

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - CAMPUS SERTÃO

BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

STEFANY CAVALCANTE SILVA

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE PLACAS DE CONCRETO CELULAR
ESPUMOSO COMO ALTERNATIVA AO REVESTIMENTO DE ESTRUTURAS COM
TECNOLOGIA *LIGHT STEEL FRAME***

STEFANY CAVALCANTE SILVA

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE PLACAS DE CONCRETO CELULAR
ESPUMOSO COMO ALTERNATIVA AO REVESTIMENTO DE ESTRUTURAS COM
TECNOLOGIA *LIGHT STEEL FRAME***

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao programa de graduação da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção de grau acadêmico (Bacharelado) no curso de Engenharia Civil da UFAL – Campus Sertão.

Orientador: Prof. Msc. Alexandre Nascimento de Lima.

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza CRB-4 2209

S586e Silva, Stefany Cavalcante

Estudo de viabilidade da utilização de placas de concreto celular espumoso como alternativa ao revestimento de estruturas com tecnologia *Light Steel Frame* / Stefany Cavalcante Silva. - 2022.
59 f. : il.

Orientação: Alexandre Nascimento de Lima,
Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas.
Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2022.

1. Construção civil. 2. Concreto celular espumoso. 3. Tecnologia Light Steel Frame. I. Lima, Alexandre Nascimento. III. Título.

CDU: 624.05

Folha de Aprovação

STEFANY CAVALCANTE SILVA

ESTUDO DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE PLACAS DE CONCRETO CELULAR ESPUMOSO COMO ALTERNATIVA AO REVESTIMENTO DE ESTRUTURAS COM TECNOLOGIA LIGHT *STEEL FRAME*

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 15 de dezembro de 2022.

Alexandre Nascimento de Lima

Msc. Alexandre Nascimento de Lima, UFAL - Orientador

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 ALVERLANDO SILVA RICARDO
Data: 27/04/2023 10:54:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Alverlando Silva Ricardo, UFAL - Examinador Interno

Documento assinado digitalmente
 KARLISSON ANDRE NUNES DA SILVA
Data: 28/04/2023 20:26:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Msc. Karlisson André Nunes da Silva - Examinador Interno

Ao SENHOR, DEUS soberano sobre todas as coisas, em quem reside o poder, a glória e a majestade, por toda a misericórdia e o amor, que me permitiram chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Ao meu SENHOR, DEUS, Criador dos céus e da terra, que entregou seu único filho, JESUS, Autor e Consumador da minha fé, Alfa e Ômega, Princípio e Fim, em quem reside toda a plenitude, para morrer para que eu tivesse vida, o meu agradecimento. Sem a mão forte do meu DEUS que me sustentou em todos os momentos, não seria possível chegar até aqui. Finalizo a minha caminhada sem tê-lo negado, sem ter perdido a minha alma no processo árduo da universidade, e sobretudo, sem ter esquecido, em nenhum único momento, que a ELE, pertence ao primeiro lugar da minha vida. Meu Abba, obrigada por ter me salvado de mim mesma. Que eu te faça conhecido através da engenharia, todos os dias da minha vida.

Ao meu pai, meu exemplo de homem, profissional, por todo amor, paciência, cuidado e incentivo. Obrigada por todo o investimento e por nunca ter deixado de acreditar e se orgulhar, mesmo quando eu desacreditei de mim no processo. Te amo, amor da minha vida!

A minha mãe, uma mulher virtuosa, por todo o alento, o colo, as milhões de conversas de desabafo e por ter sido um auxílio presente em todas as situações, sempre pronta a me ajudar e me entregar o seu melhor. Te amo mãe, esse título é nosso!

Ao meu marido, que me suportou, me ajudou e me incentivou, em todos os momentos. Obrigada por ter sido um canal de DEUS para que eu chegasse até aqui, meu amor.

A minha irmã, Isis Cavalcante, por ter dividido tudo comigo nos últimos anos. Minha amiga, confiante, colega de turma, ombro pra chorar e parceira das reclamações. Você foi essencial para que eu chegasse até aqui.

Ao meu tio Lúcio Flávio, por ter tornado o sonho da universidade possível, me cedendo uma casa pra morar. Tio, obrigada pela paciência dos últimos anos, por ter feito tudo o que podia para que eu chegasse até aqui, essa vitória, eu também compartilho com você!

Aos meus amigos: Elaine Carvalho, Karen Cristina, Mariana Flávia, Carina Mergulhão, Wilma Barbosa, Helder Lima, Renan Pires, Allyson Maciel, Agnaldo Júnior e tantos outros, por todos os momentos divididos comigo nos últimos anos. Em especial a Eloyse Ricely, por ter me incentivado, ouvido, instruído, ensinado e ter tido paciência com todos os meus atrasos, em todos os trabalhos que fizemos juntas. Foi um grande presente ter compartilhado tanto com vocês.

A Kayo Matos e Roberto Júnior, por toda a parceria e a irmandade. Sempre prontos a estenderem as mãos, me ouvirem, compartilharem as experiências e a vida.

Aos meus líderes, amigos e colegas de ministério, por terem me guiado, aconselhado, ouvido e perdoado por todas as ausências necessárias por causa da universidade.

A Enactus UFAL Sertão, pode todo o aprendizado, crescimento e contribuição acadêmica que me proporcionou.

Aos meus professores, no geral, por terem contribuído da melhor forma, para que eu me tornasse a profissional que sou. Em especial, aos meus professores queridos, que tem um espaço especial no meu coração: Alverlando Ricardo, Rogério Santos e Antônio Netto, professores, foi uma honra poder ser ensinada por vocês, obrigada por todo auxílio, incentivo e inspiração.

Por último, mas não menos importante, o meu querido Orientador, professor Alexandre Lima. A sua vida, a sua orientação e o seu incentivo, me lembraram todos os dias que o SENHOR, DEUS sobre todas as coisas, cuida de todos os detalhes da minha vida. Sem nenhuma dúvida, a escolha despreziosa anos atrás, era mais um presente que DEUS havia me dado. Obrigada por tudo que fez por mim, e foi tanto, que não caberia nesse texto. Mas eu sei e JESUS também se lembra, e por isso, lhe afirmo com certeza que a sua recompensa virá dos céus. Foi uma grande honra ser sua aluna, orientanda, ter te ouvido e aprendido com você tantas e tantas vezes. Sem dúvidas, a profissional que eu sou, se inspirará sempre no profissional que você é. Obrigada!

“Porque DEUS amou o mundo de tal maneira que deu o seu Filho unigênito, para que todo aquele que nele crê não pereça, mas tenha a vida eterna.”

João 3:16

RESUMO

O avanço da tecnologia na construção civil está intrinsecamente ligado à necessidade de se ter processos mais eficientes, rápidos, econômicos e vantajosos, além de obter estruturas moldadas e erguidas com mais sustentabilidade e durabilidade. Dessa forma, a tecnologia *Light Steel Frame* se destaca por ser uma modalidade de construção de rápida execução. Da mesma forma, a aplicação do concreto celular em edificações tem crescido, uma vez que o material proporciona vantagens, como sua baixa densidade e um melhor conforto térmico e acústico. Nesse sentido, este estudo busca avaliar a aplicação de placas de concreto celular espumoso no revestimento de estruturas com tecnologia *Light Steel Frame*, utilizando também materiais de reforço, como as fibras de polipropileno e a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Para isso, cinco tipos de concretos celulares espumosos, com espumas geradas através da ação mecânica de um misturador e com aditivo químico espumígeno, foram moldados e avaliados, utilizando a mesma dosagem de referência, sendo, sem reforço, com 0,1%, 0,25% e 0,5% de fibra de polipropileno, além de 20% de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, no entanto, o traço com 0,5% de fibra de polipropileno não pôde ser ensaiado, pois a adição causou a perda das características do material. Foram avaliadas as propriedades em estado fresco (densidade e consistência do concreto fresco através da medida de seu assentamento) e no estado endurecido (resistência à tração na flexão e resistência à compressão). A partir dos ensaios, verificou-se que a resistência mínima para utilização não foi alcançada em nenhum dos traços estudados, não sendo viável, para as porcentagens de dosagem e reforço adotadas, a aplicação em revestimentos que demandam maior resistência à tração na flexão.

Palavras-Chaves: Light Steel Frame. Concreto Celular. Fibra de polipropileno. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Resistência à tração na flexão.

ABSTRACT

The advancement of technology in civil construction is intrinsically linked to the need to have more efficient, fast, economical and advantageous processes, in addition to obtaining molded and erected structures with more sustainability and durability. In this way, the Light Steel Frame technology stands out for being a construction modality of fast execution. Likewise, the application of cellular concrete in buildings has grown, since the material offers advantages, such as its low density and better thermal and acoustic comfort. In this sense, this study seeks to evaluate the application of foam concrete plates in the coating of structures with light steel frame technology, also using reinforcement materials, such as polypropylene fibers and sugarcane bagasse ash. For this, five types of foam concrete, with foam generated through the mechanical action of a mixer and with a foaming chemical additive, were molded and evaluated, using the same reference dosage, being, without reinforcement, with 0.1%, 0.25% and 0.5% polypropylene fiber, in addition to 20% ash from sugarcane bagasse, however, the mix with 0.5% polypropylene fiber could not be tested, as the addition caused the loss of material characteristics. The properties were evaluated in the fresh state (density and consistency of the fresh concrete by measuring its settlement) and in the hardened state (flexural tensile strength and compressive strength). From the tests, it was verified that the minimum strength for use was not reached in any of the traits studied, making it not feasible, for the percentages of dosage and reinforcement adopted, the application in coatings that demand greater flexural tensile strength.

Keywords: Light Steel Frame. Foam Concrete. Polypropylene fiber. Sugarcane bagasse ash. Flexural tensile strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema construtivo Light Steel Frame.....	17
Figura 2 - Placa de gesso acartonado resistente a umidade, de uso comum e resistente ao fogo	18
Figura 3 - Placas Cimentícias aplicadas à estrutura LSF	19
Figura 4 - Placas de OSB.....	20
Figura 5 - Tecnologia <i>Smartside</i>	20
Figura 6 - Siding Vinílico em material cimentício.....	21
Figura 7 - Concreto de agregado leve, substituição nas partículas de agregados; Concreto Celular, substituição na pasta de cimento; Concreto sem finos, referente a substituição entre agregados graúdos.....	22
Figura 8 - Definições quanto às características dos tipos de concreto celular.....	23
Figura 9 - Autoclave industrial.....	24
Figura 10 - Tipos de concretos celulares espumosos.....	25
Figura 11 - Cadeia Têxtil das principais fibras.....	27
Figura 12 - Estrutura de uma fibra vegetal.....	28
Figura 13 - Método de dosagem.....	34
Figura 14 - Espuma formada a partir da operação do misturador.....	38
Figura 15 - Ensaio de consistência do concreto fresco através da medida de seu assentamento.....	38
Figura 16 - Verificação da densidade no estado fresco.....	39
Figura 17 - Moldagem das placas para ensaio de tração na flexão.....	40
Figura 18 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos para ensaio de compressão.....	40
Figura 19 - Concreto Celular com 0,5% de fibra de polipropileno.....	41
Figura 20 - Ensaio de Tração na Flexão.....	42
Figura 21 - Corpo de prova rompido a tração na flexão.....	42
Figura 22 - Ensaio de Compressão.....	43
Figura 23 - Corpo de prova rompido a compressão.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Volume percentual da adição de fibras de polipropileno na mistura homogênea...	36
Tabela 2 - Parâmetros de entrada da dosagem.....	45
Tabela 3 - Porcentagem de adição em cada amostra.....	45
Tabela 4 - Composição granulométrica.....	45
Tabela 5 - Massas específicas/absorção.....	46
Tabela 6 - Dosagem de Concreto Celular a partir do método de Ferreira (1987).....	46
Tabela 7 - Slump Test.....	46
Tabela 8 - Densidade em estado fresco.....	47
Tabela 9 - Resultados de Resistência à Tração na Flexão de cada Amostra.....	47
Tabela 10 - Resultados de Resistência à Compressão de cada Amostra.....	48

