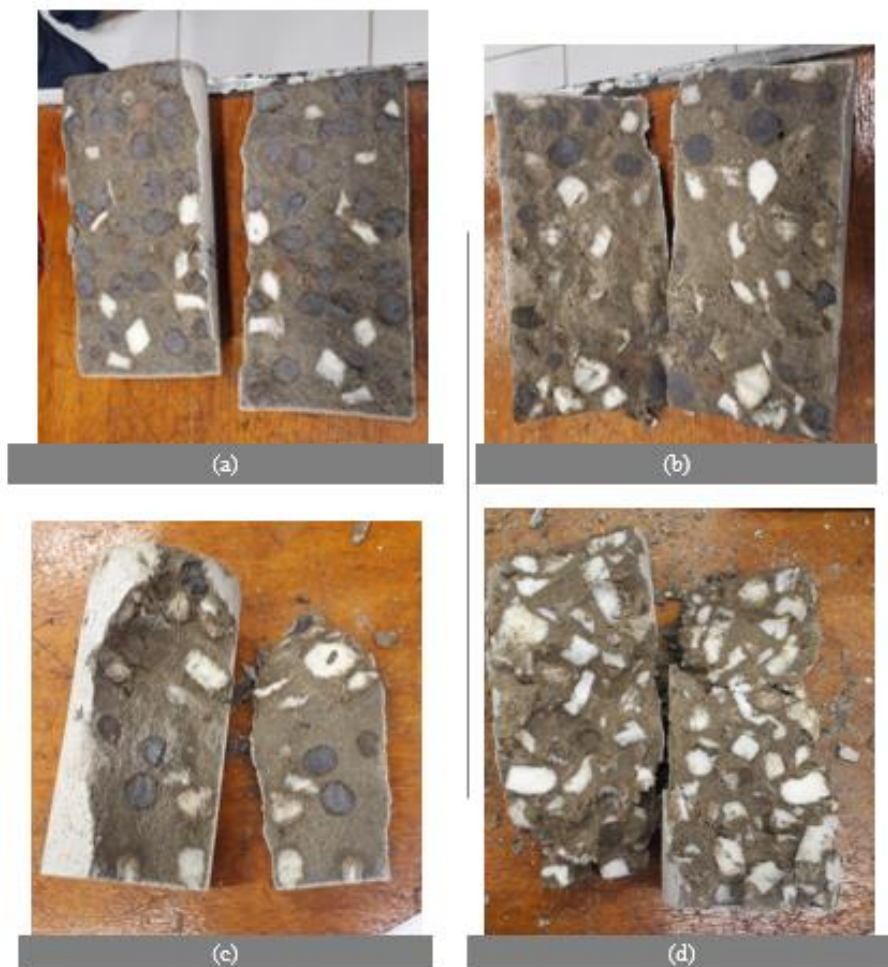
Fonte: Autor.

De acordo com o valor apresentado no resultado, é possível afirmar que o Traço 2 apresenta uma melhor resistência à tração por compressão diametral, sendo superior a apresentada pelo traço de referência. Esse valor reflete uma vantagem em utilizar o referido traço nas partes dos sistemas estruturais que requerem uma maior resistência as forças de tração

Porém, tal resultado não pode ser considerado como parâmetro de estudo, pois seriam necessários testes em no mínimo três corpos de prova para cada traço desenvolvido para refletir um resultado estatístico confiável de resistência à tração por compressão diametral.

Na Figura 17, estão dispostos os corpos de prova referente aos Traços 02 (a), Traço 03 (b), Traço 04 (c) e Traço 05 (d), após serem rompidos por compressão diametral. Nela é possível perceber a conformação dos agregados na massa cimentícia.

Figura 16 - Corpos de prova após o ensaio de compressão diametral



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

O processo de produção de concreto leve incorporado com espuma de poliuretana se mostra eficiente, satisfazendo às condições necessárias para aplicações com fins não estruturais, em termos experimentais com finalidades acadêmicas. Atendendo à proposta deste estudo, é possível produzir um componente não estrutural de caráter sustentável baseado no reuso de espuma de poliuretana, fornecendo destino apropriado para um resíduo potencialmente poluente.

Os resultados encontrados a partir dos ensaios indicam que os valores de densidade apresentados pelos concretos produzidos diminuem à medida que aumenta proporção de poliuretana em substituição ao agregado graúdo. Ou seja, o traço com maior proporção de poliuretana apresentou um menor valor de densidade do concreto. Resultado esse explicado pelo fato de a espuma de poliuretana apresentar uma densidade inferior à da argila expandida, conferindo uma propriedade atraente para o novo concreto produzido.

