INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ADITIVO INCORPORADOR DE AR PARA CONCRETO CELULAR: FORMULAÇÃO E INFLUÊNCIA NO PRODUTO FINAL

ALINE ALVES MILHOMEM DA SILVA

Orientador: Prof. Dr. GILVAN MOREIRA DA PAZ

TERESINA

2023

ALINE ALVES MILHOMEM DA SILVA

ADITIVO INCORPORADOR DE AR PARA CONCRETO CELULAR: FORMULAÇÃO E INFLUÊNCIA NO PRODUTO FINAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Síntese e Caracterização de Materiais

Orientador: Prof. Dr. GILVAN MOREIRA DA PAZ

TERESINA

2023

– **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**

Silva, Aline Alves Milhomem da

S586a Aditivo incorporador de ar para concreto celular: formulação e influência noproduto final / Aline Alves Milhomem da Silva. - 2023.

66 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal deEducação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2023.

Orientador: Prof Dr. Gilvan Moreira da Paz.

1. Concreto celular. 2. Aditivo espumígeno. 3. Concreto leve. I.Título.

CDD - 620.1

– **Elaborado por Maria Rosismar Farias CRB 3/631**

.

ALINE ALVES MILHOMEM DA SILVA

ADITIVO INCORPORADOR DE AR PARA CONCRETO CELULAR: FORMULAÇÃO E INFLUÊNCIA NO PRODUTO FINAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 09/11/2023.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Gilvan Moreira da Paz (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

_____

Prof. Dr. Kelson Silva de Almeida
Instituto Federal do Piauí (IFPI)
Campus Floriano

_____

Prof. Wiury Chaves de Abreu
Instituto Federal do Maranhão (IFMA)
Campus Buriticupu

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus, que me deu forças quando mais precisava nos momentos difíceis todas as vezes que quis desistir. Agradeço a minha família em especial a minha mãe que é minha inspiração de força diária. Aos meus amigos que nunca me deixaram desamparada, em especial a companheira de caminhada Aline Sousa que esteve comigo em todos os momentos até aqui. Agradeço ao meu orientador Gilvan, pois sem ele eu não teria conseguido. Agradeço ao grupo Kalfix® pelo apoio e incentivo financeiro ao trabalho, em especial ao químico responsável Tarcísio Felipe e a Química Gizele Saraiva, que contribuíram imensamente para minha formação.

RESUMO

Alternativas mais viáveis de tecnologia de concreto estão cada dia mais sendo debatidas no meio acadêmico, principalmente para atender às demandas atuais da indústria de viabilidade econômica e logística nas obras. O concreto celular surge como uma dessas tecnologias e com ele, surge também o desenvolvimento de aditivos e agregados. Este trabalho se concentra na investigação da formulação de um aditivo incorporador de ar e sua influência no produto final, o concreto celular. O aditivo é obtido em forma de espuma, dando ao concreto o nome de concreto celular espumoso (CCE). O peróxido de hidrogênio (H_2O_2) atuando como agente aerador em meio alcalino, foi combinado com um surfactante aniônico, cimento e areia em diferentes proporções afim de obter-se uma fórmula estável. São apresentadas as etapas progressivas do processo de produção e as características funcionais dos materiais foram estudadas e comparadas com as estabelecidas pelas normas brasileiras vigentes (conforme ABNT) e a literatura. Um novo CCE foi desenvolvido e estudado a partir de análises físico-químicas e mecânicas. Obteve-se ao final do estudo, um CCE com densidade aparente de 43 kg/m^3 e 14,74 Mpa de resistência. Na fabricação utilizou-se também um aditivo superplastificante a base de policarboxilato onde além de ter atuado como fonte redutora de água no traço (cerca de 9%), o aditivo ajudou a elevar a resistência do concreto celular em 10,8% em relação ao concreto sem o aditivo.

Palavras-chave: concreto celular; aditivo espumígeno; concreto leve.

ABSTRACT

More viable alternatives for concrete technology are being increasingly debated in the academic field, especially to meet the current research needs of the economically feasible and logistically viable construction industry. Cellular concrete emerges as one of these technologies, accompanied by the development of additives and aggregates. This work focuses on investigating the formulation of an air-entraining additive and its influence on the final product, cellular concrete. The additive is introduced in the form of foam, giving the concrete the name of foamed cellular concrete (FCC). Hydrogen peroxide (H_2O_2) as an aerating agent in an alkaline medium was combined with an anionic surfactant, cement, and sand in different proportions to achieve a stable formula. The progressive steps of the production process are presented, and the functional characteristics of the materials were studied and compared with the standards established by the current Brazilian regulations (according to ABNT) and the literature. A new FCC was developed and studied through physical-chemical and mechanical analyses. At the end of the study, a FCC with an apparent density of 43 kg/m3 and a compressive strength of 14.74 MPa was obtained. In the manufacturing process, a superplasticizer additive based on polycarboxylate was also used, which not only acted as a water-reducing agent in the mix (reducing water content by approximately 9%) but also helped increase the cellular concrete's strength by 10.8% compared to concrete without the additive.

Key-words: cellular concrete; foam additive; lightweight concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Tipos de concreto leve.....18
Figura 2- Molécula de um aditivo incorporador de ar 24
Figura 3- Organograma de análise 27
Figura 4- Série de peneiras utilizadas na granulometria 29
Figura 5- Ensaio de massa unitária da areia 29
Figura 6- Ensaio de massa específica da areia 30
Figura 7- Corpos de prova moldados com a E1 nas relações 1/30, 1/40 e 1/50 34
Figura 8a- Pistola jato de espuma 34
Figura 8b- Compressor..... 34
Figura 8c- Espuma pré-formada 34
Figura 9- Espuma adicionada ao concreto base 36
Figura 10a- Cura úmida 37
Figura 10b- Cura seca 37
Figura 11- Slump Test 39
Figura 12- Medidor de ar do tipo pressométrico 39
Figura 13- Ensaio de resistência à compressão..... 41
Figura 14- Espectrômetro de Fluorescência de raios x (FRX) 42
Figura 15- Gráfico das densidades das espumas *versus* resistência a compressão 46
Figura 16. Gráfico das densidades das espumas *versus* resistência a compressão 49
Figura 17- Gráfico do concreto com e sem aditivo 51
Figura 18a- Traço 1 55
Figura 18b- Traço 2 55
Figura 18c- Traço 3 55
Figura 18d. Traço 4 55
Figura 19- Gráfico dos resultados do ensaio de absorção de água 56
Figura 20- Resultados do ensaio do teor de ar 58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais agentes de aeração química 20
Tabela 2- Propriedades físico-químicas cimento CPV ARI 28
Tabela 3- Propriedades físico-químicas do H_2O_2 31
Tabela 4- Propriedades físico-químicas do KOH 31
Tabela 5- Características físico-químicas e dosagem recomendada do aditivo 32
Tabela 6- Formulações testadas 33
Tabela 7- Quantidades de material na composição das espumas E1, E2 e E3..... 33
Tabela 8- Concentração dos principais óxidos cimento APODI CPV ARI 43
Tabela 9- Resultados da análise granulométrica 44
Tabela 10- Análise de variância para resistência à compressão após 28 dias de cura 47
Tabela 11- Relação resistência, massa específica aparente e massa específica seca do concreto moldado com a espuma em proporções distintas 48
Tabela 12- Relação resistência, massa específica aparente e massa específica seca do concreto moldado com as espumas E1, E2 e E3 50
Tabela 13- Dosagens: análise da eficiência do superplastificante 51
Tabela 14- Classes, resistência à compressão e densidade de massa aparente seca 54
Tabela 15- Traços com quantidade de espuma alternadas e respectivos resultados de resistência 54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IFPI	Instituto Federal do Piauí
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
PC	Policarboxilato
LS	Lignossulfurados
NS	Naftaleno
MS	Melamina
FRX	Fluorescência de raios X
CPS	Corpos de prova
CCE	Concreto celular espumoso
MPa	Mega Pascal

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: $$\rho AP = \frac{(Mar - Mr)}{V}$$

Equação 2: $$\gamma = \frac{500}{(L - 200)}$$

Equação 3: $$As = \gamma Cf - Cc - (a/c \,.\, Cc)$$

Equação 4: $$V_{esp} = 1000 - \frac{As}{\gamma areia} - \frac{Cc}{\gamma c} - (a/c \,.\, Cc)$$

Equação 5: $$V_{água} = (a/c \,.\, Cc) - (Vesp \,.\, Yesp)$$

Equação 6: $$A = \frac{Msat. - Ms}{Ms} .100$$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

2 OBJETIVOS 16

2.1 Geral 16

2.2 Específicos 16

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 17

3.1 Concreto leve 17

3.2 Concreto celular 18

3.3 Classificação 20

3.4 Aditivo incorporador de ar (aditivo espumígeno) 21

3.5 Aditivo superplastificante 25

3.6 Dosagem produção e cura 25

4 MATERIAIS E MÉTODOS 27

4.1 Etapa 1: Materiais Utilizados 28

4.1.1 Cimento 28

4.1.2 Agregado miúdo 28

4.1.2.1 Análise granulométrica 28

4.1.2.2 Determinação da massa unitária 29

4.1.2.3 Determinação da massa específica 30

4.1.3 Aditivo incorporador de ar 31

4.1.4 Aditivo superplastificante 32

4.2 Etapa 2: processo de produção do aditivo espumígeno 32

4.2.1 Dosagem da espuma pré-formada 32

4.2.2 Produção da espuma pré-formada 34

4.3 Etapa 3: processo de produção do concreto 35

4.3.1 Cálculo do traço....35
4.3.2 Produção....36
4.3.3 Cura....37
4.4 Etapa 4: ensaios físicos, mecânicos e análises químicas....38
4.4.1 Ensaios no estado fresco....38
4.4.1.1 Abatimento do tronco do cone (Slump Test)....38
4.4.1.2 Teor de ar incorporado....39
4.4.1.3 Determinação da massa específica aparente....40
4.4.2 Ensaios no estado endurecido....40
4.4.2.1 Resistência a compressão....40
4.4.2.2 Ensaio de absorção de água....41
4.4.3 Análises químicas....41
4.4.3.1 Fluorescência de raio X (FRX)....41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO....43
5.1 Cimento....43
5.2 Caracterização do agregado miúdo....43
5.2.1 Análise granulométrica e determinação da massa unitária e massa específica....43
5.3 Aditivo incorporador de ar....44
5.3.1 Relação aditivo / água (adt/a)....46
5.3.2 Avaliação da melhor dosagem....48
5.4 Processo de produção do concreto leve....49
5.4.1 Relação massa específica e resistência....49
5.4.2 Adição do aditivo superplastificante....50
5.4.3 Dosagem para blocos....53

5.5 **Absorção de água** 56

5.6 **Teor de ar** 57

6 **CONCLUSÃO** 59

7 **ESTUDOS FUTUROS** 61

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 62

1 INTRODUÇÃO

O concreto tem sido o material ao longo dos anos mais utilizado na construção civil, composto por uma mistura de partículas de naturezas diferentes em um meio aglomerante, no qual o cimento em presença de água é o aglomerante, além de outros materiais eventuais, como os aditivos e adições (Lima *et al.*, 2014).

A grande utilização do concreto na construção civil está associada entre outras vantagens a sua excelente resistência à água, versatilidade e durabilidade. No entanto, algumas características como: pouca resistência a agentes químicos, o peso próprio elevado e a baixa resistência aos esforços de tração, limitam o seu uso em algumas situações, não atendendo a determinadas necessidades impostas na construção (Silva, 2015).

A busca por melhorias nas propriedades do concreto vem sendo o foco de várias pesquisas (Zelaya, 2019), os quais trouxeram alguns avanços em relação ao concreto convencional, resultando no surgimento ao longo dos anos, dos chamados concretos especiais. Desta forma foram desenvolvidos vários tipos de concretos especiais: os concretos leves, de alto desempenho, auto adensável, massa, pesado, rolado, retração compensada, com polímeros, fibras e outros (Nascimento, 2015).

Os concretos especiais podem ser definidos como materiais com características específicas devido ao aprimoramento da tecnologia, que melhorou as deficiências do concreto tradicional ou incorporou propriedades não inerentes a este material, além de atender particularidades de cada obra, com produtos para serem empregados em locais/condições em que o concreto convencional não pode ser aplicado (Nascimento, 2015).

O foco de estudo deste trabalho é o concreto celular, que faz parte do grupo dos concretos leves. Os concretos leves se utilizam de agregados de baixa densidade para reduzir a massa específica mantendo o volume, efeito que, nos concretos celulares (sem agregados graúdos) é obtido mediante bolhas de ar incorporadas mecânica ou quimicamente, homogeneamente distribuídas e estáveis (Queiroz; Nuria, 2019).

O uso do concreto leve pode possibilitar a construção em solos de baixa capacidade de suporte. Além disso, com concretos mais leves, as fôrmas necessitam suportar menor pressão do que em concretos normais, bem como a

massa de material a ser manipulada é reduzida, com aumento da produtividade. O concreto com menor massa específica também resulta em melhor isolamento térmico do que o concreto normal. Por outro lado, o concreto leve possui maior consumo de cimento do que o concreto normal, fator que representa um custo adicional, além dos agregados leves também serem mais caros (Neville, 2016).