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1.	Justificativa	13
1.2.	Objetivo Geral	14
1.3.	Objetivos Específicos	14
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1.	O sistema construtivo Light Steel Frame	14
2.2.	Revestimentos aplicados ao Sistema LSF	16
2.2.1.	Placas de Gesso Acartonado	16
2.2.2.	Placas Cimentícias	16
2.2.3.	Placas de OSB	17
2.2.4.	Tecnologia Smartside	18
2.2.5.	Siding Vinílico	18
2.3.	Conforto termoacústico de estruturas com tecnologia LSF	19
2.4.	Concreto Celular	19
2.4.1.	História	21
2.4.2.	Concreto Celular Autoclavado	22
2.4.3.	Concreto Celular Espumoso	23
2.4.4.	Adição de fibras e sua interferência na resistência de concretos celulares	26
2.4.4.1.	Fibras Naturais	26
2.4.4.2.	Fibras Químicas	26
2.4.5.	Cinzas e sua adição em placas de concreto celular	28
2.4.6.	Tração na flexão e compressão em corpos de prova de concreto	29
2.4.7.	Estudos e abordagens dos concretos celulares	29
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1.	Caracterização e preparação dos materiais	30
3.1.1.	Cimento Portland	30
3.1.2.	Agregado Miúdo	30
3.1.3.	Água	30
3.1.4.	Aditivo incorporador de ar	30
3.1.5.	Fibra de Polipropileno	30
3.1.6.	Adição Mineral	31
3.2.	Dosagem dos traços de concretos celulares espumosos	31

3.2.1.	Adição de Fibras de Polipropileno	34
3.2.2.	Adição de Cinza	35
3.3.	Confecção dos concretos	35
3.3.1.	Confecção da Espuma	36
3.4.	Ensaio de Estado Fresco	36
3.4.1.	Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone (Slump Test)	36
3.4.2.	Verificação da Densidade no Estado Fresco	36
3.5.	Ensaio de Estado Endurecido	37
3.5.1.	Moldagem	37
3.5.2.	Cura	38
3.5.3.	Ensaio de Tração na Flexão	39
3.5.4.	Ensaio de Resistência à Compressão	40
3.5.5.	Análise de Variância	41
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1.	Dados dos Materiais	42
4.1.1.	Análise granulométrica do Agregado miúdo	44
4.2.	Cálculo da Dosagem	45
4.3.	Ensaio no Estado Fresco	45
4.3.1.	Abatimento do Tronco de Cone (Slump Test)	45
4.3.2.	Densidade no Estado Fresco	45
4.4.	Ensaio de Tração na Flexão	47
4.5.	Ensaio de resistência à compressão	49
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
5.1.	Sugestões de trabalhos futuros	52
	REFERÊNCIAS	52

1. INTRODUÇÃO

A partir do avanço da construção civil e dos desafios que surgem como consequência, linhas de pesquisas são criadas com a intenção de se estudar materiais e criar tecnologias que tornem os processos construtivos mais rápidos, econômicos e vantajosos. Sabendo-se disso, pode-se citar o concreto celular e a tecnologia *Light Steel Frame* (LSF), como dois exemplos do avanço tecnológico gerado pela perspectiva da necessidade de obter-se estruturas moldadas e erguidas com sustentabilidade e durabilidade.

Nota-se que, embora o avanço científico proporcione a viabilização da aplicação de métodos, materiais e edificações mais vantajosos, o setor da construção civil esbarra em dificuldades próprias do canteiro de obras, já que a mão de obra costuma não ser especializada e, de acordo com Breda (2012), torna-se quase sempre limitado a materiais e pessoas, fazendo com que as empresas do segmento continuem a aplicar métodos defasados e, muitas vezes empíricos, acumulando prejuízos.

No Brasil, as estruturas são erguidas convencionalmente em concreto armado, uma combinação de concreto e aço, dimensionadas de modo a resistir aos esforços solicitantes. No entanto, as estruturas, quando moldadas *in loco*, na maior parte dos casos, são dosadas e construídas de forma empírica, uma vez que não há ensaio de resistência durante sua execução e nem uma dosagem precisa do material. Além disso, como o avanço na construção da edificação ocorre baseada na produtividade dos colaboradores, as obras acabam custando e durando mais tempo do que é previamente planejado.

Uma alternativa a concepção de edificações mais rápidas, precisas e vantajosas, é a Tecnologia *Light Steel Frame* que, segundo Freitas e Crasto (2006), é formada por perfis de aço galvanizado, que permite a sua utilização em painéis estruturais e não estruturais, pré-moldados e montados com precisão e agilidade. Para seu revestimento, são aplicadas placas parafusadas e lãs de vidro ou lãs PET, para que haja conforto térmico e acústico.

Rápida, precisa e com menos geração de resíduos, as estruturas em *Light Steel Frame* comprovam o avanço tecnológico que permite o estudo e a viabilização de métodos construtivos mais vantajosos. No entanto, a tecnologia que não leva concreto em sua composição estrutural, tem delimitações técnicas, já que, embora o aço suporte bem os esforços solicitantes, limita a construção a cinco pavimentos.

Assim como as estruturas LSF mencionadas, o concreto celular, um tipo de concreto especial, surge como uma inovação, uma vez que a concepção do concreto é motivada a partir

da compreensão das inúmeras possibilidades de estudo do material, e suas diferentes aplicações na construção civil.

Segundo Silva (2015), o concreto celular é obtido através de bolhas de ar que são distribuídas uniformemente, geradas de forma química ou mecânica e homogêneas, além de serem estáveis. Dentre suas vantagens, pode-se citar o peso próprio reduzido quando pré-moldado e, em função disso, seu manuseio e transporte são facilitados, e produz redução das cargas que atuam na fundação, além de ter uma baixa condutividade térmica, o que significa que suas placas pré-moldadas são eficientes termicamente.

Na tecnologia LSF, as placas usadas para revestimento costumam ser de gesso acartonado ou placas cimentícias e, sendo materiais em que não há um satisfatório conforto térmico e acústico, é usado um tipo de lã, entre as placas, para melhorar o desempenho da estrutura. Propõe-se, então, as placas de concreto especial, sendo o concreto celular espumoso, como uma alternativa ao revestimento que não necessitaria de material adicional para proporcionar conforto, uma vez que o material é eficiente térmica e acusticamente.

Tanto a tecnologia *Steel Frame* como o concreto celular espumoso, podem ser pré-moldados previamente, transportados e executados com agilidade e precisão. Dessa forma, a aplicação das placas deste tipo em edificações reduziria a necessidade de material para isolamento, além de serem levadas ao canteiro apenas para montagem, assim como as treliças estruturais da edificação.

1.1. Justificativa

Levando em consideração que não há estudo científico acerca da utilização de placas de concreto celular espumoso para revestimentos de estruturas com tecnologia *Light Steel Frame*, o presente estudo se faz necessário para avaliar o desempenho quanto à tração na flexão e compressão, assim como a utilização de reforços no compósito, tais como as fibras de polipropileno e a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, tendo em vista a possibilidade de aplicação no revestimento de construções de rápida execução.

1.2. Objetivo Geral

Analisar o comportamento do concreto celular espumoso e o seu desempenho físico-mecânico em placas pré-moldadas de revestimento de estruturas com tecnologia *Light Steel Frame*.

1.3. Objetivos Específicos

- Analisar a resistência à tração na flexão e compressão das placas em concreto celular espumoso.
- Investigar a influência de fibras de polipropileno e cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento físico-mecânico das placas pré-moldadas.
- Estudar a viabilização da utilização de placas de concreto celular no revestimento de estruturas com tecnologia *Light Steel Frame*.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será apresentada uma análise ao processo construtivo das estruturas em tecnologia *Light Steel Frame*, assim como as particularidades dos seus revestimentos usuais. De igual modo, também será descrita as particularidades do concreto celular e os estudos de suas características específicas.

2.1. O sistema construtivo *Light Steel Frame*

A história da industrialização demonstra como foi o processo de avanço tecnológico e científico da produção de bens de consumo, com ênfase na evolução dos processos, das ferramentas e da substituição de mão de obra por aparelhos mecânicos e eletrônicos. De igual forma, na construção civil, embora seja uma área de atuação que proporcione a aplicação de várias ferramentas e tecnologias, continuou, do ponto de vista técnico, refém quase sempre de uma mão de obra pouco qualificada, com baixa produtividade, maior custo, mais tempo de atividade e morosidade, e ainda com desperdício, prejuízo, retrabalho e baixo controle de qualidade.

Diante desse cenário, nasceu o método construtivo conhecido como *Light Steel Frame*, formado por perfis de aço galvanizados e chamado de construção a seco, segundo Burstrand (1998), devido a utilização de materiais que não levam água em sua aplicação, tais como perfis de aço, placas de vedação e lâs de PET ou vidro. Mais rápido, mais econômico e com o mínimo de desperdício, o sistema construtivo tornou-se conhecido e a sua aplicação cada dia mais estudada, por solucionar as maiores dores da indústria: desperdício, tempo e economia nos processos.

Baptista (2005) descreve o uso dos elementos pré-fabricados como um grande avanço para o canteiro de obras. A utilização destes componentes industrializados tornou-o mais organizado e seguro, além de contar com uma mão de obra mais especializada e fornecedores mais cuidadosamente selecionados, atingindo significativamente o custo e a qualidade do canteiro.

Bernardes *et al.* (2012) conceitua que a divisão do sistema LSF em elementos estruturais faz com que cada um resista a uma parcela menor da carga total aplicada, tornando possível a utilização de perfis mais esbeltos, leves, e mais facilmente aplicados.

Quanto à composição, os elementos de aço galvanizado devem ser revestidos e a NBR 15253 (ABNT, 2014) define que as massas mínimas de revestimento devem ser de 150 g/m²,

quando usada liga alumínio-zinco, 180 g/m² quando de zinco e para perfis estruturais, além de 100 g/m² para perfis não estruturais.

A Figura 1 mostra o sistema construtivo *Light Steel Frame* em fase de montagem estrutural.

Figura 1: Sistema construtivo *Light Steel Frame*



Fonte: Gomes *et. al.* (2013)

2.2. Revestimentos aplicados ao Sistema LSF

Atualmente, há várias opções de revestimentos disponíveis no mercado, sendo as placas de gesso acartonado e placas cimentícias, as mais usuais. No entanto, placas OSB, tecnologia *Smartside* e *Siding* vinílico também são aplicáveis.

2.2.1. Placas de Gesso Acartonado

Utilizado normalmente em vedações internas, uma vez que as placas de gesso acartonado, segundo Bauer (2012), não detêm características que viabilizem seu uso estrutural, as placas de vedação são fabricadas em três opções: tipos padrão, resistente a umidade e resistente ao fogo.

