



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**TACILA BERTULINO DE SOUZA**

**PRODUÇÃO DE CONCRETO CELULAR UTILIZANDO ESCÓRIA ÁLCALI-  
ATIVADA**

Recife

2020

**TACILA BERTULINO DE SOUZA**

**PRODUÇÃO DE CONCRETO CELULAR UTILIZANDO ESCÓRIA ÁLCALI-  
ATIVADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto.

Recife  
2020

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S729p Souza, Tacila Bertulino de  
Produção de concreto celular utilizando escória álcali- ativada / Tacila  
Bertulino de Souza. – 2020.  
119 f.: il., grafs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2020.  
Inclui referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil 2. Concreto celular de espuma. 3. Cimento de  
escória álcali-ativada. 4. Poliestireno expandido. I. Melo Neto, Antônio  
Acácio de (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2020-217

**TACILA BERTULINO DE SOUZA**

**PRODUÇÃO DE CONCRETO CELULAR UTILIZANDO ESCÓRIA ÁLCALI-  
ATIVADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 21/07/2020.

**BANCA EXAMINADORA**

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Berenice Martins Toralles (Examinadora externa)  
Universidade Estadual de Londrina

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. João Adriano Rossignolo (Examinador externo)  
Universidade de São Paulo

*A Joaquim, Deus Estabeleceu.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida e por ter me dado força para superar todas as dificuldades que surgiram ao longo do curso de Mestrado.

Aos meus pais. Em especial a minha mãe, Maria Gorete, pelo apoio e amor durante toda a minha vida, ensinando grandes valores.

Agradeço a Danilo Nunes, o companheirismo e por tornar mais leve a trajetória até aqui.

Agradeço ao meu orientador, Antônio Acácio de Melo Neto, pelo aprendizado contínuo e presente ao longo desse ano e suas valiosas contribuições. E a Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Fernanda Wanderley, minha orientadora desde os tempos de iniciação científica.

Aos demais professores do PPGEC/UFPE/CTG pelos ensinamentos repassados, essenciais para execução deste trabalho. Em especial ao professor Paulo Régis pelos bons conselhos dados e pelo entusiasmo.

Aos amigos de laboratório, principalmente: Larissa Barbosa, Nilvan Teixeira, Victor Estolano e Priscilla Basto, agradeço imensamente a todos pelo auxílio prestado, pela generosidade demonstrada e pela convivência.

Ao técnico do Laboratório de Materiais e Estruturas (LABME), João Cazuza, por toda disponibilidade e auxílio na realização dos ensaios.

Ao Laboratório de Química (LQ) do Centro Acadêmico do Agreste (CAA-UFPE), em particular à Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Érika Pinto Marinho e ao químico Agilson Nascimento.

Agradeço a CIMENTO MIZU S/A, MC-BAUCHEMIE, MF ARTEFATOS, PERNAMBUCO QUÍMICA S/A pela doação de materiais e colaboração com o desenvolvimento desta pesquisa.

A CAPES, pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

Registro aqui meu sincero agradecimento a todos aqueles que direta ou indiretamente, possibilitaram a realização e conclusão desta pesquisa.

## RESUMO

Pertencente à classe mais ampla de concreto leve, o concreto celular destaca-se entre os concretos especiais por apresentar estrutura porosa através da incorporação de espuma à matriz cimentícia. A tendência das bolhas de coalescer e colapsar durante a preparação traz alguns desafios na produção e controle nas propriedades das estruturas celulares. Engajada em poupar o estoque de recursos naturais, a escória de alto forno álcali-ativada tem se tornado uma alternativa sustentável ao cimento Portland tradicional. Visando mitigar o volume de resíduos gerados pela indústria siderúrgica, diminuir a emissão de gases atmosféricos e reduzir a extração de matéria-prima na produção de cimento, essa pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento do concreto celular utilizando a escória de alto forno álcali-ativada como aglomerante, para fins não estruturais. Outro ponto importante desta pesquisa é em relação ao uso do agregado ultraleve de poliestireno expandido (EPS) como fonte redutora de massa específica. Para comparação, foram confeccionadas amostras com cimento Portland utilizando o método de dosagem proposto por Ferreira de concretos celulares espumosos. Nestes concretos, avaliaram-se propriedades no estado plástico, realizaram-se ensaios de resistência à compressão e velocidade de propagação de onda ultrassônica com 3, 7 e 28 dias e, além destes ensaios, aos 28 dias foram feitos os ensaios de absorção, análise termogravimétrica e difração de raios X, sob três fatores água/aglomerante: 0,38, 0,42 e 0,46. Os resultados mostraram massa específica aparente abaixo de  $800 \text{ kg/m}^3$  e resistência mecânica de até 3 MPa. A substituição do poliestireno expandido promoveu uma média de redução de massa sobre volume em torno de 30%. De forma geral, o aglomerante de escória de alto forno alcali-ativado é uma alternativa viável e vantajosa quando aplicado em concreto celular do ponto de vista da indústria da construção civil e ambiental com uma produção ecologicamente correta.

Palavras-chave: Concreto celular de espuma. Cimento de escória álcali-ativada. Poliestireno expandido.

## ABSTRACT

Belonging to the broadest class of lightweight concrete, cellular concrete stands out among special concretes for having a porous structure through the incorporation of foam into the cementitious matrix. The tendency of bubbles to coalesce and collapse during preparation poses some challenges in producing and controlling the properties of cellular structures. Engaged in saving the stock of natural resources, alkali-activated blast furnace slag has become a sustainable alternative to traditional Portland cement. Aiming to mitigate the volume of waste generated by the steel industry, decrease the emission of atmospheric gases and reduce the extraction of raw material in cement production, this research aims to evaluate the behavior of cellular concrete using alkali-activated blast furnace slag as a binder for non-structural purposes. Another important point of this research is in relation to the use of the ultralight expanded polystyrene (EPS) aggregate as a reducing source of specific mass. For comparison, samples were made with Portland cement using the dosing method proposed by Ferreira for foamy cellular concretes. In these concretes, properties in the plastic state were evaluated, tests of resistance to compression and speed of ultrasonic wave propagation were carried out with 3, 7 and 28 days and, in addition to these tests, at 28 days the absorption tests, analysis thermogravimetric and X-ray diffraction, under three water / binder factors: 0.38, 0.42 and 0.46. The results showed an apparent specific mass below 800 kg/m<sup>3</sup> and mechanical strength of up to 3 MPa. The replacement of expanded polystyrene promoted an average reduction in mass over volume of around 30%. In general, the alkali-activated blast furnace slag binder is a viable and advantageous alternative when applied to aerated concrete from the point of view of the construction and environmental industry with an ecologically correct production.

Keywords: Foam cellular concrete. Alkali-activated slag cement. Expanded polystyrene.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipo de concreto leve: a) com agregado leve; b) celular; c) sem finos	21
Figura 2 - Linha do tempo do concreto celular.....	25
Figura 3 - Classificação dos concretos celulares.....	28
Figura 4 - Tipos de concretos celular espumoso.....	32
Figura 5 - Variação da massa específica da espuma com a concentração da solução surfactante.....	42
Figura 6 - Difratoograma da escória anidra.....	59
Figura 7 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	60
Figura 8 - Distribuição granulométrica do EPS (ABNT NBR NM 248:2003).....	61
Figura 9 - Ensaio de massa específica do EPS utilizando picnômetro de 500cm <sup>3</sup>	62
Figura 10 - Produção e aspecto visual da espuma pré-formada.....	63
Figura 11 - Haste metálica utilizada na confecção da espuma pré-formada.....	64
Figura 12 - Ensaio de índice de consistência com relação a/agl 0,46: a) escória álcali-ativada; b) cimento Portland.....	69
Figura 13 - Moldagem <i>in loco</i> do concreto celular de escória álcali-ativada.....	72
Figura 14 - Ensaio de massa específica aparente com concreto celular de escória: a) pesagem do recipiente; b) preenchimento do recipiente..	73
Figura 15 - Linhas pontilhadas mostrando as posições de medição a) dos diâmetros e b) das alturas do cilindro.....	74
Figura 16 - Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão.....	75
Figura 17 - Preparo da base para o ensaio de resistência à compressão utilizando pratos metálicos com neoprene.....	76
Figura 18 - Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica.....	77
Figura 19 - Estufa a 60°C com corpo de prova de concreto celular com EPS.....	77
Figura 20 - Container de nitrogênio utilizado para interromper a hidratação.....	79
Figura 21 - Equipamento utilizado para liofilização.....	79
Figura 22 - Equipamento para análise de difração de raio-X.....	80
Figura 23 - Preparação da amostra de escória para análise do difratômetro.....	80
Figura 24 - Equipamento utilizado para análise termogravimétrica.....	81
Figura 15 - Medição do índice de consistência do concreto celular produzido com EPS.....	83

Figura 26 - Relação entre a massa específica fresca e a massa específica seca	85
Figura 27 - Representação visual da amostra CCP1 após a desmoldagem.....	86
Figura 28 - Resistência à compressão com 3,7 e 28 dias.....	87
Figura 29 - Correlação linear entre a resistência à compressão e a massa específica no estado seco aos 28 dias de idade.....	88
Figura 30 - Resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias para amostras confeccionadas com areia e dois aglomerantes, cimento Portland e escória.....	89
Figura 31 - Resistência à compressão com relação a massa específica aparente no estado fresco a) escória álcali-ativada e b) cimento Portland.....	90
Figura 32 - Resistência a compressão e teor de ar dos concretos celulares.....	92
Figura 33 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica em concretos celulares.....	93
Figura 34 - Correlação entre a velocidade de pulso ultrassônico com a (a) resistência à compressão e b) absorção aos 28 dias de idade.....	94
Figura 35 - Absorção por imersão e resistência à compressão das amostras confeccionadas com areia.....	95
Figura 36 - Absorção por imersão e resistência à compressão das amostras confeccionadas com EPS.....	95
Figura 37 - Difratoograma das pastas de cimento Portland aos 28 dias com três relações a/agl.....	99
Figura 38 - Efeito do teor de água na intensidade do pico principal de C-S-H no ângulo $2\theta = 32,16$ .....	99
Figura 39 - Difratoograma das pastas de cimento Portland com espuma aos 28 dias com três relações a/agl.....	100
Figura 40 - Efeito da espuma na intensidade do pico principal de calcita no ângulo $2\theta = 29,47$ .....	101
Figura 41 - Difratoograma das pastas de escória ativada com silicato de sódio aos 28 dias com três relações a/agl a) sem espuma b) com espuma.....	102
Figura 42 - Perda de massa (TG/%) e derivada de perda de massa (DTG) da pasta de cimento Portland com e sem espuma aos 28 dias de idade e três relações a/agl.....	103

Figura 43 - Perda de massa (TG/%) e derivada de perda de massa (DTG) da pasta de cimento de escória ativada com silicato de sódio com e sem espuma aos 28 dias de idade e três relações a/agl..... 104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de referência da massa específica dos concretos celulares.	24
Tabela 2 - Principais agentes de aeração química.....	29
Tabela 3 - Classificação dos agentes tensoativos sintéticos.....	30
Tabela 4 - Dados referente a dosagem experimental.....	35
Tabela 5 - Cálculo e combinação dos componentes.....	36
Tabela 6 - Correções da água no método.....	36
Tabela 7 - Dosagem final.....	36
Tabela 8 - Características que influenciam a reatividade da escória.....	49
Tabela 9 - Características do concreto celular de escória álcali-ativada.....	53
Tabela 10 - Caracterização química do cimento Portland CPV –ARI.....	58
Tabela 11 - Caracterização física e mecânica do cimento Portland CPV – ARI...	58
Tabela 12 - Caracterização físico-química da escória granulada de alto forno....	59
Tabela 13 - Caracterização física da areia.....	60
Tabela 14 - Caracterização física do EPS.....	62
Tabela 15 - Características físico-química do aditivo espumígeno.....	63
Tabela 16 - Massa específica aparente da espuma na proporção 1:25.....	63
Tabela 17 - Características técnicas do aditivo superplastificante.....	64
Tabela 18 - Características técnicas do silicato de sódio.....	65
Tabela 19 - Traço utilizado na dosagem do CCE.....	67
Tabela 20 - Compatibilização do superplastificante com as argamassas de cimento de relação a/agl 0,38; 0,42 e 0,46.....	68
Tabela 21 - Variáveis investigadas no programa experimental.....	70
Tabela 22 - Ensaio realizados no estado endurecido.....	75
Tabela 23 - Composição das pastas investigadas no programa experimental....	78
Tabela 24 - Características das misturas dos concretos celulares.....	82
Tabela 25 - Resistência à compressão dos traços do concreto celular.....	86
Tabela 26 - Custos unitários dos materiais utilizados para a dosagem do concreto celular na região metropolitana de Recife-PE.....	97
Tabela 27 - Custo do m <sup>3</sup> do concreto celular e custo/MPa dos traços de concreto celular.....	97

Tabela 28 - Resistência à compressão por amostra aos 3,7 e 28 nos concretos CCA1, CCA2, CCA3, CEA1, CEA2 e CEA3.....	116
Tabela 29 - Resistência à compressão por amostra aos 3,7 e 28 nos concretos CCP2, CCP3 CEP1, CEP2 e CEP3.....	116
Tabela 30 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica por amostra aos 3,7 e 28 nos concretos CCA1, CCA2, CCA3, CEA1, CEA2 e CEA3.....	117
Tabela 31 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica por amostra aos 3,7 e 28 nos concretos CCP2, CCP3 CEP1, CEP2 e CEP3.....	117
Tabela 32 - Composição Unitária dos materiais utilizados para produção dos concretos celulares na região metropolitana de Recife-PE.....	118
Tabela 33 - Consumo dos materiais para a produção do m <sup>3</sup> dos concretos celulares.....	119
Tabela 34 - Composição do Custo/m <sup>3</sup> dos concretos celulares produzidos.....	119

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/agl	Água/aglomerante
AA	Concreto ativado alcalinamente
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ACC	Auto clavado
ASAAC	Concreto aerado auto clavado ativado por meio de álcali
ASTM	American society for testing and materials
CCE	Concreto celular
CCEAA	Concreto celular de escória álcali-ativado
CCV	Concreto convencional
cmc	Concentração micelar crítica
CO <sub>2</sub>	Gás carbônico
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências
EAF	Escória de alto forno
EPS	Poliestireno expandido
FRX	Fluorescência de Raio-X
HCl	Ácido clorídrico
NAAC	Não auto clavado
NaHCO <sub>3</sub>	Bicarbonato de sódio
NBR	Norma brasileira
NEG-Labise	Laboratório de Isótopos Estáveis do Núcleo de Estudos Geoquímicos
PFA	Cinza volante
PP	Polipropileno
PVA	Poliacetato de vinila
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfato de sódio
SNIC	Sindicato nacional da indústria do cimento
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVAS .....	17
1.2	OBJETIVOS .....	19
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	21
2.1	CONCRETO CELULAR .....	21
<b>2.1.1</b>	<b>Desenvolvimento histórico</b> .....	25
<b>2.1.2</b>	<b>Classificação</b> .....	27
2.1.2.1	Método de formação de poros .....	27
2.1.2.1.1	<i>Aeração química</i> .....	28
2.1.2.1.2	<i>Agente espumígeno</i> .....	29
2.1.2.2	Tipo de pasta .....	32
2.1.2.3	Método de cura .....	32
<b>2.1.3</b>	<b>Dosagem e proporções</b> .....	34
2.1.3.1	Aglomerante .....	37
2.1.3.2	Agregado .....	40
2.1.3.3	Espuma pré-formada .....	40
<b>2.1.4</b>	<b>Porosidade e resistência à compressão</b> .....	44
2.2	POLIESTIRENO EXPANDIDO .....	45
<b>2.2.1</b>	<b>Massa Específica</b> .....	46
<b>2.2.2</b>	<b>Porosidade</b> .....	47
<b>2.2.3</b>	<b>Absorção</b> .....	48
2.3	CIMENTO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO ÁLCALI-ATIVADA .....	48
<b>2.3.1</b>	<b>Produtos hidratados</b> .....	51
<b>2.3.2</b>	<b>Experiências com concreto celular utilizando escória álcali-ativada (CCEAA)</b> .....	51
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	56
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	56
3.2	MATERIAIS .....	56
<b>3.2.1</b>	<b>Cimento Portland</b> .....	58
<b>3.2.2</b>	<b>Escória de alto forno</b> .....	59
<b>3.2.3</b>	<b>Areia</b> .....	60

<b>3.2.4</b>	<b>Poliestireno expandido (EPS)</b> .....	60
<b>3.2.5</b>	<b>Espuma</b> .....	62
<b>3.2.6</b>	<b>Aditivo superplastificante</b> .....	64
<b>3.2.7</b>	<b>Silicato de sódio</b> .....	65
<b>3.3</b>	<b>PROCESSO DE PRODUÇÃO</b> .....	65
<b>3.3.1</b>	<b>Método de dosagem</b> .....	65
3.3.1.1	Dosagem Inicial.....	66
3.3.1.2	Ajuste de dosagens.....	67
3.3.1.3	Dosagem final.....	69
<b>3.3.2</b>	<b>Produção</b> .....	70
<b>3.3.3</b>	<b>Moldagem e cura</b> .....	71
<b>3.4</b>	<b>PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO</b> .....	72
<b>3.4.1</b>	<b>Massa específica aparente e teor de ar</b> .....	73
<b>3.4.2</b>	<b>Espalhamento pelo método do cone de Abrams</b> .....	73
<b>3.5</b>	<b>PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO</b> .....	74
<b>3.5.1</b>	<b>Resistencia à compressão</b> .....	75
<b>3.5.2</b>	<b>Velocidade de propagação de onda ultrassônica</b> .....	76
<b>3.5.3</b>	<b>Absorção por imersão e massa específica aparente seca</b> .....	77
<b>3.6</b>	<b>ANÁLISE DA PASTA</b> .....	78
<b>3.6.1</b>	<b>Difração de Raio X</b> .....	80
<b>3.6.2</b>	<b>Termogravimetria</b> .....	81
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	82
<b>4.1</b>	<b>PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO</b> .....	82
<b>4.1.1</b>	<b>Espalhamento pelo método do cone de Abrams</b> .....	82
<b>4.1.2</b>	<b>Massa específica aparente</b> .....	83
4.1.2.1	Massa específica seca.....	84
<b>4.2</b>	<b>PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO</b> .....	85
<b>4.2.1</b>	<b>Resistência à compressão</b> .....	86
4.2.1.1	Influência do aglomerante.....	88
4.2.1.2	Influência do agregado.....	90
4.2.1.3	Influência do fator água/aglomerante e teor de ar.....	91
<b>4.2.2</b>	<b>Velocidade de propagação de onda ultrassônica</b> .....	92
<b>4.2.3</b>	<b>Absorção por imersão</b> .....	94
<b>4.2.4</b>	<b>Análise do Custo-Benefício</b> .....	96

4.3	ANÁLISE DA PASTA.....	98
4.3.1	Difração de Raios X.....	98
4.3.2	Termogravimetria .....	102
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	105
5.1	CONCLUSÕES .....	105
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	107
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	108
	<b>APÊNDICE A – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS CELULARES</b> .....	116
	<b>APÊNDICE B – VELOCIDADE DE ONDA ULTRASSÔNICA DOS CONCRETOS CELULARES</b> .....	117
	<b>APÊNDICE C– COMPOSIÇÃO DO CUSTO DOS CONCRETOS CELULARES</b> .....	118

## 1 INTRODUÇÃO

Nesta seção, serão descritos os contextos, as justificativas, os objetivos e a estrutura do trabalho.

### 1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVAS

Este estudo está inserido na linha de pesquisa de novos materiais para a construção civil do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, que enfatiza o reaproveitamento de resíduos e a utilização de subprodutos na construção civil. O material estudado é a escória de alto forno (EAF), subproduto da indústria siderúrgica, viabilizando sua aplicação como um aglomerante hidráulico. Este trabalho tem como objetivo produzir um concreto celular (CCE)<sup>1</sup>, utilizando a escória álcali-ativada.

O cimento Portland é o principal material da construção civil utilizado no mundo. Somente no Brasil, a produção de cimento totalizou 54,5 milhões de toneladas em 2019 (SNIC, 2019). No entanto, sua grande produção global atribui à indústria cimenteira a responsabilidade por 7% de todo o CO<sub>2</sub> lançado na atmosfera (SANTOS, 2019), despertando na comunidade científica mundial a preocupação em reduzir a emissão de gases do efeito estufa e a preservação ambiental (FREIRE, 2016).

Neste cenário, a incorporação do resíduo de ferro gusa como ligante alternativo ao cimento Portland é interessante, uma vez que minimiza a emissão de CO<sub>2</sub> na ordem de 0,8 a 0,9 ton-CO<sub>2</sub> por toneladas de cimento. Desde o final dos anos 80, o concreto ativado alcalinamente (AA), sem cimento Portland, vêm ganhando visibilidade devido ao ganho de resistência, exibindo uma série de benefícios econômicos e de durabilidade (YANG *et al.*, 2014).

Para cada 1 tonelada de aço bruto produzida no Brasil, são gerados 255 kg de escória, o que está abaixo da média mundial, de cerca de 400 kg por tonelada (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2018). Em 2018, a produção de ferro gusa alcançou 28 milhões de toneladas, o que gerou uma produção de escória na faixa de 8,8 milhões de toneladas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2019). A indústria cimenteira é a grande consumidora do EAF, aplicando o resíduo na

---

<sup>1</sup> Neste trabalho, o concreto celular é do tipo que incorpora vazios, através de espuma pré-formada

fabricação dos cimentos CP-II E e CP-III, esse último pode receber até 75% de escória na sua composição (ABNT NBR 16697:2018). Embora, 98% da EAF geradas pelas siderúrgicas, sejam compradas pela indústria do cimento, o resíduo é utilizado em uma escala menor do que sua produção (MELO NETO, 2008; ARAÚJO JÚNIOR, 2019). Desse modo, é necessário desenvolver soluções para este problema, sendo o aglomerante reciclado uma das alternativas a serem estudadas.

Em vista disso, pesquisas foram e vêm sendo realizadas para o aproveitamento da escória de alto forno álcali-ativada em concretos celulares como aglomerante, sem a utilização de clínquer (ESMAILY; NURANIAN, 2012; YANG *et al.*, 2014; YUAN, *et al.* 2017; SAHIN; ERDOGAN; ÖZGUR, 2018; MASTALI *et al.*, 2018). Também conhecido como concreto espuma, concreto expandido ou concreto aerado, o concreto celular (CCE) é formado pela incorporação de vazios na pasta do concreto.

O CCE apresenta características únicas, por ser um excelente material de isolamento termoacústico, por suportar altas deformações e apresentar baixa massa específica. Pode ser aplicado para preenchimento e restauração de peças, dispensando compactação e possui capacidade de fluir sobre o próprio peso, um concreto autonivelante (BRADY; WATTS; JONES, 2001).

Suas propriedades físicas proporcionam boa proteção acústica (KIM; JEON; LEE, 2012), melhor isolamento térmico (KUZIELOVÁ; PACH; PALOU, 2016; NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000), especialmente, quando baixas massas específicas são empregadas; boa resistência ao fogo em relação ao concreto comum, onde a presença de agregado graúdo leva a taxas diferenciais de expansão (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000) e melhor trabalhabilidade (FALLIANO *et al.*, 2018). Apesar de sua baixa resistência à compressão, que diminui, quase proporcionalmente, com a diminuição da massa específica (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000; FALLIANO *et al.*, 2018), é possível obter um desempenho de resistência razoavelmente aceitável, através da modificação da matriz cimentícia.

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 (FALLIANO *et al.*, 2018; BRADY; WATTS; JONES, 2001; NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000). 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 coalescência 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 (BRADY; WATTS; JONES, 2001).

Outro ponto importante desta dissertação é em relação ao uso do poliestireno expandido (EPS). Este agregado leve possui potencial para substituir o agregado miúdo, pois apresenta forma de espuma rígida, composta por microcélulas fechadas, contendo vazios de ar no seu interior, inodoro, não poluente e fisicamente estável (ABRAPEX, 2006).

Segundo a Plastivida (2013), responsável pelos dados do setor, detectou no seu último levantamento que o Brasil reaproveitou, em 2012, cerca de 13.570 toneladas de EPS, no entanto, esse valor representa apenas 34,5% das 39.340 toneladas consumidas. Dentro da construção civil, o EPS pode apresentar resultados satisfatórios, quando utilizado no concreto celular de cimento de escória álcali-ativado (CCEAA), unindo sustentabilidade e inovação; visto que, não há relatos desse material no mercado ou pesquisas acadêmicas.

Portanto, este trabalho propôs confeccionar, com escória de alto forno álcali-ativada, uma alternativa para a produção de concretos celulares confeccionados com cimento Portland, além de investigar a incorporação de EPS na mistura.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o comportamento do concreto celular utilizando escória de alto forno álcali-ativada como aglomerante, para fins não estruturais.

Como objetivos específicos, podem ser observados:

- a) Identificar as peculiaridades no processo de produção dos concretos celulares, produzidos com agente espumígeno e três fatores água/aglomerante;
- b) Avaliar o efeito da substituição do agregado miúdo por poliestireno expandido (EPS) no concreto celular;
- c) Quantificar o custo econômico dos diferentes concretos celulares produzidos.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 1 aborda a introdução ao tema, onde a dissertação tem seu embasamento contextualizado e justificado. Em seguida, são expostos os objetivos dessa pesquisa.

O Capítulo 2 está dividido em três partes, e apresenta uma revisão bibliográfica. A primeira parte foi elaborada a partir da coleta de estudos já realizados, com o objetivo de compreender o comportamento do concreto celular sobre aspectos de características físicas, mecânicas e de aplicação do material. A segunda parte descreve os termos, conceitos e propriedades do EPS. A terceira parte, sobre escórias, ativadores alcalinos e a produção de aglomerante pela mistura destes, além de avaliar resultados de estudos, já realizados, e suas particularidades.

O Capítulo 3 detalha o programa experimental, no qual são descritas suas variáveis e etapas investigadas. Contempla o planejamento experimental, a escolha e proporção dos materiais, seguida da metodologia de dosagem e preparação das amostras, e os procedimentos de ensaios, devidamente justificado por normalização ou embasamento experimental.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos experimentalmente. E, também, analisa o comportamento físico, mecânico e microestrutural para as diferentes variáveis empregadas no desenvolvimento do concreto celular.

Finalizando, o Capítulo 5 contempla as considerações finais do trabalho, decorrentes dos resultados abordados no capítulo anterior, e sugestões para novas pesquisas sobre o assunto.

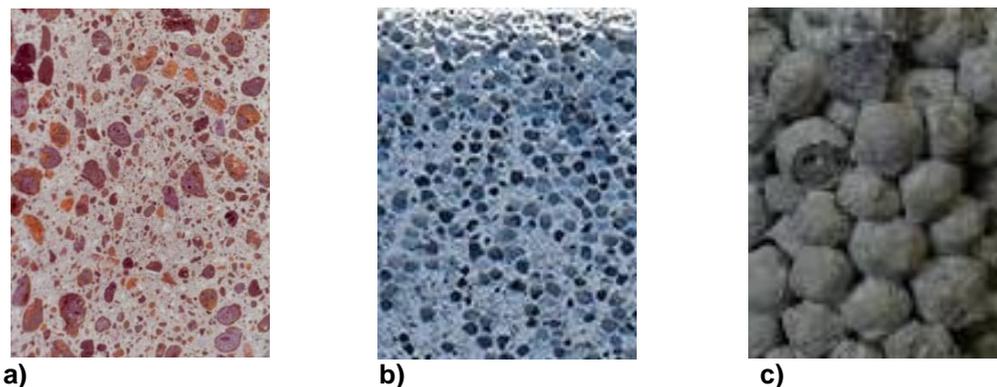
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir, será apresentado o estado da arte sobre o tema referente à pesquisa, e todo embasamento para o seu desenvolvimento.

### 2.1 CONCRETO CELULAR

O concreto celular está inserido na classe dos concretos leves, onde são caracterizados através da redução da massa específica (FALLIANO *et al.*, 2018). Segundo Rossignolo (2009), o concreto leve pode ser classificado em concreto com agregados leves, concreto celular e concreto sem finos, assim observados na Figura 1.

Figura 2 – Tipos de concreto leve a) com agregado leve; b) celular; c) sem finos.



Fonte: Adaptado de Rossignolo (2009).

Para Maycá, Cremonini e Recena (2008), complementado por Silva (2015) e aceita por vários autores, a classificação do concreto leve pode ser simplificada em:

- a) Concretos com agregados leves: Utilização do agregado leve, como a argila expandida, vermiculita, perlita, pedra pomes e outros, em substituição parcial ou total aos agregados tradicionais. Dependendo do tipo de agregado a ser empregado, grúdo, miúdo ou combinação entre eles, a massa específica pode variar entre  $950 \text{ kg/m}^3$  e  $2000 \text{ kg/m}^3$  (Figura 1 - a).
- b) Concretos Celulares, expandidos ou aerados: Originados da incorporação de vazios à pasta, seja na forma de gás ou espuma. Considerados extremamente leves, possuem massa específica nos limites de  $300 \text{ kg/m}^3$  e  $1900 \text{ kg/m}^3$  (Figura 1 - b).

- c) Concretos sem finos: Ausência do agregado miúdo, sua resistência está relacionada diretamente com a resistência do agregado e ao consumo de cimento. Aplicado na construção de estruturas de drenagens, sub-base e painéis divisórios de edifícios de concreto armado. Considerados moderadamente leves, com massa específica entre  $700 \text{ kg/m}^3$  e  $1800 \text{ kg/m}^3$  (Figura 1 - c).

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) define concreto celular como um produto leve, composto por pastas de cimento Portland, cimento pozolânico, cal pozolânica ou cal-sílica, ou até misturas desses ingredientes, possui uma estrutura de vazios homogêneos, obtido através de produtos químicos ou agentes espumantes (ASTM C796, 2012). A norma, ainda, acrescenta a omissão do agregado graúdo, onde usualmente não é utilizado.