No concreto celular é acrescentado o agente formador de espuma, que é um aditivo composto por um agente espumante, que é o produto de composição química capaz de produzir bolhas de ar estáveis no interior de pastas de cimento ou argamassas (ABNT NBR 12645). A razão para o uso crescente dos aditivos é o fato de serem capazes de conferir consideráveis vantagens físicas e econômicas ao concreto. Esses benefícios incluem a utilização do concreto em situações em que antes existiam dificuldades consideráveis ou mesmo insuperáveis.

Os aditivos, embora nem sempre sejam baratos, não representam necessariamente uma despesa adicional, já que seu uso pode resultar em economia, por exemplo, no custo da mão de obra necessária para o adensamento, no consumo de cimento ou, ainda, na melhoria da trabalhabilidade sem o emprego de medidas adicionais (Neville, 2016). Assim como para os concretos leves de modo geral, as resistências mecânicas dos concretos celulares são relativamente menores quando comparados aos concretos convencionais, devido à alta porosidade presente na pasta de cimento.

Atualmente, existem apenas três normas brasileiras que regulamentam o uso do concreto celular em paredes de edificações, são elas a NBR 12644:1992, NBR 12645:1992 e NBR 12646:1992, no entanto, nenhuma dessas normas trata sobre projeto. Para suprir esta etapa, existe o projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1 em elaboração que aborda sobre projeto, controle e execução de paredes de concreto celular moldados no local (Silva, 2015).

Avaliar o comportamento do concreto por meio de suas características e propriedades e conhecer sua microestrutura, em função dos teores de ar incorporado às misturas, ao consumo de cimento e teores de agregados permite subsidiar estudos no intuito de otimizar o uso de aditivos para produção de concretos que atendam às especificações exigidas para determinadas aplicações (Barbar, 2016).

2 OBJETIVOS

2.1. Geral

Formular e analisar um aditivo incorporador de ar, bem como, avaliar o desempenho do concreto celular moldado com este aditivo, através das caracterizações mecânicas e físico-químicas.

2.2 Específicos

- Realizar a caracterização do agregado miúdo: granulometria (NBR NM 248), massa específica (NBR NM 52) e massa unitária (NBR NM 45);
- Calcular e moldar o traço para obtenção do Concreto Celular Espumoso (CCE);
- Analisar a influência dos parâmetros: água/aditivo (a/adt), massa específica (NBR 12644), e dosagem no concreto.
- Realizar as caracterizações mecânicas: absorção de água (NBR 9778), teor de ar incorporado (NBR NM 47) e resistência (NBR 5739) dos corpos de prova produzidos;
- Avaliar a compatibilidade do concreto celular em estudo para fabricação de blocos de acordo com a norma ABNT 13438/13.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Concreto leve

Os concretos leves se utilizam de agregados de baixa densidade para reduzir a massa específica mantendo o volume, efeito que, nos concretos celulares, sem agregados graúdos, é obtido mediante bolhas de ar incorporadas mecânica ou quimicamente, homogeneamente distribuídas e estáveis. Além de ter a vantagem de menor peso próprio, quando produzido pré-moldado, facilita o manuseio e transporte, reduz as cargas atuantes na fundação e tem baixa condutividade térmica. Sua origem remonta a 1877, quando Zernikov, produziu uma mistura de cálcio e areia com vapor a alta pressão, embora pouco sólida. Em 1914, Alysworth e Dyers ativam a argamassa de cálcio e areia com pó de zinco ou alumínio, obtendo a patente do produto denominado "rocha porosa artificial" (Queiroz; Nuria, 2019).

Depois da primeira guerra mundial, que levou à escassez de recursos e energia, na Europa foram promovidas pesquisas na busca de materiais de construção que fossem isolantes térmicos e de baixo custo e, em 1924, o cientista sueco A. Eriksson desenvolveu a base para a produção do concreto celular autoclavado, iniciando-se sua produção industrial em 1929. O número de plantas industriais cresceu muito durante os anos de 1930 e, embora a Segunda Guerra Mundial tenha diminuído sua expansão, a produção de concreto celular autoclavado entre 1929 e 1975, aumentou mais de 4.200 vezes no mundo. A partir daí o desenvolvimento continuou com variações na composição de produtos comerciais e marcas diversas (Queiroz; Nuria, 2019).

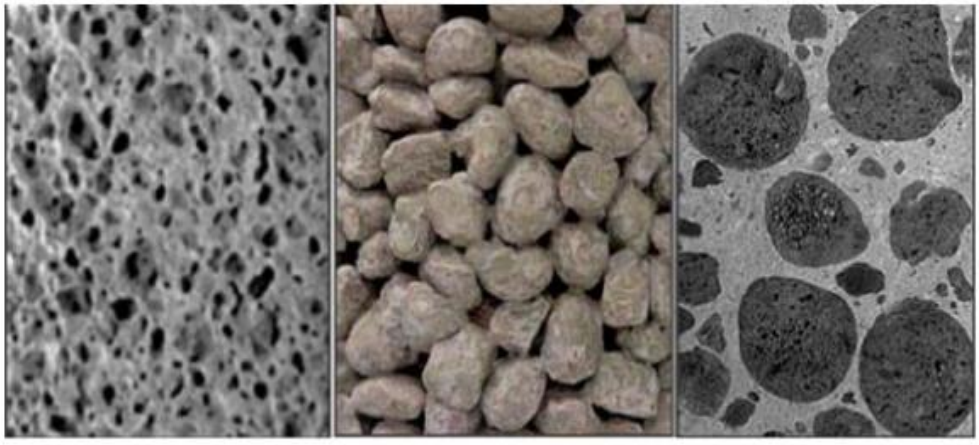
O edifício de escritórios da Southwestern Bell Telephone Company, foi ampliado em 1929 utilizando concreto leve. O edifício já possuía 14 pavimentos de concreto convencional e havia sido projetado para receber mais oito pavimentos. No entanto, verificou-se que se fosse utilizado concreto leve na nova estrutura, poderiam ser executados 14 pavimentos adicionais. A resistência à compressão atingida nesse caso foi de 25 MPa em 28 dias. Em 1929 também ocorreu a primeira construção total com concreto leve, o hotel Chase-Park Plaza, de 28 pavimentos na cidade de St. Louis nos Estados Unidos (Scobar, 2016).

A massa específica reduzida e o isolamento térmico e acústico são propriedades que estão diretamente relacionadas ao volume de vazios existentes no

concreto, sendo, portanto, a presença do ar em sua composição o fator determinante para a obtenção de concreto leve. O ar pode ser incorporado diretamente à massa através de espumas ou aditivos químicos, ou através de recursos que permitam o seu ingresso e manutenção dentro da estrutura do concreto, como a eliminação das partículas mais finas da granulometria do agregado ou a utilização de agregados graúdos ocos ou porosos, podendo-se ainda, obter concretos leves com uma combinação desses recursos (Silva, 2015).

Os concretos leves podem ser produzidos de três formas (Figura 1): a primeira é com a introdução de ar a massa cimentícia, através de espumas, fazendo com que aconteça uma reação que gera bolhas de ar, e desta forma é produzido o concreto aerado ou celular; o concreto sem finos, que é produzido apenas com aglomerante, água e agregados graúdos, onde se produz vazios entre os agregados graúdos e a argamassa; e por último, com o uso de agregados porosos, como a argila expandida por exemplo (Leite *et al*., 2019).

Figura 1- Tipos de concreto leve



a) concreto celular b) concreto sem finos c) com agregado leve

Fonte: Rossignolo (2009).

3.2 Concreto celular

O concreto celular é um tipo de concreto leve, obtido pela introdução nas argamassas, de bolhas de ar com dimensões milimétricas, homogêneas, uniformemente distribuídas, estáveis, incomunicáveis e indeformadas ao fim do processo, cuja densidade de massa aparente no estado fresco deve estar compreendida entre 1300 kg/m^3 e 1900 kg/m^3. As bolhas de ar podem ser obtidas na

forma de uma espuma pré-formada ou geradas no interior do misturador por ação mecânica deste, devido a um agente espumante (ABNT NBR 12645).

Ao compararmos com o concreto convencional, o concreto celular é um material de baixa densidade, o que pode reduzir o peso próprio de estruturas construtivas. Na forma que tem sido adotado, o mesmo é confeccionado com agregados miúdos que aumentam a resistência e espumas pré-formadas que reduzem significativamente o peso próprio das estruturas. Vários fatores influenciam na densidade do concreto celular, como o traço adotado, as quantidades de cada material inserido da mistura, o uso ou não de agregados, o tempo de mistura e o volume da espuma pré-formada. Quanto maior o volume de espuma adicionado, menor será sua resistência e maior será a porosidade do mesmo (Peixoto *et al*., 2018).

Nos últimos anos, o Concreto Celular Espumoso (CCE) vem sendo utilizado no Brasil na produção de vedações verticais, como alternativa para reduzir a geração de entulho e desperdício de material. A espuma produzida possui diversas características como: alta estabilidade dos poros, boa densidade, plasticidade em concretos celulares, bom isolamento termoacústico e também é compatível com a maioria dos cimentos Portland. Sua aplicação pode ser feita tanto para fins estruturais, como na produção de blocos, placas de alvenaria, peças pré-moldadas como para revestimento de pisos e lajes, isolamentos acústicos e térmicos, paredes corta-fogo, envelopamento de tubulações, entre outras aplicações (Leite *et al*., 2019).

Dentre os diferentes processos construtivos, o que emprega a concretagem das paredes *in loco* tem se mostrado muito competitivo com relação à otimização do sistema construtivo. O aditivo utilizado para a produção da espuma pode ser destinado para a produção de concretos e argamassas com características isolantes, capazes de substituir o uso de materiais a base de resinas plásticas (LEITE *et al*., 2019). Parâmetros como dosagem do aditivo, volume de bolhas geradas e outros precisam ser mais bem compreendidos e determinados, pois influenciam diretamente na formulação, trabalhabilidade, densidade e resistência do concreto celular (Silva *et al*., 2018).

Com o processo de pré-formação de espuma temos a garantia da densidade especificada, fornecendo assim um ótimo controle de qualidade do concreto. Devido às baixas densidades, o concreto celular não possui altos ganhos de resistência à

compressão, se compararmos ao concreto convencional. Com isso, deve-se analisar as características de desempenho únicas que cada forma de concreto apresenta e verificar a possibilidade de uso de acordo com os objetivos do projeto em questão (Peixoto *et al*., 2018).

3.3 Classificação

Pode-se dividir os concretos celulares a depender da formação de poros, do tipo de pasta e do método de cura. O concreto celular pode ser classificado ainda quanto a sua aplicação, se é para função estrutural, de vedação, ou de enchimento.

Os poros podem ser formados através de dois processos, o primeiro, denominado microporitas, onde as cavidades são obtidas por meio da evaporação da água (possui estrutura capilar uniformemente distribuída, resultante da evaporação da excessiva quantidade de água), o segundo método para formar concretos aerados, pode ser obtido de três maneiras: aeração química, agente espumígeno e a combinação dos dois (Souza, 2020).

A aeração química utiliza as reações entre substâncias químicas e os componentes da mistura durante sua fase líquida ou plástica. O resultado dessa interação química é uma massa, de volume expandido, recorrente de gases que mais tarde formarão poros no interior do concreto. Os principais agentes formadores de gás são o peróxido de hidrogênio, o pó de alumínio e o carbureto de cálcio que liberam, respectivamente, oxigênio, hidrogênio, e acetileno, os processos de reações podem ser observados na Tabela 1:

Tabela 1- Principais agentes de aeração química

Substância	Reação	Agente gasoso
Alumínio em pó	$2Al + 3Ca(OH)_2 + 6H_2O \rightarrow 3Ca.Al_2O_2.6H_2O_2 + 3H_2$ $2Al+Ca(OH)_2 + 6H_2O \rightarrow Ca[Al(OH)_4]_2 + 3H_2$	H_2 (Hidrogênio)
Peróxido de hidrogênio e cloreto de cal	$CaCl(OCl) + H_2O_2 \rightarrow CaCl_2 + H_2O + O_2$	O_2 (Oxigênio)

Carbureto de cálcio	$CaC_2 + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + C_2H_2$	C_2H_2 (Acetileno)

Fonte: Souza (2020).

Classificando o concreto celular pelo método de cura, ele pode apresentar duas variações: o autoclavado, e o espumígeno. Para os autoclavados, no processo de cura por autoclave, os valores de temperatura ficam na faixa de 160 a 190°C. O processo de autoclave dura cerca de 5 horas, sob pressão saturada de vapor e temperatura, e produzem reações que levam a compostos com maior resistência, razão pela qual os blocos expostos a essa forma de cura possuem resistência à compressão na ordem do dobro e uma retração de cerca da metade, em comparação com os blocos que são curados ao ar livre, sem custos energéticos adicionais. Não obstante, o concreto celular espumígeno é considerado ambientalmente menos impactante, além dos ganhos energéticos e o melhoramento do conforto térmico e acústico das edificações (Pedro, 2017)

3.4 Aditivo incorporador de ar (aditivo espumígeno)

Com os avanços tecnológicos no estudo dos concretos, a inclusão de aditivos entre eles os incorporadores de ar, tornaram-se alternativas possíveis para aumentar sua aplicação e utilização no setor da construção civil, como por exemplo, a aplicação de concretos leves em painéis monolíticos moldados in loco e em edificações habitacionais de interesse social. Os aditivos incorporadores de ar produzem no concreto bolhas de ar estáveis, que diferentemente dos outros vazios encontrados no concreto, podem trazer importantes benefícios, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Esses aditivos modificam propriedades físicas como a massa específica e a trabalhabilidade, reduz a resistência à compressão e interferem nas propriedades térmicas dos concretos (Cintra, 2017).