Embora convencionalmente usadas em sistema *Drywall*, sendo uma opção em divisórias não-estruturais, as placas também são opções viáveis ao revestimento em estruturas LSF, uma vez que não há contravento na estrutura, são leves, desmontáveis, com baixo volume de material, além de ser montada com modulação flexível.

A Figura 2 apresenta as placas de gesso acartonado disponíveis em três categorias de utilização, azul, branca e vermelha, respectivamente resistente a umidade, material convencional, e resistente ao fogo.

Figura 2: Placa de gesso acartonado resistente a umidade, de uso comum e resistente ao fogo.



Fonte: Distribuidora Sulmódulos (2022)

2.2.2. Placas Cimentícias

As placas cimentícias, também denominadas placas de fibrocimento, tem sua utilização regularizada através da NBR 15498 (ABNT, 2021), que a caracteriza como um material originário da mistura entre cimento portland, agregados, fios, filamentos ou telas, e ainda adições de aditivos que definem a classe e a categoria de aplicação.

Diferentemente das placas de gesso acartonado, podem ser usadas em aplicações externas que as sujeitem à exposição aos efeitos do tempo e temperatura, tais como: sol, chuva, calor e umidade.

A composição da placa, quanto a adição de reforços, também determina a resistência à tração na flexão e a sua utilização, mediante composição, deve ser indicada pelo fabricante quanto a sua classe. Devido a sua resistência, é um dos revestimentos mais usuais utilizados em estruturas com tecnologia *Light Steel Frame*.

A Figura 3 apresenta as placas cimentícias que são aplicadas em estruturas com tecnologia *Light Steel Frame*.

Figura 3: Placas cimentícias aplicadas à estrutura LSF.



Fonte: S&S Milênio (2022)

2.2.3. Placas de OSB

De acordo com LP (2012) a sigla OSB, *Oriented Strand Board*, que significa Painel de Tiras de Madeira Orientadas, podem ser usadas tanto para fechamento interno quanto externos e detém uma aplicação diversificada que abrange forros, pisos e, ainda, cobertura de telhado. No entanto, a utilização do material exige impermeabilização, quando utilizado em áreas externas.

As placas possuem componentes resistentes à água e, segundo descreve Roman *et. al.* (2018), prensadas sob alta pressão e temperatura, e seus componentes são orientados entre 3 e 5 camadas perpendiculares.

Sendo um produto de considerável resistência mecânica, seu uso é indicado ainda em revestimentos internos que devem suportar cargas solicitantes, quando há instalação de mobiliário e bancadas, por exemplo.

A Figura 4 apresenta as placas de OSB, normalmente comercializadas em espessuras variadas.

Figura 4: Placas de OSB.

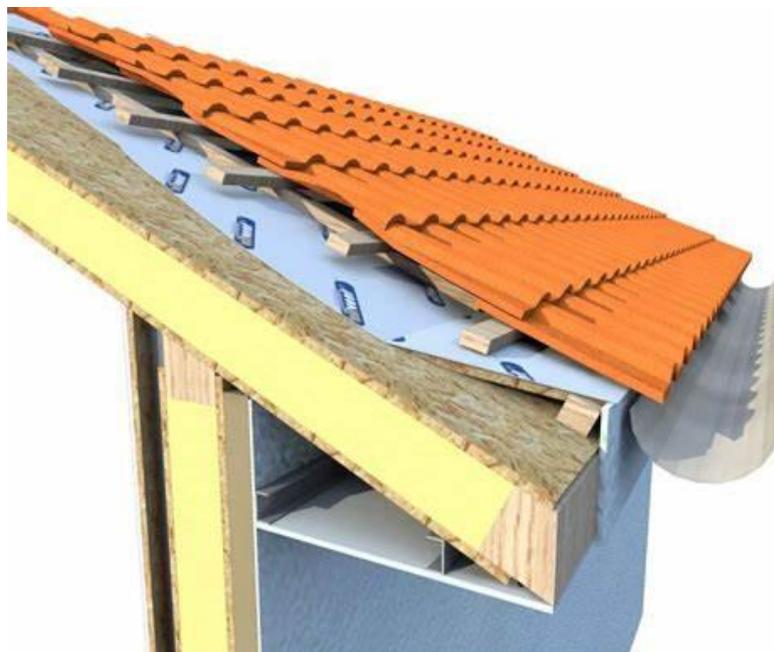


Fonte: *Conseils Professionnels* (2022)

2.2.4. Tecnologia *Smartside*

Segundo Roman *et. al.* (2018), neste tipo de revestimento, as paredes têm função estrutural e, por isso, são compostos de perfis leves de aço zincado. Além disso, a tecnologia *SmartSide*, com OSB prensados a altas temperaturas, assegura um desempenho elevado quanto a chuva e umidade, viabilizando sua utilização, tanto interna quanto externamente. A Figura 5 demonstra o método construtivo da tecnologia *smartside*.

Figura 5: Tecnologia *Smartside*



Fonte: *Austral Construcciones* (2022)

2.2.5. *Siding* Vinílico

Comuns nas residências americanas, o *Siding* Vinílico é um revestimento composto por placas paralelas, usualmente em PVC, podendo ser fabricadas em madeira ou, como mostra a Figura 6, em material cimentício, e usados convencionalmente em fachadas.

Figura 6: *Siding* Vinílico em material cimentício.



Fonte: Distribuidora Sulmódulos (2022)

O material, de acordo com Campos (2014), possui características que garantem um acabamento adequado, além de ter uma manutenção simplificada e ter sua instalação a partir da aplicação de uma membrana através de parafusos.

2.3. Conforto termoacústico de estruturas com tecnologia LSF

Como já mencionado, estruturas em *Light Steel Frame* são compostas por aço galvanizado e placas de vedação, que se assemelham visualmente às construções usuais de alvenaria, quando finalizadas. Estas placas oferecem um papel importante na vedação da estrutura, mas, dependendo do material, tem um comportamento diferente quanto ao conforto térmico e acústico da edificação.

Usualmente, as placas utilizadas, seja de gesso acartonado, seja de placas cimentícias, não são tão eficientes termoacusticamente e, por isso, é usado um componente, internamente às

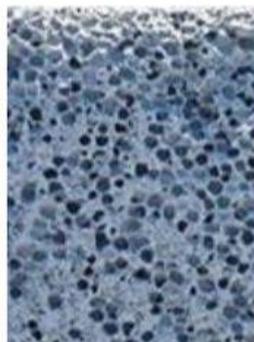
placas, para proporcionar mais conforto à edificação. Este componente costuma ser em lã de vidro.

2.4. Concreto Celular

A norma americana ASTM C796 (ASTM, 2019) conceitua o concreto celular como um produto composto por uma estrutura de vazios homogêneos que são gerados a partir da adição de produtos químicos ou agentes espumantes. Inseridos na classe dos concretos leves, as bolhas de ar que são formadas através da adição de uma espuma, são as responsáveis pela redução da massa específica do material e, a partir disso, sua classificação.

Salgado (2019) menciona que, em comparação com o concreto convencional, com densidade que varia entre 2200-2600 kg/m³, o concreto celular desempenha um melhor isolamento térmico, redução do tamanho das fundações e, ainda, diminuição do peso próprio da estrutura. Há três meios para reduzir a densidade do concreto, substituindo parcialmente os materiais sólidos por bolhas de ar, sendo, de acordo com Neville (1995), nas partículas de agregados, na pasta de cimento, demonstrado na figura 7, ou entre os agregados graúdos.

Figura 7: Concreto celular, substituição na pasta de cimento.



Fonte: Souza (2020)

No Brasil, as normativas que regulamentam as especificações do concreto celular, instituídas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas são: NBR 13438 (ABNT, 2013), NBR 12644 (ABNT, 2014) e NBR 12646 (ABNT, 1992).

2.4.1. História

De acordo com Ferreira (1987) *apud* Souza (2020) o sueco Eriksson, de Stockholm, é considerado o pai do concreto celular, uma vez que a patente mais significativa do assunto foi publicada em 1923. No entanto, de acordo com Rudolph e Valore (1954), o primeiro estudo

sobre os processos iniciais de concepção do concreto celular foi concedida por Aylsworth e Dyers em 1914, e se referia a alumínio e metais em pó que formavam gases quando em contato com misturas cimentícias.

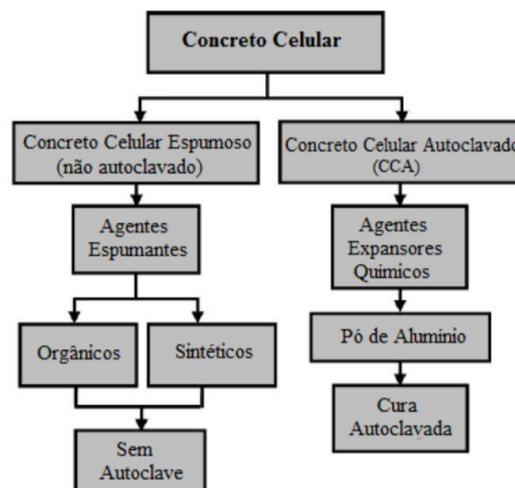
Rudolph e Valore (1954), além de Souza (2020), conceituam ainda que, com o passar dos anos, mais estudiosos fizeram descobertas significativas a respeito do assunto. Em 1923, Bayer estudou a preparação de concretos celulares a partir de espumas de ar pré-formadas e depois adicionadas em pastas cimentícias. Em 1929, Ricell recebeu patentes referentes às suas descobertas acerca de agentes espumantes, procedimentos e máquinas de mistura.

Em 1987, o brasileiro Oswaldo A. R. Ferreira, desenvolveu um método de dosagem, na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, acerca de concretos celulares espumosos, sendo um pioneiro no Brasil sobre o assunto. O método de dosagem concebido por Oswaldo Ferreira será utilizado para a concepção dos concretos celulares estudados neste trabalho.

2.4.2. Concreto Celular Autoclavado

Narayanan e Ramamurthy (2000) mencionam que o concreto celular é classificado a partir de três parâmetros: 1) método de formação de poros, sendo formados através de processos químicos, mecânicos ou intermediários; 2) tipo de ligante, sendo cimento ou cal; além do 3) método de cura, sendo autoclavado ou não-autoclavado (espumoso). Estes parâmetros afetam o desempenho mecânico final do material. A Figura 8 apresenta as definições quanto às características de cada um dos tipos de concretos celulares.

Figura 8: Definições quanto às características dos tipos de concreto celular



Fonte: Hamad (2014)

O concreto celular autoclavado (CCA), de acordo com Salgado (2019), é caracterizado através do processo mecânico que produz a estrutura porosa do material, advinda da introdução de vazios feita por agentes expansores como o pó de alumínio e que produz uma reação química que libera hidrogênio, expandindo o volume da mistura (criando poros).

Tada e Nakano (1983) avaliaram as diferenças qualitativas da estrutura porosa dos concretos celulares, a partir de técnicas de adsorção isotérmica e injeção de mercúrio. No concreto celular autoclavado, há uma tendência menor de formação de fissuras a partir da retração no processo de cura, quando comparado ao concreto celular não autoclavado.

O processo industrial que gera o CCA, de acordo com Melo (2009), consiste no processo de autoclavagem, que refere-se a uma cura a vapor, com condições de pressão e temperatura controladas (10 atm e 180 °C) em um forno especial, conforme mostra a Figura 9, que proporciona uma reação química e acelera a hidratação do concreto.