No Brasil, existem, atualmente, cinco normas voltadas à regularização e especificação do concreto celular, através da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Sendo duas, direcionadas para blocos de concreto celular autoclavado: NBR 13440:2013 e NBR 13438:2013; e três, na orientação de parede de concreto celular moldada no local: NBR 12644:1994, NBR 12645:1992 e NBR 12646:1992.

As exigências para execução, controle de qualidade e recebimento das paredes de concreto celular são fixadas através da NBR 12646 (ABNT, 1992). A mesma define CCE como um concreto leve, resultante da introdução de bolhas de ar na argamassa. Tais bolhas de ar podem ser obtidas na forma de uma espuma pré-formada, podendo ser geradas por um aditivo, denominado agente espumante, que utiliza a ação mecânica de um misturador. O produto final desse concreto deve apresentar esferas de ar milimétricas, estáveis, homogêneas, uniformemente distribuídas, incomunicáveis e indeformadas, com densidade de massa aparente no estado fresco entre  $1300 \text{ kg/m}^3$  e  $1900 \text{ kg/m}^3$ , e os lotes ensaiados, segundo a NBR 5739 devem apresentar  $F_{ck}$  mínimo de 2,5 MPa aos 28 dias de idade.

Já a massa específica observada na NBR 13438 (ABNT, 2013), apresenta o CCE com densidade de massa aparente seca, variando entre  $450 \text{ kg/m}^3$  e  $650 \text{ kg/m}^3$ . Os insumos para sua fabricação são o material calcário, mistura de cimento, cal ou ambos, e materiais ricos em sílica com granulometria muito fina. Essa combinação passa por um processo de expansão, através da utilização de produtos formadores

de gases, água e aditivos, sendo submetidos à pressão e temperatura por meio de vapor saturado, denominado autoclavado, cujo produto final é o concreto celular contendo células fechadas, aeradas e uniformemente distribuídas. A norma, ainda, beneficia os blocos com função estrutural ou não, atribuindo dimensões, estocagem e tolerâncias, entre outras características que facilitam a utilização, principalmente na construção de paredes internas e externas, e preenchimento de lajes.

Ainda assim, nenhuma dessas regulamentações trata sobre projeto. Para suprir esta etapa, existe o projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1 em elaboração sobre projeto, controle e execução de paredes de concreto celular moldados no local (SILVA, 2015).

A Indústria Coreana recorreu à Norma de Padrões Industriais Coreana 4039 (KS F 4039, 2006), a qual especifica os requisitos mínimos para concreto espuma e seu uso em sistemas de aquecimento de piso, e o classifica em três graus, de acordo com a massa específica e resistência à compressão, grau 0,4; 0,5 e 0,6. A massa específica, no estado fresco, pode ser maior ou igual a  $390 \text{ kg/m}^3$  (grau 0,4),  $520 \text{ kg/m}^3$  (grau 0,5) e  $720 \text{ kg/m}^3$  (grau 0,6), respectivamente, no estado endurecido, faixas correspondentes de  $300\text{-}400 \text{ kg/m}^3$ ,  $400\text{-}500 \text{ kg/m}^3$  e  $500\text{-}700 \text{ kg/m}^3$ . Com resistência à compressão em valores maiores ou iguais a 0,8, 1,4 e 2 MPa, respectivamente.

Ainda, diversos autores se dedicaram a estudar o concreto espuma e as disposições de suas características. Para Neville (1997), a definição do concreto celular consiste em introduzir vazios estáveis no interior da pasta de cimento ou da argamassa endurecida. O ingresso dos vazios pode ser por ar ou por outro gás, e não se usa agregado graúdo. Assim, o CCE é o produto formado de espuma ou gás, que adicionados à pasta, reagem produzindo gases que formam bolhas, com massa específica entre  $300 \text{ kg/m}^3$  e  $1900 \text{ kg/m}^3$  (MAYCÁ; CREMONINI; RECENA, 2008).

Desta forma, o concreto celular se enquadra como concreto leve (CL), pois atende à NBR 8953 (ABNT, 2015) com massa específica seca inferior a  $2000 \text{ kg/m}^3$ , porém nem todo concreto leve pode ser classificado como um concreto celular, devido às suas duas particularidades, de ter vazios incorporados à sua argamassa e ausência do agregado graúdo, diferenciando do concreto convencional.

No entanto, há acadêmicos que não notam coerência na definição “concreto celular”, pois a falta do agregado graúdo na mistura o descaracteriza de ser um concreto. Visto que o CCE é composto na sua maioria, por uma pasta de cimento e água, que é aerada antes da cura. A utilização do nome concreto celular está na

facilidade de aceitação e absorção pelo mercado, reafirmando sua inserção por ser um produto à base de cimento Portland (GRUTZECK, 2005).

Apesar de muitos confundirem o concreto aerado com o concreto com ar incorporado é fácil distingui-los, uma vez que, este último contém um volume muito menor de vazios, inferiores a 20% (BRADY; WATTS; JONES, 2001). Ferreira (1987) esclarece que o termo concreto aerado é comumente utilizado nos Estados Unidos (*aerated concrete*), enquanto o termo concreto celular é mais usual na Europa (*cellular concrete ou beton cellulaire*).

A massa específica é muito importante para caracterizar o concreto celular e, principalmente definir sua aplicação, as normas não chegam a um consenso entre os intervalos e a forma que é abordada. Alguns pesquisadores definem a massa específica aparente seca e outros no estado plástico, o que dificulta a sua classificação e atrapalha o direcionamento das indústrias às análises sobre o produto e melhorias nos processos produtivos. De modo geral, a Tabela 1 aborda os diferentes limites entre referências mundiais.

Tabela 1 - Valores de referência da massa específica dos concretos celulares

Referência	Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica seca (kg/m <sup>3</sup> )
NBR 12646 (1992)	1300 ≤ ρ ≤ 1900	
NBR 13438 (2013)		450 ≤ ρ ≤ 650
ACI 523.1R-06 (2006)		320 ≤ ρ ≤ 800
KS F 4039 (2006)	390 ≤ ρ ≤ 720	300 ≤ ρ ≤ 700
ASTM C 796 (2019)	590 ≤ ρ ≤ 690	430 ≤ ρ ≤ 540

Fonte: A autora (2019).

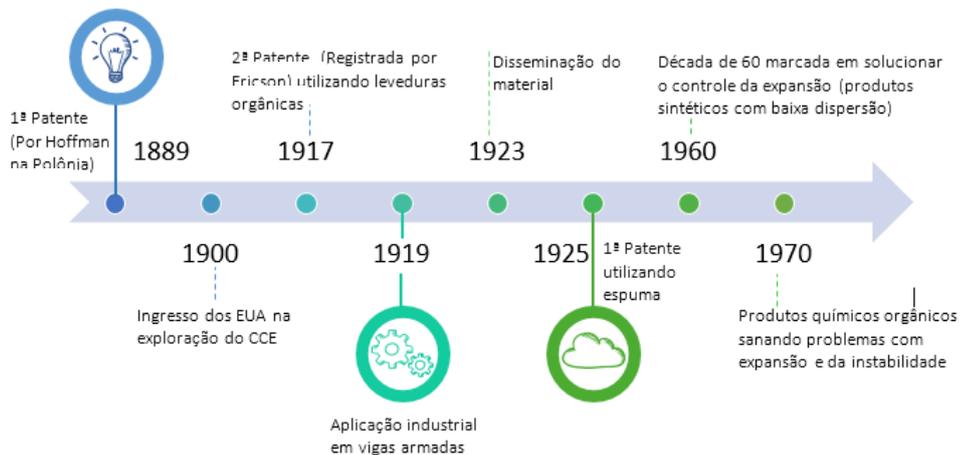
Alguns autores relacionam o diferencial de massa específica, como uma tentativa de estimar o CCE do estado fresco para o estado seco. Segundo Neville (1997), a aproximação da massa específica do concreto seco ao ar é uma redução de 80 kg/m<sup>3</sup>, do que quando o concreto está apto para o lançamento. Já para Brady, Watts e Jones (2001), a massa específica no estado plástico do material é cerca de 150 kg/m<sup>3</sup> a 200 kg/m<sup>3</sup> mais alta do que a seca. Ou seja, a larga faixa de valores da densidade aceita pelos autores não proporciona um bom cálculo de transformação entre os estados de massa específica.

### 2.1.1 Desenvolvimento histórico

A patente mais significativa para disseminação do concreto celular está datada no ano de 1923. Considerado pai do concreto celular, o sueco de Stockholm, chamado Ericksson foi responsável por um marco histórico, pois desse momento em diante, o material começou a ter um grande desenvolvimento (FERREIRA, 1987).

Apesar de pouco conhecido, o concreto celular não é um material novo, seu desenvolvimento pode ser rastreado desde o final do século XIX. A linha do tempo apresentada na Figura 2, auxilia graficamente a evolução histórica.

Figura 3 - Linha do tempo do concreto celular



Fonte: A autora (2019).

A descoberta do material pode ser considerada no ano de 1889, através do registro da primeira patente em Praga na Polônia (CORTEPASSI, 2005; FERREIRA, 1987). Durante a preparação de uma pasta com ligante cimentício, Hoffman se deparou com o processo de criação de vazios na reação química, entre o ácido clorídrico (HCl) e o bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ), iniciando o desenvolvimento do concreto aerado.

Após onze anos, em 1900, os Estados Unidos realizaram experiências utilizando grãos de cloreto de cálcio envolvidos por parafina como agregados, sendo eliminados pela geração de calor no processo de cura. Entretanto, os resultados de resistência mecânica não eram satisfatórios (FREITAS, 2004; CORTEPASSI, 2005). Nesse mesmo ano, foram testados outros geradores de aeração, como o alumínio, o zinco e a cal (FREITAS, 2004).

Segundo Guglielmi (2007), a Suécia ganhou destaque a partir de 1914, com a formação de gases, adicionando-se o alumínio em pó à mistura de cimento, cal e água. Um longo período se passou, até a aparição do segundo registro de patente. Somente no ano de 1917, a Holanda desfrutava de uma nova forma de expansão, utilizando leveduras orgânicas (FERREIRA, 1987).

A aplicação do material para indústria só aconteceu em 1919, na cidade de Berlim (SILVA, 2015), quando Grosche depositou sua patente produzindo vigas armadas de concreto celular. Logo em seguida, na década de 20, a história de tal concreto é marcada pelo desenvolvimento industrial, ainda em escala limitada, mas significativa para ganhar o mercado Europeu (BRADY; WATTS; JONES, 2001).

Após este marco, inúmeras patentes foram registradas oriundas do concreto celular, mas como um aprimoramento a registros anteriores, melhorando formas de gerar poros por meio da liberação de gás no interior das argamassas. Apesar das centenas de patentes, poucas eram viáveis economicamente e, portanto, não eram relevantes para a indústria (FERREIRA, 1987).

Até o ano de 1925, quando o primeiro relato usando espuma na confecção do concreto celular foi patenteado, o sueco criador dessa inovação atendia pelo nome de E. Chr. Bayer, e conseguiu produzir concreto celular espumoso a partir de cola vegetal, gelatina, sabão de resina e formaldeídos (CORTEPASSI, 2005). O processo para descoberta da espuma deu-se de forma lenta e só foi possível graças ao aperfeiçoamento da química orgânica.

Os agentes espumantes, desenvolvidos no período da década de 60, eram quase que exclusivamente à base orgânica. E devido às dificuldades de controlar a expansão, surgiram novas patentes procurando solucionar tal problema, dando origem aos primeiros produtos sintéticos; proporcionando espuma de boa estabilidade, porém baixa dispersão (FERREIRA, 1987).

Para Cortelassi (2005), somente no início do ano 1970 os produtos químicos orgânicos conseguiram sanar o problema da estabilidade de massa e da expansão volumétrica. E para os países industrializados a aplicação do material tornava-se atraente, expandindo o emprego do concreto celular (CORTEPASSI, 2005; FERREIRA, 1987).

No Brasil, as primeiras aplicações do concreto celular ocorreram no ano de 1957, na forma de blocos de concreto celular autoclavado comercializado pela empresa de nome Pumex, a atual Siporex (GUGLIELMI, 2007; SIPOREX, 2019).

As primeiras pesquisas estão relatadas nos Boletins técnicos da USP, e analisavam as propriedades do concreto celular com o incremento da areia na matriz cimentícia, sendo Ferreira o pioneiro da pesquisa experimental, em 1987, desenvolvendo uma metodologia de dosagem para este tipo de concreto. Seguido por Teixeira Filho e Tezuka, no ano de 1992, explorando o comportamento estrutural, especialmente o ganho de resistência mecânica com o incremento de massa específica (SILVA, 2015; TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992; FERREIRA, 1987)

Cortelassi, em 2005, analisou o comportamento nas propriedades relativas à durabilidade, desenvolvendo um concreto celular a partir de uma matriz de alto desempenho. Dez anos depois, Silva teve como principal objetivo produzir um concreto celular para fins estruturais em paredes de edificações de múltiplos pavimentos.

Ainda existe no País, uma deficiência no mapeamento do concreto celular com dados que revelem seu volume produtivo, principal aplicação e consumidor final. Esta ausência pode ser suprida, à medida que informações técnicas sejam divulgadas e subsídios sobre durabilidade deste material, estimulem a sua produção.

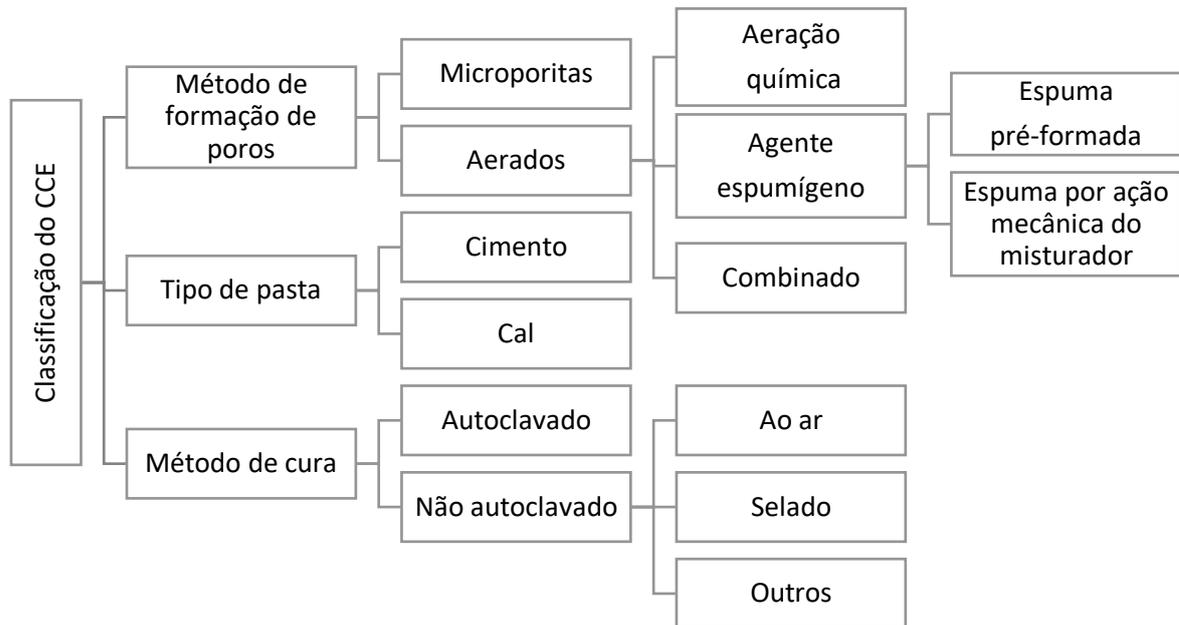
### **2.1.2 Classificação**

Os diferentes métodos utilizados para produção do concreto celular originam um vasto repertório, e a divergência entre autores, dificulta sua classificação. Em primeira análise, podemos dividir os concretos celulares a depender da formação de poros, do tipo de pasta e do método de cura (Figura 3).

#### **2.1.2.1 Método de formação de poros**

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 (CORTELASSI, 2005; FERREIRA, 1987).

Figura 4 - Classificação dos concretos celulares



Fonte: Adaptado de Teixeira Filho e Tezuka (1992).

O segundo método para formar concretos aerados, pode ser obtido de três maneiras: aeração química, agente espumígeno e a combinação dos dois (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000).

#### 2.1.2.1.1 Aeração química

A aeração química utiliza das 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 2 (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000; CORTEGLASSI, 2005; ESMAILY; NURANIAN, 2012).

Tabela 2 - Principais agentes de aeração química

Substância	Reação	Agente gasoso	Autor
Alumínio em pó	$2Al+3Ca(OH)_2+6H_2O\rightarrow 3Ca\cdot Al_2O_2\cdot 6H_2O_2+3H_2$ $2Al+Ca(OH)_2+6H_2O\rightarrow Ca[Al(OH)_4]_2+3H_2$	H <sub>2</sub> (hidrogênio)	Ferreira (1987) Petrucci (1978) Esmaily e Nuranian (2012)
Peróxido de hidrogênio e cloreto de cal	$CaCl(OCl) + H_2O_2 \rightarrow CaCl_2 + H_2O + O_2$	O <sub>2</sub> (oxigênio)	Petrucci (1978) Teixeira Filho e Tezuka (1992)
Carbureto de cálcio	$CaC_2 + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + C_2H_2$	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (acetileno)	Petrucci (1978)

Fonte: A autora (2019).

Entre os agentes de aeração citados, o pó de alumínio é o mais comumente utilizado (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000). Ferreira (1987) justifica esse consumo ao baixo custo do produto. O alto refinamento do pó garante a eficiência da reação pela sua finura. No caso de cimentos Portland com baixa alcalinidade, a adição de hidróxido de cálcio ou sódio complementam os álcalis necessários (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000).

#### 2.1.2.1.2 Agente espumígeno

Já os concretos celulares aerados por agente espumígeno, necessitam de um processo físico-mecânico, gerando espuma repleta de bolhas de ar. Normalmente, a estabilidade inicial da espuma líquida é assegurada por agentes espumantes, que reduzem a tensão superficial (KUZIELOVÁ; PACH; PALOU, 2016).

Os principais agentes formadores de espuma são resinas saponificáveis, proteínas hidrolisadas, agentes sintéticos de superfície ativa, sangue hidrolisado, cola animal (PETRUCCI, 1978). Tais produtos são protegidos por patentes, dificultando o aprofundamento nas propriedades do concreto celular espumoso (PETRUCCI, 1978; CORTELIASSI, 2005; SILVA, 2015).

Sob o mesmo ponto de vista Bauer (1995), compreende que por ação física, as forças de absorção de Vander Waals, de natureza tensoativa, modifica a tensão superficial da fase líquida e, ainda, a tensão interfacial entre esta, e as fases sólida ou gasosa. Quer dizer, os tensoativos reduzem a coesão, através das moléculas de água nas interfases “água-ar” e “água-sólido”.

Os aditivos tensoativos consistem, essencialmente, em longas cadeias orgânicas, um radical é apolar e hidrófobo (repele água), e a outra, polar e hidrófilo (que atrai a água) (BAUER, 1995; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Existe uma ampla gama de surfactantes disponíveis, e os agentes espumantes sintéticos ou baseados em proteínas, podem ser usados para produzir espuma (BRADY; WATTS; JONES, 2001).

Igualmente, Brady, Watts e Jones (2001) seguem revelando que os agentes tensoativos sintéticos podem ter sua tipologia de acordo com a natureza do seu grupo hidrófilo, ou seja, a extremidade da molécula que é solúvel em água, assim como classificado na Tabela 3:

Tabela 3 - Classificação dos agentes tensoativos sintéticos

<b>Agente sintético</b>	<b>Parcela</b>	<b>Observação</b>
Aniônico	70 %	Aproximadamente, 70% dos surfactantes, usados para produzir concreto espumado, são aniônicos, isto é, a parte ativa de sua molécula hidrófila, possui carga negativa.
Catiônico	< 5%	Menos de 5% dos surfactantes, usados para produzir concreto espumado, são catiônicos. O grupo hidrófilo carrega uma carga positiva.
Não iônico (ou polar):	25 %	Cerca de 25% dos surfactantes, usados para produzir concreto espumado, não são iônicos, ou seja, eles são eletricamente neutros. Esta ausência de carga elétrica pode proporcionar uma maior estabilidade à mistura de concreto espumado.
Anfotéricos e Zwitterion	~	Raramente são utilizados para produzir concreto celular espumado. Pois, dependendo do pH da solução, as moléculas podem sustentar uma carga positiva ou negativa, ou ambas as cargas.

Fonte: Adaptado de Brady, Watts e Jones (2001).

Em uma comparação realizada por McGovern (2000)<sup>2</sup> *apud* Brady, Watts e Jones (2001), entre a espuma produzida com surfactante sintético e de base proteica, a segunda revelou ter tamanho de bolhas menores, mais estáveis (menor passagem de água) e melhor estrutura dos poros, com bolhas mais resistentes e fechadas, portanto, o agente espumígeno à base de proteína, pode ser a alternativa mais adequada para concretos celulares com massa específica mais elevada e alta resistência.

<sup>2</sup> McGovern, G. Manufacture and supply of ready-mix foamed concrete. One day awareness seminar on 'Foamed concrete: Properties, applications and potential' University of Dundee, p. 12-25, 2000.

Similarmente, a pesquisa desenvolvida por Falliano *et al.* (2018), ao analisar a resistência à compressão, condições de cura, tipo de cimento e agente espumante de um concreto celular desenvolvido com três agentes espumígenos, sendo um de base proteica e dois sintéticos, chegou à conclusão que o surfactante proteico promove desempenho mecânico, cerca de 10 vezes maiores que o sintético, sobre as mesmas condições de fabricação.

No entanto, o mesmo autor, ao observar a fase fluída da espuma junto à pasta cimentícia, destaca 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. Este fato foi evidenciado, com o aumento da relação a/agl de 0,3 para 0,5, conduzindo a um aumento significativo da resistência à compressão, cerca de 14 vezes, nas condições de cura ao ar, mais de 14 vezes nas condições de cura selada e de, cerca de 12 vezes, na cura submersa em água.

Atualmente, não se sabe ao certo o envolvimento da natureza do agente tensoativo nas propriedades do concreto celular com agente espumígeno e a escolha do produto, normalmente, ocorre de uma base empírica ou disponibilidade do mercado local (PETRUCCI, 1978; BRADY; WATTS; JONES, 2001).

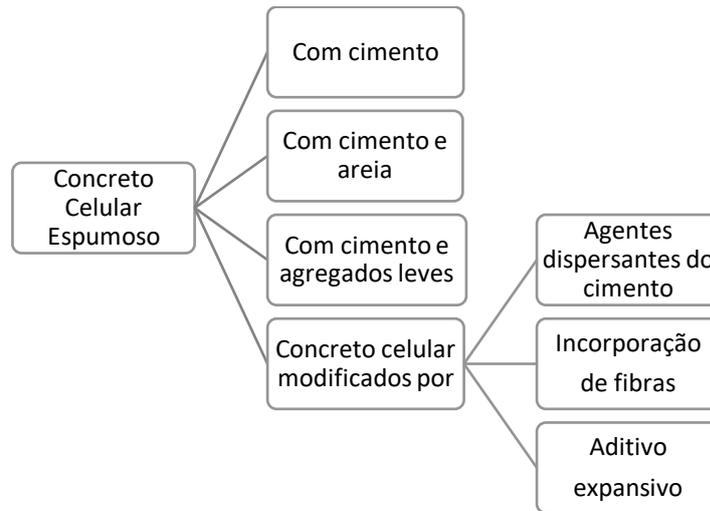
Quanto ao método de fabricação da espuma, podem ser adotados dois caminhos distintos: (a) pré-formada e (b) espuma por ação mecânica do misturador. Ambos, com propósito de agregar alta porcentagem de poros esféricos de dimensões milimétricas e regulares, uniformemente distribuídos, estáveis, indeformáveis e incomunicáveis no concreto celular.

A espuma pré-formada, como o próprio nome sugere, é adicionada posteriormente à argamassa, desenvolvida em equipamento específico, o volume pode ser estimado e as características controladas (TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992; CORTELISSI, 2005).

Ainda segundo os autores destacados anteriormente, a formação da espuma por ação do misturador mecânico consiste em adicionar todos os insumos da argamassa, mais a água com o agente espumígeno diluído, e deixar a espuma ser gerada através da velocidade de operação do misturador.

Ainda, Teixeira Filho e Tezuka (1992) explanam as diversas combinações para o concreto celular espumoso, apresentadas na Figura 4.

Figura 5 - Tipos de concretos celulares espumoso.



Fonte: Adaptado de Teixeira Filho e Terzuki (1992).

A formação do concreto celular através de agentes espumígenos é a mais econômica e controlável, pois não há reações químicas envolvidas, proporcionando poros através de meios mecânicos, seja pela espuma pré-formada ou pela espuma misturada junto à argamassa (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000).

#### 2.1.2.2 Tipo de pasta

O concreto celular pode ser qualificado conforme o material que compõe sua matriz cimentícia. Para Narayanan e Ramamurthy (2000), os ligantes podem ser cimento Portland ou a base de cal. Tentativas também foram feitas para usar materiais pozolânicos, como substituição parcial ao cimento ou areia.

Atualmente, a busca por ligantes alternativos ao cimento Portland, sugere uma revisão na classificação do concreto celular quanto ao tipo de pasta. A inclusão dos ligantes ativados alcalinamente, os modificados por pozolanas e a permanência dos aglomerantes hidráulicos, ampliam o leque de possibilidades da matriz cimentícia.

#### 2.1.2.3 Método de cura

Com base no período de cura, o concreto celular pode ser dividido em dois grupos: autoclavado e não autoclavado. É notório que o processo autoclavado acelera

a evaporação, a alta temperatura e pressão, que proporcionam uma elevação na resistência mecânica final ao material (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000).

Algumas propriedades são afetadas diretamente pela forma e duração da cura, como a resistência à compressão, retração por secagem, absorção etc. (SILVA, 2015). A revisão elaborada por Narayanan e Ramamurthy (2000), revela os métodos de cura do tipo não autoclavado (NAAC) ou autoclavado (AAC). O último antecipa a reação entre o calcário e a sílica ou alumínio, presente nos materiais cimentícios. O processo na autoclave sofre variações na pressão e tempo, dentro de uma faixa de 8 a 16 horas, sobre 4 – 16 Mpa, para que sejam finalizadas as reações hidrotermais. Outras variáveis significativas são a idade e a condição da mistura no início do ciclo de cura, e as taxas de mudança de temperatura.

Para Ferreira (1987), os concretos celulares podem ser classificados em curados ao ar ou autoclavados. De certo, quando submetemos um produto composto por calcário e silício em proporções convenientes, a uma temperatura entre 160° C e 190° C, sobre pressão de 6 a 12 Kgf/cm<sup>2</sup>, durante cerca de 5 horas em uma autoclave, reagem formando monossilicato de cálcio. Entretanto, na cura ao ar, procedem as reações comuns da química do cimento, formando os compostos hidratados, a partir dos silicatos tricálcico e silicatos dicálcico.

Ainda, segundo o autor, a principal razão pela qual um concreto celular autoclavado em relação aos concretos celulares curados ao ar, tem uma resistência à compressão da ordem do dobro e uma retração de cerca da metade (FERREIRA, 1987).

A pesquisa de Esmaily e Nuranian (2012) classifica o concreto celular com base na temperatura de cura, separando em dois grupos: curado à temperatura ambiente, e o outro autoclavado. A cura em temperatura ambiente, ainda leva em consideração uma possível elevação da temperatura. Já na autoclavada, a temperatura superior a 100°C, em sistema pressurizado e vapor, segundo os autores, a principal aplicação na cura autoclavada consiste em produtos de alvenaria pré-moldados.

Entre os métodos, o processo de embrulhar as amostras em película aderente e armazenar em sacos plásticos é conhecido como cura selada. Variações deste regime incluem molhar os espécimes após desmoldagem e antes de acondicioná-los, ou armazená-los em ambiente de alta umidade (BRADY, WATTS; JONES, 2001).

### 2.1.3 Dosagem e proporções

Eventualmente, em receitas o arranjo adequado dos materiais promove qualidade à mistura final. Não sendo diferente no concreto celular, onde as proporções apropriadas dos materiais direcionam o desempenho das propriedades no seu estado fresco e endurecido (FREITAS, 2004; CORTEPASSI, 2005).

O estudo de métodos de dosagem no concreto não é recente. Relatos, em 1881, foram apresentados formalmente por Préau, com considerações e método de dosagem das argamassas e concretos. Tais conceitos básicos revigoram até hoje, e em métodos clássicos de dosagem, como o ACI 211.1-91 (ISAIA, 2011).

Desde então, diversos autores aprofundaram-se a pesquisar a dosagem dos concretos de cimento Portland, os materiais constituintes, as proporções entre eles e da tecnologia de preparo e controle do material (MEHTA; MONTEIRO, 2014). E atualmente, com o crescente número de concretos especiais, surgem novos métodos atendendo a cada particularidade.

No contexto, a fração que cada componente deve ter na mistura depende da aplicação desejada. Dessa forma, cada solicitação terá, primeiramente, uma massa específica característica. Uma vez definida, tem-se adaptado às demais características físico-mecânica (FERREIRA, 1987). Em outras palavras, com a definição da massa específica, pode-se estimar a resistência à compressão e a condutibilidade térmica. A partir da resistência à compressão, pode-se estimar o consumo de cimento e o fator água/aglomerante. E, conhecendo a condutibilidade térmica, pode-se associar a porcentagem de ar incorporado.

Nessas circunstâncias, Ferreira em 1987 se deteve a analisar e desenvolver um método de dosagem para os concretos celulares espumosos, partindo de duas premissas:

- a) O somatório dos volumes absolutos dos componentes da mistura deverá ser de um  $m^3$  (incluindo o ar)
- b) A soma das massas dos componentes da mistura deverá ser igual à massa específica aparente do concreto celular excluindo o ar, pois não pesa.

