

**FAMIG – FACULDADE MINAS GERAIS
IVAN BATISTA MORAIS**

**EFEITOS DAS CINZAS DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR DA PRODUÇÃO
DE CACHAÇA ARTESANAL EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO
PORTLAND NA CONFECÇÃO DE CONCRETO CELULAR ESPUMOSO**

**Belo Horizonte
2023**

IVAN BATISTA MORAIS

**EFEITOS DAS CINZAS DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR DA PRODUÇÃO
DE CACHAÇA ARTESANAL EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO
PORTLAND NA CONFECÇÃO DE CONCRETO CELULAR ESPUMOSO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Faculdade
Minas Gerais – FAMIG, como requisito para
obtenção do título de bacharel.

Orientador: Prof. Me. Diego de Jesus Queiroz
Rosa

Belo Horizonte

2023

RESUMO

A construção civil, em constante crescimento, busca métodos mais sustentáveis e materiais ecoeficientes. A redução das emissões de carbono na produção de cimento é uma prioridade. Os Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), como a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), um subproduto da indústria sucroalcooleira e rico em sílica amorfa, apresenta como uma pozolana eficaz para aprimorar propriedades de compósitos cimentícios. O Concreto Celular Espumoso (CCE), variante do concreto leve, é viável economicamente e dispensa equipamentos especiais na sua produção. Na construção sustentável, a incorporação da CBCA como substituto parcial do aglomerante não apenas reduziu o consumo de cimento Portland na fabricação do CCE, mas também melhorou significativamente a resistência à compressão, ultrapassando os 5 MPa exigidos pela norma. O estudo revelou ganhos notáveis de resistência ao longo do tempo, destacando o traço com 10% de CBCA (CBCA10%) como o mais eficaz, superando o traço de referência (REF) em todas as idades testadas. O traço com 20% de CBCA (CBCA20%) apresentou a melhor evolução nos ganhos de resistência entre 7 e 28 dias. Quanto à absorção de água, os traços com CBCA mostraram aumento proporcional ao teor de cinza, sendo o CBCA20% significativamente mais absorvente (20,10%) em comparação com o REF, enquanto o CBCA10% registrou absorção mínima. Em relação à massa específica, o CBCA10% apresentou leve ganho percentual, enquanto o CBCA20% teve uma diminuição de 7,33% em relação ao REF. Esses resultados fortalecem a viabilidade do uso da CBCA na produção do CCE, contribuindo para práticas construtivas mais sustentáveis e alinhadas aos desafios ambientais do setor.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade. Concreto celular espumoso. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Argamassa. Concreto. Resíduos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de Concretos Leves.....	12
Figura 2 - Classificação de concreto celular.	14
Figura 3 - Espuma pré-formada.	22
Figura 4 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	32
Figura 5 - Amostras de CBCA natural (esquerda) e amostra peneirada (direita).	34
Figura 6 - Moagem do CBCA.	35
Figura 7 - Aspecto visual da CBCA-M (a) e da CBCA-MR (b).	35
Figura 8 - Materiais para moldagem.	44
Figura 9 - Misturador manual para argamassas.....	44
Figura 10 - Agitador mecânico	45
Figura 11 - Mistura mecânica da espuma com a argamassa.	46
Figura 12 - Processo de mistura - método CESP.....	47
Figura 13 - Moldes preenchidos	48
Figura 14 - Corpos de prova após 7 dias no tanque.....	49
Figura 15 - Retífica de corpos de prova de concreto.....	50
Figura 16 - Máquina Universal de Ensaios.	51
Figura 17 - Amostra na estufa (a), Imersão na balança hidrostática (b).	53
Figura 18 - Valores da resistência à compressão axial.	55
Figura 19 - Evolução dos ganhos de resistência.	56
Figura 20 - Tipo de ruptura do corpo de prova.	58
Figura 21 - Absorção de água.....	59
Figura 22 - Absorção de água.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do CCE.	17
Tabela 2 - Designação normalizada, sigla e classe de cimento Portland.	23
Tabela 3 - Composição química do cimento.	31
Tabela 4 - Análise da resistência à compressão do cimento conforme NBR 7215 (2019).	31
Tabela 5 - Resumo da seleção dos materiais que constituem o concreto celular.	37
Tabela 6 - Dosagem de concreto celular espumoso por m ³ em estado seco.	41
Tabela 7 - Dosagens dos traços.	43
Tabela 8 - Resistências médias de compressão axial.	54
Tabela 9 – Resistência a compressão no intervalo de 7 a 28 dias.	57
Tabela 10 - Massa aparente no estado fresco.	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI - Incorporador de ar, aditivo incorporador de ar, agente espumígeno, agente espumante ou agente formador de espuma
CBCA – Cinza de bagaço de cana-de-açúcar
CBCA-M - Cinza de bagaço de cana-de-açúcar moída
CBCA-MR - Cinza de bagaço de cana-de-açúcar moída e requeimada
CBCA10% - Traço com 10% de adição CBCA-MR
CBCA20% - Traço com 20% de adição CBCA-MR
CBIC - Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CCA – Concreto Celular Autoclavado
CESP - Produção de CCE com aditivo espumígeno, cuja espuma é pré-formada, sem agregados graúdos.
CL - Concreto Leve
CCE - Concreto Celular Espumoso
COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais Inicial
CP – Corpo de prova
CP I – Cimento Portland Comum sem adição
CP –S – Cimento Portland Comum com adição
CP II-E – Cimento Portland com escória granulada de alto forno
CP II-F – Cimento Portland com material carbonático
CP II-Z – Cimento Portland com material pozolânico
CP III – Cimento Portland de alto-forno
CP IV – Cimento Portland pozolânico
CP V – Cimento Portland de alta resistência inicial
CPV-ARI – Cimento Portland de alta Resistência
NBR – Norma Brasileira
Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (2019)
Kg – quilograma
MCS – Material Cimentício Suplementar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivo Geral	10
2.2	Objetivos Específicos	10
3	REFERENCIAL TEÓRICO	11
3.1	Concreto leve	11
3.1.1	Concreto Celular	13
3.1.2	Concreto Celular aerados quimicamente	14
3.1.3	Concreto Celular Espumo	15
3.2	Concreto-Base	20
3.3	Materiais utilizados na produção	20
3.3.1	Incorporador de ar.....	20
3.3.2	Cimento.....	22
3.3.3	Agregados	24
3.3.4	Água de amassamento.....	25
3.4	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar	26
3.4.1	Histórico do uso do bagaço de cana-de-açúcar.....	27
3.4.2	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar da produção de cachaça artesanal	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	Equipamentos	29
4.2	Aglomerante	30
4.3	Areia	31
4.4	Água	32
4.5	Aditivo incorporador de ar	33
4.6	Cinzas bagaço de cana-de-açúcar	33
4.6.1	Processamento das amostras de CBCA.....	33
4.6.2	Caracterização das amostras de CBCA após a moagem	36
4.7	Seleção dos materiais constituintes	37
5	Métodos	38
5.1	Massa específica	38

5.2	Dosagem dos Traços	39
5.3	Moldagem e Cura dos Corpos de Prova	43
5.3.1	Preparo do concreto	45
5.3.2	Procedimento de cura	48
5.4	Ensaio de resistência a compressão de corpos de prova	49
5.5	Ensaio de absorção de água por imersão	52
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	54
6.1	Resistência à compressão axial	54
6.2	Análise do ensaio de absorção	58
6.3	Teor de ar incorporado	59
7	CONCLUSÕES	62
8	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	63
9	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um setor em constante crescimento, segundo as projeções da Câmara Brasileira da Indústria da Construção - CBIC (2022) a Indústria da construção prevê crescimento de 2,5% em 2023 para o mercado brasileiro. Esse crescimento impulsiona a busca por melhores alternativas para os métodos construtivos e os materiais utilizados.

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (2019), a nível global, a fabricação de cimento representa cerca de 7% das emissões totais de dióxido de carbono (CO₂). Isso ocorre porque só as usinas de cimento, por si só, respondem por aproximadamente 5% das emissões globais de CO₂ durante o processo de cozedura da argila e do calcário. Nesse processo, há a queima de carvão e diesel para alimentar os fornos, resultando em uma emissão de cerca de 150 mil toneladas de CO₂ por ano (LOPES, 2011).

A redução das emissões de carbono na cadeia produtiva do cimento pode ser alcançada através da expansão da utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS) de baixa pegada de CO₂ como substitutos parciais do clínquer e a otimização do uso do cimento Portland em argamassas e concretos (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018).

Nesse contexto, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) destaca-se como uma alternativa viável de MCS. Sendo um subproduto da indústria sucroalcooleira, ela pode conter elevado teor de sílica amorfa. Essa característica favorece sua utilização como material pozolânico, contribuindo para aprimorar as propriedades dos compósitos cimentícios (MOURÃO. 2021; BEZERRA et al., 2017; PAYÁ et al., 2002).

Na busca constante por práticas mais sustentáveis, a indústria da construção civil está continuamente explorando melhorias e alternativas para seus métodos construtivos e materiais (BERNTSSON e CHANDRA, 2002). Nesse sentido, aprofundar o estudo do aproveitamento da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) como material cimentício suplementar (MCS) não apenas representa uma

oportunidade para reduzir o consumo do cimento, mas também uma estratégia viável para minimizar os impactos ambientais decorrentes da disposição inadequada das cinzas (MOURÃO, 2021).

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo avaliar os efeitos da substituição parcial do cimento Portland por cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) provenientes da produção de cachaça artesanal na confecção de Concreto Celular Espumoso (CCE). A pesquisa direciona sua análise para a resistência mecânica do CCE com a substituição parcial do cimento por CBCA.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho foi verificar, por meio de ensaios mecânicos, se a substituição parcial do cimento Portland pela CBCA promove uma redução no consumo de cimento na produção do concreto celular espumoso, ao mesmo tempo em que mantém ou melhora sua resistência. Além disso, a análise teve o propósito de oferecer um destino adequado para as CBCA oriundo da produção de cachaça artesanal, contribuindo para a minimização dos impactos ambientais associados aos processos, tanto na fabricação do cimento quanto na destinação das cinzas.

2.2 Objetivos Específicos

- Confeccionar corpos de prova (CP) cilíndricos de CCE com traço de referência sem a substituição de Cimento Portland por cinza;
- Verificar a relação da densidade no estado fresco e densidade no estado seco;
- Realizar avaliação do comportamento mecânico dos corpos de prova (CP) de concreto celular espumoso através de ensaios de compressão axial;
- Avaliar a porosidade do concreto celular espumoso produzidos com a substituição parcial do cimento pela CBCA;
- Avaliar a viabilidade da substituição parcial do cimento Portland por CBCA, verificando se essa prática reduz o consumo de cimento na produção do concreto celular, ao mesmo tempo em que mantém ou aprimora sua resistência;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Concreto leve

Os concretos leves (CL), se distinguem dos concretos convencionais principalmente pela redução da massa específica e pelas alterações das propriedades térmicas e acústicas. Devido a utilização de agregados leves ocorrem mudanças significativas em outras propriedades relevantes dos concretos, tais como trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de deformação, retração e fluência, além da redução da espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento (MELO 2009). Além disso, Rossignolo (2009) reforça que a redução da massa específica do concreto leve é resultante da substituição parcial dos materiais sólidos por ar. Segundo a NBR 8953 (ABNT 2015), o concreto leve (CL) é definido como aquele cuja massa específica seca é inferior a 2000kg/m^3 .

Segundo Silva (2015), as modificações nas propriedades do concreto leve estão diretamente associadas ao volume de vazios presente em sua composição, que são intencionalmente introduzidos para atingir uma densidade mais baixa. A incorporação de ar na mistura pode ser realizada de diversas maneiras, seja pela introdução direta de espumas ou aditivos químicos à massa, pela eliminação das partículas finas do agregado ou pelo uso de agregados graúdos leves ou porosos. Todas essas abordagens são empregadas com o propósito de facilitar a introdução e manutenção das bolhas de ar na estrutura do concreto (SILVA, 2015).

De acordo com Maycá, Cremonini e Recena (2008), os concretos leves se dividem em três categorias:

- Concretos celulares ou aerado: são reconhecidos por sua leveza, apresentando massa específica entre 300 kg/m^3 e 1900 kg/m^3 . Esse efeito é obtido pela adição controlada de gás ou espuma à pasta de cimento, desencadeando a produção de gases que formam bolhas no material.
- Concretos sem finos: Classificados como moderadamente leves, esses concretos apresentam massa específica na faixa de 700 kg/m^3 a 1800 kg/m^3 .

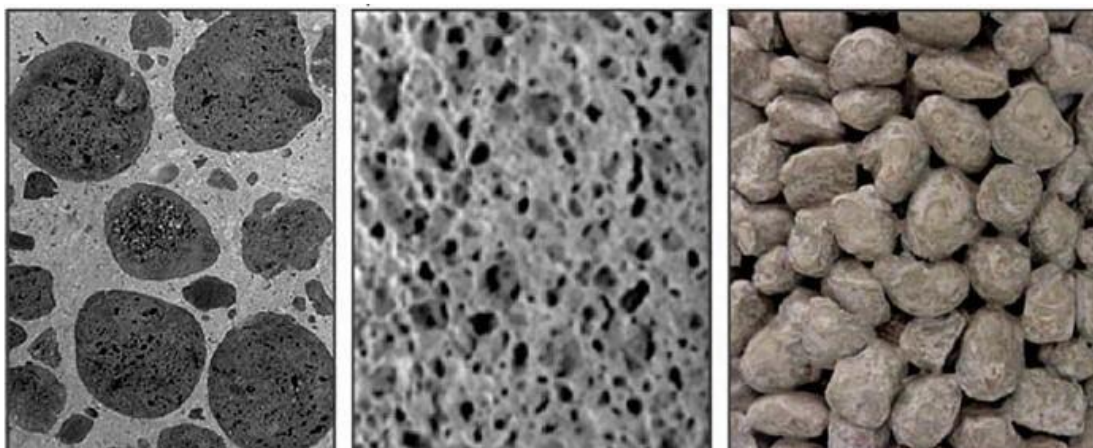
São formulados exclusivamente com aglomerante e agregado graúdo, sendo que a resistência do material está intrinsecamente ligada à qualidade do agregado utilizado e à quantidade de cimento empregada.