Figura 9: Autoclave industrial.



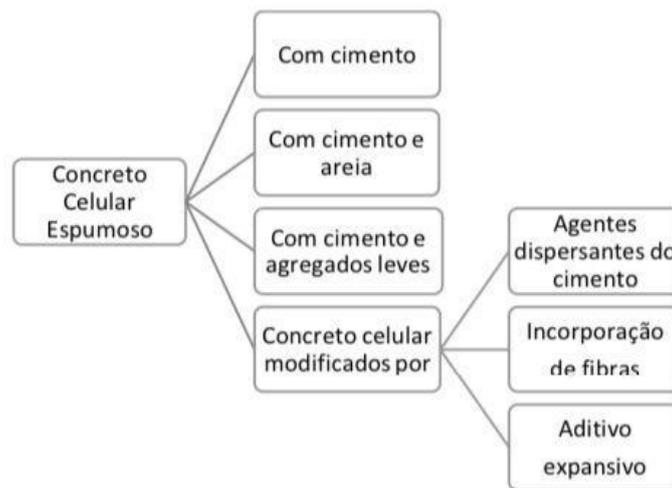
Fonte: Olymspan (2022)

2.4.3. Concreto Celular Espumoso

Os concretos celulares gerados por agentes espumígenos, denominados concretos celulares espumosos, de acordo com Teixeira Filho e Tezuka (1992), podem receber a incorporação das bolhas a partir uma espuma pré-formada e introduzida após o preparo da mistura homogênea, ou, ainda, pode ser gerada através da ação mecânica de um misturador, onde o agente espumígeno é diluído na água e a espuma é gerada através da operação num equipamento apropriado.

Teixeira Filho e Tezuka (1992) mencionam que existem alguns tipos de misturas homogêneas possíveis à formação do concreto celular espumoso, conforme apresentado na Figura 10. Os autores mencionam, ainda, que traços com adição apenas de cimento detêm densidade máxima de 800 kg/m^3 e que, para alcançar densidades mais elevadas, é recomendável a utilização de agregados miúdos nas composições. A mistura tem a finalidade de melhorar a relação entre a massa específica e a resistência mecânica do material.

Figura 10: Tipos de concretos celulares espumosos.



Fonte: Salgado (2019) adaptado de Teixeira Filho e Tezuka (1992)

Diferentemente do concreto tradicional, o concreto especial espumoso mencionado não detém a mesma resistência, pois as bolhas de ar que o formam, assim como seus agregados, modificam sua densidade. Diminuindo a massa específica, se reduz os esforços na estrutura, sendo, então, ideal para utilização em que haja esforços menores de compressão.

Nas faixas de baixa densidade o concreto celular não desenvolve a resistência à compressão do concreto convencional. Embora isto pode ser uma desvantagem em aplicações de concreto convencional, é uma vantagem nas aplicações de concreto celular. Deve-se considerar que o concreto celular e o concreto convencional são normalmente utilizados para diferentes tipos de aplicações. (SOUSA E VIEIRA, 2017)

Teixeira Filho e Tezuka (1992) mencionam que a leveza obtida através da incorporação das bolhas de ar, afeta outras propriedades físicas do material, melhorando o desempenho como isolante térmico e resistência ao fogo. Como consequência, é comum a aplicação como isolante acústico e no isolamento térmico de coberturas.

Quanto às propriedades do concreto celular espumoso, Breda (2012) menciona que, quando se trata do concreto em estado fresco, diferentemente do concreto convencional, a

mistura homogênea precisa ser mais fluída, sendo um material com grande trabalhabilidade e plasticidade na matriz.

Cortelassi e Toralles-Carbonari (2008) alertam que, ao mesmo tempo que trata-se de uma mistura com grande trabalhabilidade, fluidez e plasticidade, se trata de um material com uma resistência à compressão significativamente inferior à do concreto convencional. Isso porque a soma dos vazios que o faz poroso, sendo uma das suas características mais significativas, é um dos principais causadores do aumento da retração, sendo um fator a ser considerado na escolha do processo de cura, uma vez que afetará diretamente a resistência mecânica do material.

Ferreira (1986) *apud* Breda (2012) menciona que a retração no concreto é uma manifestação física que surge a partir da variação dimensional do material, desde a compactação até o estado limite de equilíbrio. Além disso, a perda de umidade durante o processo de cura, causando o fenômeno, tende a ser acelerado quando há tensões internas entre os grãos dos agregados, ultrapassando sua resistência, e ocasionando o aparecimento de fissuras em concretos mais jovens.

A cura do concreto celular em contato com a atmosfera, segundo Ferreira (1986) *apud* Breda (2012), faz com que o material sofra o ataque do gás carbônico presente no ar, além das variações de temperatura, facilitando a carbonatação e provocando o agravamento das fissuras causadas pelo processo de retração. Além disso, Sacht (2008) ressalta a necessidade de evitar a aplicação do material em ambientes onde é possível o ataque de cloretos, como em ambientes marinhos.

Com o intuito de diminuir a retração do concreto, Freitas (2004) menciona que é possível adicionar fibras à mistura homogênea, pois estas causariam a limitação das fissuras e aumentariam a resistência à tração na flexão do material.

2.4.4. Adição de fibras e sua interferência na resistência de concretos celulares

A NBR 12646 (ABNT, 1992) define fibras, que podem ser naturais ou químicas, como uma adição a mistura homogênea que é capaz de aumentar a resistência a tração, ao mesmo tempo que ajuda a controlar os efeitos da retração no concreto celular espumoso.

Gethal (2003) menciona que a redução das fissuras provocadas pela retração a partir do uso de fibras é causada por serem materiais leves, fortes e que resistem bem aos agentes químicos, além de não se oxidarem e nem absorverem água. A Figura 11 apresenta a cadeia têxtil das principais fibras naturais e químicas existentes.

Figura 11: Cadeia Têxtil das principais fibras

Fibras	Naturais	Animais	Alpaca • Angorá • Cabra • Camelo • Casimira • Catgut • Coelho • Lã • Lhama • Mohair • Seda • Teia de aranha
		Vegetais	Abacá • Algodão • Cânhamo • Caroá • Coco • Giesta • Juta • Linho • Malva • Paina • Phormium • Ráfia • Rami • Sisal • Tucum
		Minerais	Crisotila • Crocidolita • Fibra de basalto
	Químicas	Artificiais	Acetato • Alginato • Cupro • Fibra proteica • Lyocell • Modal • Triacetato • Viscose
		Sintéticas	Acrílica • Aramida • Clorofibra • Elastano • Elastodieno • Fluorofibra • Modacrílica • Poliamida • Policarbamida • Polychal • Policloroeteno • Policlorofluoretileno • polietileno • Poliéster • Poliestireno • Polipropileno • Politetrafluoretileno • Poliuretano • Poli(álcool vinílico) • Poli(cloreto de vinilideno)
		Inorgânicas	Fibra cerâmica • Fibra de carbono • Fibra de vidro • Lã de escória • Fibra metálica

Fonte: Cardoso (2009)

2.4.4.1. Fibras Naturais

Em geral, as fibras naturais detêm bom desempenho mecânico e um baixo custo, além de serem leves e abundantes e, segundo Salgado (2019), também são isolantes térmicos e acústicos. Dentre suas características, o seu desempenho quanto à densidade, resistência, módulo de elasticidade, deformação e rigidez, as fazem ótimas opções para diversas aplicações industriais.

As fibras vegetais, por exemplo, segundo cita Salgado (2019), podem ser categorizadas a partir da região a qual são extraídas, como semente, caule, folha ou fruto. Segundo a autora, as fibras que são provenientes do caule costumam possuir maior resistência à tração e por isso são utilizadas em produtos duráveis. Destas, pode-se citar a fibra de coco, linho e algodão, além de cânhamo, sisal e juta.

Salgado (2019) alerta que o desempenho das fibras naturais, diferentemente das fibras convencionais químicas, varia dependendo de suas características particulares, como diâmetro, origem e estrutura. O processo de envelhecimento, as composições climáticas e a composição química das fibras são aspectos importantes a avaliar através de sua morfologia.

Para a fibra vegetal, com estrutura mostrada na Figura 12, a sua morfologia é constituída por diversas camadas e os aspectos físicos, como comprimento, formato e diâmetro influenciam

sua resistência. A fibra natural mais utilizada mundialmente, de acordo com Cardoso (2009) é a fibra de algodão.

2.4.4.2. Fibras Químicas

Segundo Cardoso (2009) a fibra química mais amplamente utilizada a nível global é o poliéster e a utilização de fibras sintéticas em larga escala é motivada pelas incertezas acerca da produção de fibras naturais que estão sujeitas, por exemplo, a condições climáticas. O aperfeiçoamento tecnológico da produção de fibras sintéticas as fazem estar ainda mais próximas das fibras naturais.

Um dos primeiros reforços utilizados, a fibra química de carbono é comumente utilizada, segundo Lebrão (2008), como um material de reforço que aumenta a rigidez e a resistência dos materiais. Possuindo um bom desempenho de resistência à tração, módulo de elasticidade e fadiga, além de uma baixa massa específica, amortecimento de vibrações, resistência térmica e estabilidade dimensional, são comumente utilizadas em aplicações industriais.

A fibra de vidro, por sua vez, é constituída de substâncias minerais com alta resistência ao impacto e a corrosão, além de ter um baixo custo, se comparada à fibra de carbono, por exemplo. Além de apresentar excelentes propriedades mecânicas, segundo cita Fiorelli (2002), o material deriva produtos, como os tecidos de fibras unidirecionais, que são recomendados para utilização em reforço e recuperação de elementos estruturais.

De acordo com Braz e Nascimento (2015), as fibras de aço, por sua vez, são muito utilizadas em aplicações estruturais e não estruturais, uma vez que tem elevada aderência à matriz cimentante e melhora as propriedades físico-mecânicas dos materiais, quando utilizadas.

As fibras de polipropileno são um exemplo de fibras sintéticas amplamente utilizadas na indústria tecnológica. Segundo Melo (2009), o polipropileno é um termoplástico semicristalino e a maior parte do material comercializado é isostático.

Sabendo que as fibras de polipropileno, no estado plástico, conferem ao concreto coesão, resistência interna e plasticidade, Khajuria e Balagaru (1992) *apud* Melo (2009) afirmaram que de 0,45 kg a 0,90 kg de fibra por metro cúbico de concreto, a adição reduziria a fissuração, obtendo-se um concreto com maior durabilidade, resistência ao impacto e à abrasão, além de menor permeabilidade.

Um estudo produzido por Bonakdar *et. al.* (2013) avaliou que 0,18%, 0,27% e 0,36% seriam frações volumétricas ótimas, para o bom desempenho mecânico das fibras. No entanto,

Silva (2015) menciona que acima de 0,5% de adição, pode reduzir a trabalhabilidade do concreto, sendo este o limite para redução da fissuração por retração.

2.4.5. Cinzas e sua adição em placas de concreto celular

De acordo com Kniess (2005), as cinzas podem ser subdivididas em dois grupos, sendo cinzas volantes e cinzas pesadas. As cinzas volantes se caracterizam por serem leves e finas o suficientes para serem arrastadas pelos gases de combustão. A cinza pesada, no entanto, como o próprio nome revela, é um resíduo industrial fundido em partículas maiores que costumam ficar retidas na caldeira e a sua utilização requer redução do tamanho de suas partículas e o seu resfriamento.