Para compreender a dosagem desenvolvida por Ferreira (1987), os quadros estão estruturados de forma a explicar a modelagem adotada por ele. Divididas em: elementos, cálculo dos elementos, correções e dosagem final, respectivamente,

Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7 que juntas formam o método de dosagem do concreto celular espumoso.

Tabela 4 - Dados referente à dosagem experimental

Dados	Unidade de medida	Abreviação
<b>Massa específica aparente fresca do concreto celular</b>	kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{CCE}$
<b>Consumo de cimento</b>	kg	C
<b>Relação água/aglomerante</b>	Adimensional	F
<b>Massa específica real do cimento</b>	kg/m <sup>3</sup>	$\rho_c$
<b>Massa específica real da areia</b>	kg/m <sup>3</sup>	$\rho_a$
<b>Massa específica da espuma</b>	kg/m <sup>3</sup>	$\rho_E$
<b>Razão de vazão do gerador</b>	Constante	R
<b>Umidade da areia</b>	%	H

R: Constante igual a 1,09 nos geradores nacionais

Fonte: Adaptado de Ferreira (1987).

Dado o exposto, além da caracterização dos materiais constituintes (areia e cimento, espuma), no método proposto por Ferreira (1987) se faz necessário, previamente, a definição dos seguintes parâmetros:

- a) Massa específica aparente fresca do concreto celular, desejado ( $\rho_{CCE}$ );
- b) Relação água/aglomerante (a/agl);
- c) Consumo de cimento (C).

Apresentado os elementos que compõem o traço (Tabela 4), é possível correlacionarmos os dados e chegar à dosagem final, passando por algumas correções. Assim, Ferreira (1987) segue equacionando:

Tabela 5 - Cálculo e combinação dos componentes.

Cálculo dos elementos				
Item	Dados	Unidade de medida	Abreviação	Expressão de cálculo
2.1	Volume de Cimento	L	C <sub>1</sub>	C/ρ <sub>c</sub>
2.2	Água	L	W <sub>t</sub>	C x F
2.3	Massa da areia seca	Kg	A <sub>s</sub>	ρ <sub>CCE</sub> - C - W <sub>t</sub>
2.4	Volume da areia	L	A <sub>L</sub>	A <sub>s</sub> /ρ <sub>s</sub>
2.5	Volume de Materiais	L	V <sub>mat</sub>	A <sub>L</sub> +C <sub>1</sub> +W <sub>t</sub>
2.6	Volume do ar	L	V <sub>ar</sub>	1000-A <sub>L</sub> +C <sub>1</sub> +W <sub>t</sub>
2.7	Volume da espuma	L	V <sub>E</sub>	V <sub>ar</sub> x R

Fonte: Ferreira (1987).

Logo, a Tabela 5 calcula a quantidade de areia seca por m<sup>3</sup>, o volume dos materiais a partir dos elementos e suas respectivas massas específicas; e por operação de subtração, partindo da primeira premissa, obtém o volume da espuma. Concomitantemente, pela perda atribuída ao sistema de mistura e de transporte, pode-se fazer necessária a correção do volume da espuma, pela constante atribuída ao gerador utilizado (FERREIRA, 1987).

Na sequência é realizada a correção da água na espuma e na areia, Tabela 6. Por fim, se chega às operações necessárias para desenvolver o traço apresentado na Tabela 7. De forma mais prática, o esquema pode ser representado graficamente no Fluxograma 1.

Tabela 6 - Correções da água no método.

Item	Dados	Unidade de medida	Abreviação	Expressão de cálculo
3.1	Água na espuma	L	W <sub>E</sub>	V <sub>E</sub> x ρ <sub>E</sub>
3.2	Água na areia	L	W <sub>A</sub>	H/100 x A <sub>s</sub>
3.3	Água corrigida	L	W	W <sub>T</sub> - W <sub>E</sub> - W <sub>A</sub>
3.4	Areia Corrigida	Kg	A	A <sub>s</sub> + W <sub>A</sub>

Fonte: Ferreira (1987).

Tabela 7- Dosagem final.

Correções					
Item	Dados	Unidade de medida	Abreviação	Expressão de cálculo	Equação
4.1	Cimento	Kg	C	2	
4.2	Areia	Kg	A	3.4	ρ <sub>CCE</sub> - C - ( $\frac{a}{agl}$ x C)
4.3	Água	L	W	3.3	( $\frac{a}{agl}$ x C) - (V <sub>e</sub> x ρ <sub>e</sub> )
4.4	Espuma	L	E	2.7	1000 - $\frac{A_s}{\rho_a}$ - $\frac{C}{\rho_c}$ - ( $\frac{a}{agl}$ x C)

Fonte: Adaptado de Ferreira (1987).

Fluxograma 1 – Dosagem do concreto celular.



Fonte: A autora (2019).

Segundo Brady, Watts e Jones (2001), o método de dosagem utilizado na Universidade de Dundee é bem similar ao de Ferreira (1987), mas o procedimento da Universidade de Dundee é adaptado ao emprego da cinza volante (PFA), em substituição parcial do cimento Portland. Tal Universidade parte das seguintes abordagens:

- a) O conteúdo de água e superplastificante deve ser calculado, a partir, do teor total de cimento, que inclui cargas cimentícias, como PFA. Não considera a quantidade de água contida na espuma.
- b) Determinar a quantidade de ar (kg/m<sup>3</sup>) na mistura, considerando o volume unitário (1 m<sup>3</sup>), logo, estimar o quantitativo de espuma através da sua massa específica.

### 2.1.3.1 Aglomerante

O aglomerante desempenha um importante papel, aglutinando e fortalecendo a mistura. Normalmente, o teor total de aglomerante no concreto celular fica em torno

de 300 kg/m<sup>3</sup> e 400 kg/m<sup>3</sup>, podendo chegar até 500 kg/m<sup>3</sup>, para se obter um ganho maior de resistência. Porém, o risco de fissura térmica aumenta, substancialmente, em consumo acima de 500kg/m<sup>3</sup>, e o ganho de resistência é mínimo (BRADY; WATTS; JONES, 2001).

Nesse sentido, Freitas, Allende e Darwish, (2004), asseguram que para a dosagem do concreto celular são consumidos em torno de sete sacos de cimento por metro cúbico, portanto, uma média de 350 kg/m<sup>3</sup>, conforme recomendação dos fabricantes de agentes espumígenos no Brasil, proporcionando um aumento do custo e o grau de rentabilidade deste material.

Neville (1997), ao relatar no seu livro propriedades típicas de concretos celulares usados no Reino Unido<sup>3</sup>, indica um consumo de cimento de até 400 kg/m<sup>3</sup> (Quadro 1), chegando a uma resistência à compressão de 10 MPa. Porém, a resistência à compressão do concreto celular, pode ser expressa em função do teor de vazios, logo, o desempenho mecânico pode não ser o requisito mais importante, sendo a propriedade térmica o critério para uso do CCE, encorajando a massa específica aparente fresca, abaixo de 900 kg/m<sup>3</sup> proporcionando redução de 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento.

Com base nos resultados apresentados no Quadro 2, Falliano *et al.* (2018), define que, com as variações da resistência à compressão axial com a massa específica e o consumo de aglomerante de 381 kg/m<sup>3</sup> a 741 kg/m<sup>3</sup>, emprega três agentes espumígenos, sendo um à base de proteína (Foamin C) e dois sintéticos, um lauril sulfato de sódio (SLS) e outro similar (FoamTek). Verificou-se que o agente espumante à base de proteína eleva as resistências à compressão, em comparação aos sintéticos.

Quadro 1 – Dados indicativos sobre concreto celular

<b>Aglutinante (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Areia (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Teor de ar (%)</b>	<b>Massa específica fresca (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa específica seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência à compressão 28 dias (MPa)</b>
300	0	78	500	360	1
320	420	62	900	760	2
360	780	45	1300	1180	5
400	1130	28	1700	1550	10

Fonte: Adaptado de Neville (1997).

<sup>3</sup> BRITISH CEMENT ASSOCIATION. **Foamed Concrete: Composition and Properties**. Slough, UK: BCA, 1991.

Ainda, com base nos dados de Falliano *et al.* (2018), é possível confirmar a afirmação de Brady, Watts e Jones (2001), de que o consumo de cimento acima de 500 kg/m<sup>3</sup>, não proporciona ganhos de resistência que justifique o consumo exorbitante. Falliano *et al.* (2018) ainda acrescenta que, para os agentes espumantes sintéticos, o aumento da relação água/aglomerante de 0,30 para 0,50, conduziu a um aumento notável da resistência de, cerca de 14 vezes, nas condições de cura ao ar.

Quadro 2 – Variação da resistência à compressão de concretos celulares com o consumo de cimento da mistura, massa específica aparente e seca.

Cimento	Agente espumígeno	Aglomerante (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica fresca (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica seca (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência 28 dias (MPa)
CEM I 52,5 R	Foamin C	381	510	407	1,04
		536	735	608	6,37
		588	818	624	5,14
		584	846	688	8,99
		727	969	783	11,74
		779	1046	820	9,13
		363	497	394	<0,1
	FoamTek	534	722	600	0,28
		511	756	588	4,06
		730	973	840	1,57
		517	691	564	0,26
	SLS	690	908	764	0,62
		354	470	367	1,3
	CEM II A- L 42,5 R	Foamin C	579	831	640
741			986	774	7,18
375			503	406	<0,1
FoamTek		543	732	597	1,27
		710	947	817	3,14
SLS		529	722	584	0,76

Fonte: Falliano *et al.* (2018).

Ferreira (1987) afirma que o aglomerante mais utilizado é o cimento Portland comum, mas também podem ser usados o cimento Portland pozolânico ou o cimento Portland de escória de alto forno. Nesses casos, há necessidade de alterações, tanto na dosagem, como nas características de endurecimento, onde previamente deve passar por análise experimental. Além disso, os cimentos de alta resistência inicial proporcionam uma vantagem nos concretos celulares, sobretudo, à baixa resistência inicial, que se obtém com os aglomerantes comuns.

### 2.1.3.2 Agregado

Rico em sílica, de atividade química inerte, a areia é, normalmente, o agregado miúdo que compõe o concreto celular. Para a NM 52 (ABNT, 2009), o agregado miúdo é o material que passa na peneira com abertura de malha de 9,5 mm, que passa quase totalmente na peneira 4,75 mm e fica retido, em sua maior parte, na peneira 75  $\mu\text{m}$ .

Essa faixa granulométrica foi fonte de investigação de pesquisas experimentais. Sach e Seifert (1999) recomendam a utilização de areia fina, com partículas de até 4 mm e distribuição uniforme, que deve ser usada para concreto espuma. Explicam, ainda, que agregados mais grosseiros podem levar ao colapso da espuma durante a mistura.

Já Ferreira (1987), observou a fração das partículas do agregado junto a sua densidade, onde areias mais grossas devem ser aplicadas em concretos celulares com massas específicas elevadas, superiores a 1400  $\text{kg/m}^3$ , e para massas específicas mais baixas, inferiores a 800  $\text{kg/m}^3$ , um teor de finura maior, concluindo que o percentual de finos na areia, com dimensões inferiores a 250  $\mu\text{m}$ , não deve exceder 20%.

Concretos celulares com massas específicas mais baixas, podem ser obtidos com a substituição dos agregados convencionais por agregados leves (ROSSIGNOLO, 2009). A inclusão de uma estrutura porosa no agregado é de grande utilização para a redução desse índice físico.

Seguindo nesse princípio, Rossignolo (2009) afirma que a substituição dos agregados convencionais por agregados leves pode ocasionar alterações significativas em outras importantes propriedades do concreto, com destaque para resistência mecânica, trabalhabilidade, módulo de deformação, durabilidade, estabilidade dimensional, condutividade térmica, resistência a altas temperaturas e espessura da zona da transição agregado-pasta de cimento. Assim, o conhecimento dessas modificações é fundamental para a correta aplicação desse material.

### 2.1.3.3 Espuma pré-formada

É interessante imaginar a espuma na forma física, posto que sejam bolhas de ar, destinadas a formar uma estrutura porosa no concreto. Buscando a materialização

tátil-visual, pode ser descrita como uma espuma de barbear ou o material que surge durante o atrito de roupas ao serem lavadas (BRADY; WATTS; JONES, 2001).

Pode-se mencionar, por exemplo, do ponto de vista termodinâmico, as espumas são dispersões metaestáveis de duas fases imiscíveis (gás/água), que se separam com o tempo, e apresentam uma área de interface elevada, que contribui positivamente para o aumento da energia livre do sistema (DRENCKHAN; SAINT-JALMES, 2015; AZEVEDO; GRAMATGES, 2017).

É de consenso que a principal função da espuma é a introdução de vazios na mistura. Van Deijk apresenta, no livro *Specification for foamed concrete*, um mínimo de 20% em volume retino na argamassa plástica. Porém, como mencionado anteriormente, para usos mais comuns, o teor de ar é tipicamente entre 40 e 80% do volume total (BRADY; WATTS; JONES, 2001). Em alguns casos, essa estrutura de poros chega a ser mais severa, tão alta quanto 80% (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000).

Muito se tem a explorar a respeito da espuma e as patentes que as protegem, aumentando a especulação sobre sua real natureza (SILVA, 2015; PETRUCCI, 1978; TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992; BRADY; WATTS; JONES, 2001).

No entanto, além da origem do agente espumígeno, outros fatores interferem na forma e estabilidade final da espuma; entre eles, pode-se destacar:

- a) Proporção e diluição do agente espumígeno;
- b) Tempo de mistura;
- c) Ambiente de fabricação e exposição;
- d) Equipamento utilizado.

Para Brady, Watts e Jones (2001), a solução de agente espumígeno, normalmente, consiste em uma parte de surfactante entre 5 e 40 partes de água. O desempenho ideal é comumente obtido na proporção de 1:25, mas o valor ótimo é uma função do tipo de surfactante e do método de produção.

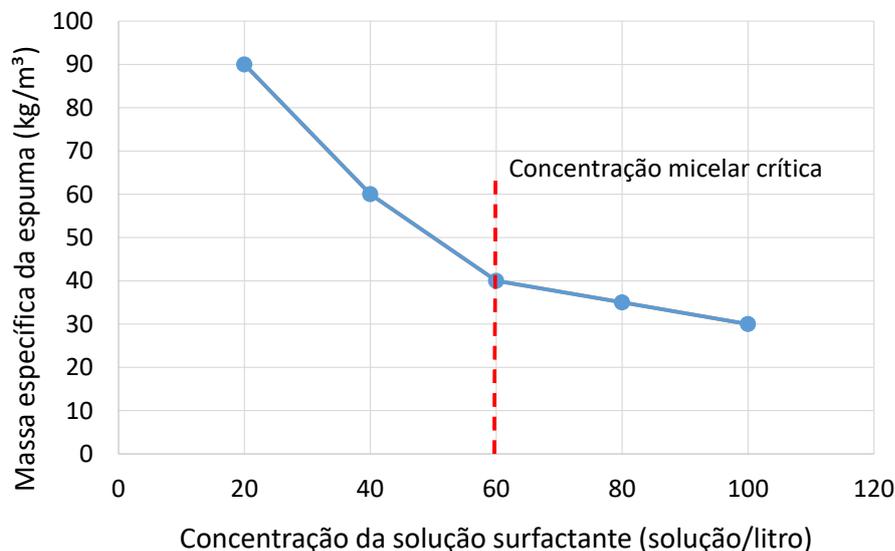
Os estudos realizados por Silva (2015) analisaram três proporções 1:20, 1:40 e 1:60 chegando, respectivamente, às massas específicas de 31,6 kg/m<sup>3</sup>, 34,2 kg/m<sup>3</sup> e 37,4kg/m<sup>3</sup>. Logo, percebeu que se elevar o teor de aditivo, na solução, ocorre uma redução na massa específica da espuma. Em outras palavras, pode-se dizer que para um mesmo volume de solução aditivo/água, a maior concentração de espumígeno irá gerar um maior volume de espuma.

Já a recomendação da ASTM C 796 (2019), é preparar uma solução aquosa do agente espumante na diluição especificada pelo fabricante. Caso esta não seja sugerida, convém realizar testes preliminares, para determinar a proporção necessária. Ainda, um ponto de partida sugerido para tais testes é utilizar 40 partes de água para 1 parte de agente espumante, por volume.

Entretanto, Yang *et al.* (2014) deram preferência a relação 1:19. Em seu trabalho, desenvolveu o estudo com concreto espuma, ativado alcalinamente com escória de alto forno, massa específica seca inferior a 500 kg/m<sup>3</sup>, e resistência à compressão de até 2 MPa.

Em vista dos argumentos apresentados, a proporção da diluição deve ser escolhida em relação à concentração micelar crítica (cmc) da espuma (BRADY; WATTS; JONES, 2001). Este é o ponto, no qual as propriedades de uma espuma exibem uma mudança significativa, por exemplo, na massa específica, como mostrado na Figura 5.

Figura 6 - Variação da massa específica da espuma com a concentração da solução surfactante.



Fonte: Adaptado de Brady, Watts e Jones (2001).

Dado o exposto, a solução de surfactante apresenta uma massa específica entre os limites 20 kg/m<sup>3</sup> e 100 kg/m<sup>3</sup>, a mesma irá variar de acordo com a aplicação. Os valores mais baixos de massa específica são quase irrisórios, após o ponto de cmc, com a redução da concentração (aditivo:água), agindo como um ponto de saturação.

A estabilidade pode ser afetada por vários fatores ambientais externos, incluindo vibração, ações do vento, evaporação e temperatura (BRADY; WATTS; JONES, 2001) e estes, isolados ou combinados, podem estar presentes no local de fabricação, ou podem afetar o CCE durante o transporte e lançamento, portanto, alguma quebra na espuma é inevitável.

A regularização do ACI 523-1 (2006) descreve a formação da espuma pré-formada, através do sistema mecânico denominado gerador de espuma. Inicialmente, a espuma pré-formada é produzida diluindo uma concentração de agente espumígeno com água, em proporções predeterminadas, combinada com o ar comprimido, durante a passagem desta solução por um dispositivo, provoca a expansão da fase líquida, a espuma chega a ter alcance de até 30 vezes o volume inicial da solução (agente:água). Normalmente, a massa específica da espuma pré-formada varia entre 40 e 65 kg/m<sup>3</sup>.

Outro cuidado é manter as características da espuma do gerador para o misturador mecânico, onde irá integrar-se a pasta ou argamassa, formando o concreto celular (CORTEPASSI, 2005). A estrutura dos poros deve poder resistir às forças físicas e químicas, impostas durante todo o processo de mistura, transporte, bombeamento e assentamento do concreto celular (ACI, 2006).

Para isso, a concentração de espuma deve ter uma composição química capaz de produzir e manter células de ar estáveis dentro da mistura de concreto; caso isso não ocorra, há tendência da coalescência das células e a subdivisão das macrocélulas em microcélulas aumentando a massa específica fresca (FERREIRA, 1987).

É possível conhecer o desempenho de um agente espumígeno, a regularização da ASTM C 869 (2016) abrange as especificações para avaliar o uso na produção de concreto celular, onde requisitos físicos prescritos, como massa específica, resistência à compressão, resistência à tração, absorção de água e perda de ar durante o bombeamento. Além disso, a ASTM C 796 (2019) fornece o método padrão para medição laboratorial na atuação do produto químico, a ser utilizado na produção de espuma (células de ar).

Cogita-se, com frequência, que as propriedades do CCE são influenciadas diretamente pela espuma. Vale salientar entre elas a massa específica, consistência, resistência à compressão e tração, condutibilidade térmica, absorção, módulo de elasticidade, retração por secagem e durabilidade (CORTEPASSI, 2005).

#### 2.1.4 Porosidade e resistência à compressão

A resistência à compressão é um parâmetro de qualidade, tradicionalmente, utilizado para caracterizar concretos de forma geral. Isso se deve ao fato de ser considerado um ensaio simples, desde a moldagem ao rompimento e, também, por ser uma medida sensível às alterações de composição da mistura, permitindo induzir modificações em outras propriedades. Assim, modelos e investigações de cálculos para prever as tensões que existem dentro de um sólido deformável, não são recentes (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Conjectura-se que René Ferét foi o responsável pelos primeiros estudos de proporcionamento racional dos materiais (TUTIKIAN; HELENE, 2011). Em 1886, formulou a expressão (Equação 1), propondo uma parábola de melhor modelo matemático de correlação entre resistência à compressão e volume de água, mais ar do concreto (TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992; SILVA, 2015).

$$f_c = k \left( \frac{C}{C+W+A} \right)^2 \quad (1)$$

Sendo,  $f_c$  a resistência do concreto,  $k$  é a constante de Ferét,  $C$  é o volume absoluto de cimento,  $W$  é o volume de água e  $A$  é o volume de ar.

Para concretos convencionais, onde o teor de poros é pequeno, esta expressão foi simplificada por Duff Abrams, em 1918. Fica evidente, ao analisar a estrutura interna do concreto expandido, um elevado teor de ar. Neste caso, a relação proposta por Abrams não é válida, tornando a expressão de Ferét mais indicada para concreto celular (TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992).

A resistência à compressão é sensível à porosidade, esse fato fica evidente nos concretos celulares, onde os teores de ar incorporados são tão elevados, que o efeito da relação água/aglomerante na resistência mecânica chega a ser inverso àquele indicado pela relação de Abrams (TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992; FALLIANO *et al.*, 2018).

No que tange a resistência à compressão, Hoff (1972) sugere uma relação força-porosidade expressa em função do teor de vazios, considerado igual ao total de vazios introduzidos e do volume de água evaporável (KEARSLEY; WAINWRIGHT, 2002). A força do concreto celular em relação a qualquer cimento

pode, segundo Hoff (1972), ser expressa usando a Equação 2:

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_0} = \left( \frac{d_c}{1+k} \right)^2 \left( \frac{1+0.2p_c}{p_c \rho_w} \right)^2 \quad (2)$$

Onde  $\sigma_y$  é a resistência à compressão;  $\sigma_0$ , a resistência teórica da pasta na porosidade zero;  $k$  é o fator água/aglomerante em peso;  $p_c$  é a massa específica do cimento;  $d_c$  é a massa específica do concreto;  $\rho_w$  é a massa específica da água;  $b_c$  é a constante empírica.

Em virtude dos fatos mencionados, a estrutura dos poros de ar e a condição mecânica dos poros têm uma influência marcante na resistência à compressão dos concretos celulares.

## 2.2 POLIESTIRENO EXPANDIDO

Os grânulos esféricos, de estrutura celular porosa e superfície fechada, caracterizam as pérolas de poliestireno expandido (ABRAPEX, 2006; FERNANDO; JAYASINGHE; JAYASINGHE, 2017). Material ultraleve e viável para substituir os agregados leves naturais (LI; LIU; CHEN, 2015).

Descoberto na Alemanha, durante procedimentos laboratoriais da Basf em 1949, pelos químicos Fritz Stastny e Karl Buchholz (ABRAPEX, 2006). O termo EPS representa a sigla internacional do Poliestireno Expandido, definida pela norma DIN ISO-1043/78. Nacionalmente, é conhecida como “Isopor®”, marca registrada pela Knauf em 1998, que comercializa os produtos de poliestireno expandido vendidos no Brasil.

Sua versatilidade e propriedades peculiares apresentam incentivos para embalagens industriais, serviços de inovação, artigos de consumo (caixas térmicas, organizadores, porta-gelo, pranchas, outros) e agricultura, descritos pela Associação Brasileira de Poliestireno Expandido, no seu Manual de utilização publicado em 2006. Ainda, segundo os mesmos, sua aplicação é mais difundida na construção civil, por ser um material isolante, resistente e de extrema leveza, proporcionando conforto termoacústico e baixo peso próprio às estruturas de edificação.

O Brasil é responsável pelo consumo aparente de 91,7 mil toneladas no ano de 2017, dados revelados pela Comissão Setorial de EPS (ABIQUIM, 2019). Destes, 46%

da produção são voltados ao consumo da indústria da construção civil (ABRAPEX, 2019), o que é justificável, uma vez que os produtos finais de EPS são inodoros, não contaminam o solo, água e ar, são 100% reaproveitáveis e recicláveis, e podem voltar à condição de matéria-prima (ABRAPEX, 2006).

O poliestireno é resultado da polimerização de monômeros de estireno, hidrocarboneto líquido derivado do petróleo. Quando o seu precursor é misturado a gases, leva a sua expansão, formando o EPS. Inicialmente, os gases utilizados na fabricação do EPS eram os clorofluorcarbonetos (CFCs), nocivos à camada de ozônio, atualmente como agente expensor, emprega-se o pentano, isento de danos ambientais (KNAUF, 2019).

O resultado da polimerização do percurso são pérolas plásticas com 3 mm de diâmetro, o conjunto químico pode ser levado à expansão. Esses grânulos rígidos podem aumentar até 50 vezes o seu tamanho original, o que possibilita moldá-lo em qualquer formato, tamanho e massa específica, com a capacidade de bloquear a umidade e manter a temperatura interna (ABRAPEX, 2006).

### **2.2.1 Massa Específica**

O poliestireno expandido é uma espuma estável de baixa massa específica, com formato esférico de estrutura interna porosa, textura lisa, de superfície hidrofóbica, fechada e impermeável (ABRAPEX, 2006).

A densidade do EPS é um atrativo quando explanado os materiais leves, apresentando massa específica entre 10 e 30 Kg/m<sup>3</sup>, sendo qualificado como ultraleve (XU *et al.*, 2015). Ainda, Babu, Ganesh Babu e Wee (2005), defendem que o poliestireno expandido pode ser usado como agregado adequado para desenvolver concretos para aplicações estruturais e não estruturais. O incremento de 30 % a 45% de EPS no volume da mistura proporciona massa específica de concreto leve (ALLAHVERDI; AZIMI; ALIBABAIE, 2018).

O tamanho e a quantidade de EPS nos traços afetam diretamente o seu desempenho mecânico (BABU; GANESH BABU, 2003). Para Fernando, Jayasinghe e Jayasinghe (2017), um dos principais parâmetros, que podem ser afetados por essa redução na massa específica, é a resistência à compressão. Igualmente, outros autores atestam que a resistência à compressão dos concretos de EPS decresce

linearmente com o aumento do volume de EPS, uma vez que ele não apresenta resistência útil (BABU; GANESH BABU, 2003; LI *et al.*, 2015; OZÓRIO, 2016).

Ainda, Babu e Ganesh Babu (2003), destacam a relevância do diâmetro médio do poliestireno expandido, ao qual a resistência do concreto aumenta com a diminuição do tamanho do grânulo de EPS para as mesmas proporções de mistura. O refinamento granulométrico das esferas de 6,3 para 4,75 mm, proporcionou resistência à compressão, aos 28 dias, de 10,2 e 15 MPa, respectivamente, na faixa de massa específica de 1550 kg/m<sup>3</sup>. Assim, para maiores circunferências das esferas, há uma redução no desempenho mecânico.

Levando em consideração esses aspectos, a resistência à compressão nos concretos leves com poliestireno expandido, parece aumentar linearmente com um aumento na massa específica do concreto, paralelamente, com uma diminuição no volume de EPS.

É de fundamental importância habilitar esse material, onde as suas aptidões são vantajosas, designando isolantes térmico e acústico, painéis autoportantes, divisórias, sistema de blocos, entre outros, onde a baixa massa específica agrega alto fator de eficiência, comparada aos concretos convencionais (CCV) (ABRAPEX, 2006).

### **2.2.2 Porosidade**

A massa interna do EPS é porosa, uma vez expandida, o poliestireno deixa de ser um plástico celular rígido, para se transformar em uma espuma rígida com microcélulas fechadas, composta basicamente de vazios contendo ar (ABIQUIM, 2019).

Após a expansão, as pérolas apresentam em seu volume até 98% de ar e apenas 2% de poliestireno, por exemplo: em 1m<sup>3</sup> de EPS expandido, há de 3 a 6 bilhões de células fechadas e cheias de ar (ABRAPEX, 2006). Justificando a alta porosidade do material em função do quociente no número de vazios e o número de volume total do material.

### 2.2.3 Absorção

A norma da ABNT NM 30 define absorção como “o processo pelo qual um líquido é conduzido e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso” (ABNT, 2001, p. 1). O EPS é considerado um material não absorvente, por apresentar esferas fechadas e impermeáveis (OZÓRIO, 2016), proporcionando, concretos com baixa absorção.

Normalmente, os concretos leves com agregados leves, têm índice de absorção de água superior a 8%. O concreto com EPS apresenta absorção entre 2,8% e 6,9%, indicando boa qualidade do concreto. A baixa absorção, quando incorporado grânulos de EPS no concreto, é justificada, uma vez que a mistura não perde água para os agregados durante a hidratação do ligante (RANJBAR; MOUSAVI, 2015; OZÓRIO, 2016).

## 2.3 CIMENTO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO ÁLCALI-ATIVADA

A escória de alto-forno (EAF), muitas vezes mencionada apenas como escória no decorrer deste trabalho, é um subproduto industrial, gerado a partir da fabricação de ferro-gusa (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018). Bem conhecido por sua alta resistência a longo prazo e a resistência à deterioração, quando submetido a condições severas de exposição (MASTALI *et al.*, 2018). Bem como a vantagem ambiental, devido a menores emissões<sup>4</sup> de CO<sub>2</sub> e consumo de energia no desenvolvimento de materiais cimentícios (YANG *et al.*, 2014; YUANA *et al.*, 2017).

A EAF é um material vítreo, que passa pela técnica de granulação, processo pelo qual a escória de alto forno é fundida e resfriada rapidamente, impedindo a mobilidade dos íons de se organizarem em forma cristalina. As plantas modernas de granulação de escória apresentam teores de vidro elevados, acima de 90% (JOHN, 1995).