O agente espumante é o produto de composição química capaz de produzir bolhas de ar estáveis no interior de pastas de cimento ou argamassas. As bolhas devem resistir aos esforços decorrentes da mistura, lançamento ou bombeamento do material, permanecendo estáveis até o início da pega normal do cimento. Para a produção da espuma, é necessária a utilização de um agente espumante que pode

ser de origem sintética ou proteica. A espuma pode ser pré-formada para posterior incorporação à argamassa ou gerada dentro desta por agitação no misturador. Em ambos os casos, devem ser respeitados os prazos de validade dos agentes espumantes, especificados pelos fabricantes (ABNT NBR 12645/92).

Os aditivos incorporadores de ar apresentam a função de produzir um grande número de bolhas de ar, estáveis, distribuídas uniformemente dentro do concreto. São produtos tensoativos geralmente constituídos de sais de resinas de madeira, materiais proteicos, ácidos graxos e alguns detergentes sintéticos. O ar incorporado por força do aditivo tem forma de pequenas bolhas de dimensões entre 10 e 1000 mícrons, distanciam-se entre si de 100 a 200 mícrons e possuem comportamento elástico. O aditivo incorporado à mistura promove a redução da tensão superficial da água, ele atua envolvendo as bolhas de ar presentes e age também envolvendo as partículas de agregado miúdo mais finas e de cimento (Berenguer *et al*., 2018).

O conjunto formado entre as partículas sólidas envolvidas e as bolhas de ar, também envolvidas, apresenta maior estabilidade que os grupos isoladamente. Apesar de reduzir a resistência mecânica do concreto, a incorporação de ar melhora a trabalhabilidade do mesmo, melhora também o comportamento do material durante o transporte, que é feito com menor possibilidade de segregação (Berenguer *et al*., 2018).

Normalmente, para usos mais comuns, o teor de ar incorporado pela espuma pode variar entre 40 e 80%, o que fragiliza e deixa o concreto expandido com uma estrutura celular porosa. Tal formação provoca bolhas de ar com tamanho de 0,1 a 1,5 mm de diâmetro, que inicialmente não teria nenhum problema em relação à permeabilidade. No entanto, a presença delas no meio pode produzir vazios mais consideráveis, principalmente na parte superior ou em contato com as fôrmas, que poderiam ser prejudiciais à durabilidade do concreto (Souza, 2020).

Há muitas variáveis relacionadas com o aditivo incorporador de bolhas (tipo e dosagem de aditivo, processo de geração de bolhas de ar, diâmetro, densidade e volume de bolhas, etc.) que influenciam na produção e propriedades no estado fresco e endurecido do concreto celular, que não são determinadas. A obtenção do concreto celular espumoso depende principalmente da dosagem do espumígeno, do volume de espuma gerado e da relação entre ambos, como, quanto de aditivo é necessário para gerar tanto de bolhas para alcançar uma determinada densidade e resistência (Silva *et al*., 2015).

A dosagem do aditivo espumígeno é determinada por tentativas, e depende do tipo de aditivo, tempo de mistura e volume e densidade do concreto. O tempo de mistura influencia na quantidade de vazios que alteram a massa específica e resistência do concreto celular. A geração de espuma pode ser pré-formada em equipamentos geradores de bolhas, que combina a solução (aditivo + água) com ar comprimido, e em seguida introduzida na argamassa base (sem aditivo), ou formadas pela ação mecânica do misturador durante o processo de mistura da argamassa base. A pré-formada, apesar de se ter um controle maior da espuma gerada, é um procedimento com uma etapa a mais e depende de outro equipamento, além do misturador, que gera mais custo, tempo e trabalho (Silva *et al*., 2015).

O processo mecânico de se produzir bolhas no concreto celular espumoso, com agentes espumígenos, é considerado o mais econômico e apresenta menor complexidade por não haver reações químicas. As diferentes variáveis de obtenção que dependem do aditivo mostram a dependência e a necessidade de melhor entendimento da influência do aditivo nas diferentes propriedades em função da dosagem do aditivo espumígeno (Silva *et al*., 2015).

O ar incorporado é de extrema importância à qualidade final do concreto, sendo necessário obter um teor que não reduza significativamente sua resistência mecânica e que garanta sua durabilidade. As bolhas de ar não representam riscos à durabilidade se não estiverem conectadas. Dessa forma, por estarem isoladas, não contribuem para o deslocamento de fluidos através do concreto. Assim, a permeabilidade, que consiste em um dos principais mecanismos de transporte de agentes agressivos no interior do concreto, não é aumentada (Barbar, 2016).

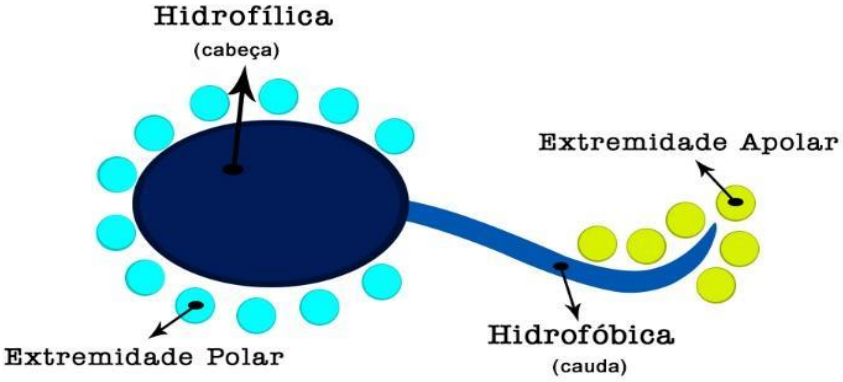
No entanto, a durabilidade do concreto está diretamente ligada ao comportamento da rede de poros em seu interior, ou seja, a comunicação da rede de poros pode indicar e definir a durabilidade do concreto. A continuidade dos poros na pasta de cimento determinará o coeficiente de permeabilidade do concreto. Os aditivos incorporadores de ar atuam como limitantes dessa continuidade de poros (Barbar, 2016).

Apesar de o teor de ar incorporado de uma argamassa plástica depender de uma série de fatores, (tipo de misturador, tempo de mistura, fator a/c, granulometria do agregado, viscosidade, velocidade de mistura, tamanho do recipiente de mistura em relação ao misturador, presença de aditivo incorporador de ar) dentre outros, na

situação em que nenhum agente é incorporado, os valores obtidos são geralmente muito baixos e praticamente independentes destes fatores, devido à instabilidade das bolhas observadas. Em geral, os agentes incorporadores de ar podem ser amplamente classificados em uma das três categorias a seguir: surfactantes, materiais naturais não processados e sólidos finamente divididos. Além destes agentes, a incorporação de ar também pode ser realizada através da formação de bolhas por agentes que liberam gás (Mansur, 2007).

Os aditivos incorporadores de ar também são agentes químicos de superfície chamados de tensoativos (ou surfactantes). Os tensoativos são moléculas que apresentam uma parte com característica apolar ligada a uma outra parte com característica polar (Shi *et al*., 2020). Dessa forma, esse tipo de molécula é polar e apolar ao mesmo tempo, ou seja, apresentam na mesma molécula uma porção hidrofílica (polar) e outra hidrofóbica (apolar) como é ilustrado na Figura 2.

Figura 2- Molécula de um aditivo incorporador de ar



Fonte: elaborada pela autora (2021).

Duas características podem ser distinguidas durante o mecanismo de formação de espuma: o encapsulamento do gás no líquido e a vida útil das espumas geradas (Falliano; Restucia; Gugliandolo, 2021). Se um agente de espuma erra na fase líquida, as bolhas de ar entram em colapso quase que instantaneamente. A instabilidade das bolhas é uma grande preocupação, especialmente em concretos ultraleves onde a densidade alvo está abaixo de 500 kg/m^3 (Dhasindrakrishna *et al*., 2020).

As espumas, em geral, podem entrar em colapso através de três mecanismos identificados: drenagem, amadurecimento de Ostwald (desproporção ou coarsening) e coalescência. A drenagem acontece quando o fluido dentro da rede de fronteira se

esvai devido à gravidade, levando à separação de fases de gás e fluido. O amadurecimento é a difusão do gás de bolhas menores que estão sob maior pressão para bolhas maiores sob uma pressão mais baixa; assim, as bolhas maiores se expandem com o tempo enquanto as bolhas menores se dissolvem. Coalescência é a fusão de bolhas adjacentes quando o filme entre elas se rompe devido ao envelhecimento (Shi, 2020).

3.5 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante é responsável pela fluidez, que é uma das principais propriedades do concreto. Os lignossulfurados (LS) são conhecidos como aditivos plastificantes de primeira geração, utilizados como redutores de água normais, e em alguns casos, como superplastificante. O Naftaleno (NS) e a melamina (MS) são conhecidos comercialmente como aditivos superplastificantes de segunda geração, e permitem redução em até 25% da quantidade de água na mistura quando usados como redutores de água (Silva, 2018).

Os policarboxilatos (PC) são os aditivos mais aconselhados para este tipo de concreto, pois são aditivos superplastificantes de alta eficiência que dispersam e desfloculam as partículas de cimento. Assim, permitem uma redução de água nas misturas em até 40% mantendo a mesma trabalhabilidade. Também são poliméricos (Silva, 2018).

Embora os aditivos, diferentemente do cimento, dos agregados e da água, não sejam um componente essencial da mistura de concreto, eles são um componente importante e cada vez mais difundido. Em vários países, uma mistura sem aditivos pode ser considerada uma exceção. Deve ser destacado que, quando adequadamente utilizados, os aditivos são benéficos ao concreto. Entretanto, eles não são uma solução para a má qualidade dos componentes da mistura nem para o uso de proporções incorretas, tampouco para a mão de obra deficiente no transporte, no lançamento e no adensamento (Neville, 2016).

3.6 Dosagem produção e cura

A dosagem do concreto leve é determinada pela combinação mais econômica dos constituintes que incluem principalmente cimento Portland, agregados e água,

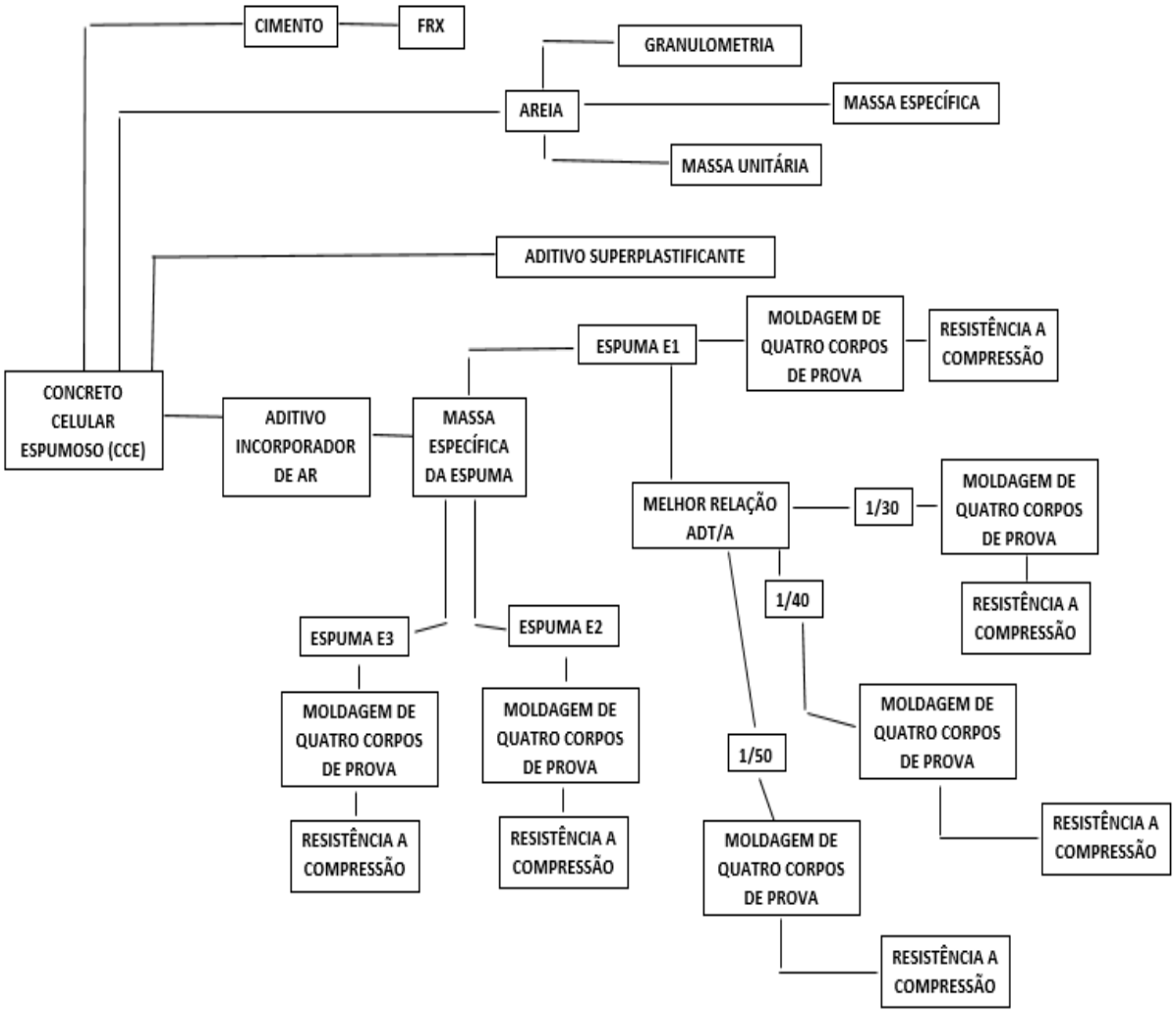
de forma que as propriedades desejadas sejam atingidas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Para a dosagem do concreto leve pode-se utilizar os mesmos métodos utilizados para concretos de agregados de peso normal, porém são necessárias adaptações. A absorção de água dos agregados leves leva a uma alteração no fator água/cimento e afeta as características de trabalhabilidade e a resistência final. O agregado leve é o responsável pela resistência do concreto, visto que a resistência da argamassa e da zona de transição é superior, portanto, quanto maiores forem as dimensões do agregado, menor é sua resistência (Scobar, 2016).