Comparativamente, os resultados apresentados para o traço em que houve a substituição de 75% do agregado por espuma de poliuretana (Traço 4) fornecem maior valor médio de resistência à compressão, aproximadamente 10% superior à verificada para o traço referência (Traço 1), composto apenas por argila expandida como agregado graúdo. Tal fato se dá principalmente por razão das divergências e variações dos valores dos traços

Confrontando os valores de densidade e de resistência à compressão axial encontrados para o concreto leve experimental, conclui-se que o material proposto não é adequado para uso estrutural, pois não atende às normas de desempenho regulamentadas para esse fim. Porém, para o uso com finalidade de enchimento o concreto leve incorporado com espuma de poliuretana se mostrou apropriado, em razão da baixa densidade, resultando em vantagens associadas à uma menor carga estrutural total em edificações.

Em relação à resistência à tração na compressão diametral, o Traço 2 apresentou um valor em torno de 60% maior que o traço referência. Esse resultado revela características promissoras do novo concreto leve quanto à tenacidade, o que é considerada como uma vantagem frente aos concretos convencionais presentes no mercado.

Por outro lado, a análise dos resultados apresentados neste estudo indica inconsistências em alguns valores, teoricamente justificadas pelo mau adensamento do concreto na montagem dos corpos de prova e pela descalibragem da prensa de compressão usada para a realização dos testes físicos.

Diante dos principais achados deste estudo, sugere-se para investigações futuras a análise microestrutural do concreto leve incorporado com espuma de poliuretano, que verificará a interação entre esse polímero e a massa cimentícia do concreto. Nesse sentido, sugere-se aprofundar a avaliação do concreto quanto ao desempenho com relação à tenacidade, avaliando a interação entre o concreto e a poliuretano. Por fim, pode-se realizar um estudo da viabilidade econômica do uso desse resíduo da construção civil, envolvendo a prática de logística reversa e se a produção de resíduo atende a demanda.

REFERÊNCIAS

- ABIPLAST, A. B. da I. do P. **Perfil 2017**. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2019/03/Perfil-2017.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2019.
- ABNT, A. B. de N. T. **NBR NM 131: Concreto Endurecido. Determinação da retração hidráulica ou higrométrica**. Rio de Janeiro, RJ, 1997.
- ABNT, A. B. de N. T. **NBR NM 33: Concreto - Amostragem de concreto fresco** Rio de Janeiro, 1998a.
- ABNT, A. B. de N. T. **NBR 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone** Rio de Janeiro, RJ, 1998b.
- ABNT, A. B. de N. T. **NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação** Rio de Janeiro, RJ, 2004a.
- ABNT, A. B. de N. T. **NBR 14931: Execução de estruturas de concreto - Procedimento** Rio de Janeiro, RJ, 2004b.
- ABNT, A. B. de N. T. **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos** Rio de Janeiro, RJ, 2004c.
- ABNT, A. B. de N. T. **NBR 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água** Rio de Janeiro, RJ, 2009.
- ABNT, A. B. de N. T. **NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndrico** Rio de Janeiro, RJ, 2011.
- ABNT, A. B. de N. T. **NBR 8224: Concreto endurecido — Determinação da fluência — Método de ensaio** Rio de Janeiro, RJ, 2012.
- ABNT, A. B. de N. T. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento** Rio de Janeiro, RJ, 2014.
- ABNT, A. B. de N. T. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova** Rio de Janeiro, RJ, 2015a.
- ABNT, A. B. de N. T. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento** Rio de Janeiro, RJ, 2015b.
- ABNT, A. B. de N. T. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência** Rio de Janeiro, RJ, 2015c.

ABNT, A. B. de N. T. **NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**Rio de Janeiro, RJ, 2017.

ABNT, A. B. de N. T. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**Rio de Janeiro, RJ, 2018.

ADHIKARY, S. K.; RUDŽIONIS, Ž.; VAIČIUKYNIENĖ, D. Development of flowable ultra-lightweight concrete using expanded glass aggregate, silica aerogel, and prefabricated plastic bubbles. **Journal of Building Engineering**, v. 31, p. 101399, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101399>.

ALQAHTANI, F. K.; ZAFAR, I. Characterization of processed lightweight aggregate and its effect on physical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 116992, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116992>.

AMARIO, M. **Caracterização física e mecânica de concreto leve estrutural contendo agregados de tijolos cerâmicos**. 2013. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

ANGELIN, A. F. Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais. **Dissertação de mestrado**, p. 98, 2014. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/267702>.