O potencial aglomerante da escória pode ser medido através da sua reatividade. Finura, composição química, módulo de hidraulicidade<sup>5</sup> e teor da fase

---

<sup>4</sup> Redução de 85 a 93% na emissão de dióxido de carbono, associada ao concreto escória, comparado ao concreto espuma, composto por cimento Portland (MASTALI *et al.*, 2018).

<sup>5</sup> Proporção entre os modificadores e os formadores de cadeia, o módulo mais simples é aquele que relaciona os dois compostos mais importantes da escória (CaO/SiO<sub>2</sub>)

vítrea são alguns dos parâmetros consagrados, atuando como indicadores na velocidade de reação, podem ser analisados na Tabela 8.

Tabela 8 - Características que influenciam a reatividade da escória.

CARACTERÍSTICA	VALOR	ANÁLISE	FONTE
Finura	250 a 700 m <sup>2</sup> /kg	Finura de Blaine	Talling e Brandstetr (1989)
Composição química	C, S, M e A <sup>6</sup>	Módulo de hidraulicidade	Cincotto, Battagin e Agopyan (1992) John (1995) Melo Neto (2002)
Teor da fase vítrea	95%	Microscopia ótica ou DRX	Cincotto, Battagin e Agopyan (1992) John (1995)

Fonte: A autora (2019).

Embora o mecanismo de hidratação do cimento Portland e da escória se assemelhem, existe divergência nos produtos finais (JOHN, 1995). Ambas passam pelo processo de dissolução e precipitação, porém a dissolução da escória em água ocorre de maneira retardada, uma vez que, promove uma película deficiente em Ca<sup>2+</sup>, impedindo o avanço da hidratação (VOINOVITCH; RAVERDY; DRON, 1980 *apud* JOHN, 1995). Sendo necessária a ativação dos íons OH<sup>-</sup> (ataque hidroxílico) para penetrar tal película, permitindo a dissolução (VOINOVITCH; RAVERDY; DRON, 1980 *apud* JOHN, 1995; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2014).

A influência da composição química afeta a hidratação da escória. A concentração de CaO (C) aumenta a solubilidade, assim como a de alumínio aumenta a sua viscosidade, em teores entre 25 e 28%. Portanto, a reatividade da escória é função do quanto C/S é maior, garantindo melhor hidratação nas escórias básicas<sup>7</sup> (JOHN, 1995).

A capacidade aglomerante da escória é função da sua velocidade de dissolução. A baixa velocidade de hidratação da escória em água é atribuída a pouca solubilidade no meio aquoso (MARTINS, 2016). John (1995) considera duas abordagens, a primeira, que a elevação do pH<sup>8</sup> aumenta a solubilidade da sílica amorfa. E a segunda, há evidências empíricas que uma camada de sílico-aluminato

<sup>6</sup> Considera-se a terminologia usual em química do cimento: C = CaO, S = SiO<sub>2</sub>, A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, M = MgO

<sup>7</sup> Escória básica apresenta  $\frac{CaO}{SiO_2} > 1$ , caso contrário, a escória é ácida.

<sup>8</sup> A água, considerada, nesse trabalho é água pura de pH neutro, possui um valor de pH igual a 7.

hidratado é formada na superfície da escória, dificultando e até mesmo impedindo o procedimento da dissolução.

Em virtude dos fatos mencionados, o efeito produzido na hidratação, acelerando a dissolução dos compostos da escória, são denominados ativadores<sup>9</sup> (JOHN, 1995).

Entre os ativadores químicos mais antigos estão a cal hidratada, o cimento Portland, os sulfatos de cálcio hidratados, como a gipsita, hemidrato e a anidrita (JOHN, 1995; MELO NETO, 2002, 2008), hidróxidos de metais alcalinos como o KOH e NaOH<sup>10</sup>, os silicatos alcalinos de sódio ou potássio ( $R_2O.nSiO_2$ ) e, também, a combinação desses elementos (JOHN, 1995).

Muito se tem discutido, recentemente, acerca de ativação com silicato de sódio (MARTINS, 2016; SAHIN; ERDOGAN; ÖZGUR, 2018; MELO NETO, 2002, 2008; PACHECO-TORGAL, *et al.* 2014; MASTALI *et al.*, 2018; ARAÚJO JÚNIOR, 2019). É consensual, entre os estudos citados, que para uma melhor resistência mecânica e outras propriedades, o silicato de sódio mostra-se como o ativador de melhor desempenho.

Entre os principais processos de fabricação do silicato de sódio, pode-se destacar com maior frequência a fusão a aproximadamente 1300°C de misturas de sílica e carbonato de sódio ( $Na_2CO_3$ ) ou, com menor frequência, de sulfato de sódio ( $Na_2SO_4$ ). E no Brasil, a técnica mais usual ocorre na dissolução de mineral silicoso<sup>11</sup> em solução de hidróxido de sódio (NaOH), à alta temperatura e pressão (JOHN, 1995).

A composição química afeta diretamente a solubilidade dos silicatos de sódio. No caso o módulo de sílica, razão entre  $SiO_2/Na_2O$ , chega a variar de 1 a 3,6 no mercado brasileiro (LONGHI, 2015). O módulo de sílica de 1 a 1,5 é o ativador mais eficaz para todos os tipos de escória (ARAÚJO JÚNIOR, 2019).

Segundo John (1995), o pH das soluções cresce com o aumento do teor de  $Na_2O$  e, conseqüentemente, diminui com o crescimento do módulo de sílica. Tendo em vista os aspectos observados, consegue-se potencializar o fator ativador com proporções menores do módulo de sílica.

---

<sup>9</sup> A ativação da escória pode ser química, térmica ou mecânica.

<sup>10</sup> O hidróxido de sódio foi utilizado pela primeira vez em 1937, para acelerar a pega junto à mistura de cal hidratada e escória (WITHEY; ASTON, 1939 *apud* JOHN, 1995).

<sup>11</sup> Pode ser empregado a areia, calcedônia, opala, diatomita, entre outros.

### 2.3.1 Produtos hidratados

Os produtos formados a partir da hidratação da escória ativada podem variar de acordo com a composição química da escória e dos materiais que a substituem parcialmente, além do tipo de ativador empregado. Porém, de forma geral, o principal produto de hidratação da escória é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (MELO NETO, 2002; JOHN, 1995). Junto ao gel C-S-H, outros produtos secundários são produzidos, como os picos de hidrotalcita, AFm, hidrogranada, aluminato tetracálcico, monocarboaluminato de cálcio (SILVA, 1998).

A relação C/S nas escórias de alto forno sofrem variações, aproximadamente entre  $0,7 < C/S < 1,4$ . Analisando em paralelo ao cimento Portland, é muito inferior, cuja relação se encontra em torno de 3 (TAYLOR 1997; JOHN 1995). Dessa forma, incorre o efeito do ativador, e pode-se mencionar que a hidratação da escória leva a uma morfologia filamentosa semelhante à folha, e geralmente, representado como o C-S-H do “tipo I”, com composição química mais próxima de 1,4 ηm-Tobermorita. A relação cálcio/silício (Ca/Si) neste composto varia nos limites de 0,8 e 1,2, dependendo do comprimento da cadeia (TAYLOR, 1997).

### 2.3.2 Experiências com concreto celular utilizando escória álcali-ativada (CCEAA)

Alguns pesquisadores estudaram as propriedades mecânicas do concreto celular com escória álcali-ativada como aglomerante (SAHIN; ERDOGAN; ÖZGUR, 2018; ESMAILY; NURANIAN, 2012; YUANA *et al.*, 2017). A literatura nesta área é, principalmente, dedicada à investigação e melhoria da resistência à compressão, isolante termoacústico e distribuição de poros do concreto celular. Enquanto isso, alguns pesquisadores desenvolveram modelos para prever a resistência à compressão e condutividade térmica do concreto espuma álcali-ativado, (YANG *et al.*, 2014) e outros analisaram as propriedades acústicas (MASTALI *et al.*, 2018). No entanto, não houve nenhum estudo abrangente para analisar as propriedades físicas e mecânicas do CCEAA, empregando EPS na sua composição. Embora alguns estudos (por exemplo, MILED; SAB; LE ROY, 2007, 2011; LE ROY, PARANT, e BOULAY 2005) tenham analisado o efeito do tamanho dos grânulos de EPS no módulo elástico de concretos leves EPS, com uma relação a/agl de 0,26, as

propriedades de CCEAA com EPS e diferentes relações a/agl (um fator de extrema relevância em relação às propriedades do material) não foram estudadas em detalhe.

Em consequência disso, podem-se verificar algumas variações que resumem os trabalhos mais atuais publicados sobre concreto celular produzido com aglomerante escória álcali-ativado. A Tabela 9 apresenta características como os principais ativadores alcalinos, o módulo de sílica ( $M_s$ ), tipos, formas de diluição dos agentes de aeração, assim como o volume incorporado à mistura, os símbolos:  $\rho$ ,  $F_{c28}$  correspondem respectivamente, à massa específica do concreto, que pode estar no estado fresco ou seco, e a resistência à compressão aos 28 dias.

Mastali *et al.*, (2018), investigou os efeitos do uso de diferentes tipos de fibras, incluindo poliacetato de vinila (PVA), polipropileno (PP) e basalto, nas propriedades mecânicas de ligantes de escória ativados por álcali. Os CCEAA foram desenvolvidos variando a massa específica seca, na faixa de 550 a 1500 kg/m<sup>3</sup>; resistência à compressão de 2,5 a 13 MPa. Para isto, utilizou como ativador uma relação de hidróxido de sódio e silicato de sódio com razão 2 e Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> com módulo de sílica de 2,5. O agente espumígeno, na forma de proteína hidrolisada, foi preparado na proporção 1:33 (agente:água). A espuma, criada com massa específica de 45 kg/m<sup>3</sup>, foi adicionada à composição reforçada com fibra no estado fresco em diferentes dosagens: 10, 15, 20, 25, 30 e 35% da massa total. Os concretos de espuma de escória, ativados por álcalis, utilizando 25-35% de espuma, apresentaram excelentes coeficientes máximos de absorção acústica (0,8–1) nas regiões de média e alta frequência.

Tabela 9 - Características do concreto celular de escória álcali-ativada.

Autor	Ativador Alcalino		Agente espumígeno			$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	F <sub>c28</sub> (MPa)
	Tipo	M <sub>s</sub>	Tipo	Proporção	Quant. de espuma		
Mastali <i>et al.</i> , (2018)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> + NaOH	2,5	Base proteína	1:33	10%	550 <sup>c</sup>	2,5 <sup>c</sup>
					15%	700 <sup>c</sup>	3 <sup>c</sup>
					20%	800 <sup>c</sup>	4 <sup>c</sup>
					25%	1000 <sup>c</sup>	6 <sup>c</sup>
					30%	1300 <sup>c</sup>	9,5 <sup>c</sup>
					35%	1500 <sup>c</sup>	13 <sup>c</sup>
Sahin, Erdogan e Özgur (2018)	NaSiO <sub>2</sub> + NaOH	3,2	Peróxido de hidrogênio	0 – 1,5% <sup>a</sup>	-	516 – 1199 <sup>b</sup>	0,5 - 30
Yang <i>et al.</i> , (2014)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	1,2	Base proteína	1:19	62%	386	1,97
					64%	395	1,64
					68%	436	1,56
					70%	456	1,03
					72%	492	0,8
Esmaily e Nuranian (2012)	NaSiO <sub>2</sub> + NaOH	1-1,7	Alumínio em pó Alquil éter sulfato, Ácido oleico e Lauril sulfato de sódio	-	-	681 - 2169 <sup>b</sup>	10 - 12,8
Yuan, <i>et al.</i> (2017)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-	Alumínio em pó	0,42% <sup>a</sup>	-	538 <sup>b</sup>	2,42

<sup>a</sup> Massa do aglomerante

<sup>b</sup> Massa específica no estado fresco

<sup>c</sup> Valores retirados de gráficos

Fonte: A autora (2019).

Esmaily e Nuranian (2012) testaram concretos celulares de alta resistência não neutralizados (com massa específica no estado fresco entre 681 e 2169 kg/m<sup>3</sup>), usando escória ativada com solução de silicato de sódio, e quantidade apropriada de hidróxido de sódio, que fizeram variações no módulo de sílica de 1 a 1,7 e concluíram que a distribuição de vazios de ar e resistência à compressão desse concreto dependem, significativamente, da relação entre a solução de silicato de sódio e o pó de alumínio utilizado na produção de gás no processo de formação de espuma. Três diferentes agentes espumígenos (alquil éter sulfato, ácido oleico e lauril sulfato de sódio) foram empregados juntamente com o pó de alumínio, as quantidades escolhidas tiveram como base o processo experimental de tentativa e erro.

Pela observação dos aspectos analisados, o módulo sílica tem um efeito binário na produção de concreto celular. Geralmente, quanto mais baixo o módulo, mais o meio básico é necessário para a reação com o pó de alumínio (ESMAILY; NURANIAN, 2012). Por outro lado, o módulo de sílica tem grande efeito na resistência final do cimento de escória ativado por álcali (ARAÚJO JÚNIOR, 2019).

Já a pesquisa desenvolvida por Sahin, Erdogan e Özgür (2018), analisou a produção de pastas de escória aerada ativadas com álcalis, usando peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ). Os testes de consistência, absorção de água, condutividade térmica e mecânicos foram realizados em amostras curadas, sob três diferentes regimes de cura: cura em estufa úmida a  $80^\circ C$ , cura selada e cura ambiente. Quatro variações de  $a/agl$  (0,4; 0,425; 0,45; 0,5) e  $H_2O_2$  (0 a 1,5% da massa da escória), identificaram a incorporação de  $H_2O_2$  na faixa de 0,25% -1,25%, não apresentando alteração mensurável no índice de consistência (*flow table*), mas não pode ser realizado em misturas contendo 1,50% de  $H_2O_2$ , devido à decomposição da espuma. Uma combinação de solução de hidróxido de sódio e solução de silicato de sódio foi escolhida como o ativador alcalino, usando  $Na_2O = 8,9\%$ ,  $SiO_2 = 28,6\%$  e  $H_2O = 62,5\%$  (com  $Ms = 3,2$ ). Assim, a solução continha 4,46% de  $Na_2O$  em todas as misturas. A faixa de massa específica variou entre  $516 \text{ kg/m}^3$  e  $1199 \text{ kg/m}^3$ , e resistência à compressão de 0,5 a 30 MPa. Substancialmente, não há mudança significativa na massa específica, além de um determinado teor de  $H_2O_2$  para misturas com  $a/agl=0,425$ , 0,45 e 0,50, o que pode ser atribuído ao uso de altas quantidades de peróxido de hidrogênio, a baixa consistência de misturas que não impedem a fuga de oxigênio após a reação e o colapso das bolhas de ar, devido à fusão.

A decomposição do  $H_2O_2$  é uma reação exotérmica que forma água e oxigênio, Equação 3. A taxa de decomposição  $H_2O_2$  depende da sua concentração, temperatura e pH (SAHIN; ERDOGAN; ÖZGÜR, 2018). Assim, misturas ativadas alcalinamente à expansão e aeração, dependem essencialmente do teor de água e do agente de aeração utilizado.



Yang *et al.*, (2014) estudou, além do isolamento térmico para aquecimento de piso, atendendo à especificação coreana (KS F 4039), um detalhamento acerca do perfil de impacto ambiental, do concreto celular de escória em relação ao concreto convencional. Uma combinação de ativadores foi utilizada, e o silicato de sódio em pó, composto de um módulo de sílica de 1,12. A espuma pré-formada foi baseada em um agente espumígeno de base proteica, com componentes enzimáticos ativos, diluídos em uma parte de agente espumígeno para dezenove partes de água (1:19), com massa específica de  $40 \text{ kg/m}^3$ . O volume de espuma variou de 62 a 72% do

volume da mistura e as resistências à compressão de 0,8 a 1,97 MPa, onde o menor volume de espuma levou a uma maior resistência mecânica. O concreto desenvolvido com espuma de escória ativada por álcali exibiu uma maior resistência à compressão, do que o concreto espuma baseado em cimento Portland, com massa específica seca similar. Além disso, a emissão de dióxido de carbono, associada ao concreto desenvolvido, foi notavelmente menor (85-93%) em comparação ao concreto espuma de cimento Portland comum. Eles concluíram que as propriedades de durabilidade, o comportamento de contração e a resistência ao fogo desses materiais, deveriam ser mais estudados (YANG *et al.*, 2014).

Assim, o teor de água influencia diretamente em vários parâmetros, como a taxa de decomposição de  $H_2O_2$ , consistência, tempo de endurecimento, pH e temperatura da mistura fresca.

Yuan *et al.*, (2017), ao investigar a escória ativada de carbonato de sódio para substituir o cimento em concreto aerado autoclavado (AAC), denominado concreto aerado autoclavado ativado por meio de álcali (ASAAC), chegou aos seguintes números: redução de 25% da massa específica seca e aumento de 18% da condutividade térmica, proporcionando um acréscimo de 13% da porosidade, diminuindo a retração em 5%. Ao se examinar a microestrutura e suas fases, verifica-se que a retração é reduzida com o aumento da cristalinidade, que é definida com a posição de 11.3 Å tobermorita, indicando que a dosagem ótima de carbonato de sódio, na cristalinidade do produto da reação é próxima de 6%. Uma maior incorporação de Al e álcalis (Na) na cadeia de tobermorita é observada para a amostra ASAAC.

Em face aos dados apresentados, os concretos celulares de escória utilizam, na sua maioria, o silicato de sódio ( $Na_2SiO_3$ ) como ativador ou uma composição junto ao hidróxido de sódio ( $Na_2SiO_3 + NaOH$ ), para acelerar a dissolução ou para se obter o módulo desejado a partir do silicato. Os agentes espumígenos são diluídos em proporções variadas, e o produto de aeração química mais utilizado é o alumínio em pó, com ponto desfavorável ao controle da expansão. A quantidade de vazios incorporados à mistura afeta diretamente a massa específica e a resistência à compressão. As amostras tiveram massa específica aparente entre 516 kg/m<sup>3</sup> e 2169 kg/m<sup>3</sup>.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, será abordado o programa experimental, contendo a descrição e justificativa de todas as partes pertinentes ao escopo desta dissertação, incluindo os materiais utilizados, método de dosagem e procedimentos de ensaios.

#### 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi elaborado de acordo com o objetivo geral e específico definidos para esta pesquisa, a fim de contribuir no desenvolvimento de uma nova alternativa para o cimento Portland tradicional, utilizado em concreto celular.

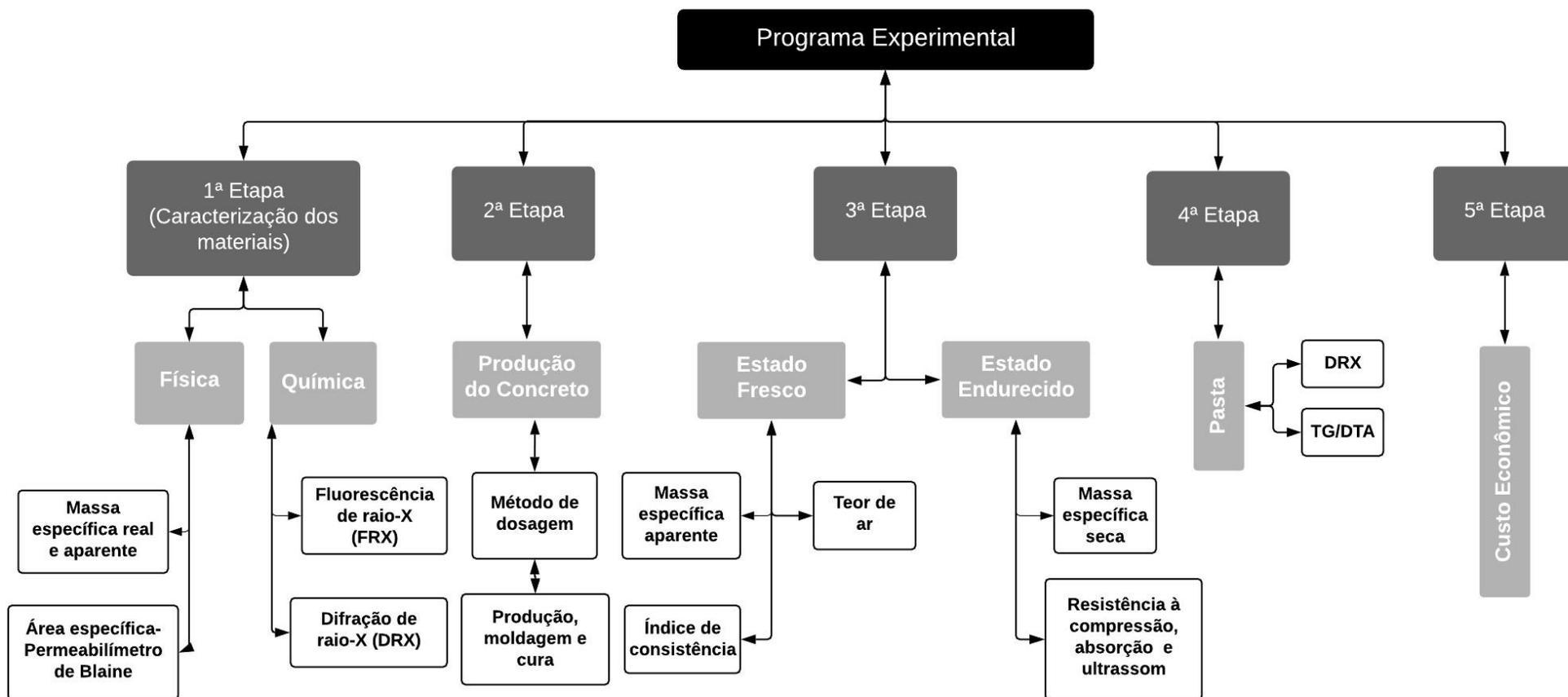
Para elaboração do concreto celular de escória álcali-ativada por silicato de sódio (CCEAA), foi utilizado o mecanismo de aeração de espuma pré-formada e, para fins comparativos, também foi elaborado o concreto celular de cimento tradicional (CCE). Outras variações comparativas importantes foram (a) substituição do agregado miúdo por EPS e (b) utilização de três fatores  $a/agl$ .

O programa experimental adotado nesta pesquisa foi dividido em cinco etapas, de acordo com o Fluxograma 2. A primeira etapa descreve os materiais adotados, sua caracterização físico-química e microestrutura, quando necessária. A segunda etapa, explana o processo de produção do concreto celular, detalhando o método de dosagem utilizado para a obtenção da proporção adequada na mistura, assim como o preparo, moldagem e a cura. A terceira etapa, analisa as propriedades do concreto celular no estado fresco e endurecido. A quarta, aborda o estudo da pasta para verificar se ocorrem mudanças microestruturais quando dá (a) substituição do aglomerante cimento Portland por escória álcali-ativada e da (b) incorporação da espuma à matriz cimentícia. A quinta etapa, analisa o custo econômico dos diferentes concretos celulares produzidos.

#### 3.2 MATERIAIS

Os materiais foram escolhidos dentro da disponibilidade da região, de forma a atender os objetivos iniciais deste trabalho, e são descritos a seguir.

Fluxograma 2 - Esquema do programa experimental.



Fonte: A autora (2019).

### 3.2.1 Cimento Portland

O cimento empregado na confecção do concreto foi o cimento Portland de alta resistência inicial CPV – ARI MAX, fabricado pela Cimento Nacional. A caracterização química foi realizada através de Fluorescência de raio-X (FRX), no Laboratório de Isótopos Estáveis do Núcleo de Estudos Geoquímicos (NEG-Labise), localizado no Departamento de Geologia da UFPE, Tabela 10.

Todo o cimento empregado neste trabalho foi proveniente de um único lote de produção, suas principais características físicas e mecânicas estão descritas na Tabela 11.

Tabela 10 - Caracterização química do cimento Portland CPV – ARI

Composição química	
Substância	Teor (%)
SiO <sub>2</sub>	15,93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,89
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,77
CaO	64,22
MgO	1,73
SO <sub>3</sub>	5,11
K <sub>2</sub> O	1,27
Na <sub>2</sub> O	0,19
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,59
Perda ao Fogo (P.F)	3,67

Fonte: A autora (2019).

Tabela 11 - Caracterização física e mecânica do cimento Portland CPV – ARI

	Ensaio	Metodologia	Resultado
Física	Área Específica (Blaine)	ABNT NBR 16372	4.450 cm <sup>2</sup> /g
	Massa Específica	ABNT NBR 16605	3,05 g/cm <sup>3</sup>
	Finura pela peneira 75 µm	ABNT NBR 11579	0,04 %
	Finura pela peneira 45 µm	ABNT NBR 9202/85	0,64 %
	Início de pega	ABNT NBR 16607	158 min
	Fim de pega	ABNT NBR 16607	218 min
Mecânica	Resist. à Compressão - 1 Dia	ABNT NBR 7215	29,3
	Resist. à Compressão - 3 Dias		39,5
	Resist. à Compressão - 7 Dias		44,3
	Resist. à Compressão - 28 Dias		54,2

Fonte: Cimento Nacional (2019).

### 3.2.2 Escória de alto forno

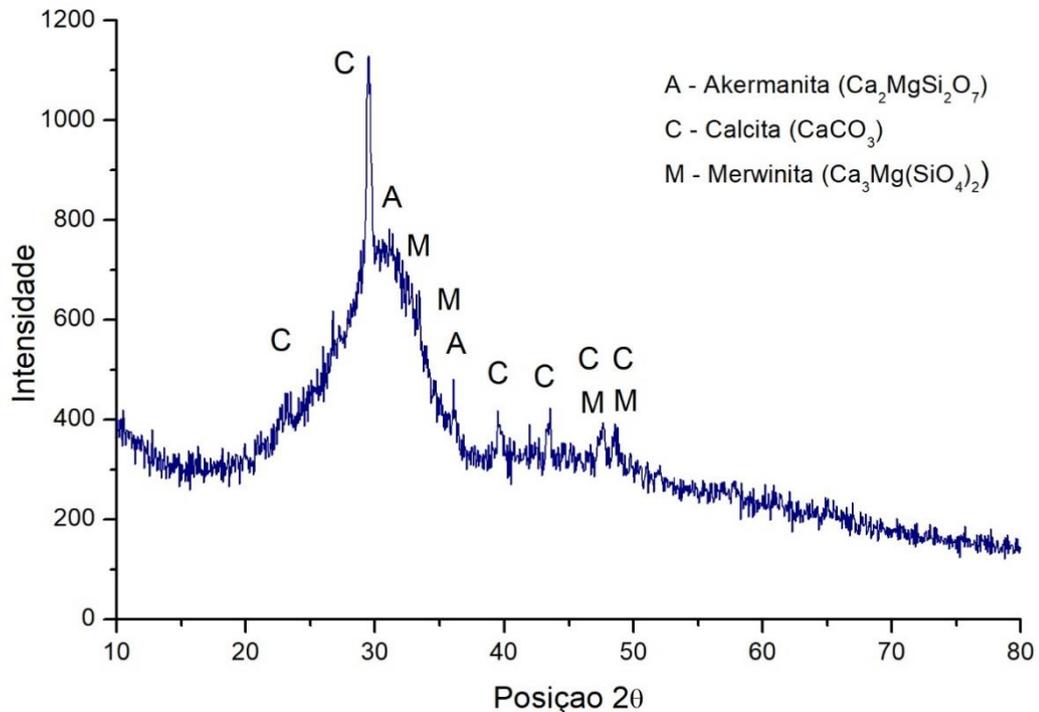
A escória de alto forno moída utilizada foi fornecida pela empresa Cimento Mizu S/A. As características físico-química do material encontram-se na Tabela 12, e a mineralógica, na Figura 6. De acordo com a classificação de Pacheco-Torgal *et al.* (2014), a escória é classificada como básica, pois sua relação  $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$  é igual a 1,28 ( $>1$ ).

Tabela 12 - Caracterização físico-química da escória de alto forno.

Óxidos	Média (%)	Massa específica
CaO	42,33	2,89 g/cm <sup>3</sup>
SiO <sub>2</sub>	38,46	Finura Blaine
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,50	(cm <sup>2</sup> /g)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,40	4.647
MgO	6,96	Índice de finura -
K <sub>2</sub> O	0,10	#200
Na <sub>2</sub> O	0,10	0,07 %
		Resíduo na peneira
		#325
		1,33 %

Fonte: Cimento Mizu (2018).

Figura 7 - Difratoograma da escória anidra.



Fonte: A autora (2019).

### 3.2.3 Areia

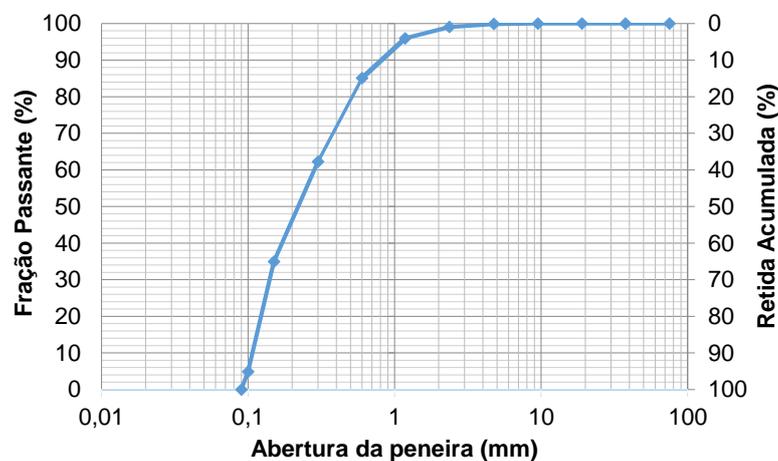
Um dos agregados miúdos utilizado foi a areia quartzosa, com módulo de finura 1,23, suas propriedades estão apresentadas na Tabela 13 e sua distribuição granulométrica, na Figura 7. A areia foi previamente lavada e seca em estufa, por 24 horas, a uma temperatura de 105° C, e o material utilizado foi de uma única remessa da jazida.