A cura do concreto leve é semelhante aos concretos convencionais e tem a função de evitar a retração e o consequente aparecimento de fissuras. Pode ser feita de duas formas: cura úmida ou cura térmica. A cura úmida é feita por meio de aplicação direta de água sobre a superfície do concreto. A cura térmica deve ser realizada em câmaras e acelera o ganho de resistência pelo aquecimento e controle da umidade. É considerada a cura mais eficiente e é muito utilizada em empresas que fabricam elementos pré-moldados. A cura do concreto leve é melhorada, pois existe a absorção de água por parte do agregado, o que leva o concreto a uma cura interna (Scobar, 2016).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresentará os materiais utilizados, as etapas de produção e os métodos de ensaios aplicados para avaliar as propriedades químicas, físicas e mecânicas. A primeira etapa tratará dos materiais utilizados, a segunda etapa, do processo de produção do aditivo, a terceira etapa tratará do processo de produção do concreto e a quarta etapa avaliará as propriedades químicas físicas e mecânicas nos estados fresco e endurecido do concreto. Na figura 3 é exposto o organograma de análise para obtenção dos resultados inicias.

Figura 3- Organograma de análise



Fonte: elaborado pela autora (2023).

4.1 Etapa 1: Materiais Utilizados

4.1.1 Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o APODI CP V ARI, cimento Portland de alta resistência inicial, resistente a sulfatos, que possui as seguintes características: resistência final e inicial mais elevada em relação aos demais tipo de cimento, menor relação água/cimento, melhor desempenho, menor permeabilidade (Silva, 2018). As propriedades físico-químicas encontram-se na tabela 2:

Tabela 2- Propriedades físico-químicas cimento CPV ARI

pH em solução Aquosa	Básico
Massa específica	2,70 a 3,10 g/cm^3
Massa específica aparente	0,9 a 1,5 g/cm^3

Fonte: Fabricante (2020).

4.1.2 Agregado miúdo

Como agregado miúdo, utilizou-se areia fina de origem aluvionar, extraída do leito do rio Poty proveniente da cidade de Teresina – PI. O material inicialmente passou pelo processo de secagem para retirada de umidade. As características físicas da areia foram feitas seguindo a NBR NM 248 para a análise granulométrica, NBR NM 45 para a determinação da massa unitária, e NBR NM 52 para a determinação da massa específica.

4.1.2.1 Análise granulométrica

Seguindo a NBR NM 248, a amostra foi seca em estufa (100°C a 110°C), e resfriada à temperatura ambiente. O conjunto foi promovido a agitação mecânica por 10 minutos. O material retido foi colocado em bandeja identificada. Determinou-se a

dimensão máxima característica (Dmáx), em mm, como sendo a abertura da malha da peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5%. Determinou-se o módulo de finura (MF), com aproximação de 0,01, que é a soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal, dividida por 100.

Figura 4- Série de peneiras utilizadas na granulometria

Fonte: elaborado pela autora (2021).

4.1.2.2 Determinação da massa unitária

Seguindo a NBR NM 45, a massa do recipiente vazio foi determinada em kg. A amostra foi colocada no recipiente, enchendo-o até transbordar (Figura. 5):

Figura 5- Ensaio de massa unitária da areia

Fonte: elaborado pela autora (2021).

A camada superior foi nivelada com a régua metálica e a massa do recipiente cheio foi determinada em kg. O valor da massa unitária foi calculado através da equação 1:

$$\rho AP = \frac{(Mar - Mr)}{V} \qquad \textbf{Eq. 1}$$

Onde:

ρAP = massa unitária da areia, em kg/m³;

Mar = massa do recipiente com a areia, em kg;

Mr= massa do recipiente vazio, em kg;

V= volume do recipiente, em dm³.

4.1.2.3 Determinação da massa específica

Seguindo a NBR NM 52, a amostra para ensaio foi seca utilizando-se a estufa (500g de agregado miúdo). Colocou-se água no frasco de Chapman até a marca de 200 cm³ e em seguida introduziu-se a areia. Efetuou-se a leitura do frasco (Fig. 6):

Figura 6- Ensaio de massa específica da areia

Fonte: elaborado pela autora (2021).

O valor da massa específica foi calculado através da equação 2:

$$\gamma = \frac{500}{(L - 200)} \qquad \textbf{Eq. 2}$$

Onde:

γ= massa específica da areia, em g/cm³;
L = leitura do nível atingido pela água no frasco após a adição da areia, em cm³.

4.1.3 Aditivo incorporador de ar

Os materiais utilizados para confecção do aditivo incorporador de ar foram: um tensoativo (sabão em pó), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) P. A. da marca *pooltécnica*®, e hidróxido de potássio (KOH) P. A. da marca *Carl Roth*®. As propriedades e especificações técnicas do peróxido de hidrogênio e do hidróxido de potássio utilizado estão listados na tabela 3 e 4.

Tabela 3- Propriedades físico-químicas do H_2O_2

Aspecto	Líquido
Cor	Incolor
Concentração	Mín. 49,5%
Densidade a 25°C	Mín. 1,19 g/mL
Acidez	Máx. 0,06 g/Kg
Estabilidade	Máx. 0,3 mLO_2/min/25mL
Ph	< 3,0

Fonte: Fabricante (2020).

Tabela 4- Propriedades físico-químicas do KOH

Aspecto	Sólido
Cor	Branco
Solubilidade em água	1.120g/L a 20°C
Densidade a 25°C	2,04 g/cm^3 a 20°C
Ponto de fusão	406°C
Ponto de ebulição	1.327°C
Ph	14

Fonte: Fabricante (2020).

4.1.4 Aditivo superplastificante

Foi utilizado um aditivo superplastificante à base de policarboxilato da marca *Basf*®, que é um pó seco por pulverização de fluxo livre, produto da policondensação de sulfonado. É especialmente otimizado para plastificação e redução de água de materiais à base de cimento e sulfato de cálcio.

O aditivo deve ser adicionado após o final da mistura dos componentes do concreto, (cimento Portland, água e agregados, etc.), ou junto a segunda parte da água de amassamento que será utilizada na mistura. Deve ser utilizado na dosagem indicada pelo fabricante (Tabela 5). Estas dosagens são orientativas, sendo imprescindível a realização de testes laboratoriais e/ou de campo (Silva, 2018).

Tabela 5- Características físico-químicas e dosagem recomendada do aditivo superplastificante

Forma física	Pó
Cor	Branco
Densidade aparente	500 a 800 Kg/m^3
pH (20°C) a 20% de solução	9 a 11,4
Dosagem recomendada	0,20 a 2,0% sobre a massa do cimento

Fonte: Fabricante (2020).

4.2 Etapa 2: processo de produção do aditivo espumígeno

4.2.1 Dosagem da espuma pré-formada

Obteve-se a proporção dos materiais pelo método de tentativas (Tabela 6). As formulações foram testadas na proporção 1/50 (para 1L de aditivo utilizou-se 20g de sólidos).

Tabela 6- Formulações testadas

Espuma	**Proporção**
X1	49% sabão, 30% H_2O_2, 21% KOH
X2	62% sabão, 32,5% H_2O_2, 5,5% KOH
X3	50% sabão, 35% H_2O_2, 15% KOH
X4	48% sabão, 35% H_2O_2, 17% KOH
X5	45% sabão, 29% H_2O_2, 26% KOH
X6	49% sabão, 36% H_2O_2, 15% KOH
X7	52% sabão, 34% H_2O_2, 14% KOH
X8	55% sabão, 30% H_2O_2, 15% KOH
X9	63% sabão, 32% H_2O_2, 5% KOH
X10	47,5% sabão, 32, 5% H_2O_2, 20% KOH
X11	60% sabão, 30% H_2O_2, 10% KOH
X12	55% sabão, 32,5% H_2O_2, 12,5% KOH

Fonte: elaborado pela autora (2021).

As formulações que apresentaram estruturas estáveis foram renomeadas em: espuma 1 (E1), espuma 2 (E2), e espuma 3 (E3). De cada formulação estável foram moldados quatro corpos de prova para ensaios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias conforme NBR 5739. Na tabela 7 é mostrado o quantitativo de material utilizado para compor as espumas.

Tabela 7- Quantidades de material na composição das espumas E1, E2 e E3

	E1		E2		E3	
Tensoativo	10g	50%	11g	55%	11g	55%
H_2O_2	7g	35%	6g	30%	6,5g	32,5%
KOH	3g	15%	3g	15%	2,5g	12,5%

Fonte: elaborado pela autora (2021).

Para testar a melhor relação aditivo/água (adt/a), foi escolhida uma das espumas que atingiram estabilidade, no caso, a espuma E1. Além das moldagens na proporção 1/50, foram moldados também corpos de prova (CPS) nas proporções 1/30 e 1/40, totalizando 4 corpos de prova de cada relação adt/a.

Figura 7- CPS moldados com a E1 nas relações 1/30, 1/40 e 1/50

Fonte: elaborado pela autora (2021).

4.2.2 Produção da espuma pré-formada

A espuma pré-formada (fig. 8c), foi produzida por uma pistola/jato de espuma (Fig.8a) da marca Vonder, onde a mesma é acoplada a um compressor (Fig.8b) de ar comprimido com potência de 1,5kw. O processo de geração de espuma é feito adicionando o aditivo a 1L de água no recipiente acoplado a pistola.

Figura 8- Produção da espuma

8a. Pistola jato de espuma 8b. Compressor 8c. Espuma pré-formada

Fonte: elaborado pela autora (2021).

4.3. Etapa 3: processo de produção do concreto

4.3.1. Cálculo do traço

O método de dosagem utilizado neste trabalho, foi o proposto por Ferreira (1987) e adaptado por Silva (2015). Consiste em primeiramente, definir a massa específica no estado fresco que se quer obter (γCf) e o fator água/cimento (a/c) que é definido de acordo com o tipo de cimento escolhido para o traço. Após essa etapa, definiu-se o consumo de cimento por m^3 (Cc), que no caso deste trabalho foi mantido constante em 400 Kg/m^3 pois, com a incorporação de bolhas de ar no concreto a resistência à compressão reduz consideravelmente. No sentido de compensar essa perda, uma elevada dosagem de cimento é adotada, ficando em 400 kg/m^3 (Silva, 2015).

Definiu-se a massa específica da espuma que se usará no traço (devendo ficar entre 34 e 64 Kg/m^3 de acordo com a norma internacional ACI523-1). Após essa etapa, calculou-se a quantidade de areia por m^3 pela eq. 3, e pela eq. 4 calculou-se o volume de espuma que se usou no traço.

$$As = yCf - Cc - (a/c \cdot Cc) \qquad \textbf{Eq. 3}$$

Onde,

yCf: massa específica que se deseja obter

Cc: consumo de cimento

a/c: relação água/cimento

$$\text{Eq. 4: } V_{esp} = 1000 - \frac{As}{\gamma areia} - \frac{Cc}{\gamma c} - (a/c \cdot Cc) \qquad \textbf{Eq. 4}$$

Onde,

As: quantidade de areia por m^3

yareia: massa específica da areia

yc: massa específica do cimento

O fator a/c do concreto base deve ser corrigido para descontar a água

presente na espuma. Pelo método de dosagem adaptado por Silva (2015), aplicado ao peso da espuma, é definido à água presente, então o volume de água presente na espuma deve ser descontado do volume de água da mistura pela Eq. 5:

$$V_{água} = (a/c \cdot Cc) - (Vesp \cdot Yesp) \quad \textbf{Eq. 5}$$

Onde,

Vesp: volume de espuma

γesp: massa específica da espuma que se deseja obter

4.3.2. Produção

Todos os corpos de prova oriundos deste trabalho foram produzidos no laboratório de controle tecnológico do grupo Kalfix®, sendo os materiais pesados em balança digital e misturados em betoneira com capacidade para 120 L. Na betoneira, foi adicionado todos os sólidos e misturados por 1 minuto. A água é adicionada aos poucos em constante agitação e por último acrescenta-se a espuma (Figura 9) onde misturou-se por cerca de 5 minutos.