- Concretos com agregados leves: Apresenta uma massa específica entre 950 kg/m³ e 2000 kg/m³, esses concretos são obtidos por meio da substituição completa ou parcial dos agregados convencionais (graúdos e miúdos), por agregados leves.

A ampla utilização dos concretos leves é justificada por Rossignolo (2005), que destaca os benefícios gerados pela redução da massa específica do concreto. Essa diminuição contribui para a minimização dos esforços gerados pelo peso próprio da estrutura, resultando em economia nas fôrmas, cimbramentos e nos custos associados ao transporte e montagem de edificações pré-fabricadas.

Concretos leves também apresentam excelente desempenho em propriedades como resistência ao congelamento/descongelamento, isolamento térmico, isolamento acústico e resistência ao fogo (SILVA, 2015). Contudo, é importante ressaltar que, apesar da melhoria nessas propriedades, a substituição de parte dos materiais sólidos por ar ocasiona uma redução significativa nas propriedades mecânicas dos concretos leves, conforme Cortelassi (2005).

Figura 1 - Tipos de Concretos Leves.



Fonte: Rossignolo (2009).

3.1.1 Concreto Celular

O concreto celular, uma variante de concreto leve, é produzido pela mistura de aglomerantes e agregados finos, que são submetidos a tratamentos mecânicos, físicos ou químicos para criar uma alta porcentagem de poros esféricos, distribuídos uniformemente em sua massa. Esses poros permanecem consistentes, isolado uns dos outros e não sofre deformação durante todo o processo de produção, resultando em uma massa específica aparente seca que varia entre 400 kg/m³ e 1.800 kg/m³ (Ferreira, 1986, citado por Melo, 2009).

A NBR 17071 (ABNT, 2022) fornece a seguinte definição para o concreto celular:

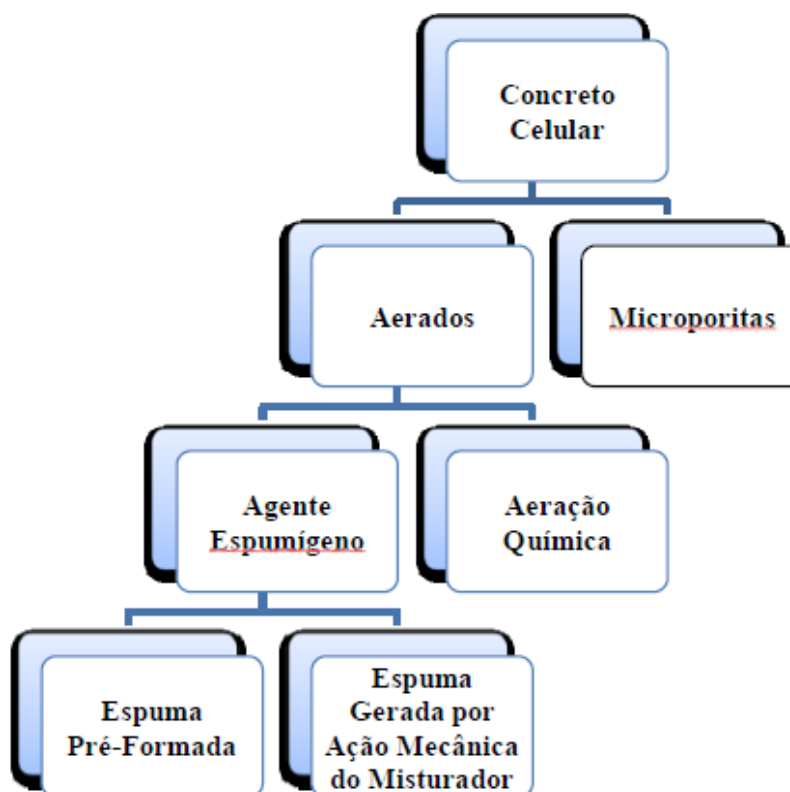
3.1.3. Concreto de cimento Portland, preparado com o emprego de aditivo incorporador de ar, no qual são observadas microbolhas incomunicáveis, homogêneas, uniformemente distribuídas, estáveis e indeformáveis, mantendo inalterada a alcalinidade do concreto-base. (ABNT, 2022, p. 3).

De acordo com Melo (2009), os concretos celulares podem ser classificados em dois grupos principais:

- Concretos aerados quimicamente, frequentemente denominados concretos gasosos. Os agentes aeradores químicos são o resultado de reações entre substâncias, tais como pó de alumínio, pó de zinco, peróxido de hidrogênio (água oxigenada), ou cal clorada, e os demais componentes presentes na argamassa. Essas reações ocorrem antes da fase de endurecimento do cimento, dando origem a poros ou células de hidrogênio no material.
- Concreto aerado por agentes espumígenos, também chamado de concreto celular espumoso (CCE) utiliza uma espuma pré-formada, pela ação desses agentes, incorporada ao concreto. A cura desse tipo de concreto pode ocorrer em condições atmosféricas normais, ambientes com vapor úmido ou em autoclave.

A Figura 2 demonstra a classificação do concreto célula de acordo com Silva (2015):

Figura 2 - Classificação de concreto celular.



Fonte: Silva (2015).

As características distintas entre esses grupos residem nos processos de formação dos poros e em suas estruturas específicas (SILVA, 2015; MELO, 2009).

3.1.2 Concreto Celular aerados quimicamente

O processo de aeração no concreto aerado quimicamente é resultado da interação de uma substância química com os demais componentes da argamassa, gerando poros (aeração). Essas reações ocorrem antes do início da pega do cimento, provocando a formação de poros antes do endurecimento da argamassa, com influência do tipo de aglomerante utilizado (SILVA, 2015; TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992). Segundo Petrucci (1982), os principais agentes formadores de gás nesse tipo de concreto incluem:

- Pó de alumínio, que reage com o hidróxido de cálcio e libera hidrogênio.
- Água oxigenada e cloreto de cal, que reagem, formando cloreto de cálcio e liberando oxigênio.

- Carbureto de cálcio, que reage com a água, formando acetileno.

Um exemplo importante de concreto celular aerado por aeração química é o Concreto Celular Autoclavado (CCA). Este tipo de concreto celular é amplamente empregado na forma de blocos no Brasil, enquanto no exterior, especialmente na Europa, sua aplicação é evidente em construções de paredes de alvenaria. Recentemente, observa-se uma crescente adoção desse material também na América (SILVA, 2015; IOANNOU et al., 2008).

O concreto celular autoclavado é obtido por meio de um processo industrial, no qual se adiciona alumínio em pó a uma mistura de cimento, cal, areia e outros materiais silicosos. A autoclavagem, é um procedimento de cura a vapor realizado em forno especial sob pressão de 10 atmosferas e temperatura de 180°C, esse processo não apenas acelera a hidratação do material, mas também propicia uma segunda reação química, conferindo ao CCA sua resistência, rigidez e estabilidade dimensional (SILVA, 2015; MELO, 2009).

A NBR 13438, (ABNT 2021) caracteriza o CCA como:

3.2 Concreto leve, obtido por processo industrial, constituído por materiais calcários (cimento, cal ou ambos) e por materiais ricos em sílica, granulados finamente.

NOTA 1. A mistura dos materiais é expandida pela utilização de produtos formadores de gases, água e aditivos, se for o caso, sendo submetidos a pressão e temperatura em câmara de vapor saturado.

NOTA 2. O concreto celular autoclavado contém células fechadas, aeradas e uniformemente distribuídas. (ABNT, 2021, p. 1)

3.1.3 Concreto Celular Espumo

O concreto celular espumoso (CCE), foco deste estudo, é produzido por meio da formação de uma espuma estável que é incorporada no concreto, essa espuma é pré-formada e, posteriormente, é adicionada durante a misturada da massa (SILVA . 2015).

Conforme Narayanan e Ramamurthy (2000), a fabricação de concreto celular por meio de agentes espumígenos é economicamente viável e controlável, uma vez que não envolve reações químicas. A introdução de poros é realizada por meios

mecânicos, seja pela utilização de espuma pré-formada ou pela formação da espuma misturada à argamassa (SILVA. 2015).

O Concreto Celular Espumoso pode ser produzido em condições operacionais simples, dispensando o uso de equipamentos especiais, exceto o gerador de espuma, e não requer mão de obra especializada (FONSECA et al, 2019). Além disso, apresenta características autonivelantes, eliminando a necessidade de vibração durante o processo de fabricação, e sua cura ocorre em condições atmosféricas consideradas normais (FONSECA et al, 2019; TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992).

A proporção de ar incorporado à mistura final na produção do CCE desempenha um papel fundamental na leveza do produto e em seu desempenho como isolante térmico e acústico (SILVA. 2015). Entretanto, é importante destacar que essa variável também impacta outras propriedades do material, incluindo a resistência mecânica (SILVA. 2015; MELO, 2009).

Segundo Silva (2015), o CCE é produzido exclusivamente com cimento, sem adição de agregado miúdo, quando se busca uma massa específica inferior a 800 kg/m^3 . No entanto, para obter uma massa específica superior a esse valor, além do cimento, a areia é adicionada. A introdução de agregados leves no CCE pode melhorar a relação entre massa específica e resistência mecânica.

O CCE modificado por agentes dispersantes de cimento (plastificantes, superplastificantes ou fluidificantes), demonstram aprimoramento nas propriedades de resistência mecânica que alcançaram aumentos de 10% e 40% nas resistências para concretos com massas específicas de 1440 kg/m^3 e 1760 kg/m^3 , respectivamente (SILVA, 2015 apud LEGATSKI, 1978, conforme citado por FREITAS 2004). Por outro lado, modificações por meio da incorporação de fibras de vidro resistentes a álcalis e aditivos expansores têm como objetivo atenuar os efeitos da elevada retração por secagem geralmente observada no concreto celular (SILVA 2015; TEIXEIRA FILHO; TEZUKO, 1992). A NBR 17071 (ABNT, 2022), estipula que, para o concreto celular, a densidade de massa aparente no estado seco deve situar-se na faixa de 1.400 kg/m^3 a 2.000 kg/m^3 .

A classificação do CCE de acordo com os materiais que o compõem está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação do CCE.

CONCRETO CELULAR ESPUMOSO (CCE)	<ul style="list-style-type: none"> • Concreto celular com cimento • Concreto celular com cimento e areia • Concreto celular com agregados leves • Concreto celular modificado por: <ul style="list-style-type: none"> - Agentes dispersantes de cimento - Incorporação de fibras - Aditivo expansivo
--	--

Fonte: Silva (2015). Adaptado.

É importante destacar que o estudo das propriedades do concreto celular no Brasil teve início em 1987 com Ferreira e, posteriormente, em 1992, com Teixeira Filho e Tezuka. Ambos os autores conduziram estudos experimentais nos quais adicionaram areia à matriz de concreto celular, resultando em melhorias nas propriedades mecânicas, especialmente na resistência à melhoria, conforme a correção do aumento da massa específica (SILVA, 2015).

Na avaliação de Ferreira (1987, apud SILVA, 2015), a redução da massa específica e da condutibilidade térmica são características centrais na decisão sobre a aplicação do concreto celular, sugerindo ainda que as possibilidades de uso desse concreto se dividam entre a concretagem direta na obra, conhecida como "in loco", e a fabricação de produtos pré-moldados.

De acordo com Silva (2015), o concreto celular espumoso é amplamente utilizado em diversas aplicações "in loco" para a execução de construção de edificações, servindo como:

- Isolante térmico de laje de cobertura e terraços;
- Isolante térmico de linhas subterrâneas de água fria e quente;

- Isolante térmico de frigorífico;
- Isolante térmico de tanques de armazenamento de gasolina, gás liquefeito, amônias, metano, propano, etileno, etc;
- Isolante térmico de fornos de alta temperatura;
- Isolante térmico de paredes corta-fogo;
- Construção de paredes monolíticas, lajes e coberturas de unidades habitacionais;
- Enchimento de pisos (contra pisos);
- Enchimento e regularização do caimento em lajes de cobertura para posterior impermeabilização;
- Revestimentos de estruturas metálicas;
- Construção de barreiras para suavizar choques e absorver energias;
- Construção de pisos flutuantes;
- Assentamento de canalizações subterrâneas;
- Grauteamento de túneis abrigos e câmaras subterrâneas contrachoque e movimentos do solo;
- Concreto projetado.

Em relação à aplicação em pré-moldados, Silva (2015) destaca as vantagens do concreto celular espumoso. De maneira geral, as principais aplicações abrangem:

- Blocos de alvenaria utilizados para instalações ou fundação autoportante;

- Blocos destinados à construção de lajes nervuradas ou lajes de caixão perdidas;
- Blocos e placas específicas para isolamento térmico;
- Placas utilizadas na criação de divisórias, com ou sem função autoportante;
- Placas desenvolvidas para aplicação em pisos falsos;
- Material para o preenchimento de contra piso.

A determinação da massa unitária do CCE, tanto em peças moldadas na obra quanto em blocos, é orientada pelas demandas específicas de que o material será submetido (SILVA, 2015). Para aplicações que exigem propriedades térmicas melhoradas, são indicados os concretos com massas unitárias secas inferiores a 1000 kg/m³. Contudo, em situações em que a aplicação é estrutural, é recomendado que a massa unitária seja superior a 1200 kg/m³ (FERREIRA, 1987 apud SILVA, 2015).

Quanto às desvantagens, destaca-se a perda de desempenho mecânico devido à porosidade do concreto celular, resultante da incorporação de espuma em sua mistura, comprometendo parcialmente sua resistência. A utilização limitada ou ausência de agregados rígidos faz com que o tijolo de concreto celular tenha um módulo de elasticidade menor em comparação com o concreto convencional, o que pode resultar em maior deformação da peça. É importante mencionar que a produção de concreto celular envolve o uso de agentes expansivos ou aditivos em sua mistura, que pode resultar em custos de produção superiores aos do concreto convencional. No entanto, torna-se relevante avaliar as vantagens do bloco de concreto celular, (VIVA DECORA, 2023).