APODI. **Cimento CP-II 32**. Disponível em: <http://www.cimentoapodi.com.br/cp-ii/>. Acesso em: 10 fev. 2020.

ARANHA, R. V. **Análise Técnica Via Tubo de Impedância e Estudo Sustentável da Lã de PET como Substituta de Materiais Comerciais em Aplicações Acústicas**. 2019. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/197401>.

ASTM. **C143 / C143M - 10: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete**West Conshohocken, PA, USA, 2010. . Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C143C143M-10>.

AZEVEDO, M. G. de. **Avaliação de argamassa de revestimento com a incorporação de partículas de elastômero reciclados de pneus**. 2019. Centro Universitário Christus, 2019.

BASF. **Produtos - Glenium 51**. Disponível em: <https://www.basf.com/br/pt/products/construction.html>. Acesso em: 10 nov. 2019.

BECKER, D. **Blendas PP / PU : Estudo do efeito do agente compatibilizante e reciclagem de resíduos de PU**. 2002. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

CALDERÓN, V. *et al.* Construction Applications of Polyurethane Foam Wastes. **Recycling of Polyurethane Foams**, p. 115–125, 2018.

CANGEMI, J. M.; SANTOS, A. M. dos; CLARO NETO, S. Poliuretano: de travessieiros a preservativos, um polímero versátil. **Química Nova na Escola**, v. 31, n. 3, p. 159–164, 2009. Disponível em: http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/2010/artigos_teses/quimica/poliuretano_polimero_versatil.pdf.

CARVAJAL-ARANGO, D. *et al.* Relationships between lean and sustainable construction: Positive impacts of lean practices over sustainability during construction phase. **Journal of Cleaner Production**, v. 234, p. 1322–1337, 2019.

CARVALHO, E. V. **Desenvolvimento de nanobiocompósitos para aplicação em sistemas de liberação controlada de fármacos**. 2013. Universidade Federal do Ceará - UFC, 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/7806>.

CEMPRE. **Boletim Sobre Reciclagem**. Disponível em: <http://cempre.org.br/ciclossoft/id/9>. Acesso em: 24 out. 2019.

CHEN, J. *et al.* Experimental study on anti-icing and deicing performance of polyurethane concrete as road surface layer. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 598–605, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.170>.

CINEXPAN. **Argila Expandida tipo 1506**. Disponível em: <https://www.cinexpan.com.br/argila-expandida-1506-cinexpan.html>. Acesso em: 8 dez. 2019.

CINEXPAN. **Concreto Leve Para Enchimento Leve Argamassado**São Paulo/SP, 2013a. . Disponível em: <https://www.cinexpan.com.br/pdf/laudo-traco-03.pdf>.

CINEXPAN. **Concreto Leve Para Enchimento Leve Rígido**São Paulo/SP, 2013b. . Disponível em: <https://www.cinexpan.com.br/pdf/laudo-traco-04.pdf>.

CONG, L. *et al.* The use of polyurethane for asphalt pavement engineering applications: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 1012–1025, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.213>.

COSTA, B. C. A. *et al.* Espuma Expansiva De PU: Principais Características e Aplicações na Construção Civil. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT**, 2017a. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/index.php/cadernoexatas/article/view/4582>.

COSTA, B. C. A. da *et al.* Espuma expansiva de PU: Principais características e aplicações na construção civil. **Ciências exatas e tecnológicas**, v. 4, n. 2, p. 55–64, 2017b.

COSTA, H. S. de S. **Betões estruturais de agregados leves. Aplicações em prefabricação e reforço de estruturas**. 2012. Universidade de Coimbra, 2012.

DE PEREIRA, D. S. T. *et al.* Comparative analysis between properties and microstructures of geopolymeric concrete and portland concrete. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 7, n. 4, p. 606–611, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.08.008>.

ELSEVIER. **Science Direct Search**. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/search?origin=home&zone=qSearch>. Acesso em: 2 maio. 2020.

FARHAN, N. A.; SHEIKH, M. N.; HADI, M. N. S. Investigation of engineering properties of normal and high strength fly ash based geopolymer and alkali-activated slag concrete compared to ordinary Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 196, p. 26–42, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.083>.

FASHANDI, H.; PAKRAVAN, H. R.; LATIFI, M. Application of modified carpet waste cuttings for production of eco-efficient lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 198, n. 2019, p. 629–637, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.163>.

FENG, W. *et al.* Experimental study on the effect of strain rates on the dynamic flexural properties of rubber concrete. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 408–419, nov. 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819317581>.