Figura 9- Espuma adicionada ao concreto base

Fonte: elaborado pela autora (2021).

A sequência das misturas seguiu Scobar (2016), onde cita que para a utilização de aditivos e adições minerais, deve-se introduzir o aditivo após a mistura

de todos componentes, para minimizar o efeito causado pela absorção de água do agregado leve, o que reduz a eficiência do aditivo.

Os CPS foram confeccionados em fôrmas cilíndricas com dimensões de 10x20 cm. Após 24h os CPS foram desformados e numerados. No preparo dos CPS de concreto celular, deve ser seguido o que prescreve a NBR 5738, exceto na amostragem e moldagem. Na moldagem, o material deve ser simplesmente vertido no interior do molde, utilizando-se a concha metálica, mantida a uma altura de 10 cm, aproximadamente, do topo do molde (NBR 12646). O procedimento de compactação foi modificado a fim de evitar o rompimento das bolhas de ar, isto é, em cada camada dá-se em média 5 leves golpes nas laterais das fôrmas até a acomodação do concreto se estabilizar.

4.3.3. Cura

Neste trabalho foram utilizados dois métodos de cura: cura úmida e cura seca. A cura úmida foi feita colocando os corpos de prova em tanques de água (Figura 10a). Já na cura seca, os CPS são selados, envoltos em plástico filme. (Figura 10b).

Figura 10- Tipos de cura

10a. Cura úmida

10b. Cura seca

Fonte: elaborado pela autora (2021).

4.4 Etapa 4: ensaios físicos, mecânicos e análises químicas

4.4.1 Ensaios no estado fresco

4.4.1.1 Abatimento do tronco do cone (Slump Test)

O abatimento do tronco do cone foi realizado de acordo com a NBR NM 67. O procedimento consiste em umedecer o molde e a placa de base e colocar o molde com o concreto de ensaio. O operador deve se posicionar com os pés sobre suas aletas, de forma a mantê-la estável. Encher rapidamente o molde com o concreto coletado, em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde compactado.

Em seguida, compactar cada camada com 25 golpes da haste de socamento (o procedimento de compactação é modificado a fim de evitar o rompimento das bolhas de ar, isto é, em cada camada dá-se em média 5 leves golpes até a acomodação do concreto se estabilizar). Distribuir uniformemente os golpes sobre a seção de cada camada. Se, durante a operação de compactação, a superfície do concreto ficar abaixo da borda do molde, adicionar mais concreto para manter um excesso sobre a superfície do molde durante toda a operação da camada superior, rasar a superfície do concreto com uma desempenadeira e com movimentos rolantes da haste de compactação.

Imediatamente, limpar a placa de base e retirar o molde do concreto, levantando-o cuidadosamente na direção vertical. A operação de retirar o molde deve ser realizada de 5 a 10 segundos, com um movimento constante para cima, sem submeter o concreto a movimentos de torção lateral. A operação completa desde o início do preenchimento do molde com concreto até sua retirada, deve ser realizada sem interrupções e completar-se em um intervalo de 150 segundos.

Finalmente após a retirada do molde, medir o abatimento do concreto (Figura 10), determinando a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo de prova, que corresponde à altura média do corpo desmoldado.

Figura 11- Slump Test

Fonte: elaborado pela autora (2021).

4.4.1.2 Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado foi medido pelo método pressométrico de acordo com a NBR NM 47. O ensaio é realizado com um medidor de ar (Figura 12):

Figura 12. Medidor de ar do tipo pressométrico

Fonte: elaborado pela autora (2021).

Deve-se limpar cuidadosamente com um pano úmido as bordas do recipiente e da tampa e proceder ao fechamento hermético do equipamento, fechando a válvula de ar principal e abrindo as chaves que se encontram na tampa.

O procedimento realizado consiste em: a) injetar água através de uma das chaves, até que saia água através da chave oposta; b) sacudir o equipamento suavemente até que todo o ar acima da superfície da amostra de concreto seja expulso através da chave; c) fechar a válvula de sangria de ar e bombear o ar para a câmara até que o manômetro esteja na linha de pressão inicial; d) deixar repousar por alguns segundos para que o ar esfrie até a temperatura ambiente; e) fechar as chaves que se encontram na tampa e abrir a válvula de ar principal; f) realizar a leitura da porcentagem de ar incorporado.

4.4.1.3 Determinação da massa específica aparente

A massa específica aparente foi determinada de acordo com a NBR 12644. Esta norma prescreve o método para a determinação da densidade de massa aparente do concreto celular espumoso no estado fresco. A densidade é definida pelo quociente da massa do concreto celular espumoso no estado fresco, totalmente contido num recipiente, pelo valor do volume deste recipiente.

4.4.2 Ensaios no estado endurecido

4.4.2.1 Resistência a compressão

Os ensaios de resistência à compressão realizados durante essa pesquisa seguiram as recomendações da NBR 5739, nas idades de 7 e 28 dias. Para cada idade foram rompidos dois corpos de prova afim de se ter uma média obtendo resultados mais confiáveis. A máquina utilizada para o ensaio é uma prensa automática da marca Contenco 100Tf Classe I. A figura abaixo (Figura 13) mostra o ensaio de resistência à compressão de um corpo de prova.

Figura 13- Ensaio de resistência à compressão

Fonte: elaborado pela autora (2021).

4.4.2.2 Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água foi feito seguindo a NBR 9778. As amostras foram colocadas em estufa e mantidas a uma temperatura de 105±5°C por um período de 72h. Completado o tempo, as amostras foram retiradas e pesadas, a fim de se obter o valor de massa seca da amostra (M*s*).

Em seguida, os corpos de prova foram imergidos em água à temperatura de 23±2°C mantidas por 72h nessa condição. Após essa etapa, as amostras foram retiradas, enxugadas com pano úmido e pesadas, a fim de se obter o valor de massa saturada da amostra (Msat.). A absorção (A) foi calculada em porcentagem, pela equação 6:

$$A = \frac{Msat. - Ms}{Ms} . 100 \qquad \textbf{Eq. 6}$$

Onde:

Msat.: Massa saturada

Ms: Massa seca

4.4.3 Análises químicas

4.4.3.1 Fluorescência de raio X (FRX)

A determinação química da composição do cimento utilizado foi identificada pela técnica analítica de Fluorescência de Raios X. O equipamento utilizado foi um espectrômetro modelo Epsilon3-CL da Panalytical (Fig. 14), do laboratório de materiais do Instituto Federal do Piauí (IFPI). Os resultados foram emitidos na forma de concentração percentual de óxidos.

Figura 14- Espectrômetro de Fluorescência de raios x (FRX)

Fonte: elaborado pela autora (2021).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Cimento

As concentrações dos principais óxidos presentes no cimento utilizado nesta pesquisa, foram determinadas através da análise de FRX, de acordo com a tabela 8:

Tabela 8- Concentração dos principais óxidos

Componente	Concentração (%)
CaO	76,9
MgO	1,2
SiO_2	9,7
Al_2O_3	2,0
Fe_2O_3	4,9
SO_3	4,1
Outros	1,2

Fonte: elaborado pela autora (2021).

O cimento Portland no concreto celular, deve apresentar alta resistência inicial, assim possibilitando a desmoldagem de maneira mais rápida em qualquer um dos casos (Pachla, 2017). Por este motivo, foi definido a utilização de cimento Portland CP V-ARI.

5.2 Caracterização do agregado miúdo

5.2.1 Análise granulométrica e determinação da massa unitária e massa específica

Os resultados obtidos no ensaio de composição granulométrica do agregado miúdo (Tabela 9), mostram as porcentagens retidas e acumuladas, o módulo de finura e a dimensão máxima de agregado. O valor calculado da massa unitária foi de 1,17 kg/dm^3, de acordo com a equação 1. O valor calculado da massa específica foi de 2,64 kg/dm^3, de acordo com a equação 2.

Tabela 9- Resultados da análise granulométrica

Abertura das peneiras (mm)	Quantidade retida (g)	Quantidade acumulada (%)
2,4	9	0,9
1,2	16	2,5
0,6	20	4,5
0,3	780	82,5
0,15	165	99
Fundo	10	100
Módulo de Finura		**1,89**
Diâmetro máx.		**2,4**

Fonte: elaborado pela autora (2021).

De acordo com a norma NBR 6502, a areia utilizada neste trabalho é considerada uma areia média. Aumentar a finura pode aumentar a área superficial específica das partículas em contato com a água, acelerando assim a taxa de dissolução e aumentando a capacidade dos materiais de participar de reações químicas (Yang *et al.*, 2019). Isso acontece, pois, quanto menor a finura do agregado, menor é a área superficial específica das partículas que participam da reação, e maior é a reatividade e a fluidez da pasta.

O tamanho do agregado tem um efeito pronunciado sobre o teor de ar no concreto. Existe pouca alteração na quantidade de ar quando o tamanho do agregado é superior a 37,5 mm, já que os agregados finos, as areias médias (entre 0,6 e 0,15 mm) são mais eficientes na incorporação de ar (Cintra, 2017).

A classificação de partículas do material sólido não influenciará apenas a fluidez da mistura de base, mas também a estabilidade da espuma introduzida quando misturada com a mistura base (Wang; Lim; Tan, 2020).

5.3 Aditivo incorporador de ar

O aditivo desenvolvido neste trabalho utiliza uma reação exotérmica em meio básico do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e o hidróxido de potássio (KOH) de acordo com a reação 1: $2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2$ em CNTP. O peróxido de hidrogênio se decompõe em água e oxigênio em um ambiente alcalino, onde sua taxa de

decomposição depende da autoconcentração, temperatura de reação, teor de hidróxido de potássio e taxa de reação. Font *et al*., (2020) também utilizou uma reação em meio básico (alumínio metálico) para realizar o estudo de sua aplicação em misturas de concreto celular. Shi *et al*., (2020), utilizou uma solução líquida alcalina misturando silicato de sódio e hidróxido de sódio (55%), também, adicionando peróxido de hidrogênio a essa mistura. A concentração da solução de H_2O_2 adicionada pelo autor foi de 30% em peso.

Muito peróxido de hidrogênio fará com que a amostra se decomponha continuamente durante a pega das pastas, destruindo a formação da microestrutura, prolongando assim o tempo de pega do concreto. As bolhas geradas pela decomposição do H_2O_2 têm um efeito de bola nas pastas, o que pode aumentar demasiadamente a sua fluidez. Teoricamente, o grau de expansão das misturas aumentará à medida que o teor de H_2O_2 aumentar. Enquanto isso, quando o conteúdo de peróxido de hidrogênio dobra, a quantidade de oxigênio produzida também dobra de acordo com a equação química. No entanto, a quantidade de expansão não está linearmente relacionada ao conteúdo de peróxido de hidrogênio. Isso significa que nem todo o gás gerado é aprisionado, ou algumas bolhas são quebradas, ou nem todo o peróxido de hidrogênio é decomposto no mesmo grau (Shi *et al*., 2020).

A expansão é mais complicada devido a algumas mudanças nas propriedades do concreto fresco. Mudanças na composição afetam diretamente seu tempo de pega, pH, consistência das pastas e temperatura de reação. A taxa de decomposição do peróxido de hidrogênio segundo Shi *et al.*, (2020), aumenta com o aumento da temperatura e do pH, a viscosidade controla o processo de formação de bolhas, e o tempo de pega inicial está intimamente relacionado com a duração da expansão.

Os aditivos incorporadores de ar podem ter agentes espumígenos de origem sintética ou proteica. O aditivo utilizado neste trabalho possui um agente espumígeno de origem sintética. Falliano *et al*., (2018) ao analisar o agente espumante de um concreto celular desenvolvido com três agentes espumígenos, sendo um de base proteica e dois sintéticos, observou a fase fluida da espuma junto à pasta cimentícia, e destacou a instabilidade da espuma mais evidente para o agente espumígeno de base proteica. Consequentemente, os agentes espumantes

sintéticos, podem alcançar resistências comparáveis aos de proteína, à medida que seja adotada uma relação água/aglomerante (a/agl) maior.

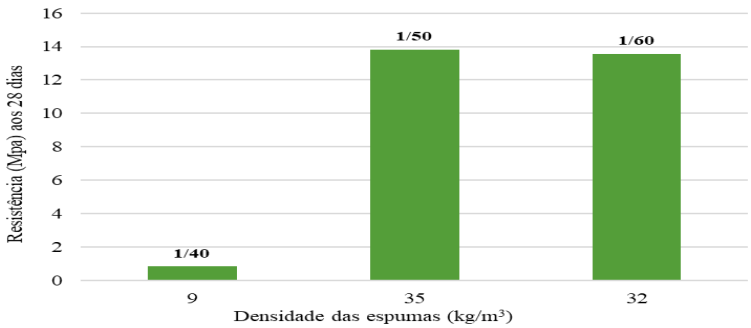
Em contrapartida, Barbar (2016) testou quatro tipos de aditivos incorporadores de ar (1: a base de resinas sintéticas; 2: sal de álcool graxo etoxilado sulfatado; 3: alquil-aril-sulfonado; 4: copolímero acrílico) e concluiu que o aditivo à base de resinas sintéticas foi o que promoveu maior eficiência na incorporação de ar em pastas de cimento Portland.