Quanto à sustentabilidade, o CCE destaca-se por ser produzido com um aditivo aerador, eliminando a necessidade de utilizar pó de alumínio, que é um material altamente poluente. Além disso, dispensam o processo de cura em altas pressões e temperaturas para expandir o alumínio, resultando em um consumo de energia até 9

vezes menor na produção do CCE. A sustentabilidade desse tipo de concreto está intrinsecamente ligada ao seu processo de fabricação e à construção propriamente dita, uma vez que parte das matérias-primas consiste em resíduos reutilizados. No contexto da construção, há uma redução significativa de desperdícios, resultando em menos entulho PROBLOC (2023).

3.2 Concreto-Base

Segundo Silva (2015), os concretos celulares são obtidos a partir de uma matriz de argamassa convencional denominado de concreto-base, normalmente composta pela mistura de aglomerante e agregados finos. A NBR 17071 (ABNT, 2022), faz a seguinte definição de concreto-base: “concreto de cimento Portland, com densidade de massa aparente no estado endurecido compreendida entre 2.000 kg/m³ e 2.800 kg/m³, ao qual é adicionado o aditivo incorporador de ar (IA), dando origem ao concreto celular estrutural.” (ABNT, 2022, p. 2).

3.3 Materiais utilizados na produção

Os materiais empregados na produção do CCE geralmente seguem uma composição semelhante à dos concretos convencionais, exceto pela utilização de aditivos que introduzem bolhas de ar na matriz do concreto. Outra distinção ocorre nos agregados, sendo a escolha dependente das propriedades desejadas. Para densidades acima de 800 kg/m³, é comum utilizar agregados miúdos, enquanto agregados graúdos leves são empregados para alcançar resistências superiores. Quanto aos demais materiais, como cimento, aditivos, agregados e fibras, não há distinção; eles são comumente utilizados na produção de concreto celular, seja por aeração química ou pela introdução do agente espumígeno, (SILVA. 2015)

3.3.1 Incorporador de ar

O incorporador de ar, conhecido também como aditivo incorporador de ar (IA), agente espumígeno, agente espumante ou agente formador de espuma é encontrado no mercado por diferentes fabricantes. Os vários agentes formadores de espuma utilizados são os detergentes, resina, sabão e proteínas hidrolisadas (SILVA, 2015; NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000). Os agentes espumantes sintéticos são economicamente mais acessíveis. No entanto, a variedade de

produtos espumantes sintéticos é ampla, e não há uma indicação clara de que um seja tecnicamente superior ao outro. Exemplos incluem os saponáceos, albuminoides ou resinas vinílicas, neutralizados e estabilizados (FERREIRA, 1987 apud SILVA, 2015).

De acordo com Petrucci (1982, apud SILVA, 2015), os principais agentes formadores de espuma incluem proteínas hidrolisadas, resinas saponificáveis, agentes sintéticos de superfície ativa, sangue hidrolisado e cola animal. Silva (2015) ressalta que esses agentes são protegidos por patentes, o que dificulta o acesso preciso às suas propriedades. Existem os fabricados a partir de sangue de animal, os sintéticos, à base de silicone, F.V.A. (acetato de polivinila), álcoois naturais, sulfatos, dentre outros. Um bom aditivo gera uma espuma com capacidade de resistir às múltiplas forças sofridas durante a mistura, que são da ordem de 10 kgicua^2 . (Melo, 2009).

A NBR 17071 (ABNT, 2022) fornece a seguinte definição para o agente espumígeno:

3.1.2 aditivo incorporador de ar - (IA). Aditivo que incorpora intencionalmente, durante o amassamento do concreto, uma quantidade controlada de microbolhas de ar, separadas entre si, uniformemente distribuídas, estáveis e que mantenham estas características no estado endurecido (ABNT, 2022, p. 3).

O propósito do aditivo incorporador de ar (IA) no concreto celular reside na criação de minúsculas bolhas de ar encapsuladas, evitando a tensão superficial da solução e ampliando a estabilidade dessas bolhas (LIMA NETO; PAIVA; PINHEIRO, 2022). Para Cortelassi (2005) os aditivos IA consistem em soluções especiais à base de tensoativos (agentes emulsificantes), e espumantes estáveis. Quando transformados em espuma e adicionados ao concreto ou argamassa, possibilitam a produção de concreto celular com propriedades excelentes. Quanto à influência desses aditivos no comportamento do CCE, o autor ressalta que, no estado fresco, o IA aprimora a trabalhabilidade, viabilizando a criação de concretos leves com massa específica variando entre 600 kg/m^3 e 1800 kg/m^3 . Já no estado endurecido, contribui para a melhoria do isolamento termo acústico do material (SILVA. 2015; CORTELASSI (2005).

O presente trabalho utilizou um aditivo incorporador de ar que, de acordo com o fabricante, gera espuma pré-formada de alta densidade, resistente e duradoura como ilustra a Figura 3. Esse aditivo mantém uma estrutura de micro e nano-bolhas de ar incorporadas na matriz da mistura durante sua homogeneização. Além disso, possibilita a produção de Concreto Celular, Concreto Leve, Argamassa Leve e Gesso Celular Leve em diversas densidades (400 a 1.600 kg/m³) e resistências, conforme o traço previamente projetado. Pode gerar espuma por meio de equipamento especializado, como Gerador de Espuma, ou por Agitação Mecânica (ECOPORE, 2023).

Figura 3 - Espuma pré-formada.



Fonte: ECOPORE, (2023).

3.3.2 Cimento

O Cimento Portland é uma substância em pó com propriedades aglutinantes, aglomerantes ou ligantes. Quando combinado com água, endurece devido a essas características e permanece estável mesmo quando submetido novamente à água. Na construção civil, concretos e argamassas são produzidos pela mistura do

cimento com água, areia, brita, cal, pó de pedra e outros materiais. (FONSECA et al, 2019).

Cada variedade de cimento é identificada por um numeral romano, conforme estabelecido pela NBR 16697 (ABNT, 2018), podendo incluir ou não letras, dependendo de sua composição e características específicas. A nomenclatura é composta pela sigla do cimento, seguida por sua classe de resistência, e pode ser complementada pelos sufixos RS e BC (MOURÃO, 2021), conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2 - Designação normalizada, sigla e classe de cimento Portland.

Designação normalizada	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland Comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland Composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d	
Cimento Portland Branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 ^c	
	Não estrutural	CPB	---	---
<p>a. Cimento Portland resistente a sulfatos: acrescenta-se a sigla RS à sigla e classe dos tipos originais de cimento.</p> <p>b. Cimento Portland de baixo calor de hidratação: acrescenta-se a sigla BC à sigla e classe dos tipos originais de cimento.</p> <p>c. As classes 25, 32 e 40 correspondem aos valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.</p> <p>d. CP V- ARI, Cimento Portland de Alta resistência Inicial, que após 1 dia de idade apresenta resistência igual ou superior a 14 MPa, conforme procedimentos da ABNT NBR 7215.</p>				

Fonte: NBR 16697, (2018).

Em relação aos concretos celulares obtidos com o IA, Ferreira (1987 apud SILVA, 2015) afirmam que o aglomerante mais comumente utilizado é o cimento comum, podendo também empregar escória de alto forno e pozolânico. Entretanto, em casos destes dois últimos, é necessário realizar ajustes nas dosagens pois pode impactar nas características de endurecimento. Recomenda-se, portanto, a análise experimental

dessas misturas para uma avaliação mais precisa de suas propriedades. Quanto ao Cimentos de alta resistência inicial, é importante considerar que devido à baixa resistência inicial observada no concreto celular com aglomerantes convencionais, os cimentos de alta resistência inicial são empregados com significativas vantagens na produção do CCE (SILVA. 2015).

3.3.3 Agregados

A NBR 9935 (ABNT, 2011) conceitua os agregados como um material granular, geralmente inerte com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto. Segundo Formagini et al. (2004), esses materiais são geralmente inertes e rígidos, desempenhando o papel de compor o esqueleto granular.

Os requisitos para a produção e recepção de agregados miúdos e graúdos utilizados na fabricação de concretos de cimento Portland são especificados pela NBR 7211 (ABNT 2019) que aborda a composição do agregado como constituídos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, sem a presença de substâncias que possam influenciar negativamente a hidratação e o endurecimento do cimento, prejudicar a proteção da armadura contra a corrosão, comprometer a durabilidade ou impactar, quando necessário, o aspecto visual externo do concreto.

A NBR 7211 (ABNT 2019) define os agregados da seguinte forma:

3.1. agregado graúdo. Agregado cujos grãos passam pela peneira de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 4.75 mm. - 3.2. agregado miúdo. Agregado cujos grãos passam pela peneira de malha de 4.75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 4.75 μ m (ABNT, 2019, p. 3).

Quanto a utilização de agregados na produção de CCE, Silva (2015) destaca a ausência de estudos que abordem a produção de concretos celulares utilizando agregados graúdos de origem rochosa. A falta de explicações sobre essa não utilização sugere que esses agregados são evitados devido à sua massa específica superior às densidades dos concretos leves. Isso pode resultar em um aumento da densidade desses concretos, devido ao peso elevado dos agregados graúdos em comparação com os miúdos. Essa disparidade de peso pode impactar negativamente as bolhas de ar durante o processo de mistura, favorecendo seu rompimento e, conseqüentemente,

umentando a densidade do concreto. Com tudo, esse mesmo autor, concluiu que a aplicação de agregados leves nas matrizes de CCE é satisfatória SILVA (2015).

Dubaj (2000), observou que a areia de rio se destaca como o agregado mais comumente utilizado em misturas de argamassas. Sua utilização desempenha várias funções essenciais, como a redução do consumo de aglomerantes, aumento da resistência mecânica à compressão, a mitigação da retração e a contribuição para o preenchimento dos vazios, uma vez que seus grãos possuem dimensão máxima de até 4,75 mm.

Através do ensaio de granulométrica pode-se determinar o módulo de finura e a dimensão máxima dos grãos. A granulometria do agregado é representada pela curva de distribuição granulométrica, é uma das características utilizadas para determinar o melhor emprego do agregado miúdo e sua aplicação na construção civil. A NBR 17054, (ABNT 2022) é a norma que dispõe sobre agregados determinando sua composição granulométrica.

3.3.4 Água de amassamento

Conforme afirmado por Gomes e Barros (2009), a água de amassamento desempenha um papel essencial no concreto, proporcionando propriedades reológicas adequadas para a mistura e lançamento, além de catalisar as reações de hidratação necessárias. A quantidade adequada de água presente na mistura vai garantir a máxima resistência e boa trabalhabilidade do concreto.

A NBR 12655 (ABNT 2022), instrui relação água/cimento que impacta diretamente a resistência do concreto, e a importância de armazenar a água de amassamento de forma segura para evitar contaminação. Além disso, ressalta que a água, mesmo quando aparentemente pura, pode ser agressiva para o concreto devido à sua capacidade de dissolver os compostos hidratados do cimento.

A ABNT NBR 15900-1 (ABNT, 2009) estabelece que a água de abastecimento público é prontamente adequada para uso em concreto, dispensando a necessidade de ensaios adicionais. Além disso, orienta que a água potável que segue as diretrizes estabelecidas na Portaria nº 518 do Ministério da Saúde está em

conformidade com os rigorosos padrões da norma do ABNT/CB-18 e pode ser empregada na preparação do concreto sem qualquer restrição. No entanto, é necessário ressaltar que a água proveniente de sistemas de esgoto, mesmo após tratamento, não é apropriada para uso na produção de concreto.

3.4 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar

As cinzas da queima do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) é um resíduo passível de ser reciclado ou reutilizado substituindo, por exemplo, a areia em produtos de natureza cimentícia, com fins de produzir materiais de construção, (LIMA et al. 2009). Segundo Rossetto (2004) para cada tonelada de cana processada gera 260 kg de bagaço seco, estima-se que no Brasil são produzidos mais de 70 milhões de toneladas de bagaço por ano. Ainda de acordo com Rossetto (2004), após a queima do bagaço, restam as cinzas, com rendimento médio de 6 kg por tonelada de cana. Esse processo resulta na produção de aproximadamente 1,6 milhão de toneladas de cinzas anualmente.

A destinação habitual das cinzas provenientes do bagaço de cana-de-açúcar consiste na aplicação direta no solo das áreas destinadas ao cultivo da cana-de-açúcar. É importante destacar que os efeitos dessa aplicação repercutem no solo, na própria planta ou mesmo no rendimento industrial, afetando a matéria-prima (BRUNELLI E PISANNI JÚNIOR 2006). No que diz respeito às questões ambientais inerentes ao setor da agroindústria sucroalcooleira, Rossetto (2004) argumenta que alguns resíduos originados desse setor possuem elevado valor agregado, transformando-se em valiosas matérias-primas para diversas atividades agrícolas e industriais. Este é o caso do bagaço de cana-de-açúcar que após sua queima em caldeiras surge as cinzas considerado um subproduto valioso.

Autores também comprovaram a utilização das cinzas do bagaço em combinação com cimento como apresentado por Zardo et al., (2004), Cordeiro et al., (2009) e Di Paula et al., (2009), Bezerra (2017), enquanto outros indicam seu uso em misturas cerâmicas como Borlini et al., 2006 (BEGA, 2014).

3.4.1 Histórico do uso do bagaço de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é reconhecida como uma das matérias-primas mais versáteis na contemporaneidade, devido à sua ampla gama de produtos derivados. Estes incluem etanol, açúcar, energia, cachaça, caldo-de-cana, rapadura, bem como seus subprodutos, que são integralmente reaproveitados (MOURÃO. 2021).

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2023), a produção de cana-de-açúcar na safra 2022/23 está estimada em 610,1 milhões de toneladas, crescimento de 5,4% em relação à temporada passada. Só na região Sudeste, maior produtora de cana no país, o volume colhido no ciclo 2022/23 aumentou 5,8% em relação à safra anterior, saindo de 366,33 milhões de toneladas para 387,76 milhões de toneladas.

De acordo com a Exame Agro (2023) a consultoria Czarnikow Group Limited, avalia que a safra 2022/2023 deve ter moagem de 549 milhões de toneladas. E para 2023/2024, o volume pode chegar a 597 milhões de toneladas de cana moídas, permitindo a produção de quase 38 milhões de toneladas de açúcar.