Hauser *et al.* (1999) *apud* Melo (2009) estudaram a influência da cinza volante como um aglomerante que substituiria parcialmente a cal. Ele constatou que o resíduo, por causa da sua concentração de sulfato, melhora a resistência à compressão no concreto. Chi *et al.* (2003) *apud* Melo (2009) verificaram que a quantidade de agregado, além do fator água/cimento, são elementos fundamentais na determinação de resistência à compressão, além do módulo de elasticidade.

Além do bom desempenho mecânico, de acordo com Cordeiro (2009), atualmente diversos materiais como cinzas volantes, sílica ativa e metacaulim, são utilizados como substitutos parciais de cimento portland, impactando diretamente o ambiente, uma vez que a fabricação do cimento emite dióxido de carbono durante sua produção.

Com relação às cinzas pesadas, pode-se citar a cinza do bagaço de cana-de-açúcar que, segundo Cordeiro (2009), em aspectos gerais, é principalmente constituída de sílica em 60% de sua massa, e, por isso, pode ser empregada como pozolana, que trata-se de um material inorgânico silicoso que pode apresentar características aglomerantes quando moído, sendo também uma adição que proporciona impactos relativos a despesas e meio ambiente, agregando valor, por tratar-se de um resíduo agroindustrial que pode apresentar também vantagens técnicas.

Wongkeo *et al.* (2012) estudaram o efeito da substituição parcial do cimento por cinzas com uma porcentagem que variou entre 0% a 30%, apresentando, então, aumento na resistência à compressão e à flexão.

2.4.6. Tração na flexão e compressão em corpos de prova de concreto

Esforços solicitantes comumente avaliados, a resistência à tração e a compressão dos materiais estabelece sua utilização, estimando a carga em que ocorrerá a fissuração.

Segundo Farias et. al. (2018), o conhecimento quanto a tração pode ser obtido em três tipos de ensaio, sendo: tração direta, tração por compressão diametral e tração na flexão. De toda forma, ao avaliar a resistência à tração, é possível prever a durabilidade, resistência ao cisalhamento, torção e retração, além da aderência entre o concreto e a armadura.

Quanto à compressão, Medeiros Junior (2014), menciona que a verificação desta resistência na engenharia é indispensável, uma vez que a resistência a este esforço estabelece um critério de aceitação do material para utilização. Alguns fatores podem interferir nessa propriedade do concreto em estado endurecido. No entanto, espera-se sempre uma resistência maior, quando comparado à tração na flexão, uma vez que o concreto resiste muito mais quando comprimido.

2.4.7. Estudos e abordagens dos concretos celulares

Um século depois das descobertas iniciais sobre o concreto celular, muitos estudos e avanços foram feitos, desde a instituição de métodos de dosagem, até a interferência na resistência mecânica de diversos tipos de materiais, com e sem adições de fibras e cinzas.

Salgado (2019) analisou o comportamento de painéis sanduíches constituídos por camadas de compósitos reforçados com fibras de curauá, separadas por um núcleo de concreto celular autoclavado. Já Melo (2009) propôs uma tecnologia de produção de elementos construtivos pré-fabricados usando o concreto celular polimérico com adição de resíduo insaturado termofixo e fibras de polipropileno.

Queiroz e Castro (2019) desenvolveram uma pesquisa que estudou formulações de concreto celular espumoso com ecofiller de resíduo do beneficiamento de mármore e granito, enquanto Sousa e Vieira (2017) pesquisaram a ampla utilização de concreto celular na construção civil.

Souza (2020) pesquisou uma forma de mitigar o volume de resíduos gerados pelas siderúrgicas, diminuindo a emissão de gases atmosféricos, avaliando o comportamento do concreto celular utilizando a escória de álcali-ativada. Já Breda (2012), avaliou quais os incentivos e obstáculos à implementação do concreto celular espumoso moldado in loco.

Ferreira (1987) analisou o comportamento do concreto celular espumoso, propondo um método de dosagem que foi amplamente utilizado, inclusive por Silva (2015) que estudou e avaliou a concepção de concretos celulares com fins estruturais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta a preparação e caracterização dos materiais além de como foram obtidos os concretos celulares e suas respectivas etapas de produção com dosagem, mistura e cura, além dos ensaios de tração na flexão, compressão, abatimento do tronco de cone e densidade, nos estados frescos e endurecidos.

3.1. Caracterização e preparação dos materiais

3.1.1. Cimento Portland

O cimento portland utilizado detém classificação CP-V-ARI (Alta Resistência Inicial) obtido em uma fábrica de pré-moldados da região. Os dados foram fornecidos pelo fabricante.

3.1.2. Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado passou inicialmente por uma análise granulométrica e verificação de sua massa específica de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009) e a NBR 16916 (ABNT, 2021). Para este ensaio, de acordo com Kavitha e Mallikarjunrão (2018), em função do concreto celular demandar uma areia mais fina, a amostra utilizada passou pela peneira de 2,4 mm.

3.1.3. Água

A água utilizada é potável e recolhida da torneira do Laboratório de Materiais da UFAL Campus do Sertão.

3.1.4. Aditivo incorporador de ar

O aditivo gerador de espuma utilizado é um aditivo incorporador de ar sintético com base química de sal de álcool com graxo etoxilado sulfatado, em formato líquido, de acordo com o fabricante.

3.1.5. Fibra de Polipropileno

Foram utilizadas fibras de polipropileno, como mostrado na figura 12, medindo 60 mm de comprimento por 1 mm de largura.

Figura 12: Fibras de polipropileno.



Fonte: Autora (2022)

3.1.6. Adição Mineral

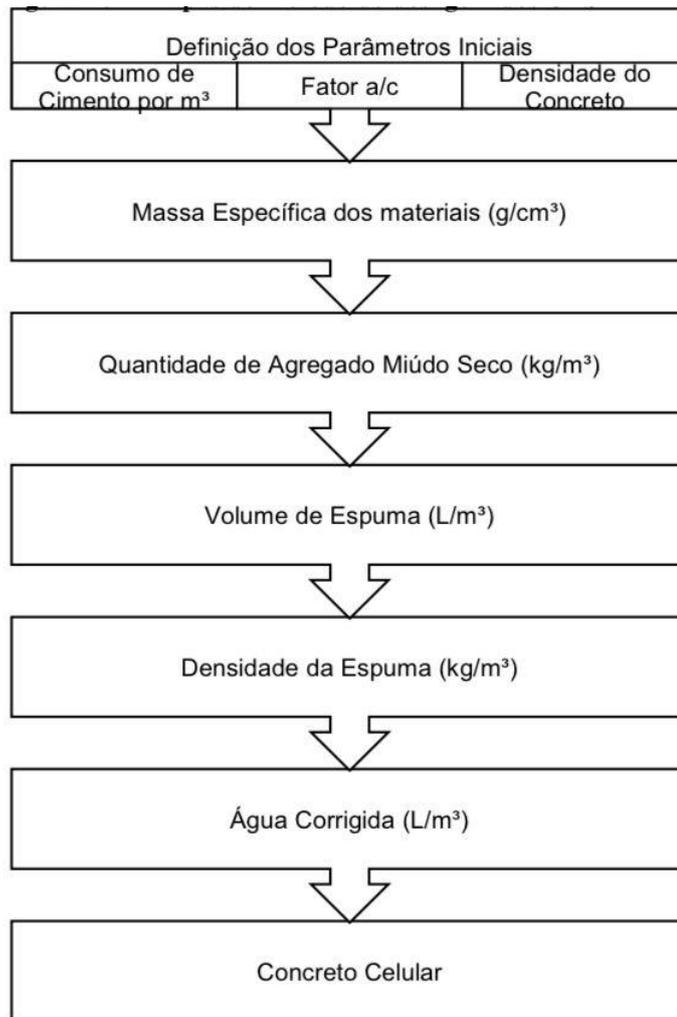
Foi utilizada como adição mineral a cinza de bagaço de cana-de-açúcar, cedida por um engenho da região e não foram executados ensaios para determinação de composição e perda ao fogo, mais usuais no tratamento deste tipo de material.

Para determinação da finura, necessária para avaliar em que proporção o material seria adicionado à mistura homogênea, a cinza foi passada na peneira de 150 micrometros, que, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), trata-se do limite granulométrico do agregado miúdo. Como, neste caso, ficou completamente retida, demonstrou não se tratar de uma cinza volante. A partir disso, o material foi passado na peneira de 2,4 mm como o agregado miúdo utilizado, já que o concreto celular, como já mencionado anteriormente, demanda agregados mais finos.

3.2. Dosagem dos traços de concretos celulares espumosos

De acordo com Silva (2015), o método de dosagem do concreto celular espumoso, proposto por Ferreira (1987), segue a ordem mostrada na figura 13.

Figura 13: Método de dosagem



Fonte: Silva (2015)

Silva (2015) cita que, para iniciar o dimensionamento das etapas para dosagem do concreto celular espumoso, é necessário definir parâmetros iniciais, a partir da finalidade de uso do concreto, em conformidade com as suas características específicas. Ele trata ainda que, para que o concreto moldado detenha leveza e resistência, é necessário avaliar o comportamento do material através da sua densidade e resistência à compressão.

De acordo com a NBR 12646 (ABNT, 1992) a densidade do concreto leve obtido através da introdução de bolhas de ar em dimensões milimétricas e homogêneas, deve compreender o intervalo entre 1300 kg/m³ e 1900 kg/m³. A partir disso, o parâmetro inicial da densidade para a composição do concreto nesta pesquisa, no estado fresco escolhido, foi de 1500 kg/m³.

Com base no estudo de dosagem e avaliação do concreto celular para fins estruturais, proposto por Silva (2015), adotou-se 400 kg/m³, como dosagem inicial do cimento e 0,5 para o fator água/cimento.

A partir do método de dosagem proposto por Ferreira (1987), é necessário conhecer os valores referentes às massas específicas do cimento, agregado miúdo e da espuma. A densidade do cimento foi fornecida pelo fabricante, já a densidade do agregado miúdo foi determinada seguindo os procedimentos da NBR 16916 (ABNT, 2021).

De acordo com o método proposto por Ferreira (1987), a partir dos parâmetros de entrada, é possível dosar a quantidade de agregado miúdo seco em kg/m^3 , através da seguinte formulação:

$$As = \gamma_{cf} - Cc - \left(\frac{a}{c} \times Cc\right) \quad (1)$$

onde,

As é o agregado miúdo seco (kg/m^3);

γ_{cf} é a densidade do concreto celular no estado fresco (kg/m^3);

Cc é o consumo de cimento (kg/m^3);

a/c é o fator água/cimento.

Tendo conhecido a quantidade de agregado miúdo seco (As), é possível calcular o volume da espuma para 1 m^3 de concreto celular. Este valor é dado pela seguinte formulação:

$$V_{esp} = 1000 - \frac{As}{\gamma_{areia}} - \frac{Cc}{\gamma_c} - \left(\frac{a}{c} \times Cc\right) \quad (2)$$

onde,

V_{esp} é o volume da espuma (m^3)

As é a quantidade de agregado miúdo seco (kg/m^3)

γ_{areia} é a massa específica da areia (kg/m^3)

γ_c é a massa específica do cimento (kg/m^3).