Ge *et al*., (2020), também, a cunho comparativo, utilizou dois tipos de agentes espumantes em seu trabalho, um sintético, e outro aniônico à base de proteínas. Comparado ao agente espumante sintético, o agente espumante à base de proteína produziu bolhas de ar esféricas isoladas menores, fornecendo maior resistência à compressão. Por outro lado, o aditivo sintético obteve uma taxa de diluição de cerca de 40-50 vezes maior que o proteico, e uma taxa de formação de espuma de cerca de 1000-1200 vezes maior.

5.3.1 Relação aditivo / água (adt/a)

Com a espuma de dosagem E1, testou-se a melhor relação adt/a usando as proporções 1/40, 1/50 e 1/60. A melhor relação foi definida tendo por base os resultados de massa específica da espuma, do concreto, e resistência à compressão dos corpos de prova moldados com essas espumas teste. Na figura 15 pode-se observar no gráfico que a relação adt/a de 1/50, apresentou maior densidade de espuma (35 kg/m^3), e consequentemente maior resistência compressiva (13,80 Mpa).

Figura 15. Gráfico da densidade das espumas *versus* resistência



Fonte: elaborado pela autora (2021)

Quanto maior a densidade da espuma, maior a resistência compressiva. Lermen (2019), em seu trabalho, pode afirmar que para corpos de prova com tempo de cura de 28 dias, o tipo de cimento, a quantidade de espuma e a interação entre os fatores apresentaram influência significativa com 95% de confiabilidade, onde a quantidade de espuma foi o fator que mais influenciou a resistência à compressão, sendo sua contribuição de 39%.

Tabela 10- Análise de variância para resistência à compressão após 28 dias de cura

Fator	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	% de contribuição
Quantidade de Espuma	196,517	2	39

Fonte: Lermen (2019).

Lermen (2019) também discute que, ao aumentar a quantidade de espuma, a resistência à compressão diminui. Isso ocorre devido à incorporação de ar na espuma, resultando na formação de poros na estrutura, diminuindo a densidade e, consequentemente, a resistência à compressão.

A variação da massa de espuma adicionada define qual será a densidade e resistência à compressão, pois além da introdução direta dos vazios de ar, isso leva a um aumento do teor de água da mistura, pois a espuma pré-formada é composta por 80% de água. Essa afirmação vai de acordo com Pedro (2017), onde em seu trabalho utilizou uma espuma pré-formada como ar incorporado com uma mistura de agentes espumantes naturais derivados do coco, onde produziu corpos de prova com relação a/c e concentrações de espuma variadas, obtendo como melhor relação 1,28 para 18% (da massa sólida total) de adição de espuma, gerando uma amostra com densidade de 430 kg/m^3, e uma resistência à compressão de 1,07 MPa.

Na elaboração deste trabalho, quantidades maiores de espuma foram testadas, porém não obtiveram sucesso. A consistência da pasta era muito fluida e não tinha resistência suficiente (viscosidade) para manter as bolhas de gás na matriz antes do endurecimento. Apesar da grande quantidade de bolhas, a aeração não foi efetiva. O mesmo foi observado no trabalho de Font *et al*., (2020), onde a forte reação química no meio alcalino das misturas também inviabilizou essa adição percentual. Além disso, pode-se considerar que o tamanho da partícula era muito alto e, consequentemente, a geração de gás não foi dispersa de forma homogênea

na matriz. Assim, grandes bolhas foram formadas e tiveram uma pressão substancial e escaparam da mistura, inviabilizando o seu uso. Na tabela abaixo (tabela 11), temos os resultados da resistência, massa específica aparente e massa específica seca do concreto moldado com a espuma E1 nas proporções 1/40, 1/50 e 1/60.

Tabela 11- Relação resistência, massa específica aparente e massa específica seca do concreto moldado com a espuma E1 em proporções distintas:

	Massa específica aparente (kg/m^3)	**Massa específica seca (kg/m^3)**	**Fck 07 dias**	**Fck 28 dias**
1/40	856	806	0,73	0,83
1/50	1.761	1.766	12,76	13,80
1/60	1.760	1.724	11,85	13,54

Fonte: elaborado pela autora (2021).

A redução da densidade causa uma queda significativa na resistência. Isso ocorre porque mais vazios de ar são formados nas misturas de baixa densidade o que foi confirmado pela análise da estrutura de vazios de ar no estudo de Ge *et al*., (2020). Para se obter um concreto celular com alta resistência, é importante criar bordas mais densas (paredes dos poros). Isso é atribuído à função de preenchimento do aditivo para tornar a estrutura das paredes dos poros mais densa, reduzindo o tamanho e o volume dos poros capilares e micro vazios, especialmente na zona de transição interfacial.

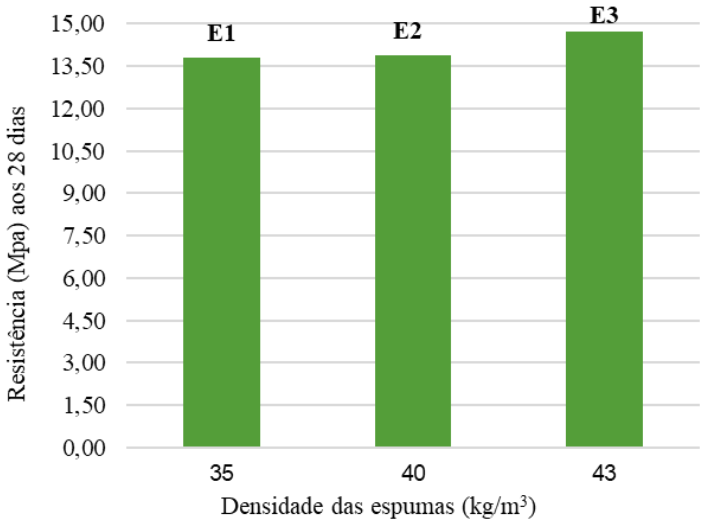
Os resultados indicaram que a resistência à compressão de 7 dias teve o maior aumento, o que concordou com a conclusão de Wang (2020), onde o autor relata que as moléculas poderiam funcionar como locais de nucleação devido à sua alta energia de superfície e os produtos de hidratação se depositariam em sua superfície, durante o qual uma maior quantidade de hidrato de silicato de cálcio (C-S-H) poderia ser produzida no estágio inicial de hidratação.

5.3.2 Avaliação da melhor dosagem

A densidade é usada como uma propriedade básica neste estudo, e a resistência à compressão foi o parâmetro escolhido para definir qual composição

apresenta o melhor resultado. Na figura abaixo (Figura 16), observa-se a densidade e resistência compressiva alcançada por cada espuma testada (E1, E2 e E3) na relação adt/a de 1/50:

Figura 16- Gráfico da densidade das espumas *versus* resistência



Fonte: elaborado pela autora (2021).

Observa-se que quanto maior é a densidade da espuma, maior é a resistência compressiva do concreto. A espuma E1 alcançou uma resistência de 13,80 Mpa, a espuma E2 de 13,87 Mpa e a E3 obteve 14,74 Mpa de resistência. Essa faixa de densidade também foi utilizada no trabalho de Ge *et al*., (2020), cerca de 40 kg/m ^{3}.

5.4 Processo de produção do concreto leve

5.4.1 Relação massa específica e resistência

A resistência à compressão e a densidade aparente dos materiais porosos estão positivamente correlacionadas. Quanto maior a densidade aparente, maior a resistência à compressão e vice-versa. No entanto, os materiais porosos são frequentemente considerados materiais leves e de baixa resistência e precisam ter maior resistência em baixa densidade. Por esse motivo, a resistência é a principal característica usada para caracterizar essa propriedade do material poroso (Wu *et al*., 2020).

A resistência a compressão segundo You *et al*., (2020), é considerada um parâmetro ideal para medir o material e uma importante propriedade mecânica deste

tipo de concreto. Na tabela abaixo, observa-se a relação resistência, massa específica aparente e massa específica seca do concreto moldado com as espumas E1, E2 e E3 (tabela 12):

Tabela 12- Relação resistência, massa específica aparente e massa específica seca do concreto moldado com as espumas E1, E2 e E3:

	Massa específica aparente (kg/m^3)	**Massa específica seca (kg/m^3)**	**Fck 07 dias**	**Fck 28 dias**
E1	1.761	1.766	12,76	13,80
E2	1.713	1.666	11,25	13,87
E3	1.812	1.768	12,99	14,74

Fonte: elaborado pela autora (2021).

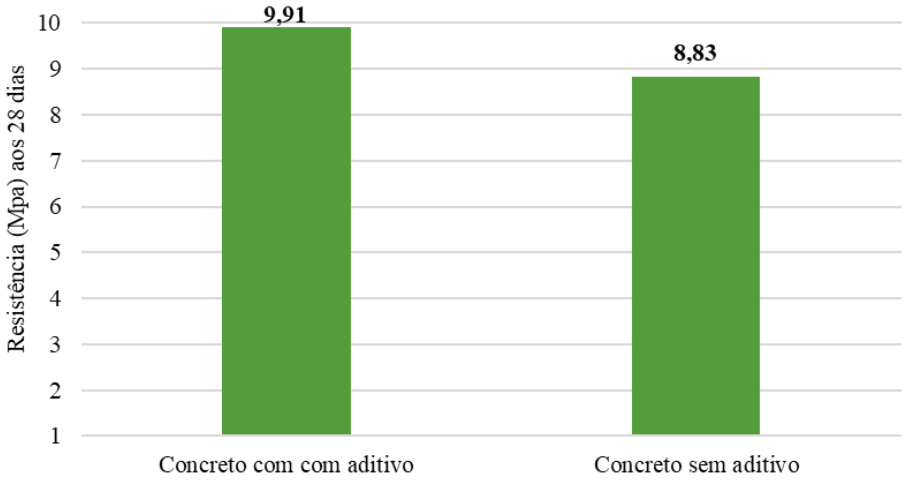
Quanto maior a densidade da espuma, maior a massa específica aparente e maior a resistência compressiva do concreto. É importante ressaltar que os valores de resistência observados nas tabelas para os corpos de prova moldados com as espumas E1, E2 e E3 foram superiores ao exigido pela NBR 13438, que determina a resistência à compressão de blocos de concreto celular autoclavado (de 1,2 a 4,5 Mpa). Entretanto, é importante citar que atualmente não existe uma norma brasileira que avalie esta propriedade em blocos de concreto celular espumoso.

Do ponto de vista mecânico, dois aspectos podem ser discutidos: I) houve uma evolução com o tempo de cura em todos os ensaios, o que foi atribuído ao avanço da reação com o tempo de cura à temperatura ambiente; e II) a melhoria da densidade correspondeu a um aumento da resistência à compressão independente da amostra. Esta ligação entre a densidade e a resistência à compressão é típica para concretos celulares (sistemas tradicionais, bem como sistemas geopoliméricos ou álcali-ativados), e tem sido relatada por vários autores (Font *et al*., 2020).

5.4.2 Adição do aditivo superplastificante

A análise da eficiência do superplastificante, é observada na figura 17, através do gráfico com os valores de resistência à compressão. Foram confeccionados quatro corpos de prova com resistência calculada de 8 Mpa utilizando a espuma E1, onde foram rompidos aos 28 dias de cura:

Figura 17- Gráfico da análise da eficiência do superplastificante



Fonte: elaborado pela autora (2021).

Além de ter atuado como fonte redutora de água no traço (cerca de 9%), o aditivo aumentou a resistência do concreto celular em 10,8% em relação ao concreto sem o aditivo. Percebe-se pelo gráfico, que o concreto com o superplastificante em sua composição chegou a 9,91 Mpa, e a formulação sem, atingiu 8,83 Mpa aos 28 dias. Isso se dá pela relação água cimento que no traço sem aditivo foi de 0.66 e no traço com, foi de 0,60 de acordo com a tabela 13:

Tabela 13- Dosagens da análise da eficiência do superplastificante

	Traço com aditivo	Traço sem aditivo
Cimento (kg)	5	5
Água (L)	3,00	3.30
Areia (kg)	15	15
Espuma (L)	2,87	2,87
Aditivo (g)	10	-
Relação a/c	0,60	0,66

Fonte: elaborado pela autora (2021).

Com o aumento da concentração de plastificante, a resistência a compressão aumenta (Tekin, 2020). Há uma forte correlação entre a proporção de plastificante e a força compressiva. No entanto, usando uma mistura química em proporção de

20% se torna muito alta e há um efeito negativo na configuração, tempo e custo. Em seu estudo, quando o autor aumentou a proporção de plastificante da mistura de 10% para 20%, a relação a/c diminuiu em 35%. Esse fato pode ser explicado pela existência de uma interface aprimorada na zona entre o cimento e os agregados, com relações a/c mais baixas.

Os testes de Piekarczyk (2020), com o aditivo superplastificante policarboxilato, mostraram que, quantidades muito altas de aditivo podem destruir a seleção cuidadosa dos ingredientes remanescentes do concreto para garantir sua alta abrasividade e baixa permeabilidade à água. Alguns tipos de superplastificantes causam aeração excessiva e, como resultado, reduzem a resistência do concreto e deterioram a durabilidade, associada à permeabilidade. Por outro lado, adicionar aditivo ao concreto deve ser precedido por uma avaliação indireta de seu efeito na porosidade e na resistência associada e permeabilidade à água do concreto.