FERREIRA, C. N. G. **Dimensionamento de Elementos Estruturais em Concreto Leve**. 2015. Universidade Federal de São Carlos, 2015.

FIGUEIREDO, S. C.; ÇOPUROĞLU, O.; SCHLANGEN, E. Effect of viscosity modifier admixture on Portland cement paste hydration and microstructure. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 818–840, 2019.

GADEA, J. *et al.* Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 9, p. 672–677, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.017>.

GARCIA, P. H. *et al.* Determinação da Resistência Característica à Compressão de Agregados Leves em Concretos de Agregados Leves Usando Simulações de Elementos Finitos. **Mecânica Computacional**, v. 34, n. 49, p. 3309–3320, 2016.
GOMES, P. C. C. *et al.* Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 3, p. 31–46, 2015.

GONÇALVES, C. K. **Pirólise e Combustão de Resíduos Plásticos**. 2007. Universidade de São Paulo, 2007.

HARITH, I. K. Study on polyurethane foamed concrete for use in structural applications. **Case Studies in Construction Materials**, v. 8, n. September 2017, p. 79–86, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.11.005>.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, p. 909, 2010.

HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, n. 1927, p. 415–451, 2011.

HERNANDES, N. de O.; BARBOSA, L. A. G. Aplicação de resíduos de borracha de pneu no concreto leve auto adensável. In: XXIV CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNICAMP, Campinas/SP. **Anais...** Campinas/SP: 22 out. 2016. Disponível em: <http://proceedings.galoa.com.br/proceedings/48/papers/51431>.

JING, G. *et al.* Polyurethane reinforced ballasted track: Review, innovation and challenge. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 734–748, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.031>.

JOCHEM, L. F.; CASAGRANDE, C. A.; ROCHA, J. C. Effect of lead in mortars with recycled aggregate and lightweight aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 117702, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117702>.

JUNCO, C. *et al.* Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 10, p. 1174–1179, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.006>.

KALPANA, M.; TAYU, A. Experimental investigation on lightweight concrete added with industrial waste (steel waste). **Materials Today: Proceedings**, v. 22, n. xxxx, p. 887–889, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.096>

KIBERT, C. J. **Sustainable construction: green building design and delivery**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2016.

LAMAISON, F. F.; HEIDERICH, P. E. P.; FILHO, W. A. S. A Química por trás da Boate Kiss. **33ºEDEQ**, 2014. Disponível em: <https://www.revistas.unijui.edu.br/index.php/edeq2013/article/view/2609>.

LIMA, A. O. S. *et al.* Análise da Inclusão da Escória de Aciaria como Material Alternativo para Pavimentos Flexíveis, em Estados Brasileiros. **Anais do XV Encontro de Iniciação à Pesquisa/XV Encontro de Iniciação à Docência/XIII Encontro de Pesquisadores/II Mostra de Ciência, Arte e Cultura do Centro Universitário Christus - Unichristus**, 2018. Disponível em: www.even3.com.br/Anais/xvencontrounichristus/114715-ANALISE-DA-INCLUSAO-DE-ESCORIA-DE-ACIARIA-COMO-MATERIAL-ALTERNATIVO-PARA-PAVIMENTOS-FLEXIVEIS-EM-ESTADOS-BRASILE.

LIMA, R. C. A. de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/5085>.

- LORENCETTI, M. R.; MARÇAL, R. Avaliação da resistência à compressão do concreto pela substituição parcial do cimento Portland por cinzas do bagaço de cana-de-açúcar. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 10, n. 20, p. 1–12, 19 dez. 2017. Disponível em: https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/anap_brasil/article/view/1658.
- MACHADO, R. de J.; LINCK, I. M. D.; PEREIRA, M. R. M. O descarte dos resíduos da construção civil e a sustentabilidade: muito além de uma questão legal, uma postura ética. **VII Fórum de Sustentabilidade do Corede Alto Jacuí**, 2019.
- MARQUES, S. B.; BISSOLI-DALVI, M.; ALVAREZ, C. E. de. Políticas públicas em prol da sustentabilidade na construção civil em municípios brasileiros. **URBE. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 10, n. suppl 1, p. 186–196, 2018.
- MARTÍNEZ-BARRERA, G. *et al.* Waste tire rubber particles modified by gamma radiation and their use as modifiers of concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, 2020.
- MAURY, M. B. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, v. 3, n. 1, p. 75–95, 2012.
- MORAVIA, W. . *et al.* Caracterização Microestrutural De Argila Expandida Para Aplicação Como Agregado Em Concreto Estrutural Leve. **Anais do 48º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, p. 1–12, 2004. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbc/2004/artigos/48cbc-17-12.pdf>.
- MOREIRA, T. L.; SILVEIRA, L. L. L. da. Aplicação de resina poliuretana à base de óleo de mamona no processo de envelopamento de blocos de rochas ornamentais. **Anais da Jornada da Iniciação Científica**, p. 1–5, 2018. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2151>.
- NASCIMENTO, F. P. Do; SOUSA, F. L. L. **Metodologia da Pesquisa Científica: teoria e prática**. 1ª ed. [s.l.] Thesaurus, 2015.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª Edição ed. [s.l.] Bookman Editora, 2015.
- NIKBIN, I. M.; GOLSHEKAN, M. The effect of expanded polystyrene synthetic particles on the fracture parameters, brittleness and mechanical properties of concrete. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 94, p. 160–172, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.02.002>.
- OKE, A. *et al.* Drivers of sustainable construction practices in the Zambian construction industry. **Energy Procedia**, v. 158, p. 3246–3252, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.995>.