Dentre os diversos resíduos provenientes das unidades industriais sucroalcooleiras, o bagaço de cana-de-açúcar se destaca como um dos mais atraentes, embora não seja o de maior volume. Sua alta capacidade calorífica o consagra como uma fonte de energia primordial em todo o processo de fabricação de açúcar e álcool (KAWA, 2015). A importância da cogeração de energia utilizando o bagaço reside no fato de que, dentre outros, o período de safra coincide com o período de seca dos reservatórios das usinas hidrelétricas e, dessa forma, possui importante caráter complementar na geração de energia. Contudo, KAWA (2015), acrescenta que após o processo da queima fica a gestão das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), que representa um desafio significativo para os administradores das usinas.

3.4.2 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar da produção de cachaça artesanal

Um estudo conduzido por Mourão (2021) detalha o processo de obtenção da cinza a partir do bagaço de cana-de-açúcar na produção de cachaça artesanal. De acordo com Mourão, esse processo está em conformidade com a Instrução Normativa No. 13, de 2005, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) do

Brasil. Segundo esta norma, a cachaça é definida como uma aguardente de cana com teor alcoólico entre 38% e 48% (em volume), medido a uma temperatura de 20°C. Essa bebida é obtida através da destilação do mosto fermentado do caldo de cana, sendo permitida a adição de açúcares em até 6 g/L, expressos em sacarose. Apesar de o Brasil ter instalações com capacidade para produzir até 1,2 bilhão de litros de cachaça anualmente, a produção real é inferior, atingindo menos de 800 milhões de litros por ano (Mourão, 2021).

O Anuário da Cachaça de 2020, publicado pelo MAPA, indica a presença de 1.086 produtores de aguardente e cachaça no país, dos quais 894 são especializados na produção de cachaça, 357 em aguardente e 165 em ambas as variedades (Mourão, 2021; IBRAC, 2023).

A amostra de cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizado neste trabalho foi cedida pela empresa produtora de cachaça 'Cachaça Decisão' Localizada em Sabinópolis, Minas Gerais, a empresa é reconhecida por produzir e comercializar cerca de 40.000 litros de cachaça anualmente. A Decisão destaca-se no mercado de cachaça devido à venda de suas duas marcas distintas: a cachaça Decisão e a cachaça Sabciana.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o propósito de alcançar os objetivos desta pesquisa, conduzimos um estudo experimental em conjunto com a revisão bibliográfica apresentada anteriormente. Nesta seção, descrevemos detalhadamente o processo de produção de corpos de prova de concreto celular espumoso, abrangendo a seleção e caracterização dos materiais, os procedimentos de dosagem, mistura, moldagem e cura dos corpos de prova (CP), bem como os métodos de ensaio aplicados. Os principais ensaios realizados neste estudo incluíram a avaliação da resistência mecânica à compressão axial, conforme estabelecido pela NBR 5739 (ABNT 2018), e a avaliação da absorção de água, de acordo com a NBR 9778 (ABNT 2005).

Este estudo buscou avaliar quais os efeitos das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar da produção de cachaça artesanal em substituição parcial ao cimento Portland na produção de concreto celular espumoso e a influência dos resultados para a contribuição na redução na pegada de carbono nos produtos da construção civil.

Os ensaios e procedimentos desse estudo foram conduzidos nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG, Campus Nova Gameleira, situado em Belo Horizonte. Todos os procedimentos foram acompanhados e auxiliados pela equipe da Coordenação de Laboratórios do departamento.

Os equipamentos e materiais para a produção das amostras de concreto celular espumoso utilizados neste estudo foram selecionados e caracterizados cuidadosamente, visando à replicabilidade em futuros projetos. Dessa forma, foram empregados os seguintes materiais e equipamentos:

4.1 Equipamentos

- Concreto projetado;
- Aditivo espumígeno;
- Água;
- Agregado miúdo (areia média de rio);

- Balanças;
- Baldes;
- Béquer de plástico graduado;
- Batedor de Argamassa para Furadeira;
- Colher de pedreiro;
- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI);
- Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar moída e requeimada (CBCA);
- Estufa;
- Furadeira elétrica portátil;
- Misturador de argamassa;
- Haste de adensamento;
- Máquina de ensaio de compressão (prensa hidráulica);
- Moldes metálicos para corpo de prova cilíndricos 10x20 cm;
- Peneira malha 4.75mm;
- Proveta de vidro graduada;
- Recipiente metálico para agregados;
- Recipientes de plástico;
- Solução Desmoldante;
- Tanque de cura;

4.2 Aglomerante

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CPV (ARI PLUS) - produzido pela Lafarge/Holcim na cidade de Pedro Leopoldo-MG. Conforme o certificado das análises do lote do cimento fornecido pela Lafarge/Holcim, a densidade é de 3,258 g/cm³. A composição química e a análise da resistência à compressão (NBR 7215 (2019), ambas fornecidas pelo fabricante, estão apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Composição química do cimento.

Componente	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SrO	Cl ⁻	LOI
Teor	18,11	4,55	3,28	62,53	0,60	2,88	0,60	0,244	0,269	0,314	0,098	5,82

Fonte: Lafarge Holcim, (2022)

Tabela 4 - Análise da resistência à compressão do cimento conforme NBR 7215 (2019).

ENSAIOS	NBR Nº	UNIDADE	Desvio	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO Média	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR16697/18
Resist.Comp. 1Dia	NBR7215/19	MPa	0.75	24.7	>=14.0
Resist.Comp. 3Dias			0.76	38.1	>=24.0
Resist.Comp. 7Dias			0.62	42.4	>=34.0
Resist.Comp. 28Dias			0.99	49.4	não aplicável

Fonte: Lafarge Holcim, (2023). Adaptado.

O cimento CP V ARI possui em sua composição 90% a 100% de sulfato de cálcio e clínquer, além de adição de até 5% de material carbonático (NBR 16697, ABNT 2018). Mourão (2021) destaca que, ao avaliar o impacto das adições de CBCA na produção de argamassas, a escolha do CP V-ARI se mostrou a alternativa mais apropriada, devido ao seu alto teor de clínquer.

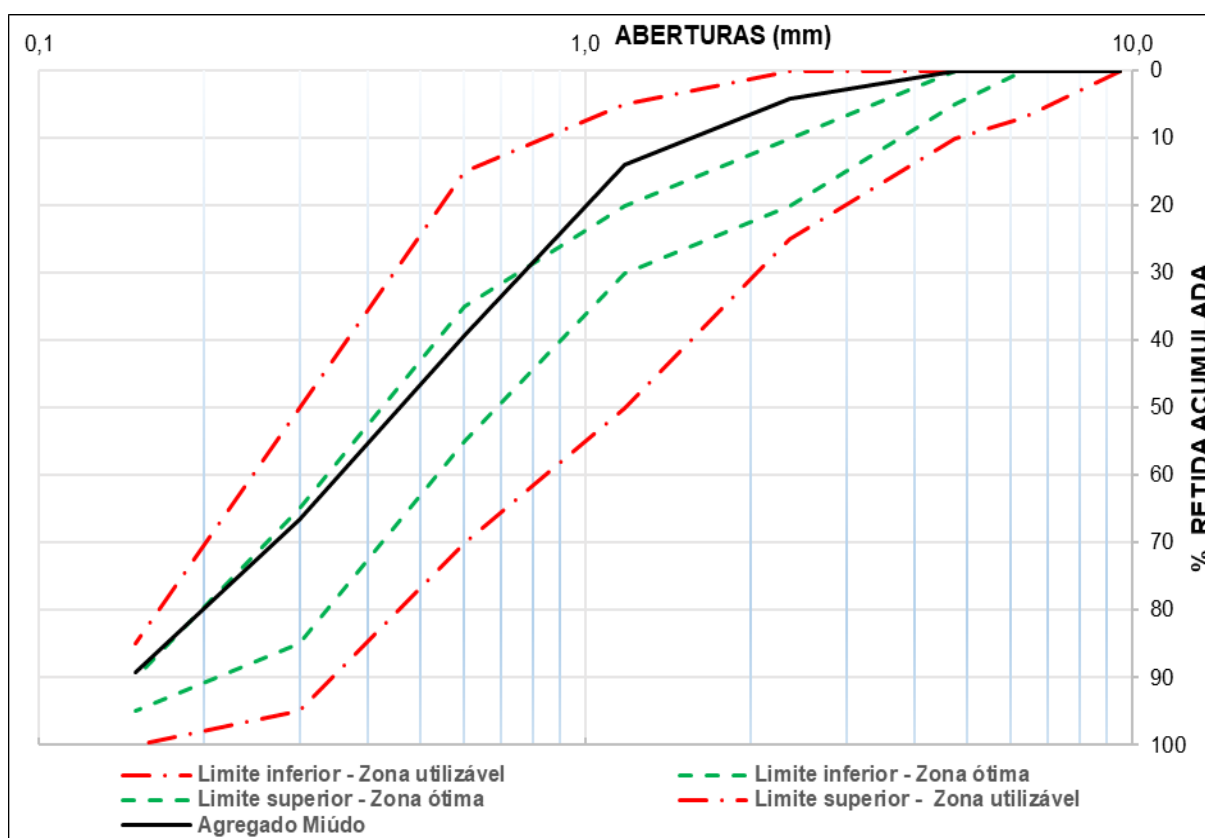
O cimento CP V- ARI, amplamente disponível no mercado, é comercializado em sacos de papel kraft de 40 kg cada. Quantidade de cimento usada para realização do presente trabalho pertencia a um único lote, visando com isto eliminar problemas de variações que poderiam acarretar mudanças no comportamento dos concretos.

4.3 Areia

O agregado miúdo utilizado foi a areia média lavada produzida na cidade de Esmeraldas no Estado de Minas Gerais. O agregado foi utilizado no estado de fornecimento, isto é, ele não passou por processos de beneficiamento que resultassem em algum tipo de alteração em suas características iniciais, tais como a lavagem prévia ou o ajuste da granulometria através de peneiramento.

A determinação da composição granulométrica e módulo de finura da areia seguiram as recomendações da NBR 17054 (ABNT 2022). O ensaio realizado definiu o agregado com sendo utilizável e com valor de módulo de finura igual a 2,87. A curva granulométrica está representada na Figura 4.

Figura 4 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor, (2023).

Para evitar possíveis contaminações dos agregados com substâncias desconhecidas, os materiais foram acondicionados em sacos plásticos no momento de sua coleta e desembalados apenas no momento de sua utilização.

4.4 Água

A água empregada na produção do CCE foi fornecida pelo abastecimento público local, proveniente da COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais, na cidade de Belo Horizonte. Foi realizada uma análise visual da condição da água utilizada para garantir a qualidade do concreto produzido, com base ao recomendado nas diretrizes da norma NBR 15900-1:2009.

4.5 Aditivo incorporador de ar

Para este estudo foi utilizado um aditivo IA de base sintética, biodegradável, livre de cloretos e comercializado na forma de um concentrado líquido. Pode ser processado em geradores de espuma ou em agitador mecânico, gerando uma espuma durável de alta densidade, compatíveis com a maioria dos tipos de cimentos Portland disponíveis no mercado, produzindo concreto celular de fácil manuseio, além de oferecer excelentes propriedades de isolamento acústico e um conforto térmico superior (ECOPORE, 2023).

O aditivo IA deve ser diluído previamente em água na proporção de 1:20 conforme orientação do manual de uso, seguida pela manipulação mecânica utilizando um batedor de hélices adaptada em uma furadeira elétrica (agitador mecânico). Esse procedimento resulta na criação de uma espuma de alta densidade e durabilidade, possibilitando um controle preciso sobre a incorporação de ar essencial para a produção de Concreto Celular em diversas faixas de densidade, geralmente variando de 400 kg/m³ até 1.900 kg/m³. (ECOPORE, 2023).

4.6 Cinzas bagaço de cana-de-açúcar

A Cinza do bagaço de cana-de-açúcar oriunda da produção de cachaça artesanal utilizado nesta pesquisa foi cedida pela empresa produtora da 'Cachaça Decisão'. A empresa tem sua sede em Sabinópolis, Minas Gerais.

A amostra utilizada pertence ao mesmo lote de Cinza do bagaço de cana-de-açúcar que foi previamente preparado e caracterizado no trabalho antecipado de Mourão (2021), que detalhou em sua dissertação as etapas de preparo e caracterização das amostras de CBCA oriunda da produção de cachaça artesanal, a reutilização do mesmo lote de material foi relevante para o desenvolvimento do presente trabalho.

4.6.1 Processamento das amostras de CBCA

Para a preparação das amostras, Mourão (2021), coletou as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar e transportou para os laboratórios do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG (Campus Nova Gameleira, Belo Horizonte). Em seguida, a amostra foi submetida a um primeiro peneiramento, utilizando a peneira de malha de

4,75 mm, seguido por um segundo peneiramento, desta vez na peneira de malha de 600 μm . Esse procedimento permitiu a eliminação de quaisquer elementos orgânicos e impurezas, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Amostras de CBCA natural (esquerda) e amostra peneirada (direita).



Fonte: Mourão, 2021

Após a etapa inicial, conforme descrito por Mourão (2021), as amostras foram submetidas à moagem em um moinho de bolas cerâmicas, Figura 6, ao longo de uma hora.

Figura 6 - Moagem do CBCA.



Fonte: Mourão, (2021)

Em seu trabalho, Mourão (2021) conduziu a pesquisa utilizando duas amostras de CBCA: uma moída (CBCA-M) e outra moída e requeimada a 600°C (CBCA-MR), conforme a Figura 7.

Figura 7 - Aspecto visual da CBCA-M (a) e da CBCA-MR (b).



Fonte: Mourão (2021).

A Figura 7 (a), exibe o aspecto visual da amostra da cinza apenas com o processo de moagem, enquanto a Figura 7 (b), mostra o aspecto visual da amostra da cinza moída e requeimada. Observa-se uma homogeneidade maior em comparação com a cinza in natura, com a cor predominante dessa amostra sendo o marrom claro.