Uma mistura inadequadamente selecionada, e especialmente um excesso dela, causa uma deterioração significativa na durabilidade e permeabilidade do concreto. Aditivos à base de álcool de alto peso molecular e superplastificante aumentam excessivamente o teor de ar no concreto causando deterioração da resistência à compressão e permeabilidade à água.

Wu *et al*., (2020), ao analisar o efeito do superplastificante em suas amostras de concreto aerado, concluiu que a incorporação de superplastificantes policarboxilatos tem um efeito positivo nas propriedades reológicas da pasta, na geração de gás e nas propriedades físicas da amostra. Seu efeito redutor de água (28%) não só pode melhorar as propriedades reológicas da pasta para corresponder à taxa de geração de gás do agente aerador, mas também otimizar a estrutura dos poros para reduzir o número de poros nocivos (menos de 50 nm) e melhorar a resistência dos produtos. O autor utilizou porcentagens na faixa entre 0,5 – 5%.

Para entender o funcionamento do policarboxilato na pasta, é preciso saber que o cimento forma uma estrutura de flocos após o contato com a água. A estrutura do floco contém uma grande quantidade de água livre, o que não contribui para a fluidez da pasta. Após a adição do policarboxilato a estrutura do floco com um grande volume é decomposta, em uma grande quantidade de pequeno volume devido à forte dispersão de adsorção pelo aditivo. Enquanto isso, uma parte da água livre é liberada (Wu *et al*., 2020).

A trabalhabilidade melhorada da pasta traz bolhas uniformes e, ao mesmo tempo, o tamanho dos poros é reduzido. Portanto, o aumento do teor de policarboxilato resulta em uma menor densidade aparente do produto. Além disso, o aditivo pode otimizar a distribuição de poros grandes na pasta e tornar os poros mais uniformes do que antes. Também pode melhorar efetivamente a forma de ligação entre os componentes da pasta e densificar a estrutura interna da pasta. Portanto, a força do produto aumenta com o aumento da quantidade de aditivo dentro de um determinado intervalo.

Ge *et al*., (2020), também, em seu estudo, utilizou superplastificantes para melhorar a trabalhabilidade e estabilizar a compatibilidade do concreto espumado de baixa relação a/c na faixa de 1,5 a 2,9 kg/m^3. Diferentes quantidades de aditivo foram usadas para controlar as propriedades reológicas das misturas: para concreto espumado de baixa densidade, menos superplastificante e maior volume de agente de espuma são necessários para criar mais espaços vazios no material.

Wang (2020) utilizou um superplastificante à base de policarboxilato com teor de sólidos de 35% em peso. Como um grande número de macroporos irregulares é introduzido, o alto consumo de água é desfavorável à resistência à compressão do produto até certo ponto. Percebe-se que a combinação razoável de consumo de água e agente redutor de água pode melhorar a resistência dos produtos de concreto aerado sem alterar significativamente a densidade aparente da amostra.

5.4.3 Dosagem para Blocos de Concreto Celular Espumoso (BCCE)

Após a análise da relação massa específica e resistência das primeiras amostras testes, foram calculados e moldados quatro traços de CCE seguindo as equações do item 4.3.1 da metodologia, afim de avaliar a compatibilidade do CCE em estudo para fabricação de blocos. É importante ressalvar novamente que ainda não existe uma norma específica para este tipo de bloco, mas é possível se basear em alguns dos requisitos exigidos para os blocos de concreto celular autoclavados, que seguem a norma ABNT NBR 13438/13.

Esta norma define uma densidade aparente máxima de 650 Kg/m^3 para um bloco de resistência mínima de 4,5 Mpa em média, de classe C45 (durável), para aplicações de unidades de alvenaria de concreto aerado autoclavado, de acordo com a tabela 14:

Tabela 14- Classes, resistência à compressão e densidade de massa aparente seca

Classe	Resistência à compressão (seca)		Densidade aparente seca
	Valor médio mínimo Mpa[a]	Menor valor isolado Mpa[a]	Média kg/m³
C 12	1,2	1	< 450
C 15	1,5	1,2	< 500
C 25	2,5	2	< 550
C 45	4,5	3,6	< 650

[a] Considerar: 1 MPa = 1 N/mm²= 10 kgf/cm²

Fonte: ABNT NBR 13438

No traço utilizado neste estudo, foram mantidas constantes as dosagens de cimento, e houve pouquíssima variação na dosagem de água. A dosagem de areia foi decrescente do traço 1 para o traço 4. Já a dosagem de espuma foi crescente do traço 1 para o traço 4, pois um outro objetivo destes novos traços foi tabelar uma relação onde a resistência a compressão fosse de fato, inversamente proporcional a dosagem de espuma, confirmando a intuitiva deste estudo. Abaixo (tabela 15), encontram-se os traços com os respectivos resultados de resistência a compressão aos 28 dias:

Tabela 15- Traços utilizados nos BCCE com respectivos resultados de resistência

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Densidade aparente (kg/m^3)	1635	1607	1370	1203
Cimento (kg)	400	400	400	400
Areia seca (kg)	1220	1020	820	820
Água (L)	170,11	166,90	163,36	160,38
Espuma (L)	229,90	304,61	380,37	456,13
Densidade seca (kg/m^3)	1574	1530	1316	1185
Resist. (Mpa) aos 28 dias	12,92	8,89	6,61	4,97

Fonte: elaborado pela autora (2021).

Após analisar a tabela, constatou-se de fato que, modificar o teor de espuma alterou consideravelmente a resistência das amostras; todos os traços atingiram uma resistência a compressão maior do que a estabelecida na norma, entretanto, suas densidades aparentes ultrapassaram o valor normatizado.

Na figura 18 é apresentada as imagens (recortes de amostras cilíndricas de 10x20cm) dos quatro traços de concreto calculados para blocos. Em todas as imagens a aparência de estrutura porosa pode ser observada entre os concretos. É possível também visualizar e identificar defeitos, grãos, minerais, vazios, oclusões, fraturas, trincas e outras estruturas notáveis.

Figura 18- Recortes de amostras cilíndricas (10x20cm) dos quatro traços de BCCE

Figura 18a: traço 1

Figura 18b: traço 2

Figura 18c: traço 3

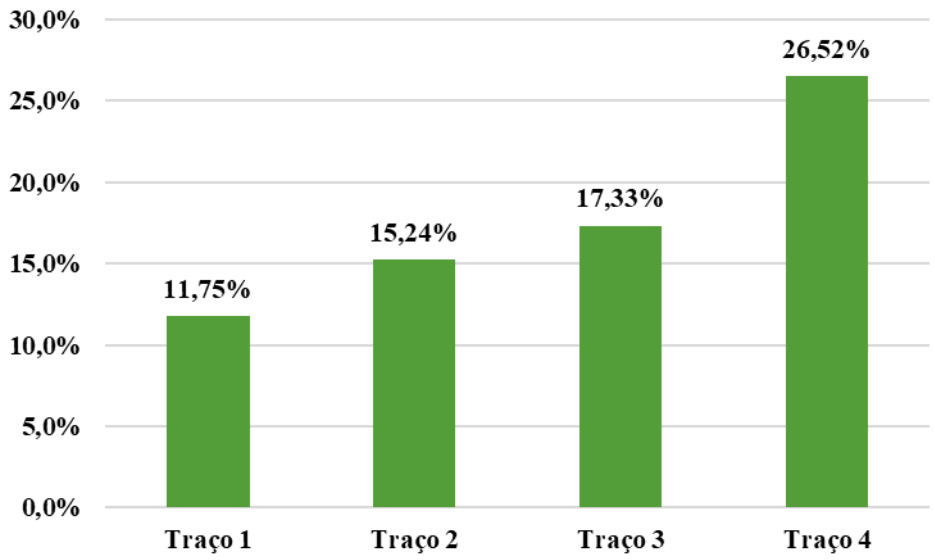
Figura 18d: traço 4

Fonte: elaborado pela autora (2021).

5.5 Absorção de água

Os quatro traços foram submetidos ao ensaio de absorção de água seguindo o item 4.4.2.2 da metodologia. Sabe-se que materiais cimentícios porosos geralmente possuem baixa densidade com alta capacidade de absorção de água, o que também foi identificado neste estudo. A absorção de água para todas as misturas experimentais foi encontrada na faixa de 11,75 – 26,52% conforme é mostrado no gráfico da figura 19:

Figura 19- Gráfico dos resultados do ensaio de absorção de água



Fonte: elaborado pela autora (2021).

Com a diminuição da densidade, a absorção de água aumenta. Essas propriedades executam um papel crítico no desempenho da durabilidade do concreto, quando ele é exposto principalmente a condições ambientais úmidas. Se o concreto tiver maior capacidade de absorção de água, maior será a chance de ser danificado (Sharafutdinov, 2019).

O traço 1 apresentou o teor de absorção de água menos elevado. Percebe-se que quanto maior a massa específica, menor é o teor de absorção. Esse fenômeno é atribuído à baixa porosidade capilar na mistura e às bolhas de espuma não conectadas, pois poros capilares maiores levam a uma maior permeabilidade à água (Wang, 2020).

O peróxido de hidrogênio segundo Shi *et al*., (2020), pode aumentar significativamente a absorção de água da amostra. Para concreto espumado, a absorção de água do corpo de prova aumenta significativamente com a diminuição da densidade. Isso está relacionado com a porosidade capilar, que é positivamente correlacionada. Além disso, o corpo de prova que apresentou a maior absorção de água, é o mesmo que apresenta a menor densidade.

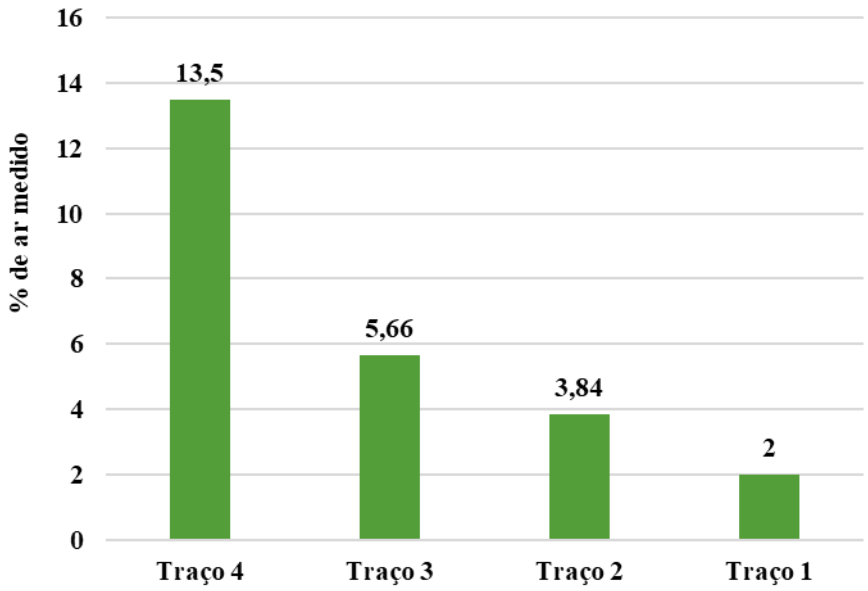
Os resultados encontrados também vão de acordo com Kejkar (2020), onde em seu trabalho encontrou uma faixa de absorção de água entre 11,8-16,2%. Pode-se observar que apenas o traço 4 apresentou um resultado distinto da média encontrada pelo autor. Já comparando aos resultados de Tekin (2020), houve uma distinção maior, pois em seu estudo, o autor encontrou valores de absorção de água entre 10 e 18% das suas amostras. A absorção de água em seu trabalho, diminuiu à medida que as proporções de materiais de partida das amostras aumentaram.

You *et al*., (2020), relacionou a absorção de água com a idade de cura das amostras, onde percebeu que à medida que a idade de cura aumenta, produtos da hidratação serão gerados para preencher os poros, melhorando a capacidade do sistema e reduzindo o número de poros conectados. Piekarczyk (2020), mediu o comportamento de absorção de água de pastas de cimento contendo concentrações variadas (0, 0,2 e 5%) de aditivo onde também observou uma diminuição na taxa de absorção de água com o aumento da maturidade do espécime e da concentração da mistura. Os resultados também mostraram que a composição da mistura desempenha um papel essencial no desempenho geral do concreto.

5.6 Teor de ar

Os quatro traços também foram submetidos a análise do teor de ar seguindo o item 4.4.1.2 da metodologia. Um sistema de vazios estável com tamanho e distribuição de poros homogêneos é a chave para fornecer uma matriz de concreto celular estável que tenha bom comportamento mecânico. Na figura 20 encontra-se o gráfico com os valores do teor de ar medido nas respectivas amostras:

Figura 20. Gráfico dos resultados do ensaio de teor de ar



Fonte: elaborado pela autora (2021).

Este estudo seguiu a mesma ideia de Piekarczyk (2020), onde em seu trabalho também manteve constante as proporções da mistura excerto o percentual de espuma, para estudar o efeito da interação e teor de ar. A água está diretamente ligada ao teor de ar no concreto onde as misturas que possuem moléculas de tensoativos não iônicos fortalecem a ligação na mistura e garantem que o processo de secagem do compósito de cimento seja retardado. O efeito negativo do uso de aditivos é a possibilidade de redução da resistência do concreto em 5 a 8% devido à entrada de ar na mistura, o que também é comprovado neste estudo.