Ferreira (1987) menciona que o volume da espuma contém água e, portanto, a dosagem de água da mistura deve descontar esse valor:

$$V_{\text{água}} = \left(\frac{a}{c} \times Cc\right) - (V_{esp} \times \gamma_{esp}) \quad (3)$$

onde,

$V_{\text{água}}$ é o volume de água corrigido (L);

C_c é o consumo de cimento (kg/m^3);

a/c é o fator água/cimento.

V_{esp} é o volume da espuma (m^3);

γ_{esp} é a massa específica da espuma (kg/m^3).

3.2.1. Adição de Fibras de Polipropileno

De acordo com Melo (2009), a fibra de polipropileno, sendo uma resina que pertence ao grupo das poliolefinas, é utilizada com o intuito de diminuir a fissuração de paredes, peças ou placas, advindas das tensões de tração causadas pela retração do concreto no seu processo de cura. A adição da fibra de polipropileno na mistura homogênea do concreto celular aumenta a estabilidade volumétrica, resistência e durabilidade do material. A tabela 1, apresenta as porcentagens adotadas e adicionadas para cada traço. No traço 2, também foi necessário a adição de 50 ml de superplastificante, para manter a trabalhabilidade do concreto.

Tabela 1: Volume percentual da adição de fibras de polipropileno na mistura homogênea

Traço 1	Traço 2	Traço 3
0,1%	0,25%	0,5%

Fonte: Autora (2022)

3.2.2. Adição de Cinza

Como trata-se de uma cinza pesada, a amostra da cinza utilizada neste experimento é, a partir da sua análise granulométrica, considerada um agregado miúdo, e por isso, não foi usada como substituto parcialmente do cimento, mas adicionado à mistura. E como a cinza é um material com alto consumo de água, foi modificada a proporção água/cimento.

Um traço com a mesma dosagem de referência, apenas com adição de cinza e 150 ml de superplastificante, foi feito para avaliar o comportamento físico-mecânico da placa através da adição mineral. Foi adotado um valor intermediário para adição de 20% de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, atribuído a partir da quantidade de cimento portland na mistura. Como manteve-se a proporção água/aglomerante, 20% de cinza gerou um acréscimo de 20% de água. Esse traço foi chamado de Traço 4.

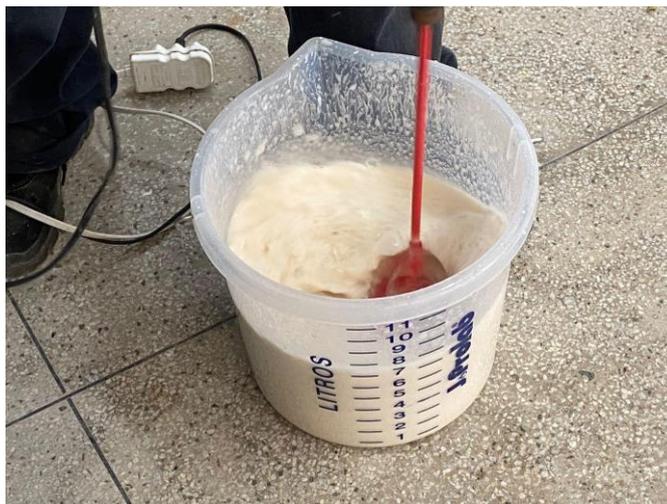
3.3. Confeção dos concretos

Para a confecção dos concretos, inicialmente foi calculada uma dosagem de acordo com o método de Ferreira (1987), o Traço de Referência. A partir deste traço inicial de referência, sem reforço, foram executados outros traços do compósito, com reforço de fibra de polipropileno e de cinza do bagaço da cana-de-açúcar. O traço 1 foi executado com 0,1% de fibra de polipropileno, o traço 2 com 0,25% de fibra de polipropileno, além de 50 ml de aditivo superplastificante, já o traço 3 contou com 0,5% de adição de fibra de polipropileno. Quanto ao traço com adição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, foi realizado com a mesma dosagem do traço de referência, com acréscimo de 20% da cinza e 150 ml de superplastificante.

3.3.1. Confeção da Espuma

A partir da diluição do aditivo incorporador de ar sintético em água, a confecção da espuma foi realizada com o auxílio de um misturador de argamassa acoplado a uma furadeira, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14: Espuma formada a partir da operação do misturador.



Fonte: Autora (2022)

3.4. Ensaios de Estado Fresco

3.4.1. Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone (Slump Test)

A NBR 16889 (ABNT, 2020) regulamenta o processo de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, também chamado *slump test*. Ela menciona que o ensaio

determina a consistência no estado fresco através do seu assentamento do concreto e o resultado deve ser expresso em milímetros e arredondado aos 5 mm mais próximos.

A partir disso, o ensaio referente ao abatimento pelo tronco de cone foi realizado para todos os traços analisados, conforme mostra a Figura 15.

Figura 15: Ensaio de consistência do concreto fresco através da medida de seu assentamento



Fonte: Autora (2022)

3.4.2. Verificação da Densidade no Estado Fresco

Com o intuito de verificar se o concreto celular espumoso alcançou a densidade previamente planejada de 1500 kg/m^3 , todos os corpos de prova cilíndricos foram moldados e em seguida, suas densidades foram verificadas, como mostra a figura 16. O processo de verificação consiste, de acordo com a NBR 12644 (ABNT, 2014), em dividir o peso do concreto no estado fresco, pelo volume do molde cilíndrico.

Figura 16: Verificação da densidade no estado fresco



Fonte: Autora (2022)

3.5. Ensaios de Estado Endurecido

3.5.1. Moldagem

A NBR 15498 (ABNT, 2021) descreve as dimensões dos moldes para placas cimentícias e a aparelhagem necessária para a execução dos ensaios de tração na flexão estabelecendo que os corpos de prova, moldados em placa única, sejam cortados de forma contínua na mesma chapa. No entanto, para encurtar esse processo, os moldes foram confeccionados de acordo com o tamanho padrão estabelecido para rompimento, tendo 25 centímetros de largura, 25 centímetros de comprimento e 2 centímetros de espessura. A figura 17, mostra a moldagem das placas para ensaio de tração na flexão. Para cada traço, foram moldados 10 corpos de prova em forma de placas.

Figura 17: Moldagem das placas para ensaio de tração na flexão.



Fonte: Autora (2022)

Para os ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos, a NBR 5738 (ABNT, 2015) e a NBR 5739 (ABNT, 2018) estabelecem as medidas e a aparelhagem necessárias, tendo o corpo de prova, de acordo com o recomendado, 10 centímetros de diâmetro e 20 centímetros de altura. A figura 18 mostra a moldagem para ensaio de resistência à compressão, sendo moldados para cada traço 6 corpos de prova.

Figura 18: Moldagem dos corpos de prova cilíndricos para ensaio de compressão



Fonte: Autora (2022)

Não foi possível realizar a moldagem do traço 3, com adição de 0,5% de fibra de polipropileno, pois a quantidade adicionada causou a perda das características do concreto celular, como suas bolhas e a trabalhabilidade do material. A figura 19 mostra o concreto, com sua aparente falta de fluidez, após sua confecção.

Figura 19: Concreto Celular com 0,5% de fibra de polipropileno.



Fonte: Autora (2022)

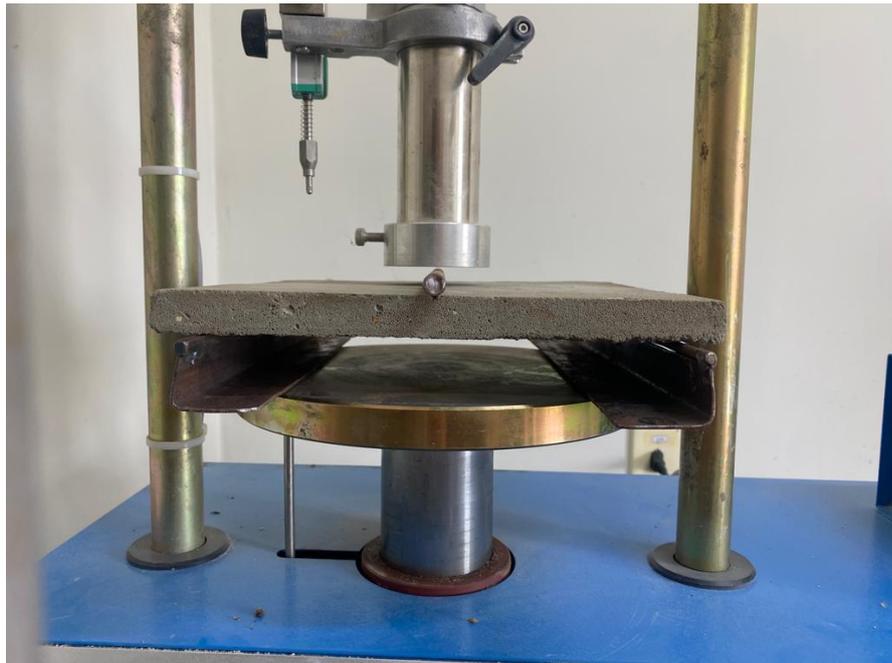
3.5.2. Cura

A NBR 15498 (ABNT, 2021) estabelece que o estado de equilíbrio é obtido através da cura em atmosfera controlada, com temperatura entre 23 ± 5 °C e umidade de $50\pm 20\%$. Atendendo a este requisito, os corpos de prova foram armazenados em uma sala climatizada com temperatura controlada, até que o seu processo de cura estivesse de acordo com a normativa, ou seja, 28 ± 1 dias, para a realização dos ensaios no estado endurecido

3.5.3. Ensaio de Tração na Flexão

De acordo com a NBR 15498 (ABNT, 2021) a distância entre os eixos dos suportes (com uma superfície fixa e outra livre) deve ser de 215 ± 5 mm. A força é aplicada na placa através da barra de carregamento até a ruptura. Para a realização do ensaio, conforme mostra a figura 20, foi utilizada uma prensa CBR/Marshall adaptada.

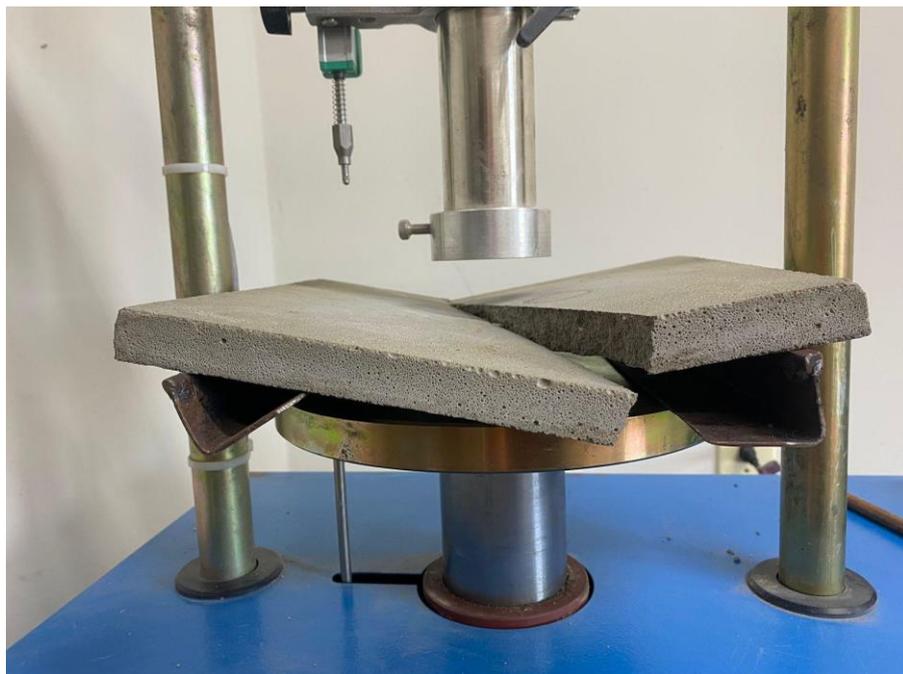
Figura 20: Ensaio de Tração na Flexão



Fonte: Autora (2022)

A força foi aplicada até a ruptura, conforme mostra a figura 21.