4.6.2 Caracterização das amostras de CBCA após a moagem

Mourão conduziu uma caracterização detalhada das amostras de CBCA, submetendo-as a uma série de ensaios. As análises abrangeram a investigação da estrutura cristalina das amostras de cinzas por meio da difração de raios X (DRX), a determinação da composição química por espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX), a granulometria foi avaliada por difração a laser (granulômetro), a medição da massa específica utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier conforme a norma NBR 16605 (ABNT, 2017) e a análise visual por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Além disso, foi realizado o ensaio de perda ao fogo mediante a técnica de aquecimento a 950°C. Além de ensaios de Tempos de pega, determinação da Atividade Pozolânica, Método de Condutividade e finalizando com a confecção de argamassas com substituição do cimento por CBCA.

Mourão (2021), constatou que a requeima a 600°C resultou em cinzas com uma granulometria mais homogênea, conforme evidenciado pelo ensaio de granulometria a laser. Adicionalmente, a requeima reduziu a quantidade de matéria orgânica presente nas cinzas. A resistência à compressão das argamassas produzidas com as cinzas foi mais elevada nas amostras com a cinza moída e requeimada (CBCA-MR), em comparação com amostras com cinza moída sem o processo de requeima. Segundo Mourão (2021) essa elevação da resistência se deve principalmente ao menor teor de carbono presente na cinza requeimada, favorecendo o processo de hidratação do material e, em menor escala, a ocorrência de reações pozolânicas.

Em relação aos teores de cinzas, importante observar que Mourão (2021) definiu os percentuais de substituição de 10% e 20% em volume:

A produção das argamassas se deu conforme os procedimentos da NBR 7215 (ABNT, 2019). Foram adotados percentuais de substituição de 10% e 20% (em volume) do cimento pelas cinzas, pois essa faixa de percentual gerou resultados satisfatórios nas propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas, conforme verificado por Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007), Ribeiro e Morelli (2014), Bezerra et al. (2017) e Batista (2016). (MOURÃO, 2021).

O autor concluiu que as argamassas com 10% de adição de cinza moída e requeimada apresentaram o melhor desempenho mecânico entre as dosagens com

CBCA, obtendo valores de compressão semelhantes à referência aos 28 dias de idade. Nesse sentido, o presente trabalho utilizou uma fração do mesmo lote de cinzas moída e requeimada (CBCA-MR), caracterizada no trabalho de Mourão (2021), buscando obter desempenhos mecânicos equivalentes ao substituir o cimento por CBCA na produção de CCE.

4.7 Seleção dos materiais constituintes

O resumo das justificativas que embasam a seleção dos materiais que constituem o concreto celular está justificado na Tabela 5.

Tabela 5 - Resumo da seleção dos materiais que constituem o concreto celular.

MATERIAL	TIPO	JUSTIFICATIVA DE USO
CIMENTO	CPV-ARI	Aglomerante composto por 90% a 100% de sulfato de cálcio e clínquer, revelou ser a escolha mais adequada para avaliar o impacto das adições de CBCA.
AGREGADO MIÚDO	Areia média de rio	Desempenha funções essenciais, como a redução do consumo de aglomerantes, aumento da resistência mecânica à compressão e a mitigação da retração.
ÁGUA	Abastecimento local	Material disponibilizado.
CINZA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	CBCA-MR	Por ser uma alternativa de materiais cimentícios suplementares rica em sílica amorfa, o que pode acarretar melhorias nas propriedades das argamassas e concretos.
ADITIVO INCORPORADOR DE AR	Base Sintética	Capaz de gera uma espuma pré-formada de alta densidade, resistente e capaz de aprimorar a trabalhabilidade, viabilizando a criação de concretos leves com massas específicas variadas.

Fonte: Elaborada pelo autor (2023) - Adaptado de Fonseca et al, (2019).

5 Métodos

A produção do concreto celular espumoso se deu conforme procedimentos da NBR 12821 (ABNT, 2009). Foram produzidos três traços de concreto celular espumoso sendo o primeiro de matriz convencional (cimento, água, areia e aditivo IA), sem uso de substituições, denominado traço referência (REF) confeccionado para efeito de comparação e avaliação do desempenho das diferentes proporções de CBCA utilizados. Os demais, segundo e terceiro traços foram adotados percentuais de substituição de 10% (CBCA10%) e 20% (CBCA20%) do volume do cimento pelas cinzas, conforme estudos de Mourão (2021) essas faixas de percentuais geraram resultados satisfatórios nas propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas que utilizaram o CBCA com substituição.

Foram produzidos 11 (onze) corpos de prova (CP) de cada traço, sendo 27 CPs para ensaio de resistência à compressão axial com idades de 7, 21 e 28 dias, para o ensaio de absorção de água por imersão foram confeccionados 6 CPS totalizando 33 CP confeccionados. O experimento foi conduzido utilizando um delineamento próprio casualizado (DIC), organizado em um esquema fatorial 3x3 (representando 3 traços para 3 idades de rompimento), com três repetições (com 3 amostras para cada idade de rompimento), explorando-se 2 proporções de cinza para cada traço mais 1 traço referência.

5.1 Massa específica

Conforme Freitas (2004), a massa específica do concreto é definida em três formas distintas: a massa específica no estado fresco, medida durante a preparação da mistura; a massa aparente, quantificada imediatamente após a desforma do material; e a massa específica seca, determinada após a secagem em estufa até a estabilização do peso do material.

A medição da massa específica é essencial para cada aplicação feita com o concreto celular estrutural, exigindo uma harmonização das propriedades físico-mecânicas dos materiais que compõem a dosagem. Em vista disso, alguns critérios gerais sobre a massa específica podem ser observados: em aplicações que exigem propriedades térmicas, o ideal é escolher massas unitárias secas inferiores a 1000

kg/m³; para aqueles que exigem características estruturais, a preferência incidi sobre massas unitárias secas superiores a 1200 kg/m³. No caso de peças moldadas "in situ" e blocos de concreto celulares, a definição da massa unitária ocorre de acordo com as demandas específicas impostas ao material (SILVA, 2021; FERREIRA, 1987).

5.2 Dosagem dos Traços

Os estudos sobre a dosagem de concretos com cimento Portland são essenciais para alcançar a melhor proporção entre os materiais que compõem o concreto. Essa proporção, conhecida como traço, pode ser expressa em massa ou volume (SILVA, 2015; TUTIKIAN E HELENE, 2011).

Silva (2015) observou que não é comum na literatura encontrar métodos de dosagem específicos para concretos celulares. Geralmente, os métodos de dosagem partem de uma matriz de concreto convencional dosada por meio de técnicas já estabelecidas. A partir desse concreto base, são adicionados aditivos em dosagens distintas para gerar bolhas de ar ou gás até alcançar as características desejadas do concreto celular.

A NBR 17071 (ABNT, 2022) especifica os requisitos para o estudo de dosagem do concreto celular estrutural:

18.4.2.1 A composição do concreto celular estrutural, a ser utilizado na obra, deve ser determinada por meio de dosagem racional e experimental, com a devida antecedência em relação ao início da concretagem da estrutura. 18.4.2.2 Antes do estudo de dosagem devem ser caracterizados os materiais constituintes do concreto celular estrutura, que devem atender aos requisitos estabelecidos na seção 6. Esta caracterização deve ser realizada com os mesmos materiais a serem utilizados pela obra. 18.4.2.3 O estudo de dosagem do concreto celular estrutural deve ser realizado com base na classe de agressividade ambiental, na resistência característica à compressão (f_{ck}) e na densidade da massa aparente no estado fresco (ρ_f), especificadas no projeto estrutural, devendo ser determinada nesta etapa a densidade de massa aparente no estado endurecido (ρ_s) e, quando for o caso, avaliar o atendimento a outras especificações, como, teor de ar incorporado, módulo de elasticidade, retração, deformação lenta e coeficiente de dilatação térmica. (ABNT, 2022, p. 33).

Ferreira (1987 apud SILVA, 2015) emprega um método de dosagem para concretos celulares espumosos baseado em dois fatores principais: Primeiramente, a soma dos volumes absolutos dos componentes da mistura (incluindo o ar) deve ser de 1

m^3 ; em segundo lugar, a soma das massas dos componentes da mistura, excluindo o ar (uma vez que não possui peso), deve ser igual à massa unitária úmida do concreto celular.

Ao investigar os efeitos da substituição parcial do cimento por CBCA nas propriedades das argamassas cimentícias, Mourão (2021) seguiu as quantidades dos materiais especificados na NBR 7215 (ABNT, 2019) para estabelecer a dosagem dos traços usados nas produções das argamassas analisadas em seu estudo, adotando um fator areia/cimento de 3 quilos de areia por 1 quilo de cimento, sobre a massa de cada material.

Em relação ao volume de espuma usada no traço, Silva (2015), descreve que a quantidade de espuma adicionada à mistura exerce uma influência direta na massa específica dos concretos celulares espumosos. O aumento do teor de espuma resulta em uma maior quantidade de vazios na massa do concreto, o que, por sua vez, leva à redução da massa específica do material. Essa observação confirma a relação existente entre o volume de espuma e a densidade do concreto celular.

Segundo a empresa ECOPORE (2023) – “Grupo privado que atuam no desenvolvimento e pesquisa de soluções técnicas sustentáveis e ecológicas para engenharia”, a massa específica está diretamente relacionada à quantidade de espuma incorporada à argamassa. À medida que adicionamos mais espuma, a mistura se torna mais leve, mas também mais frágil. A mistura ideal seria aquela que atinge pelo menos 20 MPa com uma densidade de 1.000 Kg/m^3 ; entretanto, os resultados mais promissores encontrados em diversos estudos foram de 18 MPa e uma densidade de 1.200 Kg/m^3 . Em comparação, um concreto celular simples, sem aditivos, normalmente alcança de 5 a 8 MPa com uma densidade de 1.000 Kg/m^3 .

O tempo de mistura prolongado dos componentes, argamassa e espuma, induz a um aumento da massa específica aparente, resultando conseqüentemente em uma elevação da resistência à compressão dos concretos celulares espumosos, conforme destacado por Ferreira (1986 apud SILVA, 2015). O autor explica que o tempo excessivo de mistura, as bolhas de ar tendem a se unir e subdividir, transformando macrocélulas em microcélulas, o que reduz a quantidade de ar

incorporado e, conseqüentemente, o volume da mistura. Tendo em vista que a meta deste estudo é atingir uma densidade de 1200 kg/m³, foi estabelecido um tempo de mistura da argamassa com espuma de 2 minutos. Este período foi definido para ter uma boa a incorporação de ar, mantendo a densidade desejada.

O manual de utilização do aditivo IA, empregado neste estudo, apresenta sugestões de traços para produção de concretos celulares para uso estrutural e não estrutural. Os métodos de dosagem seguem as proporções de cimento, agregados, água e volume de espuma determinadas com base na Tabela 6.

Tabela 6 - Dosagem de concreto celular espumoso por m³ em estado seco.

MATERIAIS	ESTRUTURAL			NÃO ESTRUTURAL				CONCRETO CONVENCIONAL
	1200	1400	1600	400	600	800	1000	
Densidade Seca – kg/m ³	1200	1400	1600	400	600	800	1000	2350
Areia (kg) –	750	950	1100	–	210	400	560	1950
Cimento (kg) +/-	360	380	400	300	310	320	350	320
Água na Massa (L) =/-	140	150	160	110	110	120	120	180
Espuma (L) +/-	460	370	290	800	715	630	560	–
Água na Espuma (L) +/-	33	27	21	58	52	46	41	–
Densidade Úmida (kg/m ³)	1287	1510	1683	474	687	890	1075	2400
Resistência (N/mm ²)	6 – 8	10 – 8	16-18	~ 1	~ 2	~ 3	~ 4	> 25
Lambda Média (W/m.K)	0,405	0,45	0,55	0,096	1,18	0,21	0,32	2,1

Fonte: Ecopore (2023). Adaptado

Quanto à produção da espuma, o fabricante do aditivo IA (Tabela 6), orienta a diluição do produto na proporção de 1:20 (1 parte de aditivo para 20 partes de água), essa é a orientação para o uso no agitador mecânico. O presente trabalho não abordou detalhadamente o processo de produção da espuma, limitando-se ao

emprego da espuma pronta, adicionada no concreto base dosada em volume conforme manual do fabricante.

A relação água/cimento (a/c) sugerido pelo fabricante do aditivo espumígeno é a a/c de 0,45, porém em testes preliminares foi verificada dificuldades ao realizar a mistura da água junto aos demais componentes da argamassa usando a relação sugerida. Cabe ressaltar que a fabricante do aditivo espumígeno orienta que os parâmetros de desempenho dos traços sofrem variações de acordo com diversos fatores, incluindo a qualidade e o tipo de cimento (por exemplo, CP II, CP III, CP VI e CP V), o tipo de areia (seca, molhada, fina, etc.), os equipamentos empregados para a mistura e as condições do local da obra, assim como no concreto convencional, a resistência em diferentes densidades e a proporção da mistura também são influenciadas pelo teor de água final do traço (ECOPORE, 2023).

Sendo assim, a relação a/c nesse trabalho foi de 0,55 com uso de aditivo superplastificante na proporção de 1% da massa do cimento, dessa forma, a quantidade de água foi mantida constante para todos os demais traços.

Com base no exposto, a dosagem do concreto-base foi realizada considerando os parâmetros estabelecidos nos estudos de Mourão (2021), onde ele definiu a quantidade de cimento e areia para as argamassas, seguindo as especificações da NBR 7215 (ABNT, 2019). Quanto aos teores de substituição do cimento por cinzas, Mourão (2021) optou por taxas de substituição de 10% e 20% de CBCA-MR em relação ao cimento.

A dosagem da espuma foi determinada com base nas instruções fornecidas no manual do aditivo IA, que orienta sobre o volume de espuma, pré-formada, necessário para atingir a densidade seca de 1.200 kg/m³ no CCE. Dessa forma, o método de dosagem seguiu as proporções a seguir:

- (REF) – Traço Referência 0% CBCA;
- CBCA10% – Traço com 10% de CBCA;
- CBCA20% – Traço com 20% de CBCA;

A partir dessas proporções, foram determinados os pesos de cada material utilizados na composição dos traços, conforme ilustrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Dosagens dos traços.