Tabela 13 - Caracterização física da areia.

Ensaio	Metodologia	Resultado	
Massa específica	ABNT NBR NM 52:2009	2,63	g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária	ABNT NBR NM 45:2006	1,75	g/cm <sup>3</sup>
Dimensão Máximo	ABNT NBR NM 248:2003	1,18	
Módulo de Finura	ABNT NBR NM 248:2003	1,23	
d <sub>10</sub>	0,096	d <sub>60</sub>	0,288
d <sub>30</sub>	0,139	d <sub>90</sub>	0,862
Coeficiente de Uniformidade (Cu)		2,98	Muito uniforme
Coeficiente de Curvatura (Cc)		0,70	Mal graduado

Fonte: A autora (2019).

Figura 8 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: A autora (2019).

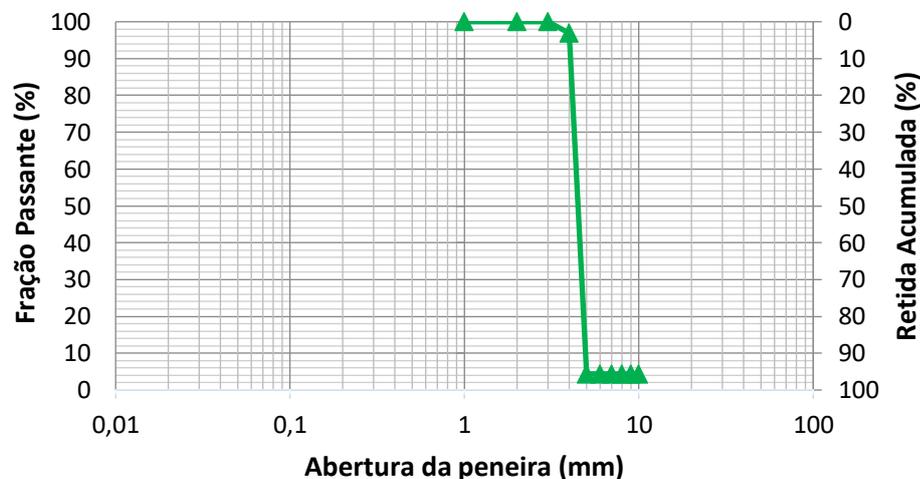
### 3.2.4 Poliestireno expandido (EPS)

O EPS utilizado foi fornecido pela empresa MF Artefatos, localizada na área industrial no Cabo de Santo Agostinho - PE, a mesma adquire o poliéster de uma empresa de origem chinesa, e realiza o processo de expansão sob duas temperaturas, 90 e 95° C, proporcionando esferas com dimensões variadas.

Neste estudo, as pérolas de EPS apresentaram diâmetro máximo de 6,3 mm, sendo necessário o acréscimo da série intermediária, para uma melhor investigação da dimensão das esferas, como observado na Figura 8. O EPS enquadra-se como agregado miúdo, pois a NBR NM 52 (ABNT, 2009) considera este, o que passa na peneira com abertura de malha 9,5 mm, que passa quase totalmente na peneira de malha 4,57 mm e fica retido, em sua maior parte, na peneira 75 µm.

A massa específica do EPS foi realizada de acordo com o método modificado, sugerido por Deng e Xiao (2010) e aplicado por Ashana e Chandrakaran (2017), tendo como base a ASTM C128. As esferas de EPS foram colocadas no picnômetro de 500 cm<sup>3</sup>, até que o volume do recipiente estivesse aparentemente ocupado (Figura 9). Em seguida, um pedaço de gaze foi colocado no orifício de entrada do picnômetro para manter as esferas em posição, quando adicionada a água, até que o peso do picnômetro fosse constante. A massa específica real foi calculada conforme a Equação 4, e as características físicas estão apresentadas na Tabela 14.

Figura 9 - Distribuição granulométrica do EPS (ABNT NBR NM 248:2003).



Fonte: A autora (2019).

$$\rho = \frac{b-a}{(d-a)-(c-d)} \quad (4)$$

Em que:

$\rho$  = Massa específica do EPS, em g/cm<sup>3</sup>;

$a$  = massa do picnômetro vazio e seco, em g;

$b$  = massa do picnômetro mais amostra, em g;

c = massa do picnômetro mais amostra, mais água, em g;  
d = massa do picnômetro cheio de água, em g.

Tabela 14 - Caracterização física do EPS

Ensaio	Metodologia	Resultado	
Massa específica	ABNT NBR NM 52:2009	0,0210	g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária	ABNT NBR NM 45:2006	0,0127	g/cm <sup>3</sup>
Dimensão Máximo	ABNT NBR NM 248:2003	6,30	
Módulo de Finura	ABNT NBR NM 248:2003	5,77	

Fonte: A autora (2019).

Figura 10 - Ensaio de massa específica do EPS utilizando picnômetro de 500 cm<sup>3</sup>

Fonte: A autora (2019).

### 3.2.5 Espuma

A espuma utilizada no concreto foi a pré-formada através de aditivo espumígeno, Tabela 15. O aditivo espumígeno fornecido pela empresa MC- Bauchemie Brasil foi o tensoativo sintético, no estado líquido, inodoro e de coloração castanho escuro.

Tabela 15 - Características físico-química do aditivo espumígeno.

<b>Nome químico</b>	Sal de álcool graxo etoxilado sulfatado
<b>Massa específica</b>	1,01 g/cm <sup>3</sup>
<b>pH</b>	8,2 - 10,2
<b>Ponto de ebulição inicial</b>	100 °C

Fonte: MC Bauchemie (2018).

A massa específica aparente da espuma foi determinada como o quociente entre a massa específica da espuma e o volume de um recipiente ocupado pela espuma (2,94 litros). A determinação da massa específica foi a média de três repetições, Tabela 16. Tomou-se cuidado de descartar a espuma, em cada medição, para que o tempo em aberto não levasse a sua decomposição e alterasse a média do cálculo, o aspecto visual da espuma está representado na Figura 10.

Tabela 16 - Massa específica aparente da espuma na proporção 1:25.

<b>Nº de repetições</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Desvio</b>
<b>Massa específica (ρ)</b>	66,47	65,95	69,01	1,64
<b>Massa Específica na proporção 1:25</b>	67,14 Kg/m <sup>3</sup>			

Fonte: A autora (2019).

Figura 11 - Produção e aspecto visual da espuma pré-formada.



Fonte: A autora (2019).

Para confecção da espuma, o produto foi diluído na proporção 1:25 (aditivo:água), em razão do levantamento bibliográfico constantes no item 2.1.3.3 desta dissertação, com o intuito de obter maior volume de espuma de estrutura mais estável. Em razão da infraestrutura disponível, este estudo obteve a geração da espuma com o auxílio de uma furadeira de impacto com haste adaptada (Figura 11),

permitindo uma rotação de 2.000 rpm, agindo sob 1 mim após a diluição do produto em água.

Figura 12 - Haste metálica utilizada na confecção da espuma pré-formada.



Fonte: A autora (2019).

### 3.2.6 Aditivo superplastificante

O superplastificante usado foi o MAXIFLUID 960 H da MATCHEM, um aditivo superplastificante tipo II, à base de policarboxilatos, desenvolvido para fabricação de concreto, compatível com todos os tipos de cimento Portland, e atende os requisitos da norma ABNT NBR 11768:2011. As características técnicas podem ser analisadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Características técnicas do aditivo superplastificante.

<b>Aspecto</b>	Líquido
<b>Cor</b>	Marrom Claro
<b>pH</b>	5,0 a 7,0
<b>Massa específica</b>	1,062 a 1,102 kg/L
<b>Viscosidade</b>	< 20 cP
<b>Teor de Cloretos</b>	Não contém cloretos

Fonte: MATCHEM (2016).

O aditivo atuou na compatibilização do índice de consistência das argamassas confeccionadas com cimento Portland, verificado conforme NBR 13276 (ABNT, 2016), descrita mais adiante.

### 3.2.7 Silicato de sódio

O silicato de sódio foi fornecido pela Pernambuco Química S/A, no estado líquido, com módulo de sílica (relação  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) de 1,72. Optou-se por utilizar este ativador pelo fato de ser um dos mais indicados na literatura, e desenvolver bons resultados quando utilizado na ativação da escória básica. As características técnicas fornecidas pela empresa podem ser analisadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Características técnicas do silicato de sódio.

Referência	Valor
$\text{Na}_2\text{O}$	16,50 %
$\text{SiO}_2$	28,50 %
Sólidos totais	45,00 %
Ms	1,72

Fonte: Pernambuco Química S/A (2019).

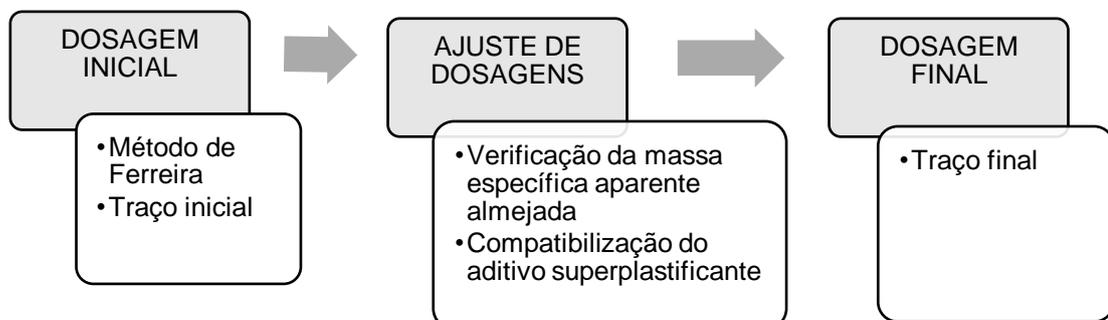
## 3.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO

A seguir, foram relatados os procedimentos para dosagem, preparo, moldagem e cura nos corpos de prova de concretos.

### 3.3.1 Método de dosagem

Para este estudo, o método de dosagem foi dividido em três partes: dosagem inicial, ajuste de dosagens e dosagem final, conforme apresentado no Fluxograma 3.

Fluxograma 3 - Método de dosagem.



Fonte: A autora (2019).

### 3.3.1.1 Dosagem Inicial

A dosagem inicial aborda as proporções adequadas para produção do CCE, seguindo o método desenvolvido por Ferreira (1987), em resumo no Fluxograma 1. Previamente, se faz necessário os seguintes dados:

- a) Caracterização física dos materiais construintes (areia, cimento e espuma);
- b) Massa específica aparente fresca do concreto celular desejado ( $\rho_{CCE}$ );
- c) Relação água/aglomerante ( $a/agl$ );
- d) Consumo de cimento (C)

A massa específica da areia, cimento e espuma, descrita no item 3.2 desta dissertação, foi respectivamente 2,63 g/cm<sup>3</sup>; 3,05 g/cm<sup>3</sup> e 0,067g/cm<sup>3</sup>. A determinação da massa específica aparente do CCE, assim como a relação  $a/agl$  e o consumo de cimento, levou em consideração os trabalhos desenvolvidos por Neville (1997), Freitas, Allende e Darwish (2004) Falliano *et al.*, (2018), debatidos no item 2.1.3, para a mesma faixa de resistência à compressão, que alcançou uma massa específica fresca próxima de 800 kg/m<sup>3</sup>, respeitando os limites que caracterizam este tipo de concreto, Tabela 1.

Adotou-se um consumo de cimento de 390 kg/m<sup>3</sup> e relação  $a/agl$  0,48, o que ratifica os estudos anteriores (BRADY; WATTS; JONES, 2001; FREITAS; ALLENDE; DARWISH, 2004; NEVILLE, 1997; FALLIANO *et al.*, 2018), citados ao longo da revisão bibliográfica, item 2.1.3.1. Após a definição dos dados de entrada, o traço é definido pela sequencia de calculos abaixo:

- Quantidade de Areia Seca por metro cúbico, em kg/m<sup>3</sup>

$$A_s = \rho_{CCE} - C - \left(\frac{a}{agl} \times C\right) \quad (5)$$

- Volume da espuma, em L/m<sup>3</sup>

$$V_e = 1000 - \frac{A_s}{\rho_a} - \frac{C}{\rho_c} - \left(\frac{a}{agl} \times C\right) \quad (6)$$

- Água Corrigida, em L/m<sup>3</sup>

$$V_a = \left(\frac{a}{agl} \times C\right) - (V_e \times \rho_e) \quad (7)$$

O Fluxograma 4 representa o esquema e os valores encontrados aplicando a metodologia de Ferreira (1987) para CCE, resultando no traço unitário em massa de cimento 1:0,57:1,53:0,38 (cimento:areia:espuma:água), com exceção da espuma que encontra-se em volume.

Fluxograma 4 - Aplicação do método de dosagem de Ferreira, com dados apresentados neste programa experimental.



Fonte: A autora (2019).

### 3.3.1.2 Ajuste de dosagens

A segunda etapa foi a confecção experimental do CCE, a partir do traço preliminar, encontrado de forma teórica na dosagem inicial. A massa específica prevista de 800 kg/m<sup>3</sup>, só foi alcançada por meio da introdução de areia, em 0,16 no traço unitário. Desta forma, o traço ajustado para o CCE foi 1:0,73:1,53:0,38 (Tabela 19). Partindo para o estudo (a) da substituição da areia por EPS em volume e (b) dos fatores a/agl 0,38; 0,42 e 0,46.

Tabela 19 - Traço utilizado na dosagem do CCE.

Traço em Massa e Volume			
Aglomerante	Areia	Espuma	a/agl
1,00	0,73	1,53	0,38

Fonte: A autora (2019).

Para incorporar a espuma é necessário que a argamassa tenha certa viscosidade, que permita a união das bolhas de ar. Por isso, o superplastificante proporcionou a trabalhabilidade necessária, sem alterar o fator a/agl.

Ressalta-se que o aditivo superplastificante utilizado é desenvolvido para cimentos do tipo Portland, visto que o cimento de escória álcali-ativada não é comercial e estes aditivos, quando incorporados, não proporcionam mudança na fluidez desse tipo de cimento. Portanto, primeiro foi realizado a dosagem com cimento de escória adotando-se, como referência, o índice de consistência das argamassas CCEAA para cada relação a/agl. Em seguida, foram testadas as porcentagens de superplastificante sobre a massa de cimento Portland, através da NBR 13276 (ABNT, 2016), de modo a se obter argamassas com fluidez semelhantes com as obtidas com as argamassas de escória ativada. Os resultados de índice de consistência constam na Tabela 20.

Tabela 20 - Compatibilização do superplastificante com as argamassas de cimento de relação a/agl 0,38; 0,42 e 0,46

Escória					Cimento						
Metodologia: ABNT NBR 13279:2016											
a/agl	Adit. (%)	Diâmetro (mm)			Ind. Consistência	a/agl	Adit. (%)	Diâmetro (mm)			Ind. Consistência
		D <sub>A</sub>	D <sub>B</sub>	D <sub>C</sub>	(mm)			D <sub>A</sub>	D <sub>B</sub>	D <sub>C</sub>	(mm)
0,38	0	415	411	418	415	0,38	0,23	420	406	415	414
0,42	0	430	439	435	435	0,42	0,18	430	431	428	430
0,46	0	464	465	466	465	0,46	0,16	464	459	465	463

Fonte: A autora (2019).

Assim, para a relação a/agl 0,38; 0,42 e 0,46, o teor de aditivo utilizado nas argamassas de cimento Portland, para se obter o mesmo índice de consistência das argamassas de escória ativada, foi de 0,23%, 0,18% e 0,16%, respectivamente. Como exemplo, as imagens do ensaio de compatibilidade podem ser analisadas na Figura 12.

Figura 13 - Ensaio de índice de consistência com relação a/agl 0,46: a) escória álcali-ativada; b) cimento Portland.



Fonte: A autora (2019).

### 3.3.1.3 Dosagem final

Com a definição do traço padrão (Tabela 19) e o ajuste do teor de superplastificante, foi definido o conjunto de variáveis (Tabela 21), com o estudo de 12 diferentes dosagens de concreto celular.

O traço identificado por CCA1 se refere ao traço padrão da pesquisa, ou seja, em sua composição não existe elemento específico, apenas cimento, areia, espuma, água e aditivo superplastificante.

Tabela 21 - Variáveis investigadas no programa experimental

Traço	Sigla	Tipo	Ligante	Agregado	a/agl	Idades de Estudo
1	CCA1	Concreto Celular Convencional	Cimento	Areia	0,38	3, 7 e 28 dias
2	CEA1	Concreto Celular Escória	Escória	Areia	0,38	3, 7 e 28 dias
3	CCP1	Concreto Celular Convencional com EPS	Cimento	EPS	0,38	3, 7 e 28 dias
4	CEP1	Concreto Celular Escória com EPS	Escória	EPS	0,38	3, 7 e 28 dias
5	CCA2	Concreto Celular Convencional	Cimento	Areia	0,42	3, 7 e 28 dias
6	CEA2	Concreto Celular Escória	Escória	Areia	0,42	3, 7 e 28 dias
7	CCP2	Concreto Celular Convencional com EPS	Cimento	EPS	0,42	3, 7 e 28 dias
8	CEP2	Concreto Celular Escória com EPS	Escória	EPS	0,42	3, 7 e 28 dias
9	CCA3	Concreto Celular Convencional	Cimento	Areia	0,46	3, 7 e 28 dias
10	CEA3	Concreto Celular Escória	Escória	Areia	0,46	3, 7 e 28 dias
11	CCP3	Concreto Celular Convencional com EPS	Cimento	EPS	0,46	3, 7 e 28 dias
12	CEP3	Concreto Celular Escória com EPS	Escória	EPS	0,46	3, 7 e 28 dias

Fonte: A autora (2019).

### 3.3.2 Produção

A confecção dos concretos ocorreu no Laboratório de Materiais e Estruturas (LABME), localizado no galpão de Estruturas e Construção Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE. Os concretos foram produzidos utilizando-se uma betoneira de capacidade de 400 litros. Todas as misturas levaram 7 minutos até completa homogeneização, dividido em duas partes, primeiro era fabricada a argamassa durante 4 min, e em seguida, incorporada a espuma pré-forma por 3 min.

Para os traços que continham EPS (CCP1, CCP2, CCP3, CEP1, CEP2 e CEP3), as pérolas foram homogeneizadas previamente com adesivo (cola) de base PVA, seguindo as orientações da ABRAPEX (2006). Com isto, temos o aumento do seu peso, de modo a evitar sua flutuação na água da mistura.

Nos concretos produzidos com escória álcali-ativada, CEA1, CEA2, CEA3, CEP1, CEP2, CEP3, o aglomerante corresponde a 87,85 % de escória, e 12,15% de

silicato de sódio<sup>12</sup>. A fração de água na composição do silicato sódio, foi utilizada para corrigir o volume de água total da mistura.

Inicialmente, a betoneira era preparada com imprimação, seguindo a recomendação de Helene e Terzian (1992); alternando o tipo de aglomerante, a depender do traço a ser confeccionado. A sequência adotada está simplificada no Quadro 3.

Quadro 3 - Sequência de mistura adotada para confecção dos concretos celulares.

Traço	Ordem	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>
1, 5 e 9	Ação	Areia + 50% cimento	50% cimento + 50% água	50% água + SP	Espuma
	Tempo	1 min	1 mim	2 min	3 min
Traço	Ordem	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>
2, 6 e 10	Ação	Areia + 50% escória	50% escória + 50% água	50% água + Silicato	Espuma
	Tempo	1 min	1 mim	2 min	3 min
Traço	Ordem	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>o</sup>
3, 7 e 11	Ação	EPS + 50% cimento	50% cimento + 50% água	50% água + SP	Espuma
	Tempo	1 min	1 mim	2 min	3 min
Traço	Ordem	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>o</sup>
4, 8 e 12	Ação	EPS + 50% escória	50% escória + 50% água	50% água + Silicato	Espuma
	Tempo	1 min	1 mim	2 min	3 min

Fonte: A autora (2019).

### 3.3.3 Moldagem e cura

As amostras foram moldadas em corpos de prova cilíndricos, de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. As fôrmas foram devidamente limpas, fechadas e receberam desmoldante a base de óleo mineral, na superfície interna. Direcionadas ao ambiente que passariam o período de cura, onde o concreto foi vertido *in loco*, de forma a não haver deslocamento do molde cilíndrico (Figura 13), evitando o rompimento das bolhas de ar.

<sup>12</sup> Essas proporções são as mesmas definidas por Melo Neto (2002) e Araújo Júnior (2019).

Figura 14 - Moldagem *in loco* do concreto celular de escória álcali-ativada.



Fonte: A autora (2019).

A moldagem dos corpos de prova ocorreu, imediatamente, após o término da mistura na betoneira. O preenchimento dos moldes foi realizado em camada única, recebendo 10 batidas na lateral da fôrma, com martelo de borracha. Na sequência, uma placa de vidro era colocada na superfície superior, até a desmoldagem com vinte e quatro horas, logo, identificados e imersos no tanque com água saturada de cal para cura, submetidos a essas condições, até idade dos ensaios com 3, 7 e 28 dias.

Para este trabalho, adotou-se esse procedimento de moldagem e preenchimento com o objetivo de mitigar problemas relacionados a heterogeneidade das amostras, uma vez que o concreto celular apresenta estrutura delicada de bolhas de ar, sendo natural evitar as manipulações bruscas, mantendo a estabilidade da espuma. O número de batidas nas paredes laterais dos moldes cilíndricos seguiu as recomendações de Silva (2015).

Deve-se ressaltar que os concretos celulares de escória com maior relação  $a/agl$ , CEA3 e CEP3, levaram um tempo maior para atingir o enrijecimento necessário para desmoldagem, por um período de 48 horas.

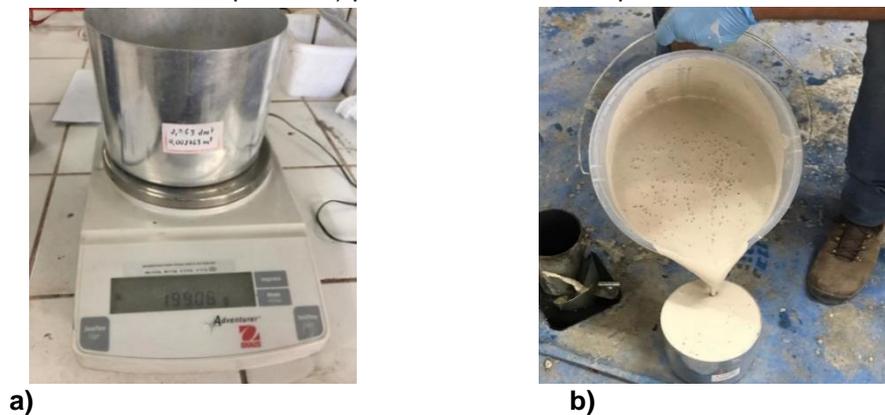
### 3.4 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

A seguir, foram descritos os procedimentos para a determinação da massa específica, teor de ar e espalhamento pelo método do cone de Abrams.

### 3.4.1 Massa específica aparente e teor de ar

Para este estudo, a massa específica aparente do concreto celular espumoso seguiu a metodologia da ABNT NBR 12644:2014, foi utilizado um recipiente cilíndrico, com volume de 2,76 L e relação altura x diâmetro igual a dois. Antes de realizar a moldagem, o recipiente foi pesado e preenchido imediatamente após a finalização da mistura na betoneira, efetuando-se a rasadura e a pesagem do conjunto (Figura 14). Chegando à massa específica, através do quociente entre a diferença de massa do recipiente e o volume ocupado por este.

Figura 15 - Ensaio de massa específica aparente com concreto celular de escória: a) pesagem do recipiente; b) preenchimento do recipiente.



Fonte: A autora (2019).

O teor de ar foi determinado através do método gravimétrico modificado, onde o cálculo partiu do procedimento da ABNT NBR 9833:2008. Adotou-se em utilizar na composição a massa total dos materiais que geram a espuma (água e agente espumígeno), e não da espuma isolada.

### 3.4.2 Espalhamento pelo método do cone de Abrams

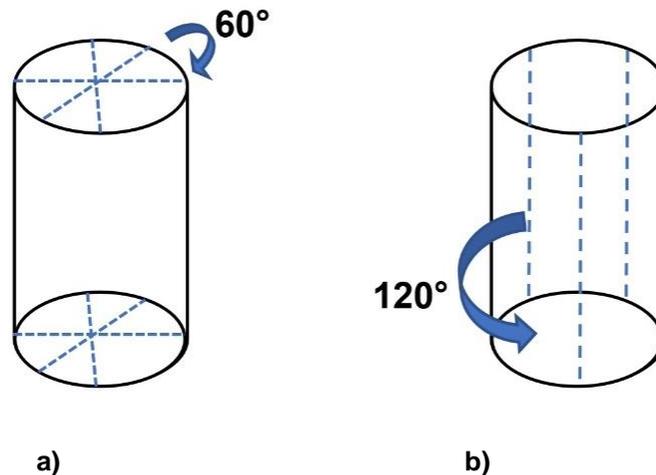
A fluidez foi analisada através do espalhamento, utilizando o método do cone de Abrams e ocorreu ao término da mistura, seguindo as recomendações da ABNT NBR 15823-2:2017, no qual, o preenchimento do tronco cônico foi realizado em camada única, de forma contínua e uniforme, evitando a ruptura das bolhas de ar.

### 3.5 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

Para refinamento dos dados, mitigando irregularidades e deformações no concreto celular, antes dos ensaios no estado endurecido, foi realizada uma coleta de dados, a respeito das dimensões de diâmetro e comprimento das amostras cilíndricas 10x20 cm (diâmetro x altura).

O diâmetro utilizado no cálculo da área para o ensaio de resistência à compressão, partiu da média de 6 medidas, sendo três do diâmetro superior e três do diâmetro inferior, com afastamento de aproximadamente  $60^\circ$ , entre si. E no ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica, o deslocamento resultou da média de três alturas do corpo de prova, com afastamento de aproximadamente  $120^\circ$  entre elas, Figura 15. O volume do corpo de prova, para determinar a massa específica aparente seca, também utilizou as médias de diâmetro e altura corrigidos, buscando maior precisão nos dados. O resumo dos ensaios realizados no concreto celular, assim como a quantidade e idades, podem ser analisadas na Tabela 22.

Figura 16 - Linhas pontilhadas mostrando as posições de medição a) dos diâmetros e b) das alturas do cilindro.



Fonte: A autora (2019).

Tabela 22 - Ensaio realizados no estado endurecido

Ensaio	Idades para realização dos ensaios	Quantidade de corpos de prova	Norma de Referência
Resistência à compressão	3 dias	6	NBR 5739/2018
	7 dias	6	
	28 dias	6	
Absorção por imersão	28 dias	3	NBR 9778/2005
Ultrassom	3 dias	6	NBR 8802/2019
	7 dias	6	
	28 dias	6	
Massa específica seca	28 dias	2	
<b>Total</b>		<b>23</b>	<b>276 amostras</b>

\*Os corpos de provas utilizados no ensaio de resistência à compressão e ultrassom são os mesmo.

Fonte: A autora (2019).

### 3.5.1 Resistência à compressão

Para este estudo, o ensaio de resistência à compressão do concreto celular foi determinado seguindo o procedimento estabelecido na ABNT NBR 5739:2018, nas idades de 3, 7 e 28 dias, para cada idade foram ensaiados seis corpos de prova. Executados no Laboratório de Materiais e Estruturas – LABME/CTG/UFPE, utilizou o a máquina servo controlada Shimadzu modelo AGS\_X de 300 kN (Figura 16), a uma velocidade de deformação axial de 0,25 MPa/s.

Figura 17 - Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão.



Fonte: A autora (2019).

O preparo das bases, ocorreu através de um par de pratos metálicos com discos de neoprene para corpos de prova 10x20cm, posicionados centralizados sobre o prato superior da máquina, mantendo a planicidade entre a superfície e o alinhamento do corpo de prova entre os pratos do concreto em contato com equipamento, demonstrado na Figura 17.

Figura 18 - Preparo da base para o ensaio de resistência à compressão utilizando pratos metálicos com neoprene.



Fonte: A autora (2019).

### 3.5.2 Velocidade de propagação de onda ultrassônica

O ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes – LABTAG situado dentro do galpão de Estruturas e Construção Civil do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) na UFPE. A velocidade de propagação de onda ultrassônica seguiu a orientação da ABNT NBR 8802:2019 nas idades de 3, 7 e 28 dias em 6 amostras de concreto na condição saturada.

O equipamento utilizado foi o gerador de pulsos ultrassônico modelo *Pundit Lab* da Proceq. A captação dos dados e análise das ondas foram verificadas através do *software Pundit Link*, também desenvolvido pela Proceq. Para emitir e receber os pulsos de ondas foram utilizados dois transdutores de cisalhamento com frequência de 54 kHz, posicionados nas extremidades do eixo longitudinal do corpo de prova (Figura 18).

Figura 19 - Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica.



Fonte: A autora (2019).

### 3.5.3 Absorção por imersão e massa específica aparente seca

Para este estudo, a absorção por imersão e a massa específica aparente seca foi realizada na idade de 28 dias, permaneceram em condição saturada até a data no ensaio. A metodologia adotada, seguiu as recomendações da ABNT NBR 9778:2005 com algumas modificações.

As amostras que contêm areia como agregado miúdo, CCA1, CCA2, CCA3, CEA1, CCA2 e CCA3, foram completamente secas em estufa, durante 72 horas a uma temperatura de 105° C. No entanto, esta temperatura não é indicada para as amostras com EPS, uma vez que há possibilidade de alteração do formato do EPS pelo aquecimento chegando a sua decomposição próximo dos 100°C.