OLIVEIRA, M. C. B. R. **Gestão de Resíduos Plásticos pós-consumo: perspectivas para a reciclagem no Brasil**. 2012. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/maria_deoliveira.pdf.

PAN, Z.; LI, H.; LIU, W. Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 256–261, dez. 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814009908>.

PLASTBRINQ. **Poliuretano: o que é, classificações e características**. Disponível em: <https://plastbrinq.com.br/poliuretano/>. Acesso em: 15 set. 2019.

PNUD, P. das N. U. para o D. **Plataforma Agenda 2030**. Disponível em: <http://www.agenda2030.org.br/>. Acesso em: 25 ago. 2019.

REHMAN, M. U. *et al.* Formulation and characterization of geopolymer and conventional lightweight green concrete by incorporating synthetic lightweight aggregate. **Journal of Building Engineering**, v. 31, n. March, p. 101363, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101363>.

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

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS, W. N. Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 15, n. 1, p. 31–39, 2010. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762010000100005&lng=pt&tlng=pt.

SAÚDE, M. da. **Coronavírus Brasil**. Disponível em: <https://coronavirus.saude.gov.br/sobre-a-doenca>. Acesso em: 9 maio. 2020.

SAYADI, A. A. *et al.* Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 716–724, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.218>.

SCOBAR, R. L. **Concreto Leve Estrutural: substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida**. 2016. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

SHIROSAKI, R. K. **Caracterização de Painéis de Partículas de Madeira Tratada com CCB (sais de cromo, cobre e boro) confeccionados com Resina Poliuretana Mista**. 2019. Universidade Federal de São Carlos, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/11380>.

SILVA, M. D. da. Estudo Comparativo Entre a Utilização Dos Concretos Convencional E Leve Nos Elementos Horizontais Das Estruturas De Edifícios. p. 165, 2003.

SILVEIRA, C. B. da *et al.* Decomposição térmica de espumas de poliuretano para fabricação de vitrocerâmica celular de Li₂O-ZrO₂-SiO₂-Al₂O₃ (LZSA). **Química Nova**, v. 30, n. 5, p. 1104–1107, out. 2007. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422007000500010&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt.

SIQUEIRA, L. V. M.; STRAMARI, M. R.; FOLGUERAS, M. V. Adição de poliuretano expandido para a confecção de blocos de concreto leve. **Materia (Rio de J.)**, v. 9, n. 4, p. 399–410, 2004. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10607>.

STALTER, C. F.; MORAES, C. A. M.; BREHM, F. A. Revisão das Oportunidades de Reciclagem do Poliuretano Rígido. **7º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos**, 2016. Disponível em: <http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/view/95>.

TIONG, H. Y. *et al.* Environmental impact and quality assessment of using eggshell powder incorporated in lightweight foamed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118341, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118341>.

VIDAL, C. L.; GUERRA, C. J. Z.; FILHO, R. do C. N. Avaliação das resistências do concreto leve com argila expandida para possível utilização nas lajes em residências. **E-RAC**, 2018.

XIE, J. *et al.* Investigation of a new lightweight green concrete containing sludge ceramsite and recycled fine aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 235, p. 1240–1254, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.012>.

YANG, W. *et al.* Recycling and Disposal Methods for Polyurethane Foam Wastes. **Procedia Environmental Sciences**, v. 16, p. 167–175, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.023>.

ZWICKY, D. Mechanical properties of organic-based lightweight concretes and their impact on economic and ecological performances. **Construction and Building Materials**, v. 245, p. 118413, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118413>.