TRAÇOS	CIMENTO (KG)	CINZA (KG)	AREIA (KG)	ÁGUA (KG)	SUPER PLASTIFICANTE (KG)	ESPUMA (L)
REF	7,3	0	20,1	4,00	0,073	9,00
CBCA10%	6,57	0,73	20,1	4,00	0,073	9,00
CBCA20%	5,84	1,46	20,1	4,00	0,073	9,00

Fonte: Autor 2023.

5.3 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

Com os traços definidos, seguiu-se para a preparo do CCE de acordo com a NBR 12655 (2022) “Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento”. Ao total foram moldados 33 CP's, 9 para cada traço e 3 para cada idade de rompimento (7, 21 e 28 dias). A Figura 8 mostra os materiais usados.

Figura 8 - Materiais para moldagem.



Fonte: Autor (2023)

A mistura dos componentes foi executada por um misturador manual específico para argamassas, como demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Misturador manual para argamassas.



Fonte: Autor (2023)

A decisão de optar pelo misturador manual de argamassas foi fundamentada em um teste preliminar que evidenciou a ineficácia da homogeneização ao utilizar uma betoneira de 120 litros. Neste contexto, a quantidade reduzida de materiais que compunham o traço revelou-se insuficiente para uma mistura eficiente na betoneira, levando à escolha do misturador manual para garantir a qualidade desejada.

A produção da espuma foi conduzida por meio de agitação mecânica, utilizando uma furadeira elétrica portátil equipada com uma haste metálica contendo hélices, Figura 10. A espuma atingiu o ponto desejado quando exibiu uma boa consistência e estabilidade.

Figura 10 - Agitador mecânico



Fonte: Autor, 2023.

5.3.1 Preparo do concreto

O preparo do concreto foi feito em uma ordem específica de mistura. A sequência definida foi a seguinte:

- ✓ Inicialmente, a água foi dividida, e aproximadamente 75% do seu volume foi adicionado ao recipiente de mistura.
- ✓ Em seguida, a composição pré-homogeneizada dos componentes cimento e cinza foram lançados no recipiente que estava com a água,

- ✓ A areia foi introduzida gradualmente, se juntando aos demais materiais no recipiente de mistura.
- ✓ A argamassa foi então misturada mecanicamente por 2 minutos.
- ✓ Após esse período, foi adicionado o restante da água contendo o aditivo superplastificante que já estava diluído, seguido de mais 2 minutos mistura ou até alcançar uma consistência homogênea, sem a presença de grumos secos.
- ✓ Por fim, com a espuma pré-formada, produzida por um agitador mecânico (Figuras 11), foi adicionada por último à argamassa previamente preparada.
- ✓ Em seguida, a mistura mecânica da espuma com a argamassa foi realizada por mais 2 minutos, garantindo uma integração adequada dos componentes.

Figura 11 - Mistura mecânica da espuma com a argamassa.



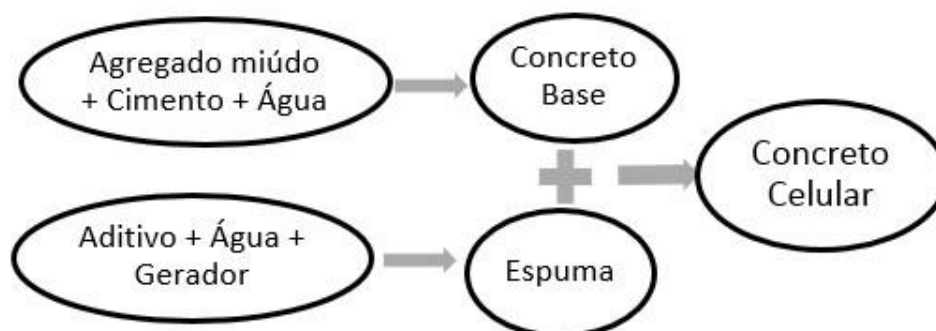
Fonte: Autor, 2023.

Com o concreto pronto uma amostra da mistura foi pesada para análise do seu peso específico, meta desejada de aproximadamente 1200 kg/m^3 densidade no estado fresco. Em seguida foi realizada a moldagem dos corpos de prova usando moldes

cilíndricos de 10x20 cm. Antes de colocar o concreto nos moldes, eles foram previamente revestidos internamente com uma camada fina de solução desmoldante que não reage com o cimento. Os moldes foram preenchidos com duas camadas aproximadamente iguais conforme recomendado pela norma NBR 5738 (2015). De acordo com as diretrizes da mesma norma, é permitida a adaptação do procedimento de adensamento para concretos especiais. Nesse caso, optou-se por aplicar leves golpes na face externa do molde utilizando uma colher de pedreiro como método de adensamento.

Para maior clareza, o processo de mistura, dos concretos celulares com espuma pré-formada, seguiu as orientações dos estudos conduzidos por Silva (2015) usando o processo de mistura do método CESP: Produção de “concreto celular com aditivo espumígeno, cuja espuma é pré-formada, sem agregados graúdos”)

Figura 12 - Processo de mistura - método CESP.



Fonte: Silva (2015).

Após o processo de moldagem os moldes preenchidos foram deixados para cura em uma superfície de apoio plana livre de vibrações e perturbações para não afetar a forma e as propriedades do concreto durante o início de pega NBR 5738 (ABNT 2015). Figura 13.

Figura 13 - Moldes preenchidos



Fonte: Autor, 2023.

5.3.2 Procedimento de cura

Para o procedimento de cura, a norma NBR 5738 (2015), define que os corpos de prova produzidos com concreto leve devem ser retirados do tanque de cura após sete dias, (Figuras 14), e mantidos em condições específicas de temperatura, a $23 \pm 2^\circ\text{C}$, juntamente com uma umidade relativa de $50 \pm 15\%$, até o momento dos ensaios.

Figura 14 - Corpos de prova após 7 dias no tanque.



Fonte: Autor, 2023.

Desta forma, os corpos de prova foram retirados do tanque de cura úmida, após o período determinado na norma, a seguir foram conservados em um recipiente capaz de manter a umidade relativa, conforme especificado pela na norma, até o momento do ensaio.

5.4 Ensaio de resistência a compressão de corpos de prova

Antes de realizar o ensaio de compressão, as bases dos corpos de prova foram preparadas de acordo com as diretrizes da NBR 5738 (ABNT 2015) para garantir a planicidade e perpendicularidade em relação ao eixo longitudinal do corpo de prova. Esse processo foi feito por retificação, que consiste na remoção controlada de uma camada fina de material das bases dos CP's. A retificação foi realizada por meios mecânicos utilizando uma máquina retificadora de corpos de prova de concreto, construída especialmente para essa finalidade, Figuras 15.

Figura 15 - Retífica de corpos de prova de concreto.



Fonte: Autor, 2023.

O ensaio para determinação da resistência à compressão axial seguiu a norma da NBR 5739 (ABNT 2018). Para a aplicação das cargas durante os ensaios, utilizou-se uma Máquina Universal de Ensaio da marca EMIC (Figura 16), modelo DL 30.000, classe 1, equipada com células de carga de capacidade de 300 kN e medição de força digital por meio do software TESCH.

Figura 16 - Máquina Universal de Ensaios.



Fonte: Autor (2023).

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em três idades distintas: 7, 21 e 28 dias. Antes de cada ensaio, as superfícies do corpo de prova e os pratos da máquina de ensaio foram devidamente limpos e secos para garantir a ausência de sujeira e partículas. O corpo de prova foi posicionado no prato inferior da prensa, centralizado na mesma direção em que foi moldado, de forma a alinhar seu eixo com o da prensa. O carregamento do ensaio foi aplicado de maneira contínua e sem

impactos, com uma velocidade controlada de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. O ensaio foi encerrado quando ocorreu a ruptura do corpo de prova, registrando a força máxima atingida em KiloNewtons e a resistência à compressão axial em MegaPascal (MPa) conforme NBR 5739 (ABNT, 2018).

5.5 Ensaio de absorção de água por imersão

Os ensaios de massa específica e determinação da absorção de água foram realizados aos 21 dias, com 2 CPs de cada traço totalizando 6 corpos de prova de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2005). A execução do ensaio seguiu com a determinação da massa no estado seco onde a amostra foi colocada em uma estufa e mantida à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 72 horas, Figuras 17 (a). Nesse momento, registra-se a massa seca da amostra.

A determinação da massa na condição saturada e imersa em água começa com a amostra submersa em água à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, mantida nessa condição por 72 horas. Em seguida, a amostra é colocada em um recipiente cheio de água e levada gradualmente à ebulição. A amostra deve ficar e ebulição por 5 horas, com o volume da água mantido aproximadamente constante NBR 9778 (ABNT, 2005). Devido à falta de equipamentos específicos no local, não foi possível manter as amostras em ebulição. A massa da amostra imersa é determinada com o auxílio de uma balança hidrostática conforme Figuras 17 (b). Em seguida, registra-se a massa da amostra na condição saturada, também com o auxílio da mesma balança. Após a conclusão do ensaio, são realizados cálculos para determinar a absorção, o índice de vazios e a massa específica de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2005).

Figura 17 - Amostra na estufa (a), Imersão na balança hidrostática (b).



Fonte: Autor, 2023.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Resistência à compressão axial

A Tabela 8 apresenta detalhadamente os resultados obtidos nos traços CBCA10% e CBCA20% nos ensaios de compressão axial, incluindo o percentual em relação ao traço REF para cada idade. Esses valores foram obtidos através da média de três corpos de prova para cada traço.

Tabela 8 - Resistências médias de compressão axial.

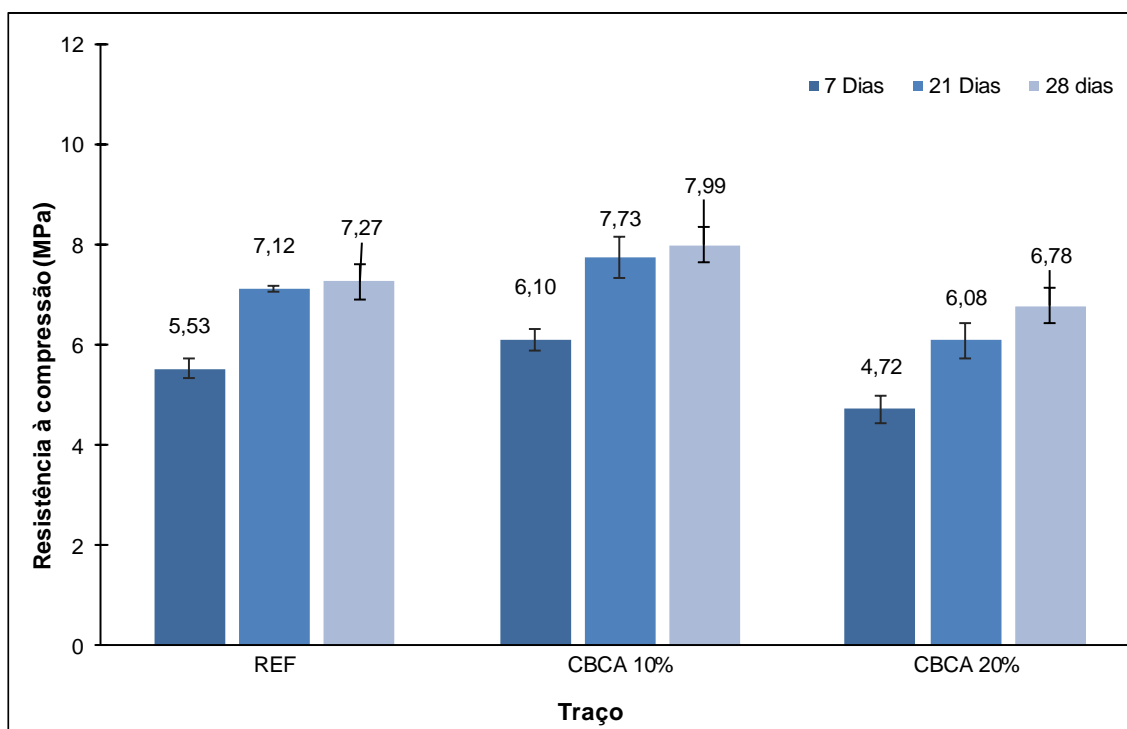
Dosagem	Idade (dias)	Resistência à compressão (Mpa)			Média	Desvio padrão (MPa)	Percentual em relação a REF
		CP 1	CP 2	CP 3			
REF	7	5,31	5,72	5,55	5,53	0,206	100%
	21	7,17	7,06	7,14	7,12	0,057	100%
	28	7,03	7,11	7,68	7,27	0,354	100%
CBCA 10%	7	6,27	5,85	6,19	6,10	0,223	110,43%
	21	8,03	7,91	7,26	7,73	0,414	108,56%
	28	7,69	7,67	8,62	7,99	0,543	109,89%
CBCA 20%	7	4,99	4,44	4,74	4,72	0,275	85,46%
	21	6,09	5,71	6,45	6,08	0,370	85,40%
	28	6,87	6,63	6,85	6,78	0,133	93,26%

Fonte: Autor, 2023.

A NBR 17071 (ABNT, 2022) especifica os requisitos para resistência à compressão do concreto celular estrutural: “A resistência característica a compressão do concreto celular estrutural (f_{ck}) deve ser especificada em função dos esforços a que as paredes estão submetidas, não podendo ser adotado valor de f_{ck} inferior a 5 Mpa. ” (ABNT, 2022, p. 16).

A Figura 18, apresenta graficamente os valores da resistência à compressão axial aos 7, 21 e 28 dias.

Figura 18 - Valores da resistência à compressão axial.



Fonte: Autor, 2023.

Para a idade de 7 dias nota – se que a dosagem CBCA10% demonstrou uma resistência à compressão 10,43% superior à REF, enquanto a dosagem CBCA20% apresentou um resultado inferior a REF (-14,54%). A diminuição mais expressiva da resistência no traço com 20% de CBCA para o período de 7 dias foi também observada por Mourão (2021), indicando uma cinética de hidratação e ganho de resistência mais lentos em comparação com argamassas contendo 100% de cimento Portland. Isso pode ser coerente ao considerar que o traço com CBCA20% possui o dobro do teor de cinzas em comparação com o traço de CBCA10%, que, por sua vez, alcançou resultados significativamente superior a REF.