Para tanto, o ensaio nas amostras com agregado ultraleve, CCP1, CCP2, CCP3, CEP1, CEP2 e CEP3, foi produzido a uma temperatura de 60° C até constância de massa (BABU; GANESH BABU, 2003; OZÓRIO, 2016; LI; LIU; CHEN, 2015), como pode ser verificado na Figura 19.

Figura 20 - Estufa a 60°C com corpo de prova de concreto celular com EPS.



Fonte: A autora (2019).

### 3.6 ANÁLISE DA PASTA

Foram confeccionadas doze pastas para este estudo, com objetivo de analisar as possíveis variações microestruturais em função da incorporação da espuma. Para isso, metade das amostras não possuíam a espuma pré-formada e a composição pode ser analisadas na Tabela 23.

Tabela 23 - Composição das pastas investigadas no programa experimental.

Traço	Sigla	Tipo	Ligante	Espuma	a/agl
1	PC1	Pasta Convencional	Cimento	SEM	0,38
2	PE1	Pasta Escória	Escória	SEM	0,38
3	PC2	Pasta Convencional	Cimento	SEM	0,42
4	PE2	Pasta Escória	Escória	SEM	0,42
5	PC3	Pasta Convencional	Cimento	SEM	0,46
6	PE3	Pasta Escória	Escória	SEM	0,46
7	PCE1	Pasta Convencional com Espuma	Cimento	COM	0,38
8	PEE1	Pasta Escória com Espuma	Escória	COM	0,38
9	PCE2	Pasta Convencional com Espuma	Cimento	COM	0,42
10	PEE2	Pasta Escória com Espuma	Escória	COM	0,42
11	PCE3	Pasta Convencional com Espuma	Cimento	COM	0,46
12	PEE3	Pasta Escória com Espuma	Escória	COM	0,46

Fonte: A autora (2019).

As pastas foram produzidas com auxílio de um misturador mecânico, após a água entrar em contato com os materiais secos, misturadas por dois minutos. Os primeiros trinta segundos com agitação mecânica, mais trinta segundos com agitador manual e o minuto seguinte com agitação mecânica. Para pastas aeradas, o acréscimo de um minuto incorporando a espuma pré-formada com auxílio de um batedor de claras de ovos. Finalizada a homogeneização, as pastas foram vertidas em sacos plásticos e inseridas em um recipiente polimérico composto por tampa, de formato cilíndrico de dimensões 3,5 cm x 5 cm (diâmetro x altura).

As amostras tiveram a sua hidratação interrompida aos 28 dias de idade, sob imersão em nitrogênio líquido ( $\cong -180^{\circ}\text{C}$ ) para o congelamento instantâneo da água livre (Figura 20). Após congelamento, as amostras foram trituradas com auxílio de um martelo, acondicionadas em outros recipientes poliméricos e armazenadas no refrigerador com temperatura aproximada de  $-30^{\circ}\text{C}$  aguardado o momento da liofilização.

Figura 21 - Container de nitrogênio utilizado para interromper a hidratação.



Fonte: A autora (2019).

O liofilizador utilizado foi da marca Liotop, modelo L101 (Figura 21). Com objetivo de realizar o processo de sublimação nas amostras de concreto, em outras palavras, passar do estado sólido para o gasoso, retirando, sob baixa pressão por um período de 24 horas, a água congelada e a água livre da estrutura da pasta, restando apenas a água quimicamente combinada e parte da água adsorvida dos compostos hidratados.

Após liofilização, as amostras foram moídas e apenas o material com granulometria passante na peneira de malha 200  $\mu\text{m}$  foi utilizada para os ensaios, o material excedente foi depositado em tubos plásticos do tipo *ependorfs* e armazenados em dessecador.

Figura 22 - Equipamento utilizado para liofilização.



Fonte: A autora (2019).

### 3.6.1 Difração de Raio X

Para este estudo, foi utilizada a análise de difração de raio X (DRX) para caracterizar qualitativamente a estrutura cristalina dos compostos hidratados. As composições mineralógicas das amostras estudadas foram obtidas utilizando o difratômetro Rigaku D/max-2200 com radiação  $\text{CuK}\alpha$ , operando a 40kV e 20 mA (Figura 22). Os ensaios foram realizados em uma faixa de varredura de 5 a  $80^\circ 2\theta$  com um incremento de passo do goniômetro de  $0,05^\circ 2\theta$ , velocidade  $2^\circ 2\theta/\text{passo}$  e tempo de contagem de 0,575s/passos.

A Figura 23 demonstra a preparação da amostra, onde o material foi prensado e rasado manualmente utilizando a estrutura do porta amostra.

Figura 23 - Equipamento para análise de difração de raio-X.



Fonte: A autora (2019).

Figura 24 - Preparação da amostra de escória para análise no difratômetro.



Fonte: A autora (2019).

### 3.6.2 Termogravimetria

Para o acompanhamento da variação de massa das amostras, em função do incremento de temperatura, foi utilizado o equipamento da marca NETZSCH, modelo STA 2500 (Figura 24). O ensaio foi realizado no Laboratório de Química - LQ, situado no Centro Acadêmico do Agreste (CAA).

Sendo realizado a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min em uma faixa que vai de 30°C até a temperatura de 1000 °C, fluxo de 40ml/min em um porta amostra, cadinho, de alumina.

Figura 25 - Equipamento utilizado para análise termogravimétrica.



Fonte: A autora (2019).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados da evolução das propriedades mecânicas em concretos celulares e os resultados do desenvolvimento microestrutural em pasta, assim como a análise deles.

### 4.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

A Tabela 24 apresenta os resultados obtidos para o consumo de aglomerante, a relação água/aglomerante (a/agl), o teor de aditivo superplastificante, o volume de espuma, espalhamento pelo cone de Abrams, o teor de ar e a massa específica no estado fresco ( $\rho$ ) e seco ( $\rho_s$ ) dosados para produzir 1 m<sup>3</sup> de cada traço.

Tabela 24 – Características das misturas dos concretos celulares.

Traço	Consumo (Kg/m <sup>3</sup> )	a/agl	SP (%)	Espuma (L)	Espalhamento (mm)	Teor de ar (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )
CCA1	327,37	0,38	0,23%	500,88	905,00	61,98	748,47	635,69
CCA2	286,33	0,42	0,18%	438,08	930,00	65,61	665,93	543,83
CCA3	254,35	0,46	0,16%	389,16	1000,00	68,44	601,70	471,15
CEA1	374,46	0,38	-	572,92	817,50	56,60	855,27	726,16
CEA2	331,66	0,42	-	507,43	900,00	60,24	770,77	638,47
CEA3	304,40	0,46	-	465,73	925,00	62,29	719,60	607,06
CCP1	287,57	0,38	0,23%	439,98	975,00	67,19	449,07	-
CCP2	287,11	0,42	0,18%	439,28	940,00	66,11	459,69	348,22
CCP3	280,38	0,46	0,16%	428,97	882,50	65,79	460,07	342,71
CEP1	290,59	0,38	-	444,61	960,00	66,92	453,13	390,68
CEP2	301,23	0,42	-	460,88	940,00	64,50	481,77	376,90
CEP3	311,36	0,46	-	476,39	905,00	62,07	510,42	370,32

Fonte: A autora (2019).

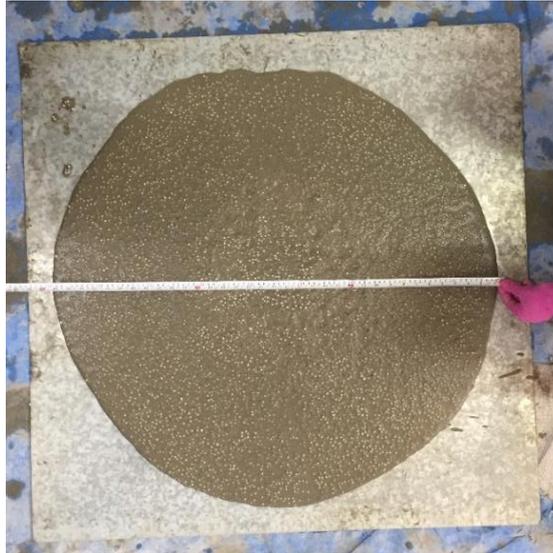
#### 4.1.1 Espalhamento pelo método do cone de Abrams

Todos os concretos ensaiados apresentaram uma consistência bastante fluída, e o espalhamento foi medido através do método do cone de Abrams. Todos os traços produzidos resultaram em concretos com espalhamento superior a 800 mm. Isso foi possível pelo alto volume de espuma incorporado as misturas, combinadas ao aumento da quantidade de água disponível proporcionando distanciamento entre as partículas.

Quanto aos agregados utilizados, nota-se o aumento de fluidez à medida que o volume de água é acrescentado nos concretos, no entanto os produzidos com areia

chegaram à abertura de até um metro (CCA3). Concomitantemente, as misturas com agregado leve proporcionam o inverso, formando uma barreira de pérolas de EPS na circunferência mais externa. O aumento da relação água/aglomerante produz concretos com maior massa específica no estado plástico, promovendo um aumento na suspensão do EPS, que restringe o escoamento do fluido (Figura 25).

Figura 26 – Medição do índice de consistência do concreto celular produzido com EPS.



Fonte: A autora (2019).

#### 4.1.2 Massa específica aparente

Na Tabela 24, a massa específica dos concretos celulares confeccionados variou entre 449,07 kg/m<sup>3</sup> e 855,27 kg/m<sup>3</sup>. A larga faixa de variação na massa específica aparente, ocorreu em função dos diferentes materiais utilizados: aglomerante, relação a/agl e principalmente a substituição da areia pelas pérolas de EPS.

Em relação ao aglomerante, a massa específica dos concretos celulares de cimento escória álcali-ativados, foi ligeiramente maior do que os produzidos com cimento Portland. As amostras produzidas com escória: CEA1, CEA2, CEA3, CEP1, CEP2 e CEP3 apresentaram uma massa específica fresca de 14,27%, 15,74%, 19,59%, 0,90%, 4,80%, 10,94%, respectivamente, superior as mesmas amostras produzidas com cimento Portland (CCA1, CCA2, CCA3, CCP1, CCP2 e CCP3).

Conforme os resultados, verifica-se que a areia proporciona a maior massa específica aos concretos, como esperado em razão da acentuada densidade do

material. A substituição do agregado miúdo quartzoso pelo EPS promoveu uma redução de 40,00%, 30,97%, 23,54%, 47,02%, 37,49% e 29,07%, respectivamente nas amostras CCA1, CCA2, CCA3, CEA1, CEA2 e CEA3. Alcançando uma média de redução de massa sobre volume de 34,68%.

Para os concretos confeccionadas com a areia (CCA1, CCA2, CCA3, CEA1, CEA2 e CEA3) a massa específica diminui a medida que cresce a relação água/materiais secos (H). Contudo, os concretos produzidos com EPS (CCP1, CCP2, CCP3, CEP1, CEP2 e CEP3) tende ao inverso, a massa específica diminuiu à medida que reduz a relação água/materiais secos (H). É provável que este comportamento esteja relacionado a baixa densidade do EPS, tornando o peso da água mais considerável do que o próprio agregado, ou seja, o aumento do teor de água para um determinado volume de materiais sólidos incorre no aumento da massa específica fresca do concreto celular. A relação água/materiais secos (H) parece ser mais importante do que a relação água/aglomerante quando aplicado ao concreto celular; uma vez que o teor de ar acompanha esta tendência promovendo a redução da massa específica.

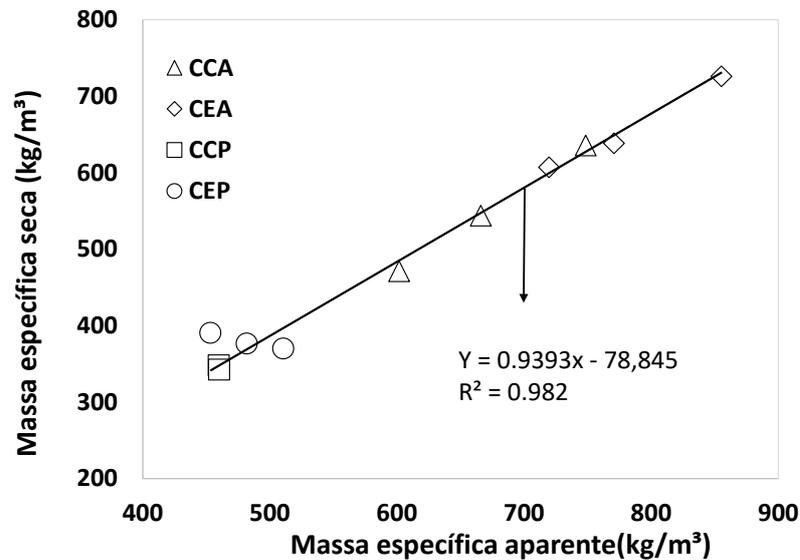
#### 4.1.2.1 Massa específica seca

A correlação entre a massa específica no estado fresco com a massa específica no estado seco é muito importante, pois, a maioria das propriedades do concreto celular é expressa em termos da sua massa específica na condição seca e a estimativa deste parâmetro mostra maior confiabilidade ao trabalho (YANG *et al.*, 2014, NARAYANAN, RAMAMURTHY, 2000).

A Figura 26, demonstra a análise de regressão mais adequada entre modelos matemáticos, com o intuito de verificar qual regressão ocasiona um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) mais próximo de 1. A tendência de maior credibilidade foi a linear com  $R^2$  de 0,9820, onde a densidade seca é diretamente proporcional à densidade fresca, a massa específica seca ( $\rho_d$ , em  $\text{kg/m}^3$ ) do concreto celular pode ser expressa, pela equação de 1º grau, da seguinte forma:

$$\rho_d = 0,9393x - 78,845 \quad (8)$$

Figura 27 - Relação entre a massa específica fresca e a massa específica seca



Fonte: A autora (2019).

A tendência de correlação linear também foi observada por Yang *et al.*, (2014), onde a massa específica seca do concreto expandido aumentou com o conteúdo de aglutinante unitário nos resultados obtidos em pastas. Como esperado, nessa pesquisa a massa específica seca cresceu com o aumento da relação do conteúdo de sólidos.

#### 4.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

Entre os traços produzidos de concreto celular, o CCP1 foi o único que não foi possível desmoldar, o mesmo apresentava vazios e se quebrava, conseqüentemente, não foi possível verificar as propriedades no estado endurecido. O traço composto por cimento Portland, EPS e relação a/agl 0,38 apresentou massa específica mais baixa em relação aos demais. O colapso da amostra, pode ser atribuído a diferença de densidade dos materiais, proporcionando a sedimentação do cimento, a concentração da espuma ao centro e suspensão do EPS, assim, a argamassa não formou uma mistura homogeneia integrada as bolhas de ar resultando em uma estrutura porosa, mas o aprisionamento da espuma entre as duas frações do concreto acelerou a coalescência entre as bolhas formando um grande vazio ocasionando a ruptura da amostra, Figura 27.

Tentativas de replicar o traço alternando a sequência da mistura dos materiais na betoneira e alternando o período do dia, com variação da temperatura não obtiveram sucesso, repetindo o observado na Figura 27.

Figura 28 - Representação visual da amostra CCP1 após a desmoldagem.



Fonte: A autora (2019).

#### 4.2.1 Resistência à compressão

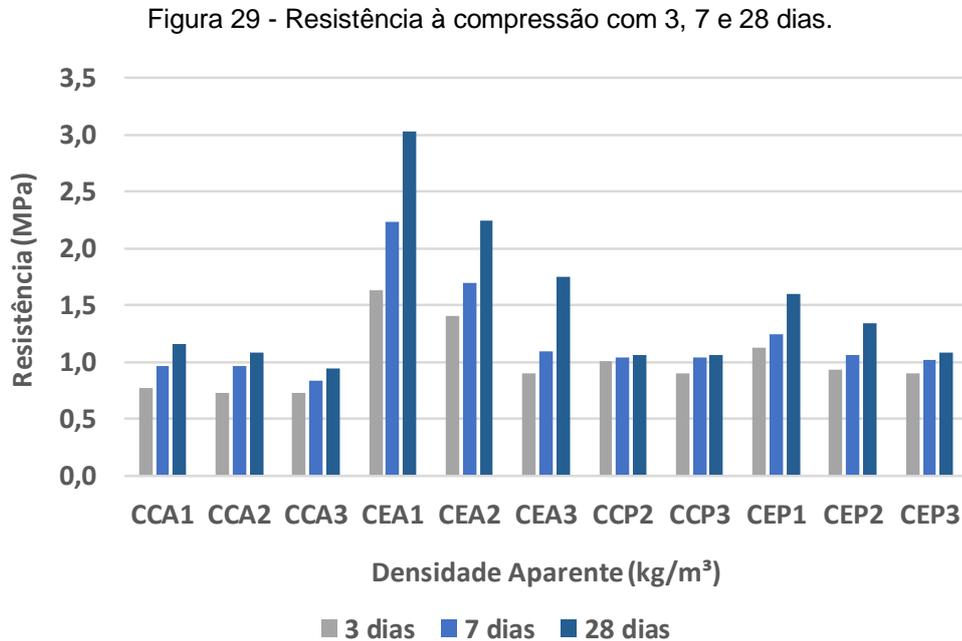
Neste trabalho os corpos de prova produzidos foram ensaiados aos 3, 7 e 28 dias para resistência à compressão. Na Tabela 25, são apresentados os resultados médios dos 11 traços finais, com a finalidade de caracterizar os concretos celulares estudados. Cabe salientar que os resultados individuais por traço estão apresentados no APÊNDICE A.

Tabela 25 - Resistência à compressão dos traços do concreto celular.

Traço	Massa Específica Kg/m <sup>3</sup>	Resistência à Compressão (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
CCA1	748,47	0,77	0,97	1,16
CCA2	665,94	0,73	0,97	1,08
CCA3	601,70	0,72	0,83	0,95
CEA1	855,27	1,63	2,23	3,03
CEA2	770,77	1,41	1,69	2,25
CEA3	719,60	0,90	1,09	1,75
CCP2	459,69	1,00	1,04	1,07
CCP3	460,07	0,90	1,04	1,07
CEP1	453,13	1,13	1,24	1,60
CEP2	481,77	0,93	1,06	1,34
CEP3	510,42	0,90	1,01	1,08

Fonte: A autora (2019).

Através da Figura 28, verifica-se que quanto maior a hidratação dos 11 concretos estudados nesta etapa, maior a evolução da resistência dos 3 para os 28 dias.

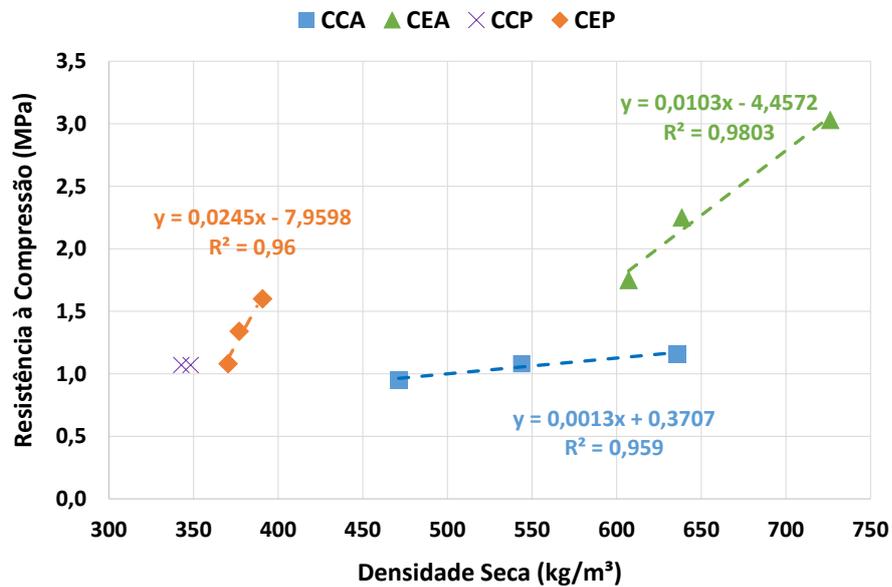


Fonte: A autora (2019).

Observa-se que a faixa de resistência à compressão nas amostras com 28 dias de idade encontra-se dentro dos limites discutidos por alguns autores, que geralmente variam de 1 a 10 MPa (BRADY; WATTS; JONES, 2001; MASTALI *et al.*, 2018) sendo uma das características do concreto celular o baixo desempenho mecânico à compressão.

De modo conceitual, a resistência à compressão varia na razão direta da massa específica como pode ser visto nos estudos de Falliano *et al.* (2018), Kim, Jeon e Lee (2012), Silva, (2005) e Ferreira (1987). O comportamento linear é similar ao das misturas produzidas nesta pesquisa, entretanto de forma mais evidente nas amostras confeccionadas com escória, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 30 - Correlação linear entre a resistência à compressão e a massa específica no estado seco aos 28 dias de idade.



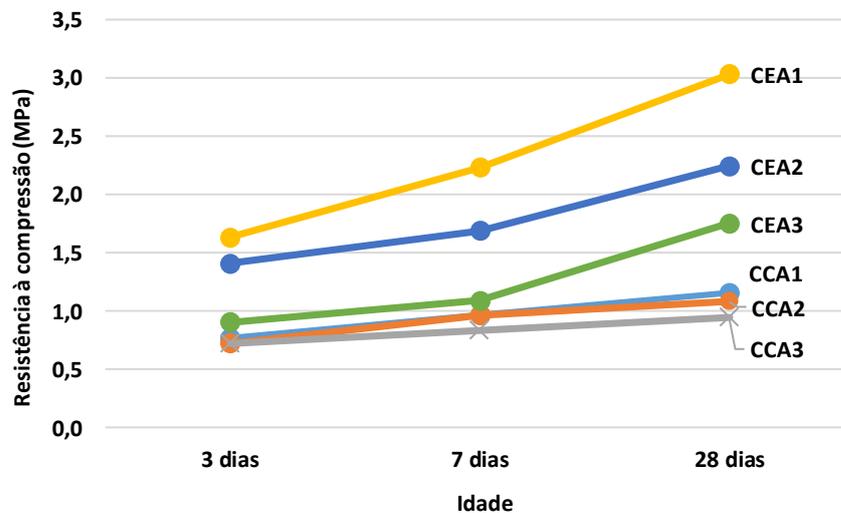
Fonte: A autora (2019).

Para as amostras compostas por cimento e EPS (CCP) não foi possível apresentar linha de tendência ao longo deste trabalho, devido ao fato de a família não possuir dados suficientes para formar uma correlação.

#### 4.2.1.1 Influência do aglomerante

A Figura 30 apresenta a evolução da resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias, utilizando areia como agregado miúdo e dois diferentes aglomerantes. Observa-se que o ganho de resistência ao longo da idade foi mais acentuado para as amostras confeccionadas com escória ativada, principalmente dos 7 para os 28 dias, chegando a um aumento de 35,87%, 33,14% e 60,55%, respectivamente, CEA1, CEA2 e CEA3. Este último com elevado crescimento, pois o aumento do teor de água levou a baixa taxa de hidratação inicial dos 3 para os 7 dias.

Figura 31 - Resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias para amostras confeccionadas com areia e dois aglomerantes, cimento Portland e escória.



Fonte: A autora (2019).

No entanto, o cimento Portland apresentou uma tênue evolução da hidratação ao longo de todo o processo, com ganho dos 3 aos 28 dias, de 50,65%, 47,95% e 31,94% (CCA1, CCA2 e CCA3, respectivamente). Para essa mesma faixa de massa específica Falliano *et al.*, (2018) chegou a valores próximos de 1 MPa, semelhante a escala demonstrada na Figura 31.

Aos 28 dias de idade, a escória chegou à resistência à compressão de até 3 MPa. Estes valores, são satisfatórios quando comparados aos resultados encontrados na literatura utilizaram silicato de sódio como ativador para esta faixa de massa específica, como os 3,2 MPa e 2,9 MPa encontrado por Mastali *et al.*, (2018) e Esmaily e Nuranian (2012), respectivamente.

Fatores que afetam de forma direta a resistência à compressão são o consumo do aglomerante e a superfície específica deste, ou seja, a finura do aglomerante. A superfície referida dos aglomerantes através do método de Blaine da escória e do cimento Portland são 4.647,00 cm<sup>2</sup>/g e 4.450,00 cm<sup>2</sup>/g, respectivamente.

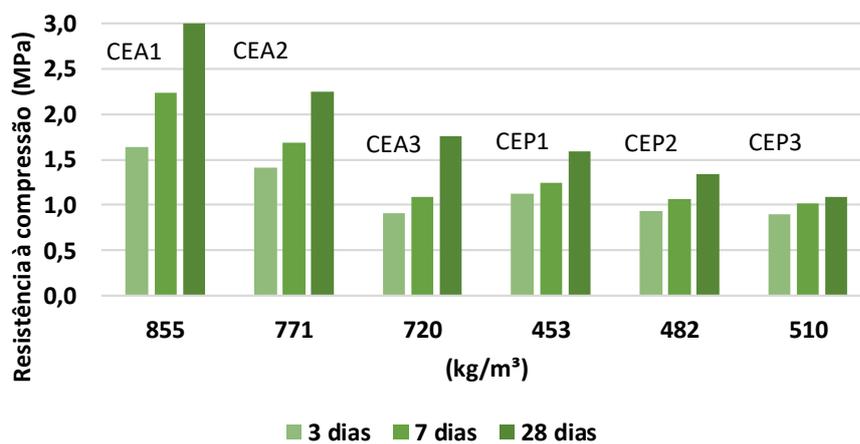
Isso é uma das explicações para o fato da escória proporcionar resistência à compressão superior. Quando comparados as amostras produzidas com escória CEA1, CEA2 e CEA3 verifica-se que a resistência à compressão final aos 28 dias de idade é 161,21%, 108,33% e 84,21% maior que as amostras produzidas com cimento Portland CCA1, CCA2 e CCA3, respectivamente.

#### 4.2.1.2 Influência do agregado

Como pode ser observado na Figura 31-a, a resistência à compressão diminui à medida que se reduz a massa específica no estado plástico, o que proporciona aos concretos produzidos com EPS uma redução no desempenho mecânico de 47,19%, 40,44% e 38,29%, respectivamente, CEP1, CEP2 e CEP3 com cura de 28 dias. Dessa forma, a substituição do agregado convencional pelo leve, resulta em uma perda de resistência em torno da 40%.

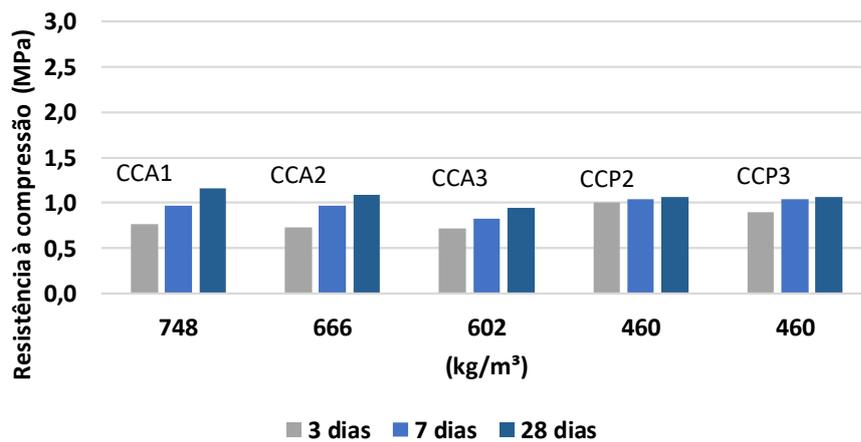
Contudo, nas misturas confeccionadas com cimento Portland, Figura 31-b, verifica-se que a resistência à compressão aos 28 dias concentra-se próximo de 1MPa sem linearidade com a massa específica e independente do aglomerante. A redução na massa específica das amostras CCA2 e CCA3, respectivamente, de 30,97% e 23,53% para as suas correspondentes com EPS, não alterou a resistência à compressão. Isso corrobora com fatos verificados na literatura, onde experimentos demonstraram que concretos com massa específica menores de 700 kg/m<sup>3</sup>, podem dispensar o uso da areia (ABRAPEX, 2006).

Figura 32 - Resistência à compressão com relação a massa específica aparente no estado fresco a) escória álcali-ativada b) cimento Portland.



a)

Fonte: A autora (2019).



**b)**

Fonte: A autora (2019).

Outra observação importante contribui para esta afirmação, algumas amostras do traço CCA3 apresentaram uma camada de areia retida no fundo do corpo de prova. Este traço apresenta a menor massa específica nas amostras confeccionadas com areia, dispensando o uso de agregado miúdo, uma vez que o mesmo não corrobora na resistência à compressão do concreto celular.

#### 4.2.1.3 Influência do fator água/aglomerante e teor de ar

De acordo com alguns autores o aumento da relação água/aglomerante no concreto celular proporciona melhorias no desempenho mecânico de compressão (TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992; FALLIANO *et al.*, 2018). No experimento de Falliano *et al.*, (2018) o aumento da relação a/agl de 0,3 para 0,5 conduziu a um aumento notável da resistência de cerca de 12 vezes na cura em água.

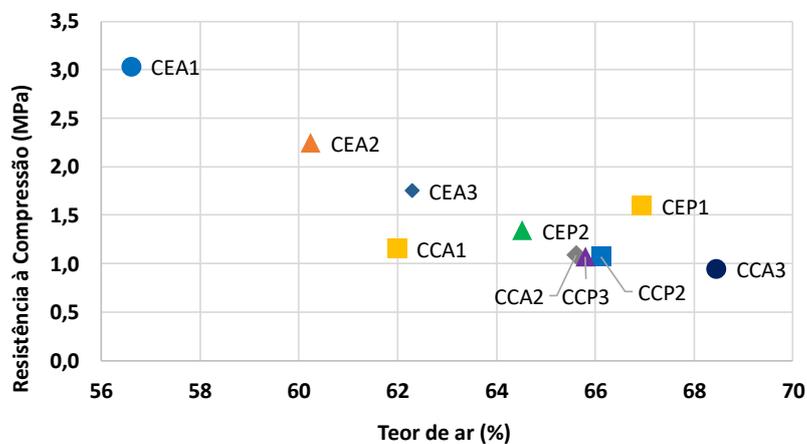
No entanto, nesta pesquisa foi verificado que o aumento da relação água/aglomerante correspondeu a resistências menos significativas para cada série com mesmo aglomerante e agregado, como consequência delas apresentarem o maior teor de ar inicial. Indicando a necessidade de considerar a composição da quantidade de água e ar das relações para resistência à compressão axial dos concretos celulares espumosos. Como reportado nos trabalhos de Sahin, Erdogan e Özgür (2018) e Kearsley e Wainwright (2002).