Figura 21: Corpo de prova rompido a tração na flexão



Fonte: Autora (2022)

Quanto a determinação da resistência à tração na flexão, a NBR 15498 (ABNT, 2021) estabelece que seja calculada a partir da equação 4:

$$R_f = \frac{3P_{max} \times L}{2b \times e^2} \quad (4)$$

onde,

R_f é a resistência à tração na flexão (MPa);

P_{max} é a carga suportada (N);

L é a distância dos apoios (mm)

b é a largura da placa (mm);

e é a espessura da placa (mm).

3.5.4. Ensaio de Resistência à Compressão

A NBR 5739 (ABNT, 2018) estabelece que o carregamento aplicado deve ser ininterrupto, sem choques e com velocidade de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s. Os corpos de prova foram posicionados e cuidadosamente centralizados no prato inferior da prensa de concreto 200 tf, como mostra a figura 22, seguindo o sentido de moldagem.

Figura 22: Ensaio de Compressão



Fonte: Autora (2022)

A força foi aplicada até que houvesse ruptura, conforme mostra a figura 23.

Figura 23: Corpo de prova rompido a compressão



Fonte: Autora (2022)

Quanto a determinação da resistência à compressão, a NBR 5739 (ABNT, 2018) estabelece que seja calculada a partir da equação 5:

$$R_c = \frac{4P_{max}}{\pi \times D^2} \quad (5)$$

onde,

R_c é a resistência à compressão (MPa);

P_{max} é a carga suportada (N);

D é o diâmetro (mm)

3.5.5. Análise de Variância

Tratando se de um modelo matemático que leva em consideração os elementos amostrais, os grupos comparados e os erros provenientes de uma distribuição normal, o método de análise de variância (ANOVA) foi realizado para os ensaios em estado fresco, quanto a sua densidade, além do estado endurecido, resistências à tração na flexão e compressão, para verificar estatisticamente se há uma diferença entre as distribuições dos traços (MONTGOMERY; RUNGER, 2009). Para a análise estatística, foi utilizado um intervalo de confiança de 95%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Dados dos Materiais

Os parâmetros iniciais de dosagem referente ao consumo de cimento e fator água/cimento foram adotados de acordo com o estudo do concreto celular para fins estruturais proposto por Silva (2015). Já a densidade esperada para o concreto celular, foi definida conforme a NBR 12646 (ABNT, 1992) que estabelece a densidade mínima e limite para o material. Estes dados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de entrada da dosagem

Densidade no estado fresco (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Fator água/cimento
1500	400	0,50

Fonte: Autora (2022)

Para as amostras que envolvem a adição de fibras de polipropileno e as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, a tabela 3 aponta as porcentagens adotadas nos traços válidos.

Tabela 3: Porcentagem de adição em cada amostra

Traço	Traço 1	Traço 2	Traço 4
Tipo de Adição	Fibra de Polipropileno	Fibra de Polipropileno	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar
Porcentagem de Adição	0,1%	0,25%	20%

Fonte: Autora (2022)

4.1.1. Análise granulométrica do Agregado miúdo

A composição granulométrica do agregado miúdo utilizado, a partir dos parâmetros estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), é apresentada pela Tabela 4.

Tabela 4: Composição granulométrica

Abertura das peneiras	% Retido
4,8 mm	0
2,4 mm	7
1,2 mm	16
600 μm	27
300 μm	28
150 μm	16
Fundo	5
Dimensão máxima característica	4,8 mm
Módulo de Finura	2,51
Classificação granulométrica	Areia utilizável

Fonte: Autora (2022)

A massa unitária em estado solto obtida na análise foi de 1.480 kg/m³. Já os dados obtidos para massa específica/absorção são apresentados na tabela 5.

Tabela 5: Massas específicas/absorção

Agregado seco	2.500 kg/m³
Agregado saturado superfície seca	2.510 kg/m³
Absorção de água	0,96%

Fonte: Autora (2022)

4.2. Cálculo da Dosagem

Segundo o método de dosagem proposto por Ferreira (1987), através das equações 1, 2 e 3, foram obtidos os valores, apresentados na tabela 6, referente a dosagem de 1 metro cúbico de concreto celular.

Tabela 6: Dosagem de Concreto Celular a partir do método de Ferreira (1987)

Volume de Cimento – CC (kg/m³)	Volume de Água (l/m³)	Volume de espuma (l/m³)	Agregado miúdo (kg/m³)
400,00	175,12	310,97	900,00

Fonte: Autora (2022)

4.3. Ensaio no Estado Fresco

4.3.1. Abatimento do Tronco de Cone (*Slump Test*)

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos através do *Slump Test*.

Tabela 7: *Slump Test*

Traço Referência	Traço 1	Traço 2	Traço 4
250 mm	250 mm	250 mm	250 mm

Fonte: Autora (2022)

Não houve anomalias observadas durante a realização dos ensaios.

4.3.2. Densidade no Estado Fresco

A tabela 8 descreve a média e o coeficiente de variação da densidade obtida em cada traço.

Tabela 8: Densidade em estado fresco

Traço	Traço Referência	Traço 1	Traço 2	Traço 4
Média	1553,64 kg/m ³	1455,87 kg/m ³	1426,47 kg/m ³	1426,46 kg/m ³
Coeficiente de Variação	47,12	30,38	109,64	14,29

Fonte: Autora (2022)

É importante salientar que, mesmo com adição de fibras de polipropileno e cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, os concretos tiveram densidades próximas aos 1500 kg/m³ previamente planejados, além de que, comparado ao traço de referência, as densidades foram reduzidas.

Observa-se, também, que o aumento da quantidade de fibras provoca um decréscimo na densidade. Da mesma forma, o traço com a cinza foi o que obteve a menor densidade.

A partir dos resultados obtidos quanto à densidade no estado fresco, foi executada a ANOVA, sendo os resultados mostrados na tabela 9, comparando e avaliando se os traços amostrados detêm características estatisticamente iguais ou estatisticamente diferentes.

Tabela 9: Análise de variância do ensaio de densidade no estado fresco.

Comparação	Valor P
Traço REF / Traço 1	$1,14 \times 10^{-03}$
Traço REF / Traço 2	$99,98 \times 10^{-02}$
Traço REF / Traço 4	$2,57 \times 10^{-02}$
Traço 1 / Traço 2	$60,93 \times 10^{-02}$
Traço 1 / Traço 4	$10,39 \times 10^{-02}$
Traço 2 / Traço 4	$8,45 \times 10^{-05}$

Fonte: Autora (2022)

Quanto às densidades em estado fresco, os traços REF e 1 e 2 e 4 são estatisticamente diferentes (valores p menores que 0,05), enquanto os traços REF e 2, REF e 4, 1 e 2 e 1 e 4 são estatisticamente semelhantes (valores p maiores que 0,05).

4.4. Ensaio de Tração na Flexão

Os resultados referentes ao ensaio de tração na flexão, estão descritos na tabela 10, destacando a média e o coeficiente de variação.

Tabela 10: Resultados de Resistência à Tração na Flexão de cada Amostra

Traço	Tipo de Amostra	Média	Coefficiente de variação
Referência	Sem reforço	1,2 MPa	0,08
Traço 1	0,1% de Fibra de Polipropileno	1,8 MPa	0,16
Traço 2	0,25% de Fibra de Polipropileno + 50 ml de Superplastificante	3,4 MPa	0,39
Traço 4	20% de Cinza do bagaço de cana-de-açúcar + 150 ml de Superplastificante	1,6 MPa	0,22

Fonte: Autora (2022)

Com o aumento no teor de fibras, notou-se uma resistência superior, quando comparada ao traço de referência. Da mesma forma, embora o fator água/cimento tenha sido aumentado, o acréscimo da cinza do bagaço de cana-de-açúcar também causou um melhor desempenho à tração na flexão. É importante salientar que, o traço 2, com adição de 0,25% de fibras de polipropileno obteve um melhor desempenho, provavelmente, pela perda de bolhas durante a composição da amostra.

A partir dos resultados obtidos quanto à tração na flexão, foi executada a ANOVA, sendo os resultados mostrados na tabela 11, comparando e avaliando se os traços amostrados detêm características estatisticamente iguais ou estatisticamente diferentes.

Tabela 11: Análise de variância do ensaio de tração na flexão.

Comparação	Valor p
Traço REF / Traço 1	$1,11 \times 10^{-04}$
Traço REF / Traço 2	$8,97 \times 10^{-09}$
Traço REF / Traço 4	$2,24 \times 10^{-08}$
Traço 1 / Traço 2	$4,3 \times 10^{-09}$
Traço 1 / Traço 4	$6,94 \times 10^{-02}$
Traço 2 / Traço 4	$11,03 \times 10^{-2}$

Fonte: Autora (2022)

Conforme apresenta a tabela, os traços REF e 1, REF e 2, REF e 4 e 1 e 2, são estatisticamente diferentes (valores p menores que 0,05), assim como os traços 1 e 4 e 2 e 4 são estatisticamente semelhantes (valores p maiores que 0,05).

A NBR 15498 (ABNT, 2021) define a classe de classificação conforme a categoria de aplicação e suas respectivas resistências mínimas para utilização. Para o caso de utilização das placas para revestimento, a categoria mínima em que se enquadra é A. No entanto, como pode ser aplicada em divisórias internas e áreas úmidas, também deve ser avaliada conforme parâmetro mínimo de categoria C.

Tanto para categoria A, quanto para categoria C, conforme a NBR 15498 (ABNT, 2021), o requisito mínimo de resistência à tração na flexão é de 4 Mega Pascal. Com isso, a amostra 2, com reforço de 0,25% de fibra de polipropileno, foi a amostra que mais se aproximou da recomendada, mas assim como as outras amostras, não atendeu o requisito mínimo para utilização.

4.5. Ensaio de resistência à compressão

Os resultados referentes ao ensaio de compressão, estão descritos na Tabela 12, destacando a média e o coeficiente de variação.

Tabela 12: Resultados de Resistência à Compressão de cada Amostra

Traço	Tipo de Amostra	Média	Coeficiente de variação
Referência	Sem reforço	6,7 MPa	0,32
Traço 1	0,1% de Fibra de Polipropileno	8,6 MPa	0,93
Traço 2	0,25% de Fibra de Polipropileno + 50 ml de Superplastificante	19,8 MPa	1,10
Traço 4	20% de Cinza do bagaço de cana-de-açúcar + 150 ml de Superplastificante	8,2 MPa	0,28

Fonte: Autora (2022)

Como a utilização de placas para revestimento demanda solicitações pequenas de esforços para compressão, as amostras foram obtidas unicamente para avaliar o desempenho do material quando reforçado, comparando-o com o material sem reforço. Os traços 1 e 4, demonstraram ser mais resistentes que o traço de referência, com melhor desempenho da fibra de polipropileno. O traço 2, no entanto, obteve um desempenho muito melhor, ocasionado pela perda de bolhas através de uma utilização mais elevada de fibras de polipropileno.