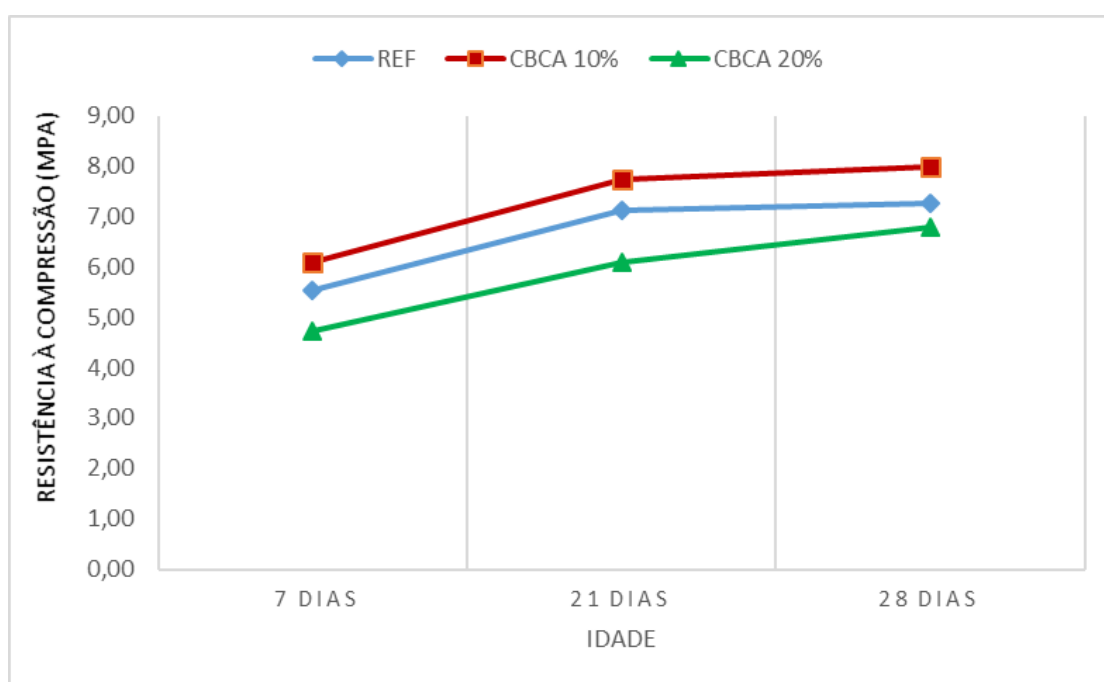
Em relação à resistência à compressão aos 21 dias, observou-se um avanço no ganho de resistências em comparação a amostra REF de mesma idade. Contudo, os traços de CBCA10% e CBCA20% apresentaram percentuais de, respectivamente, 8,56% e -14,59%. Esses resultados demonstram uma coerência razoável com relação aos percentuais verificados na idade anterior.

Os resultados dos traços aos 28 dias de idade demonstram ganhos satisfatórios de resistência. No caso do traço CBCA10%, a margem percentual de ganho se

manteve positivamente consistente em relação às idades anteriores. Por outro lado, destaca-se que o traço CBCA20% apresentou uma evolução significativamente maior no percentual de ganho de resistência, reduzindo as margens percentuais observadas anteriormente.

A Figura 19, apresenta graficamente a evolução dos ganhos de resistência com base nos valores médios obtidos nos ensaios de compressão dos 3 traços para cada idade aos 7, 21 e 28 dias.

Figura 19 - Evolução dos ganhos de resistência.



Fonte: Autor, 2023.

Observa-se que ambos os traços, com a substituição de cimento por CBCA, apresentaram ganhos de resistência à compressão em todas as idades em comparação com a amostra REF. Entretanto, na Figura 19, observou-se que a amostra do traço CBCA20% apresentou um aumento contínuo na linha do gráfico de resistência, demonstrando tendência de ganhos mais expressivo a longo prazo. A evolução da resistência no intervalo de 7 para 28 dias foi de, respectivamente, 4,72 MPa e 6,78 MPa, representando um ganho percentual de resistência entre essas idades de 43,61%, para a amostra do traço CBCA20% conforme demonstrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Resistência a compressão no intervalo de 7 a 28 dias.

TRAÇOS	MÉDIA DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO (MPA)		GANHO PERCENTUAL DE RESISTÊNCIA ENTRE 2 IDADES
	7 Dias	28 Dias	
REF	5,53	7,27	31,60%
CBCA 10%	6,10	7,99	30,97%
CBCA 20%	4,72	6,78	43,61%

Fonte: Autor, 2023.

Diante dos resultados, é notório que entre os traços com substituição de cinza, a dosagem com 10% de CBCA (CBCA10%) demonstrou os melhores resultados de resistência à compressão para todas as idades em comparação com a REF. Esta observação também foi indicada por Mourão (2021), que sugere que, do ponto de vista da resistência à compressão, o percentual mais adequado para a substituição parcial do cimento pela CBCA é de 10%.

Outro aspecto a ser observado após o ensaio de compressão é o tipo de ruptura do corpo de prova (FONSECA et al. 2019). Na maioria das amostras, observou-se uma fratura de Tipo C – Coluna com formação de cones, conforme especificado pela NBR 5739 (ABNT 2018), Figura 20. Nesse tipo de ruptura o cisalhamento ocorre em planos verticais e inclinados em relação à direção da força cortante, explicando por que a linha de fratura atravessa diagonalmente o corpo de prova NBR 5739 (ABNT 2018). Segundo a mesma norma um ensaio que resulta nesse tipo de ruptura pode ser considerado normal e aceitável.

Figura 20 - Tipo de ruptura do corpo de prova.

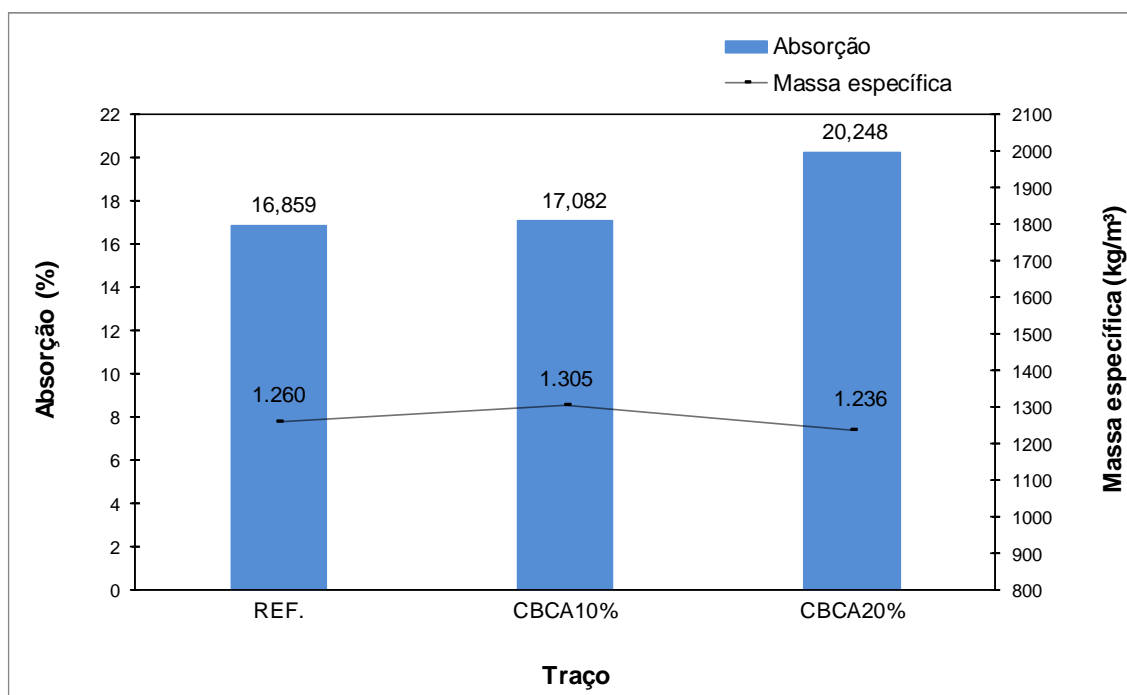


Fonte: Autor, 2023.

6.2 Análise do ensaio de absorção

Conforme o gráfico da Figura 21, constata-se que os traços com substituição registraram médias de índice de absorção de água mais elevadas à medida que o teor de adição de cinza foi aumentado nos traços. O traço CBCA10% teve elevação percentual de 1,32% em relação a REF. Destaque para CBCA20% que apresentou elevação de 20,10% se comparado a REF. Além disso, a massa específica demonstrou ganhos percentuais de 3,57% para o traço CBCA10%, enquanto para o CBCA20% ocorreu diminuição de 7,33% referente ao traço REF.

Figura 21 - Absorção de água.



Fonte: Autor, 2023.

Estudos conduzidos por Mourão (2021), foi notada que a incorporação da CBCA em ambos os traços resultou no aumento do índice de absorção nas argamassas. Paula et al. (2009) constataram que a introdução de CBCA moída e requemada resultou no aumento do índice de absorção das argamassas. Mourão (2021) completa sua análise concluindo que o aumento do índice de absorção de água nas amostras com CBCA pode ter sido motivado pelo diâmetro médio das cinzas que se mostrou superior ao tipo de cimento Portland utilizado.

Contudo, é fundamental considerar que os concretos celulares possuem uma elevada porosidade em sua pasta de cimento (SILVA, 2015). A introdução de CBCA em porcentagens mais elevadas pode proporcionar a formação de um CCE com porosidade mais significativa, facilitando a permeabilidade à água.

6.3 Teor de ar incorporado

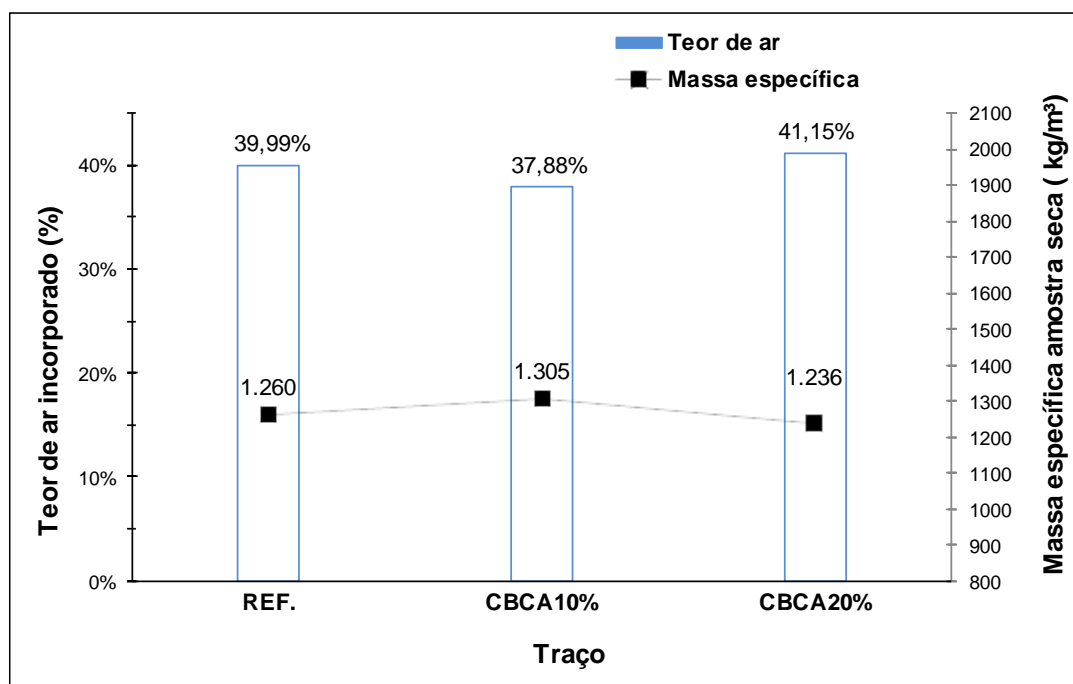
Outro fator essencial a ser analisado quando se fala em concreto celular é a massa específica da mistura em estado fresco e o teor de ar incorporado de acordo com Fonseca et al. (2019). Em seus estudos os autores adotaram a massa específica de

2,1 g/cm³, usual para argamassas convencionais, como ponto de referência para comparar com a massa específica do concreto celular espumoso.

A NBR 17071 (ABNT, 2022) especifica a massa aparente no estado endurecido para o concreto celular estrutural, contudo também define parâmetros para o teor de ar incorporado: “A densidade de massa aparente no estado endurecido do concreto celular estrutural deve estar entre 1.400 kg/m³ e 2.000 kg/m³ e o teor de ar incorporado deve ser menor ou igual a 37%.” (ABNT, 2022, p. 10).

Como destacado no referencial teórico, Fonseca et al. (2019) destaca como uma das principais características do concreto celular é que, à medida que o teor de ar incorporado aumenta, sua massa específica diminui, essa relação pode ser observada no presente estudo, conforme Figuras 22. Nota-se que, nas amostras com CBCA os teores de incorporação de ar tiveram uma variação nos seus percentuais. Uma explicação possível para essa variação é a característica de elevada porosidade presente em concretos celulares, conforme analisado na seção 6.2 deste estudo.

Figura 22 - Absorção de água.



Fonte: Autor, 2023.

Os resultados das análises da densidade da massa especificamente no estado seco não atenderam aos requisitos mínimos estipulados pela NBR 17071 (ABNT 2022) em que é especificado uma densidade de massa aparente no estado seco para o concreto celular estrutural entre 1.400 kg/m³ e 2.000 kg/m³, incluindo o percentual mínimo do teor de ar incorporado que deve ser menor ou igual a 37%, que também ficou, minimamente, aquém do previsto. No entanto, é relevante ressaltar que, mesmo diante dessas inconsistências normativas, o objetivo central deste estudo foi alcançado. A massa aparentemente no estado seco alcançou com sucesso a meta proposta de 1.200 kg/m³.