Pode-se observar na Figura 32 e Tabela 24 que o teor de ar variou de 56,60% a 68,44%, para as amostras CEA1 e CCA3, respectivamente. Dentro da faixa esperada para concretos celulares, normalmente entre 40 e 80% do volume total como

foi verificado no estado da arte por Brady; Watts e Jones (2001) e Narayanan; Ramamurthy (2000). À vista disso, tiveram maior proximidade dos resultados do estudo de Yang *et al.*, (2014) que apresentaram de 65% a 75% de vazios.

A Figura 32 evidencia que a resistência à compressão varia inversamente a porcentagem de ar, assim as amostras com menor teor de ar resultaram em maiores resistências CEA1, CEA2 e CEA3. As amostras que apresentaram o teor de ar próximo de 66% tiveram seu desempenho mecânico próximo de 1 MPa, amostras CCA2, CCP2 e CCP3.

Figura 33 - Resistência à compressão e teor de ar dos concretos celulares.



Fonte: A autora (2019).

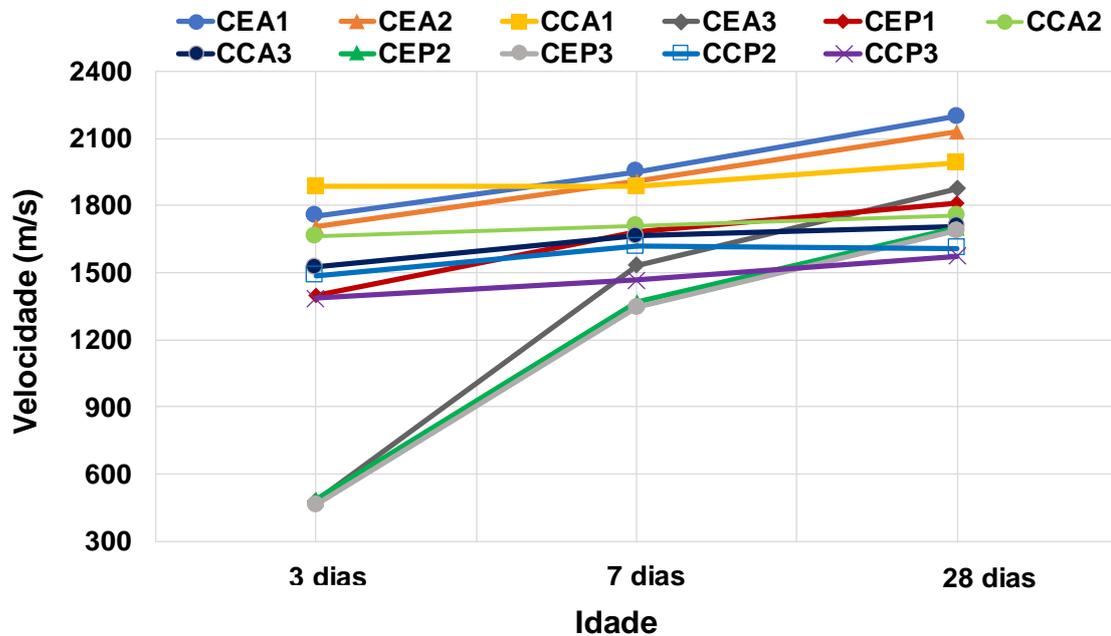
#### 4.2.2 Velocidade de propagação de onda ultrassônica

Analisando as médias de velocidade de propagação de onda ultrassônica, Figura 33, há um aumento da velocidade para todos os casos com o passar do tempo de 3, 7 e 28 dias em razão da hidratação contínua dos materiais. Segundo Bogas, M. Gomes e A. Gomes (2013), a velocidade de propagação de onda ultrassônica do concreto convencional varia entre 3000 e 5000 m/s. No entanto, o concreto celular alcança pulsos reduzidos, chegando a velocidades menores que a metade do concreto convencional (KASHANI *et al.*, 2017).

O impulso ultrassônico variou de 2199,20 m/s para o concreto de escória, areia e a/agl 0,38 a 1575 m/s para o concreto de cimento, EPS e a/agl 0,46 quando analisados com 28 dias. Demonstrando que o cimento de escória proporciona uma melhor estrutura interna, com menor descontinuidade. E os grânulos de EPS apesar de fechados externamente continuam a apresentar propagação da onda mais lenta

principalmente nos ligantes com cimento Portland, onde o teor de ar é considerado maior.

Figura 34 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica em concretos celulares.



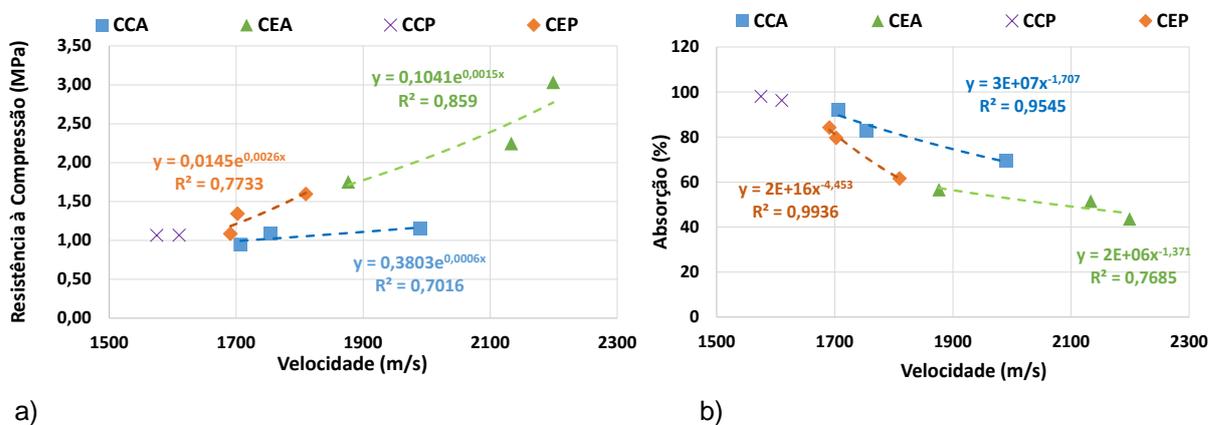
Fonte: A autora (2019).

Além disso, baseado nos dados que foram expostos na Figura 34-a, observa-se que não há uma correlação bem definida entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação de onda, uma vez que o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) mais expressivo foi de 0,859 na família CEA (composto de escória e areia).

Os dados da Figura 34-a, são aproximados por equações exponenciais, semelhante ao encontrado por Kashani *et al.*, (2017) com coeficiente de determinação de 0,88. Kashani *et al.*, (2017) observaram que a velocidade e a resistência à compressão diminuíam com a substituição da areia natural pelo agregado leve, o mesmo comportamento pode ser analisado na família CEA e CEP.

Embora, não haja muitos estudos com dados relacionando a velocidade de propagação de onda em concretos celulares, Babu, Ganesh Babu e Wee (2005) também abordaram nos concretos leves com EPS uma correlação exponencial, como a encontrada nesta pesquisa, mas, com  $R^2$  satisfatório de 0,989 os resultados indicam através do teste de ultrassom que o EPS é capaz de reduzir a resistência mecânica à compressão.

Figura 35 - Correlação entre a velocidade de pulso ultrassônico com a (a) resistência à compressão e b) absorção aos 28 dias de idade.



Fonte: A autora (2019).

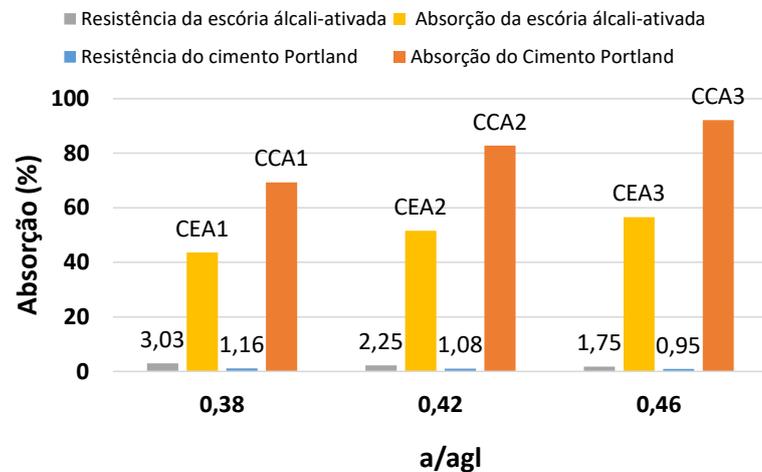
Entretanto, quando realizamos uma análise de regressão da velocidade de propagação de onda com os resultados de absorção chegamos a um coeficiente de determinação mais expressivo ( $R^2 = 0,9936$ ), como mostra a Figura 34-b.

#### 4.2.3 Absorção por imersão

Os valores médios de absorção aos 28 dias de idade estão apresentados para cada dosagem, e seus resultados foram ajustados à cada tipo de agregado (Figura 35 e 36), respectivamente, areia e EPS. Pode-se, então, observar que os valores de absorção foram elevados, como esperado, uma vez que o concreto celular apresenta alto índice de poros artificiais.

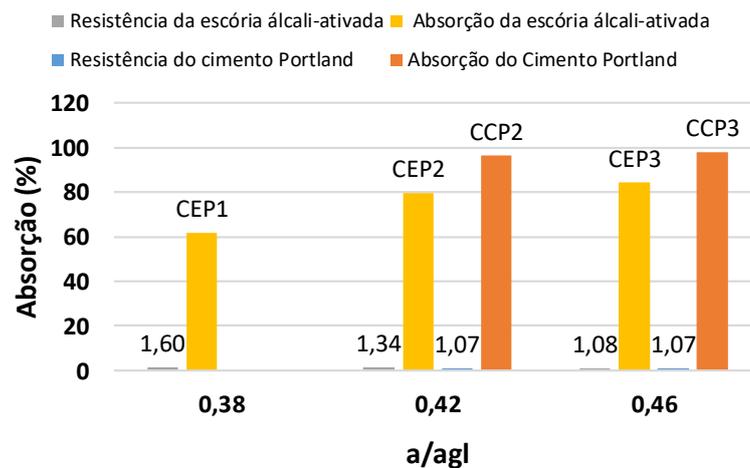
O traço com escória álcali-ativada (CEA1) apresentou o menor percentual de absorção de água, enquanto para o traço (CCP3) resultou o maior percentual de absorção. A maior porosidade do concreto celular foi estabelecida como consequência do aumento do teor de ar (65,79%) junto ao EPS poroso, aumentando assim o volume de macroporos. Para Narayanan e Ramamurthy (2000) o aumento de macroporos, resulta em paredes mais finas dos poros, reduzindo assim a participação no volume de microporos, afetando diretamente a resistência à compressão, como pode ser verificado na Figura 36, amostra CCP3, onde a resistência mais baixa pode ser justificada ao aumento da porosidade e da relação a/agl.

Figura 36 - Absorção por imersão e resistência à compressão das amostras confeccionadas com areia.



Fonte: A autora (2019).

Figura 37 - Absorção por imersão e resistência à compressão das amostras confeccionadas com EPS.



Fonte: A autora (2019).

A comparação das amostras em diferentes volumes de água revela que o aumento proporciona maiores porcentagens de absorção, tanto na Figura 35 com agregado de areia, quanto na Figura 36 com a utilização do EPS.

Constata-se uma maior absorção por imersão com o aumento do teor de água, devido ao aumento da porosidade capilar. Em contrapartida, a absorção das amostras de concreto celular aumentou drasticamente com a diminuição da massa específica para um dado fator a/agl, CEA3, CCA3, CEP3 e CCP3, respectivamente, massa específica seca de 607,06 kg/m<sup>3</sup>, 471,15 kg/m<sup>3</sup>, 370,32 kg/m<sup>3</sup> e 342,71 kg/m<sup>3</sup>. Descobertas semelhantes foram relatados na literatura por Sahin, Erdogan e Özgür

(2018) e Kearsley e Wainwright (2001). Ademais, Sahin, Erdogan e Özgür (2018) revelam em sua pesquisa, que a absorção de água de amostras com massa específica inferior a  $1000 \text{ kg/m}^3$  aumentou consideravelmente com o aumento do teor de água, o que também é esperado, uma vez que o aumento da porosidade acompanha o crescimento do fluido.

Quanto ao aglomerante, constatamos, conforme exposto na Figura 36 e 37, que para cada relação a/agl há uma diminuição da absorção, e conseqüentemente um aumento no desempenho mecânico nas amostras confeccionadas com escória álcali-ativada em comparação ao cimento Portland, isso pode ser atribuído há um refinamento dos poros desenvolvido pelo uso da escória, atribuído à baixa absorção e o acréscimo de massa específica.

O fato do EPS não absorver a água disponível para hidratação dos compostos cimentícios tratando-se de esferas fechadas e impermeáveis é a principal justificativa por alguns autores para a baixa absorção dos concretos leves, Ozório (2016) e Li, Liu e Chen (2015). No entanto, os resultados entram em conflito com os achados por Babu, Ganesh Babu e Tiong-Huan (2006) que observaram um aumento na absorção em concretor de massa específica abaixo de  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Além disso, a absorção de água nas amostras que apresentaram menor massa específica seca,  $348,22 \text{ kg/m}^3$  e  $421,71 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente, CCP2 e CCP3, aumentou consideravelmente. Isso pode ocorrer devido uma quantidade significativa de ar introduzida na matriz de concreto durante a mistura em uma fração volumétrica de EPS alta, este alto teor de ar poderia levar a uma maior capacidade de absorção de água.

#### **4.2.4 Análise do Custo-Benefício**

Um dos objetivos desta pesquisa foi verificar o valor dos traços produzidos, materializando o produto para a indústria, analisando o custo-benefício quanto ao desempenho mecânico. O custo unitário (R\$/ton.) de cada material utilizado na confecção dos concretos celulares, especificado neste trabalho, estão apresentados na Tabela 26. Manteve-se as proporções quanto a dosagem de aglomerante, agregado miúdo e espuma (1:0,73:1,53), variando, apenas as relações a/agl e o tipo de agregado. Assim, o custo do  $\text{m}^3$  destes concretos em função da resistência à compressão pode ser visto na Tabela 27. No Apêndice C estão detalhadas a composição unitária e o custo por  $\text{m}^3$  de concreto celular.

Tabela 26 - Custos unitários dos materiais utilizados para a dosagem do concreto celular na região metropolitana de Recife-PE.

Valor (R\$) da tonelada									
Material	Cimento Portland (R\$/t)	Escória (R\$/t)	Areia (R\$/t)	EPS (R\$/t)	Silicato (R\$/t)	Agt. Esp (R\$/t)	Água (R\$/t)	SP (R\$/t)	Adesivo PVA (R\$/t)
<b>Valor (R\$/t)</b>	425,00	150,00	25,71	18.466,67	1.197,00	9.051,00	3,10	9.723,00	11.000,00

Fonte: A autora (2019).

Tabela 27 - Custo do m<sup>3</sup> do concreto celular e custo/MPa dos traços de concreto celular.

Traço	CCA1	CCA2	CCA3	CEA1	CEA2	CEA3	CCP2	CCP3	CEP1	CEP2	CEP3
<b>Agl. (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	327,37	286,33	254,35	374,46	331,66	304,40	287,11	280,38	290,59	301,23	311,36
<b>Custo (R\$/m<sup>3</sup>)</b>	172,99	149,94	132,73	200,54	177,66	163,10	195,16	190,07	200,98	208,37	215,42
<b>(Mpa)</b>	1,16	1,08	0,95	3,03	2,25	1,75	1,07	1,07	1,60	1,34	1,08
<b>Custo por Resistência à compressão (R\$/MPa)</b>											
<b>R\$/MPa</b>	149,13	138,84	139,72	66,19	78,96	93,20	182,39	177,64	125,61	155,50	199,46

Fonte: A autora (2019).

Ao analisar a Tabela 27, observa-se que o m<sup>3</sup> do concreto celular variou de R\$ 132,73 (CCA3) a R\$ 215,42 (CEP3). A substituição do agregado convencional para o poliestireno expandido proporcional um aumento de 1,30, 1,43, 1,17 e 1,32 vezes o custo para as amostras CCA2, CCA3, CEA2 e CEA3, respectivamente. O valor unitário do EPS é significativo na composição do concreto celular, tratando-se do insumo mais caro (Tabela 26).

De acordo com os dados, quando analisamos a troca do aglomerante convencional pelo álcali-ativado obtemos um aumento de 1,16, 1,18, 1,23, 1,07 e 1,13 vezes comparado ao cimento Portland, amostras CCA1, CCA2, CCA3, CCP2 CCP3, respectivamente. O maior consumo de aglomerante e o custo elevado do silicato de sódio nos concretos celulares álcali-ativado são os principais fatores para o custo deste concreto ser ligeiramente superior as amostras produzidas com cimento Portland.

Entretanto, quando se realizou uma comparação do custo destes concretos relacionados ao desempenho mecânico obteve-se que, o concreto produzido com escória e areia, traço CEA1, apresenta o melhor benefício com menor Custo/MPa de R\$66,19. Constata-se que o custo por MPa para produzir o CEA1 é 55,62% menor que o de CCA1, de iguais proporções.

### 4.3 ANÁLISE DA PASTA

A seguir, foram apresentados os resultados e discussões das pastas de concreto celular, através da análise de difração de raios X e termogravimetria.

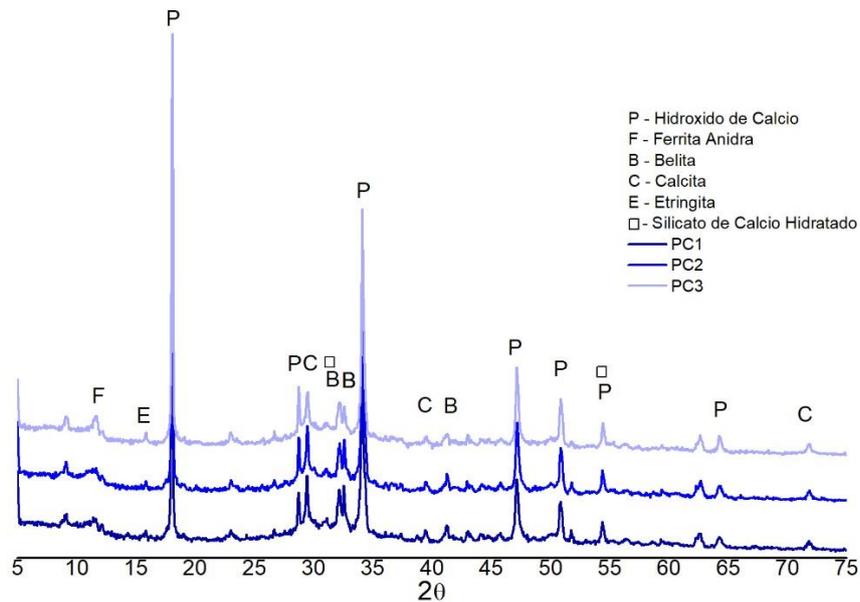
#### 4.3.1 Difração de Raios X

O ensaio de difração de raios X foi realizado com o intuito de investigar possíveis alterações na formação dos produtos hidratados quando adicionado espuma pré-formada no sistema de cimento Portland e no do cimento de escória ativada com silicato de sódio, com o mesmo traço, em três relações água/aglomerante. A identificação dos compostos foi realizada por comparação do difratogramas da amostra com o banco de dados do *International Centre of Diffraction Data* (ICDD), por meio do software *X'Pert HighScore Plus*. O ensaio permite realizar uma análise semi-quantitativa através de uma comparação da intensidade dos principais picos observados no difratograma, indicando a alteração da hidratação aos 28 dias de idade.

A Figura 37 apresenta o difratograma das pastas confeccionadas com cimento Portland e três relações água/aglomerante: 0,38, 0,42 e 0,46. Foram identificados os picos de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), silicato de cálcio hidratado ( $\text{Ca}_3\text{H}_2\text{SiO}_5$ , C-S-H) e observa-se que o pico de maior repetitividade é o de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , portlandita), mais acentuado no ângulo  $2\theta = 18,04$  e no ângulo  $2\theta = 34,08$ , e ainda foi identificado silicato dicálcico não reagido nas amostras similar aos picos encontrados por Rossignolo (2005).

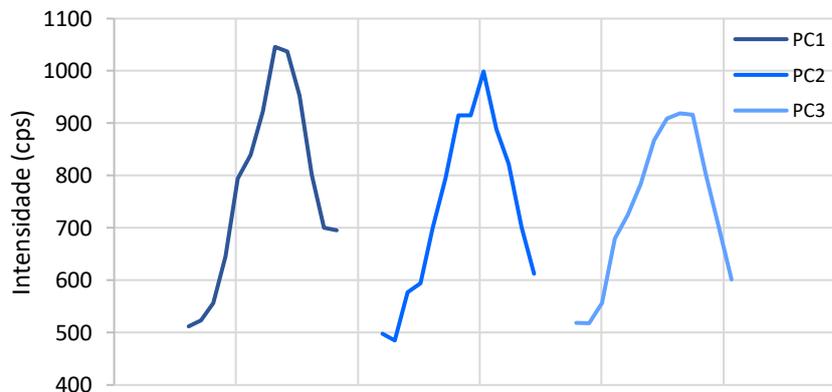
Com o aumento da relação a/aglo para 0,42 e 0,46, não foram constatadas alterações na natureza dos compostos hidratados, sendo o gráfico dos difratogramas similares ao da mistura PC1, com relação a/agl igual a 0,38. O efeito da relação a/agl foi observado na alteração da intensidade dos picos com a redução do pico principal de portlandita, e um leve aumento na intensidade do pico de C-S-H no ângulo  $2\theta = 32,16$ , como pode ser visualizado na Figura 38. A redução da formação do C-S-H ficou evidente com o consumo do pico de portlandita em razão da maior disponibilidade de água.

Figura 38 - Difratoograma das pastas de cimento Portland aos 28 dias com três relações a/agl.



Fonte: A autora (2019).

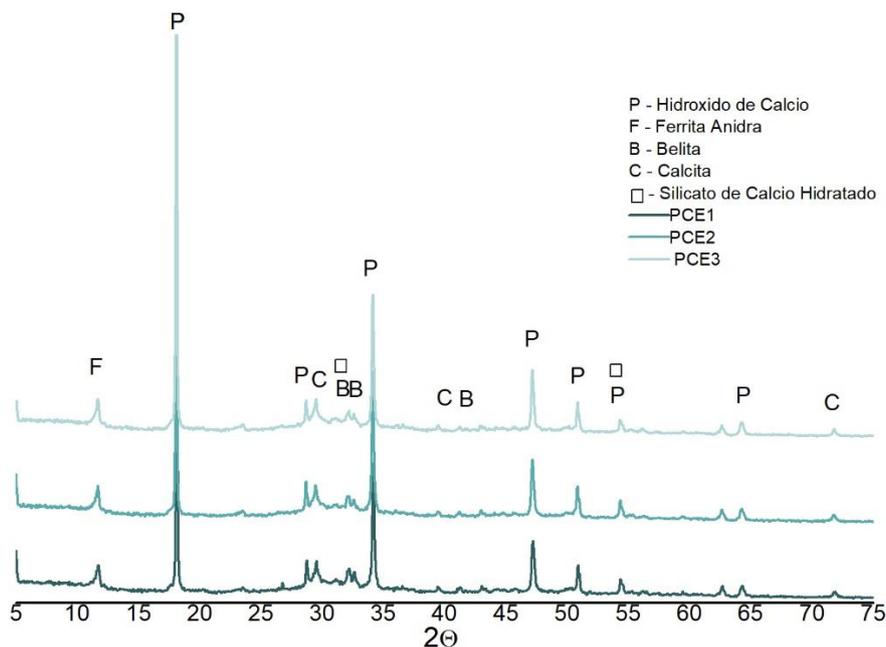
Figura 39 - Efeito do teor de água na intensidade do pico principal de C-S-H no ângulo  $2\theta = 32,16$ .



Fonte: A autora (2019).

De modo a ter-se conhecimento da contribuição da incorporação da espuma nos resultados da análise por difração de raio X, a Figura 39 mostra o difratograma das pastas de cimento Portland com espuma e três relações a/agl: PCE1, PCE2 e PCE3. A principal fase cristalina nas amostras do concreto de espuma após 28 dias de cura foi a portlandita. Além da portlandita, foram encontrados C-S-H, calcita e silicato dicálcico não reagido nas amostras, ou seja, semelhante ao difratograma das misturas sem utilização da espuma e similar aos picos encontrados por Rossignolo (2005) e Kuzielová, Pach e Palou (2016).

Figura 40 - Difratoograma das pastas de cimento Portland com espuma aos 28 dias com três relações a/agl



Fonte: A autora (2019).

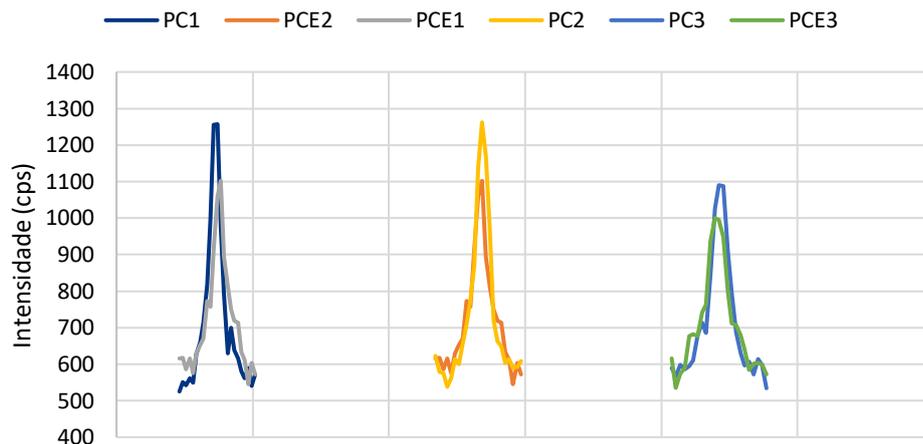
Observa-se que os resultados da difração de raios X indicam que a espuma não interagiu quimicamente com os compostos hidratados do cimento Portland, a ponto de se identificar algum composto diferente do observado nas misturas sem utilização das mesmas. O efeito da espuma pode ser observado na alteração da intensidade do pico de calcita no ângulo  $2\theta = 29,47$ .

Quando comparamos as amostras de igual relação a/agl, verificamos que as amostras sem espuma apresentaram maiores intensidades de pico pertencentes à calcita, que se originaram da carbonatação dos produtos de hidratação. Segundo Kuzielová, Pach e Palou (2016), a carbonatação resulta da instabilidade das fases de portlandita e C-S-H sob o efeito do dióxido de carbono do ar. A carbonatação inicial da portlandita é geralmente mais rápida do que a da C-S-H, mas depois de algum tempo as camadas de microcristais de  $\text{CaCO}_3$  se formam na superfície de  $\text{Ca(OH)}_2$  e a carbonatação da portlandita diminui. Ainda, Arandigoyen *et al.*, (2006) chegaram a conclusão que cristais de carbonato de cálcio constroem a estrutura de poros da pasta de cimento Portland, que leva à queda de porosidade e a distribuição do tamanho dos poros muda para poros menores.

Em termos de análise na influência da espuma na hidratação do cimento Portland, a espuma contribui com a queda da intensidade do pico de calcita o que leva

ao aumento da porosidade e a distribuição do tamanho dos poros, segundo a teoria, mudaria para poros maiores (Figura 40). Justifica o fato da espuma ser responsável pelo desenvolvimento de macroporos maiores na matriz, e utilizada para reduzir significativamente a massa específica.

Figura 41 - Efeito da espuma na intensidade do pico principal de calcita no ângulo  $^{\circ}2\theta = 29,47$ .



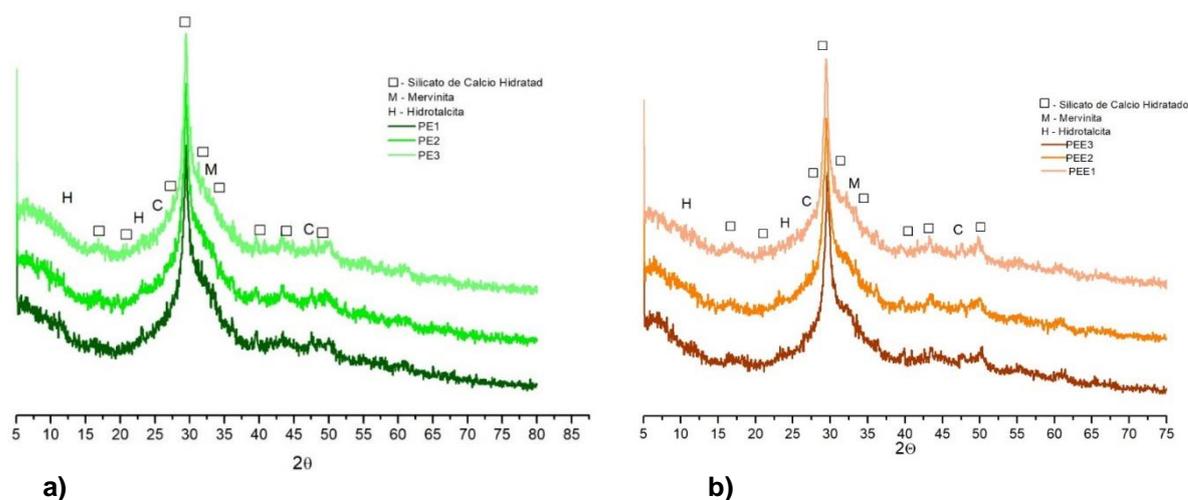
Fonte: A autora (2019).