A literatura publicada sobre a investigação do estudo de poros no CCE, relata que a estrutura de poros deste tipo de concreto determina diretamente suas propriedades mecânicas. No caso deste trabalho, a maioria dos vazios de ar vem da decomposição do peróxido de hidrogênio, então a maioria dos poros tem uma forma de esfera regular e apenas um número insignificante de poros é irregular. Um alto teor de peróxido de hidrogênio aumentará significativamente o conteúdo e poros dentro da amostra, e algumas das bolhas de ar entrarão em colapso e se fundirão em poros maiores (Shi *et al*., 2020).

6 CONCLUSÃO

Ao concluir este trabalho percebe-se a complexidade de se formular um material em condições ideais de uso comercial, onde, acerca da natureza do agente tensoativo do aditivo espumígeno, a escolha do produto normalmente ocorre de uma base empírica ou disponibilidade do mercado local. Foi constatado que é possível a utilização do material formulado podendo ser utilizado principalmente por fábricas de pré-moldados para fabricação de blocos de até 12 Mpa de resistência.

Percebeu-se a importância do cimento Portland e dos agregados utilizados neste tipo de concreto, onde o cimento deve apresentar alta resistência inicial, possibilitando a desmoldagem de maneira mais rápida em qualquer caso, e a escolha dos agregados feita com bastante cautela, pois, a classificação de partículas do material sólido não influenciará apenas na fluidez da mistura base, mas também a estabilidade da espuma introduzida quando misturada ao restante do material.

A melhor relação adt/a foi definida tendo por base os resultados de massa específica da espuma, do concreto, e resistência à compressão dos corpos de prova moldados com as espumas teste. A relação adt/a de 1/50, foi a que apresentou maior densidade de espuma (35 kg/m^3), e consequentemente maior resistência (13,80 Mpa), onde constatou-se que quanto maior a densidade da espuma, maior a resistência compressiva do concreto.

Concluiu-se também que ao aumentar a quantidade de espuma, a resistência à compressão diminui, pois à incorporação de ar na espuma resulta na formação de poros na estrutura, diminuindo a densidade e, consequentemente, a resistência à compressão. A densidade foi usada como uma propriedade básica neste estudo, e a resistência à compressão foi o parâmetro escolhido para definir qual composição apresentaria o melhor resultado.

Com relação ao superplastificante, constatou-se que, de fato, com o aumento de sua concentração, a resistência a compressão aumenta. Além de ter atuado como fonte redutora de água no traço (cerca de 9%), o aditivo aumentou a resistência do concreto celular em 10,8% em relação ao concreto sem o aditivo.

Percebeu-se também ao finalizar o estudo, que com a diminuição da densidade a absorção de água aumentou, pois nos testes para blocos, o traço 1 que atingiu a maior resistência, apresentou o teor de absorção de água menor. Percebeu-se que quanto maior a massa específica do concreto, menor é o seu teor

de absorção. Além disso, o corpo de prova que apresentou a maior absorção de água, é o mesmo que apresentou a menor densidade e consequentemente a menor resistência. A relevância deste trabalho está associada principalmente em como foi possível alterar a resistência do concreto, calculando e modificando seu teor de aditivo espumígeno.

7 ESTUDOS FUTUROS

O processo de fabricação do concreto pode ser ainda mais otimizado para obter melhor desempenho, dado que as espumas alcançaram o efeito ideal de estabilidade, pode-se criar um gráfico correlacionando com a melhoria do isolamento térmico (com benefício adicional de maior resistência à compressão e maior durabilidade potencial), e propriedades do isolamento acústico (que estão intimamente relacionadas com a condutividade térmica). A porosidade total, e sua distribuição na matriz, determinará o isolamento acústico do CCE, portanto, uma avaliação mais completa e mais complexa de suas propriedades é considerada necessária em trabalhos futuros antes do aditivo ser usado e comercializado para aplicações na indústria.

Nota-se que este estudo foi a primeira fase para prova deste material tendo por foco as propriedades mecânicas. A ideia de envolver e analisar propriedades termoquímicas em estudos futuros é essencialmente importante para validar todo o conceito. Se torna relevante agregar também a um estudo futuro, uma análise microestrutural detalhada, pois em tal análise será possível observar número, tamanho e como estão organizados os poros dentro da estrutura. Utilizar outros aglomerantes (EPS, resíduos, etc.) também seria interessante para avaliar o comportamento do aditivo.

O estudo na microestrutura do concreto permite o desenvolvimento de adições, proporções de misturas e técnicas de execução, visando minimizar tensões internas, retrações e consequentes fissuras indesejadas, permitindo a inspeção e avaliação da morfologia interna de amostras de concreto. Dessa forma, é possível avaliar forma, quantidade e distribuição de bolhas de ar incorporadas no concreto por meio de aditivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 13438:** Blocos de concreto celular autoclavado- requisitos. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados-Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:** Agregados-Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 47:** Concreto-Determinação do teor de ar em concreto fresco- método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:** Agregado miúdo-Determinação da massa especifica e massa aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:** Concreto-Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12644:** Concreto celular espumoso - Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12645**: Execução de paredes de concreto celular espumoso moldadas no local. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12646:** Execução de paredes de concreto celular espumoso moldadas no local: procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502:** Solos e rochas: terminologia. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778:** Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação da Absorção de Água por Imersão - Índice de Vazios e Massa Especifica. Rio de janeiro, 1987.

BARBAR, Joseph Salem. **Influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados**. 151 f. Tese (Doutorado) – (Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo), Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2016.

BERENGUER, Romildo Alves *et al*. Avaliação comparativa do comportamento mecânico de concretos leves com ar incorporado. **Alconpat**, Recife, v. 8, n. 2, p. 1-16, 30 abr. 2018.

CINTRA, Laura Borges. **Avaliação das propriedades térmicas de concretos com ar incorporado**. 2017. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

DHASINDRAKRISHNA, K *et al*. Effect of yield stress development on the foam-stability of aerated geopolymer concrete. **Cement And Concrete Research.** Hawthorn, p. 106233. 10 dez. 2020.

FALLIANO, Devid *et al*. Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density. **Construction And Building Materials.** Messina, p. 735-749. 20 mar. 2018.

FALLIANO, Devid; RESTUCCIA, Luciana; GUGLIANDOLO, Ernesto. A simple optimized foam generator and a study on peculiar aspects concerning foams and foamed concrete. **Construction And Building Materials.** Messiana, p. 101-121. 25 jan. 2021.

FERREIRA, Oswaldo Aguiar Rocha. **Concreto celular espumoso: aplicado em pré-moldados.** 1987, Anais [...]. São Paulo: Ibracon, 1987.

FONT, Alba *et al.* Salt slag recycled by-products in high insulation alternative environmentally friendly cellular concrete manufacturing. **Construction and Building Materials**, v. 231, p. 114-117, 2020.

GE, Zhi *et al.* Use of green calcium sulphoaluminate cement to prepare foamed concrete for road embankment: A feasibility study. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117791, 2020.

KEJKAR, Rupali; MADHUKAR, Amit; WANJARI, Swapnil. Development of sustainable non-aerated light-weight geopolymer block (NAG) for commercial use. **Materials Today: Proceedings.** S.I, p. 1079-1085. 09 out. 2020.

LEITE, Carolina Gonçalves *et al.* **Estudo de dosagem e avaliação de concreto celular espumoso com adição de cerâmica e cinza da biomassa de eucalipto com fins estruturais**. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Teófilo Otoni, 2019.

LERMEN, Richard Thomas et al. Effect of Additives, Cement Type, and Foam Amount on the Properties of Foamed Concrete Developed with Civil Construction Waste. Applied Sciences, v. 9, n. 15, p. 2998, **2019.**

LIMA, Caio Ivson Vasconcelos *et al*. Concreto e suas inovações. **Caderno de Graduação**: Ciências exatas e tecnológicas, Maceió, v. 14, n. 1, p. 31-40, 05 set. 2014.

MANSUR, Alexandra; NASCIMENTO, Otavio; MANSUR, Herman. Avaliação do teor

de ar incorporado em argamassas modificadas com poli (Álcool vinílico). In: 9º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2007, Paraíba. **Anais [...].** Minas Gerais: Dep. Fumec, 2007. p. 1-9.

NASCIMENTO, Felipe Bomfim Cavalcante do. Concreto reforçado com fibras de aço. **Caderno de Graduação**: Ciências exatas e tecnológicas, Alagoas, v. 3, n. 1, p. 46-56, 04 nov. 2015.

NEVILLE, Adam. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 912 p. Tradução de Ruy Alberto Cremonini.

PACHLA, Eduardo Cesar. **Desempenho térmico-acústico-mecânico-durabilidade de compósitos de matriz cimentícia com reduzida massa específica reforçados por casca e palha do arroz.** 2017. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.

PEDRO, Rudimar. **Produção de blocos de concreto celular usando espumígeno de ácidos graxos de coco e resíduos de pedras roladas de ágata.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - UFRGS). Porto Alegre, 2017.

PEDRO, Rudimar *et al.* Production of aerated foamed concrete with industrial waste from the gems and jewels sector of Rio Grande do Sul-brazil. **Applied Sciences**, Rio Grande do Sul, v. 7, n. 10, 26 set. 2017.

PEIXOTO, Jéssica Batista *et al*. Caracterização das propriedades mecãnicas de concreto celular produzido em Palmas-TO. In: 73° CONGRESSO ANUAL DA ABM, 73, 2018, São Paulo. **Proceedings [...].** Palmas: 2018. v. 13, p. 1-9.

PIEKARCZYK, Beata. The influence of superplasticizer and shrinkage reducing admixture type on air-content and related properties of HPSCC. In: MATEC WEB OF CONFERENCES, 322, 2020, Gliwice. **Anais [...].** [S.L.]: Edb Sciences, 2020. p. 2-10.

QUEIROZ, Fábio Conrado de; CASTRO, Nuria Fernandes. Concreto celular com Ecofiler de resíduos de mármore e granito. In: Jornada do programa de capacitação interna do CETEM, 8, 2019, Rio de Janeiro. **Anais [...].** Rio de Janeiro: Cetem/McTic, 2019. p. 1-8.

ROSSIGNOLO, João Adriano. Concreto leve estrutural: influência da argila expandida na microestrutura da zona de transição pasta/agregado. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 119-127, 17 nov. 2009.

SCOBAR, Renan Luna. **Concreto leve estrutural**: substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida. 2016. 48 f. TCC (Bacharelado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

SHARAFUTDINOV, Eldar *et al.* Frost resistance number to assess freeze and thaw resistance of non-autoclaved aerated concretes containing ground granulated blast-furnace slag and micro-silica. **Materials**, [S.l] v. 12, n. 24, p. 4151, 11 dez. 2019.

SHI, Jinyan *et al.* Preparation and characterization of lightweight aggregate foamed geopolymer concretes aerated using hydrogen peroxide. **Construction and Building Materials**, [S.l] v. 256, p. 119442, 2020.

SILVA, Cledson André de Oliveira. **Estudo de dosagem e avaliação de concreto celular com fins estruturais**. 2015. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

SILVA, Cledson André de Oliveira *et al*. Influência do aditivo espumígeno na dosagem e nas propriedades do concreto celular aerado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, p. 1-13, 5 mar. 2018.

SILVA, Mark Anderson Moreira e. **Dosagem experimental de concreto autoadensável com adição de pérolas de poliestireno expandido.** 2018. 135 f. Dissertação (Mestrado). Engenharia de Materiais, IFPI. Teresina - PI, 2018.

SOUZA, Tacila Bertulino de. **Produção de concreto celular utilizando escória álcali ativada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco: Recife - PE, 2020.

TEKIN, Ilker et al. Properties of lightweight concrete blocks with waste zeolitic tuff. Materials Science, v. 26, n. 4, p. 463-470, **2020.**

WANG, Su; LIM, Jacob Lok Guan; TAN, Kang Hai. Performance of lightweight cementitious composite incorporating carbon nanofibers. **Cement and Concrete Composites**, [S.l] v. 109, p. 103561, 2020.

WU, Rendi *et al*. Utilization of the circulating fluidized bed combustion ash in autoclaved aerated concrete: effect of superplasticizer. **Construction And Building Materials**, Wuhan, v. 237, p. 117-124, 20 mar. 2020.

YANG, Feihua *et al* Preparation and performance of energy-saving and environment-friendly autoclaved aerated concrete prepared by quartz tailings sand. **J New Mat Electr Sys**, [S.l] v. 22, n. 3, p. 149-154, 30 dez. 2019.

YOU, Junjie *et al*. Effect of Curing Age on Material Properties of Autoclaved Light-Weight Concrete Wallboard. In: IOP CONF. SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE, 20, 2020, China. **Anais [...].** [S.L.]: Ltd, 2020. p. 32-42.

ZELAYA, Percy Enzo Calle. **Análisis y diagnóstico del polvo de aluminio sobre el asentamiento en un concreto ligero, en la provincia de Huaura – 2018**. 2018. 79 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Facultad de Ingenieria Civil, Huaura, 2018.