Sobre a massa aparente no estado fresco, os resultados dos traços ficaram dentro da margem de referência especificado no referencial teórico desse estudo, Tabela 10.

Tabela 10 - Massa aparente no estado fresco.

DENSIDADE DA MASSA APARENTE NO ESTADO FRESCO (<i>pf</i>)			
TRAÇO	REF	CBCA10%	CBCA20%
(<i>pf</i>) kg/m ³	1.538	1.464	1.540

Fonte: Autor, 2023.

Silva (2015), ao referenciar a NBR 12646 (ABNT 1992), ressaltou que o concreto celular é concretizado por meio da inclusão de bolhas de ar na argamassa. Essas bolhas apresentam características milimétricas, homogêneas, distribuídas de forma uniforme, estáveis, incomunicáveis e preservam sua forma original ao final do processo. De acordo com os padrões, a densidade da massa aparente no estado fresco desse concreto deve situar-se entre 1300 kg/m³ e 1900 kg/m³. Desta forma o presente estudo apresentou uma densidade no estado fresco compreendida dentro dos padrões referenciados.

7 CONCLUSÕES

A introdução das cinzas provenientes do bagaço da cana-de-açúcar, um subproduto da produção de cachaça artesanal (CBCA), melhorou o desempenho da resistência à compressão do concreto espumoso celular (CCE) em todas as formulações comprovadas, alcançando resistências superiores aos 5 MPa estabelecidas pela norma ABNT vigente.

Nas análises realizadas ficou evidente que os CCE com a adição de CBCA apresentaram um notável ganho de resistência ao longo do tempo. Entre as diferentes dosagens com CBCA, aquela com 10% de adição de cinza (CBCA10%) destacou-se pelo melhor desempenho mecânico, registrando valores de resistência a compressão superiores ao traço de referência (REF) em todas as idades testadas (7, 21 e 28 dias). Embora a dosagem com 20% de cinza (CBCA20%) tenha apresentado a melhor evolução nos ganhos de resistência, ainda assim foi inferior à REF em todas as idades de teste.

Em relação a absorção de água, os traços com CBCA revelaram médias de índice de absorção de água mais elevadas à medida que o teor de cinza aumentou nas dosagens. O traço CBCA20% registrou um aumento significativo de 20,10% em comparação com o REF, enquanto o CBCA10% registrou uma absorção de apenas 1,32%. Em relação à massa específica, o traço CBCA10% teve um leve ganho percentual, ao passo que o CBCA20% apresentou uma diminuição de 7,33% em relação a massa específica do traço REF.

Durante a elaboração das misturas para produção do CCE, foi evidente que a geração de espuma por meio da ação mecânica do misturador, juntamente com a diluição do agente espumígeno em água, resultou em uma espuma pré-formada estável. A qualidade desta espuma foi prontamente perceptível quando introduzida na pasta da argamassa. A quantidade de espuma incorporada à mistura atendeu às orientações do fabricante, comprovando positivamente no desempenho do processo.

De acordo com os resultados do presente estudo, foi possível confirmar que a incorporação das cinzas provenientes do bagaço da cana-de-açúcar da produção de cachaça artesanal (CBCA) em substituições parciais ao cimento Portland na

fabricação do concreto celular espumoso (CCE) atendeu, de maneira geral, aos objetivos propostos.

Os experimentos práticos confirmaram os efeitos positivos da substituição parcial do cimento por CBCA na produção de concreto celular espumoso. Essa abordagem não só oferece uma destinação mais sustentável para um resíduo industrial, mas se alinha também com as crescentes preocupações com a sustentabilidade ambiental. A reutilização desse resíduo contribui para a redução do consumo de cimento Portland, auxiliando na diminuição da pegada de carbono da indústria do cimento. Esses benefícios não se limitam ao aspecto ecológico, mas se estendem aos âmbitos social e econômico da indústria da construção civil.

8 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação das propriedades mecânicas como: resistência à tração e módulo de elasticidade, dos traços de CCE com CBCA;
- Estudo do comportamento dos traços com CBCA para idades superiores a 28 dias;
- Obter concretos celulares com agregado graúdo leve;
- Obter concretos celulares com agregados leves recicláveis;
- Obter concretos celulares com incorporação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em substituição ao agregado miúdo;
- Obter concretos celulares com agregados leves recicláveis; Obter bloco de concreto celular espumoso com cinzas Refazer os traços apresentados com variação na adição de superplastificante;
- Produzir concretos celulares com densidades de massa aparente nos intervalos de 800 à 1400 kg/m³, variando as proporções de água/cimento e o consumo de cimento;

9 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**. Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

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

_____. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland. Rio de Janeiro.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 8953**: Concretos para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 12644**: Concreto leve celular estrutural — Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 12646**: Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local. Rio de Janeiro, 1992.

____. **NBR 12821**: Preparação de concreto em laboratório — Procedimento. Rio de Janeiro, 2009.

____. **NBR 13438**: Blocos de concreto celular autoclavado — Requisitos. Rio de Janeiro, 2021.

____. **NBR 13440**: Blocos de concreto celular autoclavado — Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

____. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

____. **NBR 16606**: Cimento Portland – determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

____. **NBR 16697**: Cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

____. **NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

____. **NBR 17071**: Parede de concreto celular estrutural moldada no local para a construção de edificações - Projeto, execução e controle - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2022.

CBIC - Câmara Brasileira da Indústria da Construção - **Indústria da construção prevê crescimento de 2,5% em 2023**. Disponível em: <<https://cbic.org.br/industria-da-construcao-preve-crescimento-de-25-em-2023/#:~:text=A%20ind%C3%BAstria%20da%20constru%C3%A7%C3%A3o%20pre v%C3%AA,e%20a%20demanda%20habitacional%20s%C3%B3lida>>. Acesso em 22 setembro 2023

BEGA, Rodrigo Merighi. **Aplicação de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em latossolo cultivado com cana-de-açúcar**. 2014.

BEZERRA, A. C. DA S. et al. **Effect of partial replacement with thermally processed sugar cane bagasse on the properties of mortars.** Revista Materia, v. 22, n. 1, 2017.

BORLINI, M. C.; MENDONÇA, J. L. C. C.; VIEIRA, C. L. F.; MONTEIRO, S.N. **Influência da temperatura de sinterização nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de cerâmica vermelha incorporada com cinza de bagaço de cana de açúcar.** Revista Matéria, v. 11, n. 4, p. 435-443, 2006.

CHANDRA, Satish; BERNTSSON, Leif. **Concreto agregado leve** . Elsevier, 2002.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento - **Boletim Da Safra De Cana - De – Açúcar.** Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>> Acesso em 22 setembro 2023.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto.** Ambiente Construído, v.9, n.4, p.99-107, 2009.

CORTELASSI, E. M. **Desenvolvimento e avaliação de concretos celulares espumosos de alto desempenho.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) –Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2005

DI PAULA, M. O., TINÔCO, I. F. F., RODRIGUES, C. S., SILVA E. N.; SOUZA, C. F. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, n.3, p.353–357, 2009.

DO PRADO BRUNELLI, Ângela Maria Macuco. V-Pisani-Brasil-1 **Proposta de Disposição de Resíduo Gerado a partir da Queima do Bagaço de Cana em Caldeiras como Fonte de Nutriente e Corretivo do Solo.**

DUBAJ, E. **Estudo comparativo entre traços de argamassa utilizadas em Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

ECOPORE. ECOFOAM – **Aditivo Espumante para Concreto Celular**. Disponível em: <https://www.ecopore.com.br/produtos/ecofoam_aditivo-espumante-para-concreto-celular/>. Acesso em: 30 de agosto de 2023.

ECOPORE - **Fazendo Concreto Celular Espumoso**. Disponível em: <<https://www.ecopore.com.br/fazendo-concreto-celular-espumoso/>>. Acesso em 25 de setembro de 2023.

ECOPORE - **Bem-vindo ao Website da ECOPORE**. Disponível em:

< <https://www.ecopore.com.br/>> Acesso em 25 de setembro de 2023.

EXAME Agro - **Cana-de-açúcar: produção 2022/2023 cresce 5,4%, aponta Conab**. Disponível em: <<https://exame.com/agro/cana-de-acucar-producao-22-23-cresce-54-aponta-conab/>>. Acesso em 23 setembro 2023.

FERREIRA, O. A. R. **Concretos leves: concreto celular espumoso**. 1986. Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo, São Paulo. 1986.

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

FONSECA, Érica Cantão da; ALMEIDA, Fabiane Gonçalves; SANTOS, Ricardo Ramalho dos; OLIVEIRA, Taynara Borges de. **Estudo de dosagem e avaliação de concreto celular espumoso com adição de cal e cinzas da biomassa de eucalipto para fins de alvenaria estrutural**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Teófilo Otoni - MG, 2019. Disponível em: <<http://site.ufvjm.edu.br/icet/files/2019/05/ESTUDO-DE-DOSAGEM-E-AVALIA%C3%87%C3%83O-DE-CONCRETO-CELULAR-ESPUMOS-COM-ADI%C3%87%C3%83O-DE-CAL-E-CINZAS-DA-BIOMASSA-DE-EUCALIPTO-PARA-FINS-DE-ALVENARIA-ESTRUTURAL.pdf>> Acesso em 21 de agosto de 2023.

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

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: PINI, 2009. 165p.

IBRAC. **Instituto Brasileiro da Cachaça. Mercado Interno**. Disponível em: <<https://ibrac.net/servicos/mercado-interno>> Acesso em 23 setembro de 2023.

IOANNOU, Ioannis; HAMILTON, Andréa; HALL, Cristóvão. **Absorção capilar de água e n-decano por concreto aerado autoclavado**. Pesquisa em Cimento e Concreto , v. 38, n. 6, pág. 766-771, 2008.

KIHARA, Y. **O estudo mineralógico das cinzas volantes brasileiras: origem, características e qualidade**. São Paulo, 1983. 223 p.

LAWRENCE, K; LORDSLEEM JUNIOR, A. C.; BARROS, M. M. B. **A influência do teor de fibras e de cimento nas características do concreto celular espumoso para emprego em vedações verticais de edifícios**. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO TECNOLOGIA E GESTÃO NA PRODUÇÃO DE EDIFÍCIOS: SOLUÇÕES PARA O TERCEIRO MILÊNIO, 1998, São Paulo. Anais... São Paulo: USP, 1998. p. 143-150.

LEVY, Salomon Mony. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. São Paulo, v. 199, 2001.

LIMA NETO, AP; PAIVA, OA; PINHEIRO, SC **Concretos Celulares Produzidos com Aditivos Espumantes Comerciais e Alternativos: Uma Análise no Estado Fresco e Endurecido**. Revista FT , edição 114, setembro de 2022. DOI: 10.5281/zenodo.7046816.

LIMA, Sofia Araújo et al. **Análise de argamassas confeccionadas com a cinza do bagaço da cana de açúcar em substituição ao agregado miúdo**. Revista Tecnológica, Edição Especial ENTECA, v. 2009, p. 87-97, 2009.

LOPES, Diego Furtado. **Créditos de Carbono na indústria do cimento**. 2011.

MAYCÁ, J.; CREMONINI, R. A.; RECENA, F. A. **Contribuição ao estudo da argila expandida nacional como alternativa de agregado gráudo para concretos leves estruturais (CLE)**. 2008. Curso de Especialização em Construção Civil (Especialização em Construção Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação, Porto Alegre, 2008.

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.

MOURÃO, André Barroso. **Efeitos das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar da produção de cachaça artesanal em substituição parcial ao cimento nas propriedades das argamassas cimentícias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. CEFETMG. Belo Horizonte, 2021.

NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K. **Microstructural investigations on aerated concrete**. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 3, p. 457-464, 1999. ISSN 0008-8846.

NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K. **Structure and properties of aerated concrete: a review**. *Cement and Concrete Composites*, v. 22, n. 5, p. 321-329, 2000. ISSN 0008-8846.

PAYÁ, J. et al. **Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production**. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, v. 77, n. 3, p. 321–325, mar. 2002.

PAULA, M. O. et al. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.3, p.353–357, 2009.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 5. ed. São Paulo: GLOBO, 1982.

PROBLOC. **Concreto Celular - Vantagens**. Disponível em: <<https://www.probloc.com.br/vantagens>>. Acesso em: 12 out. 2023.

Relatório anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC 2019. São Paulo: SNIC, 2019. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf>. Acesso em 23 de setembro de 2023.

Relatório anual - **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (2019)**. Disponível em: <<http://snic.org.br/noticias-ver.php?id=28>>. Acesso em 23 de setembro de 2023.

Resíduos da produção de cana-de-açúcar - Prof Luciane Kawa, 2015 - Disponível em: <<https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/sucroenergetico/156845-residuos-da-producao-de-cana-de-acucar.html>>. Acesso em 23 setembro 2023.

ROSSETTO, R. **A cultura da cana, da degradação à conservação. Visão agrícola**, v. 1, n. 1, p. 80-85, 2004.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações: concreto estrutural leve**. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2.

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

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry**. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 2–26, dez. 2018.

SILVA, C. A. O. **Estudo de dosagem e avaliação de concreto celular com fins estruturais**. 137 f. : il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2015.

SILVA, Vinícius Alberto da; RIBEIRO, Ana Cristina Junqueira. **PAREDES DE CONCRETO MOLDADAS IN LOCO: CONCRETO CELULAR X CONCRETO AUTO ADENSÁVEL**. 2019.

TEIXEIRA FILHO, F. J.; TEZUKA, Y. **Boletim técnico: considerações sobre algumas propriedades dos concretos celulares espumosos**. São Paulo: EPUSP, 1992.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. São Paulo: IBRACON. 2011.

VIVA DECORA. **O que é concreto celular? Onde Usar, Preço +6 Vantagens Importantes**. Disponível em: <<https://www.vivadecora.com.br/pro/concreto-celular/>>. Acesso em 12 de outubro de 2023.

ZARDO, A. M.; BEZERRA, E. M.; MARTELLO, L. S.; SAVASTANO JUNIOR, H. **Utilização da cinza de bagaço cana-de-açúcar como filler em compostos de fibrocimento**. In: Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável, 1 e Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 10, São Paulo, SP, 2004. Anais. Porto Alegre, 2004. v. 1, p. 1-13.