A partir dos resultados obtidos quanto à compressão, foi executada a ANOVA, sendo os resultados mostrados na tabela 13, comparando e avaliando se os traços amostrados detêm características estatisticamente iguais ou estatisticamente diferentes.

Tabela 13: Análise de Variância do ensaio à compressão

Comparação	Valor P
Traço REF / Traço 1	$8,45 \times 10^{-4}$
Traço REF / Traço 2	$7,9 \times 10^{-11}$
Traço REF / Traço 4	$4,32 \times 10^{-8}$
Traço 1 / Traço 2	$3,49 \times 10^{-9}$
Traço 1 / Traço 4	$13,62 \times 10^{-2}$
Traço 2 / Traço 4	$6,02 \times 10^{-10}$

Fonte: Autora (2022)

Conforme apresenta a tabela, os traços 1 e 4, são estatisticamente diferentes (valores p menores que 0,05), assim como os traços REF e 1, REF e 2, REF e 4, 1 e 2 e 2 e 4 são estatisticamente semelhantes (valores p maiores que 0,05).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todas as densidades dos concretos celulares confeccionados estavam dentro do intervalo permitido pela NBR 12646 (ABNT, 1992). No entanto, quando comparados ao traço de referência, todos obtiveram redução na densidade e aumento da resistência à tração, sendo um resultado positivo quanto a utilização dos reforços embora não tenha alcançado a resistência mínima à tração na flexão necessária para utilização.

Uma vez que a partir da adição de 0,5% de fibra de polipropileno, as bolhas estouram e o concreto perdeu fluidez, o limite utilizável da adição para reforço pode ser de 0,49% com adição de superplastificante, para manter a trabalhabilidade.

O concreto celular com reforço de 0,25% de fibra de polipropileno foi o traço que teve uma resistência à tração na flexão mais próxima do aceitável, por isso, é possível supor que uma porcentagem adicional de fibra que varie entre 0,25% e 0,49%, alcance a resistência mínima estabelecida por norma para utilização em placas de revestimento interno e externo.

Quanto à influência do reforço da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, nas placas de concreto celular, a adição mineral melhorou a resistência do material aos esforços de compressão, assim como de tração na flexão, no entanto, não teve um desempenho melhor que as fibras de polipropileno. O percentual de melhora no desempenho quanto à tração na flexão foi de 33,33%, já a resistência à compressão melhorou em 22,39% com o reforço, com isso, pode-se afirmar que a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar resiste melhor aos esforços tração na flexão.

É possível concluir que não há viabilidade técnica de utilização de placas de concreto celular espumoso com densidade de 1500 kg/m³, e traços que envolvam o reforço das placas com 0,1%, 0,25% e 0,5% de fibras de polipropileno, assim como o reforço de 20% de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, uma vez que não atende as especificações de resistência descritas na NBR 15498 (ABNT, 2021).

Sendo o concreto celular um tipo de concreto especial considerado novo e ainda pouco utilizado, este estudo contribui para uma melhor compreensão sobre a sua resistência quando reforçado com fibras químicas e cinzas pesadas.

5.1. Sugestões de trabalhos futuros

No que diz respeito a trabalhos futuros, sugere-se ensaios com uma densidade maior de concreto, além de traços com outras porcentagens de fibra de polipropileno, variando entre 0,25 e 0,49%. Além disso, sugere-se ainda, o custo comparativo da utilização de concreto celular

espumoso como alternativa ao revestimento de estruturas com tecnologia *Light Steel Frame* com os materiais mais usados com a mesma finalidade, como placas de gesso acartonado e placas cimentícias.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM/C 796-19**: Standard Test Method For Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam. West Conshohocken: ASTM, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12644** – Concreto celular espumoso - Determinação de densidade de massa aparente no estado fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12646** – Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13438** – Blocos de Concreto Celular. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15253**: Perfis de aço formados a frio com revestimento metálico, para painéis estruturais reticulados em edificações – Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15498**: Chapas cimentícias reforçadas com fios, fibras, filamentos ou telas — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

Austral Construction. **Smartside**. Disponível em: <australconstruction.com.au> Acessado em: 02 de dezembro de 2022.

BAPTISTA. S. M. **Racionalização e Industrialização da Construção Civil**. Universidade Federal de São Carlos 2005.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: LP. Manual CES, 2012.

BERNARDES, M., NILSSON, S. G. MARTINS, Marcele Salles. ROMANINI, Anicoli. **Comparativo econômico da aplicação do Sistema Light Steel Frame em habitação de interesse social**. Porto Alegre, Revista de Arquitetura da IMED, 2012.

BONAKDAR, A.; BABBITT, F.; MOBASHER, B. **Physical and mechanical characterization of Fiber-Reinforced Aerated Concrete (FRAC)**. Cement and Concrete Composites, v. 38, p. 82–91, 2013.

BRAZ, M. C. de A. NASCIMENTO, Felipe Bomfim Cavalcante do. **Concreto reforçado com Fibras de Aço**. Maceió: Cadernos de graduação de ciências exatas e tecnológicas, 2015.

BREDA, C. F. **Concreto Celular Espumoso Moldado no Local: Identificação dos incentivos e obstáculos enfrentados pelas empresas construtoras para a implementação do método construtivo**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

BURSTRAND, H. **Light Gauge Steel Framing Leads the Way to an Increased Productivity For Residential Housing**. Stockholm: Swedish Institute of Steel Construction, 1998.

CAMPOS, A. S. **Light Steel Frame : Uma aposta do setor Siderúrgico no Desenvolvimento Tecnológico da Construção Civil**. São Paulo. 2014.

CARDOSO, S. G.. **Estudo das propriedades mecânicas e dos mecanismos de fratura de fibras sintéticas do tipo Náilon e Poliéster em tecidos de engenharia**. São Paulo: Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, 2009.

Catálogo Comercial LP.2012. Ministério das Cidades. Política nacional de habitação. Brasília: 2004. Disponível em: <<https://www.lpbrasil.com.br>> Acesso em: 02 de dezembro de 2022.

Conseils Professionnels. **Plaques OSB**. Disponível em: <fr.conceptualhouseplans.com> Acessado em: 02 de dezembro de 2022.

CORDEIRO, G. C. **Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios**. Rio de Janeiro: Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2009.

CORTELASSI, E. M.; TORALLES-CARBONARI, B. M. **Avaliação da resistência mecânica de concretos celulares espumosos de alto desempenho**. Fortaleza: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2008.

COSTA, A. T. da, NASCIMENTO, F. B. C. do. **Uso de gesso acartonado em vedações internas**. Maceió: Caderno de Graduação Ciências Exatas e Tecnológicas, 2015.

Distribuidora SulMódulos. **DryWall – Parede e divisória em gesso acartonado**. Disponível em: <sulmodulos.com.br> Acessado em: 02 de dezembro de 2022.

FARIAS, L.A. LOPES, A. N. M., STIVAL, M. L. ANDRADE, M. A. S. BITTENCOURT, R. M. **Ensaio de Tração Direta em Corpos de Prova de Concreto**. Rio de Janeiro: Laboratório FURNAS, 2018.

FERREIRA, O. A. R. **Boletim técnico: concreto celulares espumosos**. São Paulo: EPUSP, 1987.

FIORELLI, J. **Utilização de Fibras de Carbono e Fibras de Vidro para reforço de Vigas de madeira**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2002.

FREITAS, A. M. S. CRASTO, R. C. M. **Steel framing: arquitetura**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2006.

FREITAS, I. **Produção e propriedades físicas e mecânicas do concreto celular espumoso**. 2004. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2004.

GETHAL. **Sistema gethal: manual de procedimentos para execução de paredes**. Goiânia, FURNAS, 2003.

GOMES, C. E. M., VIVAN, A. L., SICHIERI, E. P., PALIARI, J. C. **Light Steel Frame: Construção industrializada a seco para habitação popular - práticas sustentáveis**. São Paulo: Encontro Latinoamericano de edificações e comunidades sustentáveis, 2013.

HAMAD, A. J. **Materials, Production, Properties and Application of Aerated Lightweight Concrete: Review**. International Journal of Materials Science and Engineering, v. 2, n. 2, p. 152-157, 2014.

KAVITHA, D. MALLIKARJUNRÃO, K. V. N. **Design and Analysis of Foam Concrete**. India: Department of Civil Engineering, 2018.

KNISS, C. T. **Desenvolvimento e caracterização de materiais cerâmicos com adição de cinzas pesadas de carvão mineral**. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

LEBRÃO, G. W. **Fibra de Carbono**. São Caetano do Sul: Instituto Mauá de Tecnologia, 2008.

LP. Manual CES. **Construção Energética Sustentável. Steel Frame, Wood Frame**.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A. LIMA, M. G. MEDEIROS, M. H. F. REAL, L. V. **Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento**. Rev. ALCONPAT vol.4. Brasil: Departamento de Engenharia Civil, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), 2014.

MELO, G. F. **Concreto celular polimérico: influência da adição de resíduo poliéster insaturado termofixo**. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos; Processamento de Materiais a parte) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Natal. 2009.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 4ª Edição. Editora LTC, 2009.

NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K. **Structure and properties of aerated concrete: A review**. Cement and Concrete Composites, v. 22, n. 5, p. 321–329, 2000.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 5.ed. London: Longman, 1995.

OLYMSPAN. **Autoclave industrial do borracha/a de madeira do equipamento em grande escala do vapor**. Disponível em: <<https://portuguese.aac-autoclave.com>> Acessado em: 02 de dezembro de 2022.

QUEIROZ, F. C. de, CASTRO, N. F. **Concreto celular com Ecofiler de resíduos de mármore e granito**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2019.

ROMAN, L., ZARDO, C. R. CAMARGO, Anderson de. PUTON, Ezequiel Furini. **Técnicas construtivas de revestimentos externos: Siding vinílico, *SmartSide* e Placa cimentícia no sistema construtivo Light Steel Frame**. São Miguel do Oeste: UCEFF, 2018.

RUDOLPH, C. VALORE, JR. Cellular concretes. Michigan USA: Journal of the American Concrete Institute, 1954.

SACHT, H. M. **Painéis de vedação de concreto moldados in loco: avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos**. 2008. 228 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SALGADO, I. de P. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Painéis Sanduíche com Compósitos Laminados Reforçados com Fibra de Curauá e Núcleo de Concreto Celular Autoclavado**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019.

SILVA, C. A. de O. **Estudo de dosagem e avaliação de concreto celular com fins estruturais**. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2015.

SOUSA, C. V. M., VIEIRA, T. do S. **Concreto celular e seu uso na construção civil**. Mineiros: UNIFIMES, 2017.

SOUZA, T. B. **Produção de Concreto Celular utilizando Escória Álcali-ativada**. Recife: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, 2020.

SS Milênio Importação e Exportação. **Placa Cimentícia**. Disponível em: <<https://www.ssmilenio.com.br>> Acessado em 02 de dezembro de 2022.

TADA, S.; NAKANO, S. **Microstructural approach to properties of moist cellular concrete**. In: **Autoclaved aerated concrete, moisture and properties**. Amsterdam: Elsevier, 1983, p. 71– 88.

TEIXEIRA FILHO, F.J.; TEZUKA, Y. **Considerações sobre algumas propriedades dos concretos celulares espumosos**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1992.

WONGKEO, W. et al. **Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials**. *Materials and Design*, v. 35, p. 434–439, 2012.