Os difratogramas das Figuras 41-a e 41-b mostram a composição mineral das pastas de cimento de escória ativada com silicato de sódio com e sem espuma, respectivamente. A escória hidratada apresenta-se, basicamente, como um material amorfo, apenas com os picos característicos de C-S-H tipo I no ângulo  $^{\circ}2\theta = 29,47$  e hidrotalcita, confirmando os dados do levantamento bibliográfico. Identifica-se a existência de um pico referente à calcita na mesma posição angular do C-S-H, dificultando a análise. Entretanto, os resultados de termogravimetria confirmam o quantitativo de C-S-H sem que se tenha o aumento da quantidade de calcita.

O C-S-H tipo I está associada às fases cristalinas tobermorita ( $C_5S_6H_9$ ), identificada em outros trabalhos como Taylor (1997), Melo Neto (2008), Narayanan e Ramamurthy (2000). Para Melo Neto (2008) a identificação deste pico característico se dar ao fato da escória de alto forno anidra apresentar relação C/S ( $CaO/SiO_2$ ) em torno de 1,3. Como foi utilizada neste trabalho uma escória com silicato de sódio com C/S 1,1, inferior a 1,3; não encontra-se nenhuma fonte externa de cálcio; sendo coerente com a relação C/S teórica dos tipos de C-S-H identificados.

De fato, os resultados de difração de raios X indicam que a incorporação da espuma não interagiu quimicamente com os compostos hidratados do cimento de escória, sem a identificação de algum composto diferente do observado na mistura sem utilização do agente. Também, observa-se que independente da relação a/agl empregada, não houve alteração significativa na intensidade dos picos.

Figura 42 - Difratoograma das pastas de escória ativada com silicato de sódio aos 28 dias com três relações a/agl a) sem espuma b) com espuma



Fonte: A autora (2019).

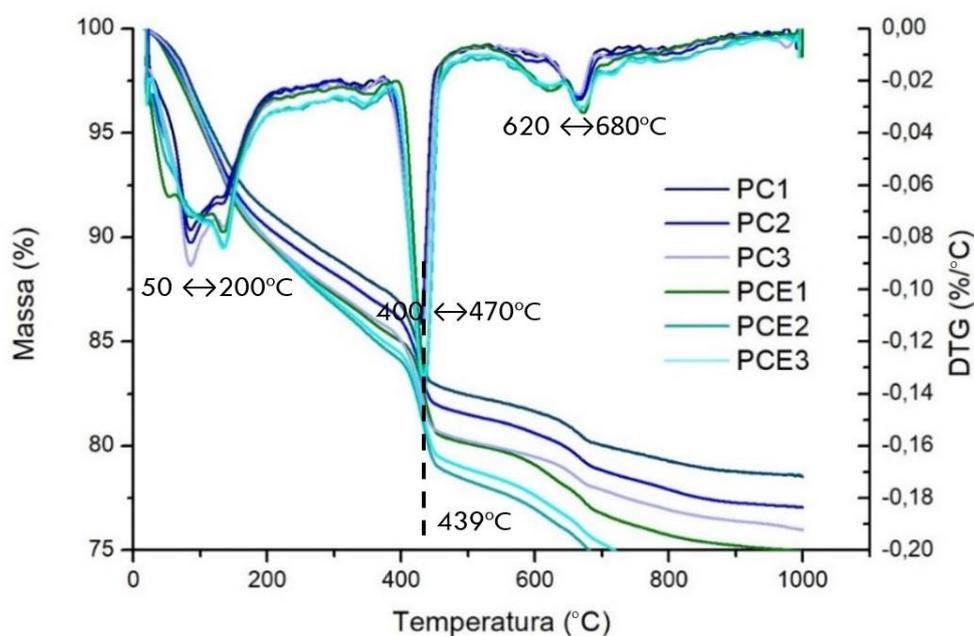
#### 4.3.2 Termogravimetria

A Figura 42 apresenta os resultados da perda de massa com o aumento da temperatura (TG) e utilizando-se da derivada destas curvas (DTG) é possível identificar os picos que caracterizam os principais produtos hidratados do cimento Portland. As mesmas pastas preparadas para a difração de raio X, utilizando o cimento Portland com e sem espuma.

Pode-se observar que o primeiro evento endotérmico surgiu entre 50°C e 200°C, corresponde à remoção de água devido à decomposição dos hidratos quase amorfos, principalmente C-S-H. Um evento similar aconteceu com Kuzielová, Pach e Palou (2016) com uma faixa de decomposição entre 30°C e 200°C. E o segundo evento se inicia próximo de 400°C até 470°C com pico máximo em 439°C que corresponde a decomposição de portlandita. A presença de um terceiro evento ocorreu com a formação de um pequeno pico entre 620°C e 680°C evidenciada na curva de DTG.

De acordo com a literatura, Kuzielová, Pach e Palou (2016) identificou um pico semelhante no concreto espuma entre 600 e 650 °C, mas sem justificativa para sua formação, Fares *et al.*, (2010) abordou um pico a cerca de 600°C e atribuiu a uma transformação alotrópica do quartzo- $\alpha$  em quartzo- $\beta$ . No entanto, as amostras investigadas por termogravimetria desta pesquisa não possuem adição de areia, e a origem deste pico necessita de maior investigação. Melo Neto (2008) deparou-se com a presença de um pequeno pico em torno de 640°C atribuí à decomposição de fase carbonática mal cristalizada.

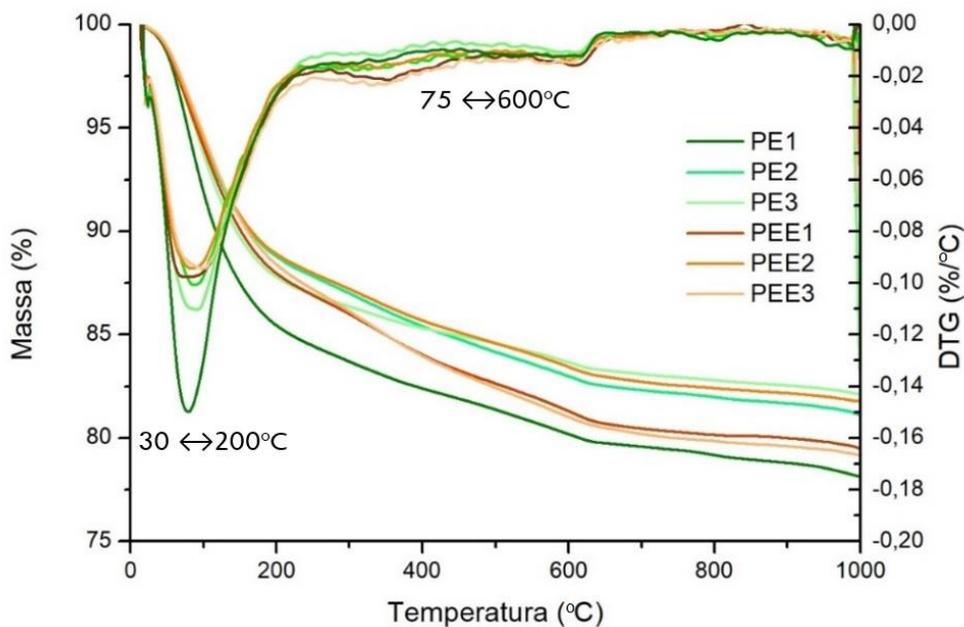
Figura 43 - Perda de massa (TG/%) e derivada de perda de massa (DTG) da pasta de cimento Portland com e sem espuma aos 28 dias de idade e três relações a/agl.



Fonte: A autora (2019).

Figura 43 apresenta o resultado por termogravimetria das pastas de cimento de escória ativada com silicato de sódio com e sem espuma. O perfil típico deste tipo de aglomerante foi identificado por Langaro (2016) e Melo Neto (2002, 2008). A partir da análise térmica foi possível identificar os compostos hidratados de forma a correlacionar com os picos obtidos nas análises de DRX.

Figura 44 - Perda de massa (TG/%) e derivada de perda de massa (DTG) da pasta de cimento de escória ativada com silicato de sódio com e sem espuma aos 28 dias de idade e três relações a/agl.



Fonte: A autora (2019).

Em todas as amostras foram identificados os picos de C-S-H e a fase hidrotalcita, como uma leve curva (em torno de 350°C). Para Taylor (1997) a decomposição do C-S-H inicia em torno de 50°C e finaliza próximo de 500°C, com pico máximo entre 85°C e 120°C; já a hidrotalcita é caracterizada por perda de massa em torno de 75°C e final em torno de 600°C, com pico culminante na faixa entre 300°C e 400°C.

O pico mais intenso foi o referente ao C-S-H, exibindo-se isoladamente com pico em torno de 88°C, Figura 43, com faixa de decomposição de 30°C a 200°C. Melo Neto (2008) encontrou o mesmo produto de hidratação em uma faixa mais extensa de 30°C a 300°C, com pico máximo em 95°C e Langaro (2016) identificou a perda de massa entre 50° e 200°C.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir, serão abordadas as considerações finais do trabalho de acordo com a análise dos resultados e sugestões para novas pesquisas sobre o assunto.

### 5.1 CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa indicam a possibilidade da produção de concreto celular a partir de um aglomerante alternativo obtido através da escória de alto forno ativada alcalinamente com silicato de sódio (CCEAA) atendendo a proposta do objetivo geral. Este trabalho aplicou o método de dosagem de Ferreira (1987) ajustado, utilizando a espuma pré-formada para incorporar vazios de ar na matriz de argamassa, investigada sob as relações água/aglomerante: 0,38, 0,42 e 0,46. Para efeito de comparação, foi produzido o concreto celular tradicional com cimento Portland (CCE). Além destes, também foi analisada a substituição do agregado miúdo de areia pelas pérolas de EPS consideradas ultraleves. Foram estudadas propriedades plásticas, mecânicas e microestruturais destes concretos.

As massas específicas dos concretos bases utilizadas para a produção dos concretos celulares ficaram dentro do intervalo de 449,07 kg/m<sup>3</sup> a 855,27 kg/m<sup>3</sup>. É possível afirmar que os concretos celulares espumosos apresentam elevada fluidez, trabalhabilidade e plasticidade, devido à presença dos poros incorporados à massa. Retratando um concreto delicado onde movimentações bruscas e temperaturas altas afetam a estabilidade das bolhas.

Em relação a fonte alternativa do aglomerante, a escória de alto forno alcali-ativada provou ser viável, produzindo concretos com massa específica ligeiramente maiores, demonstrando melhor estrutura interna com menor descontinuidade, atingindo impulso ultrassônico de até 2199,20 m/s. Verifica-se que a resistência à compressão final aos 28 dias de idade é 161,21%, 108,33% e 84,21% maior que as amostras produzidas com cimento Portland CCA1, CCA2 e CCA3, respectivamente.

Quanto a substituição do agregado miúdo por poliestireno expandido (EPS), o impacto mais significativo foi na massa específica do concreto celular; alcançando uma média de redução de massa sobre volume de 34,68%. Ratificando o referencial bibliográfico, onde, a massa específica e a resistência à compressão são diretamente proporcionais, desta forma, o desempenho mecânico sofreu uma perda em torno de

40%, chegando à redução de 47,19%, 40,44% e 38,29%, respectivamente nas amostras CEP1, CEP2 E CEP3 com cura aos 28 dias.

Concretos celulares com massa específica aparente fresca menores de 700 kg/m<sup>3</sup> podem dispensar a utilização de agregado miúdo, uma vez que sua aplicação não há incremento de resistência à compressão e podem proporcionar heterogeneidade das amostras.

O efeito da relação água/aglomerante afeta principalmente a absorção dos concretos celulares. O aumento do teor de água promove um crescimento na porosidade capilar e, conseqüentemente, maiores porcentagens de absorção, principalmente nas amostras com a/agl 0,46, independentes do aglomerante e agregado utilizados.

O custo do m<sup>3</sup> de CCEAA foi ligeiramente maior que o custo CCE em concretos com proporções equivalentes. Constatou-se que o custo para produzir 1m<sup>3</sup> de CCEAA é cerca de 1,16 vezes maior que o de CCE, porém apresenta o melhor benefício com menor Custo/MPa de R\$66,19. Constata-se que, o custo por MPa para produzir o CEA1 é 55,62% menor que o de CCA1, de iguais proporções.

Através da análise mineralógica por difração de raios X e da perda de massa por termogravimetria foi possível verificar que, a incorporação da espuma não interagiu quimicamente com os compostos hidratados dos diferentes aglomerantes utilizados. Também se observa que, independente da relação a/agl empregada, não houve alteração significativa na intensidade dos picos.

De acordo com os resultados obtidos no programa experimental, foi possível confirmar o potencial do uso do cimento de escória álcali-ativado sendo adequado para aplicações em paredes, blocos, preenchimento de painéis sanduíches. Entre os concretos confeccionados, o concreto CEA1, foi quem apresentou uma melhor resistência à compressão, atingindo 3 MPa aos 28 dias, podendo este ser utilizado conforme as recomendações da NBR 12646 (ABNT,1992) para paredes de concreto celular moldados no local, também aplicado em blocos de concreto celular seguindo a NBR 13438 (ABNT, 2013) em edificações.

Conclui-se que a produção de concreto celular com escória de alto forno álcali-ativada é viável, promovendo maior desempenho mecânico e menor variação mineralógica, sugerindo materiais mais estáveis quimicamente.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como propostas para trabalhos futuros, pode-se sugerir:

- a) Avaliar a durabilidade dos concretos celulares, com agregado de origem rochosa e com agregados ultraleves;
- b) Analisar a microestrutura do concreto celular para a verificação da distribuição e tamanho dos poros;
- c) Investigar as propriedades do concreto celular com regime de cura maiores de 56 dias;
- d) Avaliar o concreto celular com escória ativada com silicato de sódio com diferentes teores deste ativador e com diferentes módulos de sílica, verificando qual composição acarreta as melhores propriedades;
- e) Verificar a redução nos perfis de impacto ambiental, através de Análise de Ciclo de Vida (ACV), do concreto celular produzido com cimento de escória de alto forno álcali-ativada.

## REFERÊNCIAS

- ALLAHVERDI, A.; AZIMI, S. A.; ALIBABAIE, M. Development of multi-strength grade green lightweight reactive powder concrete using expanded polystyrene beads. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 457–467, 2018.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 523.1R-06**: Guide for Cast-in-Place Low-Density Cellular Concrete. Detroit: ACI, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM/C 796-19**: Standard Test Method For Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam. West Conshohocken: ASTM, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM/C C869-11** - Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete. West Conshohocken: ASTM, 2016.
- ARANDIGOYEN M.; BICER-SIMSIR, B.; ALVAREZ, J.I.; LANGE A.D. Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes. **Applied Surface Science**, v. 252, p. 7562–7571, 2006.
- ARAÚJO JÚNIOR, N. T. **Concreto de alta resistência produzido com escória álcali-ativada**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.
- ASHNA, K. N.; CHANDRAKARAN, S. Experimental Study on stress-strain behaviour of eps beads-sand mixture. In: **International Conference on Geotechniques for infrastructure Projects**. India: Thiruvananthapuram, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA (ABIQUIM). **O que é EPS?**. Disponível em: <<http://www.epsbrasil.eco.br/eps/index.html#processos-produtivos>> Acesso em: 12 de jan. de 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12644:2014** – Concreto celular espumoso - Determinação de densidade de massa aparente no estrado fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12646:1992** – Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276:2016** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13438: 2013** – Blocos de Concreto Celular. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697:2018** – Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 30:2001** – Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 52:2009** – Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738: 2018** – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8802:2019** – Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8953: 2015** – Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778:2005** – Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9833:2008** – Concreto fresco – determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-2:2017** – Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (ABRAPEX). **Manual de utilização EPD na construção civil**. São Paulo: Pini, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (ABRAPEX). **Mercado de EPS**. São Paulo. Disponível em: <<http://www.abrapex.com.br/41Mercpg02.html>>. Acesso em: 12 de jan. de 2019.

AZEVEDO, B. R.; PÉREZ-GRAMATGES, A. **Formação de espumas em soluções micelares**: efeitos de misturas de surfactantes iônicos e sais inorgânicos. Rio de Janeiro: PUC, 2017.

BABU, D. S.; GANESH BABU, K. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 5, p. 755-762, 2003.

BABU, D. S.; GANESH BABU, G.; TIONG-HUAN, W. Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 6, p. 520-527, 2006.

BABU, D. S.; GANESH BABU, G.; WEE, T. H. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1218-1223, 2005.

BAUER, L. A. **Materiais de Construção Vol. 1: Novos Materiais Para Construção Civil**. 5 ed., v. 1. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S. A., 1995.

BOGAS, J. A.; GOMES, M. G.; GOMES, A. Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. **Ultrasonics**, v. 53, p. 962-972, 2013.

BOUVARD, D. et al. Characterization and simulation of microstructure and properties of EPS lightweight concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 12, p. 1666-1673, 2007.

BRADY, K. C.; JONES, M. Roderick; WATTS, G. R. **Specification for foamed concrete**. Crowthorne, UK: TRL Limited, 2001.

CIMENTO NACIONAL. **Certificado de ensaios em cimento CP V-ARI MAX**. Minas Gerais: Cimento Nacional, 2018.

CIMENTO MIZU, S/A. **Certificado de ensaios em escória**. 2018.

CINCOTTO, M. A.; BATTAGIN, A.; AGOPYAN, V. **Características da escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado**. São Paulo: IPT, 1992. (Boletim, 65).

CORTELASSI, E. M. **Avaliação do comportamento de concretos celulares espumosos de alto desempenho**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2005.

DENG, A.; XIAO, Y. Measuring and modeling proportion-dependent stress-strain behavior of EPS-sand mixture 1. **International Journal of Geomechanics**, v. 10, n. 6, p. 214-222, 2010.

DRENCKHAN, W; SAINT-JALMES, A. The science of foaming. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 222, p. 228-259, 2015.

DRON, R. Structure et réactivité du laitier granulé. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE QUÍMICA DO CIMENTO, 8, 1986, Rio de Janeiro. **Anais**. São Paulo: ABPC, v. 4, p. 81-6, 1986.

ESMAILY, H.; NURANIAN, H. Non-autoclaved high strength cellular concrete from alkali activated slag. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 200-206, 2012.

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**, v. 165, p. 735-749, 2018.

FARES, H.; REMOND, R.; NOUMOWE, A.; COUSTURE, A. High temperature behaviour of self-consolidating concrete – microstructure and physicochemical properties. **Cement Concrete Research**, v. 40, p. 488–496, 2010.

FERNANDO, P. L. N.; JAYASINGHE, M. T. R.; JAYASINGHE, C. Structural feasibility of Expanded Polystyrene (EPS) based lightweight concrete sandwich wall panels. **Construction and building materials**, v. 139, p. 45-51, 2017.

FERREIRA, O. A. R. **Concretos celulares espumosos**. São Paulo: Departamento de Engenharia Construção Civil da EPUSP, 1987.

FREIRE, D. Especialistas discutem papel da indústria do cimento nas emissões de CO<sub>2</sub>. **Agência FAPESP**, 17 jun. 2016. Disponível em: <<http://agencia.fapesp.br/especialistas-discutem-papel-da-industria-do-cimento-nas-emissoes-de-co2/23449/>>. Acesso em: 30 de out. de 2019.

FREITAS, I. M. **Produção e propriedades físicas e mecânicas do concreto celular espumoso**. Dissertação de Mestrado. Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2004.

FREITAS, I. M.; ALLENDE, K. A.; DARWISH, F. A. I. Otimização Da produção e das propriedades do concreto celular espumoso orgânico e inorgânico com adição de cinasita e rejeito plástico. **XXIV ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, Florianópolis, SC, Brasil, 2004.

GRUTZECK, M. W. Cellular Concrete. In SCHEFFLER, M.; COLOMBO, P. (Eds.). **Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications**. Ed. Wiley-VCH. Weinheim, Alemanha. 2005.

GUGLIELMI, P. O. **Investigação da porosidade e resistência mecânica de um concreto celular argiloso curado em autoclave**. Monografia. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Ed. PINI, 1992.

HOFF, G. C. Porosity–strength considerations for cellular concrete. **Cement and concrete research**, v. 2, n. 1, p. 91-100, 1972.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Folder Aço Brasil Sustentabilidade**. 2019.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade**. 11. ed. Brasil, 2018.

INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL DOS PLASTICOS (PLASTIVIDA). **Monitoramento dos índices de reciclagem mecânica de plásticos no Brasil**. São Paulo, 2013

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. v. 1, p. 415-51. São Paulo: IBRACON, 2011.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. Tese de Doutorado. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1995.

KASHANI, A.; NGO, T. D.; MENDIS, P.; BLACK, J. R.; HAJIMOHAMMADI, A. A sustainable application of recycled tyre crumbs as insulator in lightweight cellular concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 925-935, 2017.

KEARSLEY, E. P.; WAINWRIGHT, P. J. The effect of porosity on the strength of foamed concrete. **Cement and concrete research**, v. 32, n. 2, p. 233-239, 2002.

KEARSLEY, E. P.; WAINWRIGHT, P. J. Porosity and permeability of foamed concrete. **Cement and concrete research**, v. 31, n. 5, p. 805-812, 2001.

KIM, H.K.; JEON, J. H.; LEE, H.k. Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 193-200, 2012.

KOREAN INDUSTRIAL STANDARD. **KS F 4039: Testing Concrete**. Seoul: KS, 2006.

KUZIELOVÁ, E; PACH, L.; PALOU, M. Effect of activated foaming agent on the foam concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 998-1004, 2016.

LANGARO, E. A. **Cimento álcali ativado a partir da valorização da escória de alto forno a carvão vegetal**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

LE ROY, Robert; PARANT, Edouard; BOULAY, Claude. Taking into account the inclusions' size in lightweight concrete compressive strength prediction. **Cement and concrete research**, v. 35, n. 4, p. 770-775, 2005.

LI, Y.; LIU, N.; CHEN, B. Properties of lightweight concrete composed of magnesia phosphate cement and expanded polystyrene aggregates. **Materials and structures**, v. 48, n. 1-2, p. 269-276, 2015.

LONGHI, M.A. **Álcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em engenharia civil. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015

MARTINS, N. P. **Microestrutura e propriedades mecânicas de argamassas contendo escória de alto forno in natura**. Monografia. Centro de Tecnologia. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2016.

MASTALI, M. *et al.* Mechanical and acoustic properties of fiber-reinforced alkali-activated slag foam concretes containing lightweight structural aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 371-381, 2018.

MATCHEM. **Boletim Técnico de Produto**. 2016.

MATHER, Bryant. Laboratory tests of Portland blast-furnace slag cements. In: **Journal Proceedings**. V. 54, n. 3, p. 205-232, 1957.

MAYCÁ, J.; CREMONINI, R. A.; RECENA, F. A. **Contribuição ao estudo da argila expandida nacional como alternativa de agregado graúdo para concretos leves estruturais (CLE)**. Monografia de especialização. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

MC-BAUCHEMIE BRASIL. **Ficha de informações de segurança de produtos químicos (FISPQ)**. São Paulo: MC-Bauchemie, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO NETO, A. A. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2002.

MELO NETO, A. A. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.

MILED, K. *et al.* Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: size effects and failure mode. **Mechanics of materials**, v. 36, n. 11, p. 1031-1046, 2004.

MILED, K.; SAB, K.; LE ROY, R. Effective elastic properties of porous materials: Homogenization schemes vs experimental data. **Mechanics Research Communications**, v. 38, n. 2, p. 131-135, 2011.

MILED, K.; SAB, K.; LE ROY, R. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: experimental investigation and modelling. **Mechanics of Materials**, v. 39, n. 3, p. 222-240, 2007.

MUNDO ISOPOR. **Conheça a história do EPS Isopor**. Knauf. Disponível em: <https://www.mundoisopor.com.br/conheca-a-historia-do-isopor>. Acesso em: 10 jan. 2019.

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

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

OZÓRIO, B.P.M. **Concreto leve com pérolas de EPS**: estudo de dosagens e de características mecânicas. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2016.

PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J. A.; LEONELLI, C.; PALOMO, A.; CHINDAPRASIRT, P. (Ed.). **Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes**. [s.l.]: Woodhead Publishing, 2014. 852 p

PETRUCCI, E. G. **Concreto de Cimento Portland**. 5 ed. São Paulo: Globo, 1978.

RANJBAR, M.M; MOUSAVI, S. Y. Strength and durability assessment of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. **Materials and Structures**, v. 48, n. 4, p. 1001-1011, 2015.

RAVINDRARAJAH, R. S; TUCK, A. J. Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads. **Cement and Concrete Composites**, v. 16, n. 4, p. 273-277, 1994.

ROSSIGNOLO, J. A. Avaliação da Porosidade e do Teor de CH de Pastas de Cimento Portland com Sílica Ativa e Látex SBR. **Revista Matéria**, v. 10, n. 3, p. 437–442, 2005.

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

SACH, J.; SEIFERT, H. Foamed concrete technology: possibilities for thermal insulation at high temperatures. In: **Ceram. Forum Int./Ber**. DKG. 1999. p. 23-30.

SADRMOMTAZI, A. *et al.* Properties of multi-strength grade EPS concrete containing silica fume and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 211-219, 2012.

SANTOS, A. **Brasil busca menor emissão de CO2 por tonelada de cimento**. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/brasil-quer-ser-menor-emissor-de-co2-por-tonelada-de-cimento/>>. Acesso em: 22 de out. de 2019.

ŞAHIN, M.; ERDOĞAN, S.T.; BAYER, O. Production of lightweight aerated alkali-activated slag pastes using hydrogen peroxide. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 106-118, 2018.

SHI, C.; ROY, D.; KRIVENKO, P. **Alkali-activated cements and concretes**. New York: Taylor & Francis, 2006.

SILVA, C.A. **Estudo de dosagem e avaliação de concreto celular com fins estruturais**. Dissertação Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estrutura. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2015.

SILVA, M. G.; AGOPYAN, V. **Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimentos de escória de alto-forno**. Tese de Doutorado. Departamento de

Engenharia de Construção Civil. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Resultados Preliminares de Dezembro 2019**. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=44>>. Acesso em: 30 de dez. de 2019.

SIPOREX. **Seja Bem-vindo ao Portal da Siporex**. Disponível em: <<https://www.siporex.com.br/#>>. Acesso em: 31 de out. de 2019.

TALLING, B.; BRANDSTETR, J. Present state and future of alkali-activated slag concretes. **Special Publication**, v. 114, p. 1519-1546, 1989.

TAYLOR, H. **Cement chemistry**. 2 ed. London: Thomas Telford Publishing, 1997.

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

TUTIKIAN, Bernardo F.; HELENE, Paulo. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia** (Vol. 1, p. 1712). São Paulo: IBRACON, 2011.

VOINOVITCH, I.; RAVERDY, M.; DRON, R. Ciment de laitier sans clinker. In: ICC, 7<sup>th</sup> **Proceedings**. Paris, v. 2, p. 111-122, 1980.

WORLD STEEL ASSOCIATION. Steel Facts. **World Steel Association**, 1 ed., p. 130, 2018. Disponível em: <<http://agencia.fapesp.br/especialistas-discutem-papel-da-industria-do-cimento-nas-emissoes-de-co2/23449/>>. Acesso em: 30 de out. de 2019.

XU, Y. *et al.* Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 32-38, 2012.

XU, Y. *et al.* Prediction of compressive strength and elastic modulus of expanded polystyrene lightweight concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 67, n. 17, p. 954-962, 2015.

YANG, K.H. *et al.* Properties and sustainability of alkali-activated slag foamed concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 68, p. 226-233, 2014.

YUAN, B. *et al.* Sodium carbonate activated slag as cement replacement in autoclaved aerated concrete. **Ceramics International**, v. 43, n. 8, p. 6039-6047, 2017.

## APÊNDICE A – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS CELULARES

Tabela 28 - Resistência à compressão por amostra aos 3, 7 e 28 nos concretos CCA1, CCA2, CCA3, CEA1, CEA2 e CEA3.

	Traço CCA1			Traço CCA2			Traço CCA3			Traço CEA1			Traço CEA2			Traço CEA3		
<b>Média</b>	0,77	0,97	1,16	0,73	0,97	1,08	0,72	0,83	0,95	1,63	2,23	3,03	1,41	1,69	2,25	0,90	1,09	1,75
<b>Desvio P</b>	0,08	0,17	0,10	0,08	0,18	0,14	0,07	0,04	0,04	0,08	0,15	0,11	0,10	0,07	0,04	0,12	0,07	0,23
<b>CV</b>	10,87	17,86	8,58	11,54	18,27	13,19	9,13	4,95	3,93	4,65	6,85	3,73	7,39	4,16	1,78	12,76	6,26	13,40
<b>Nº dos corpos de prova:</b>	18			18			18			18			18			18		
<b>Insira os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>
	0,72	1,09	1,24	0,56	1,14	0,97	0,80	0,77	0,97	1,61	2,31	3,26	1,47	1,64	2,26	0,92	1,00	2,06
	0,72	0,84	1,18	0,76	0,88	1,08	0,75	0,79	0,90	1,78	2,41	3,00	1,51	1,66	2,31	0,92	1,06	1,51
	0,84	1,02	1,01	0,77	1,13	1,18	0,76	0,87	0,96	1,60	2,18	3,00	1,33	1,61	2,23	0,95	1,19	1,84
	0,66	0,68	1,24	0,73	0,94	0,92	0,70	0,87	0,99	1,63	2,01	2,94	1,52	1,72	2,25	0,68	1,06	1,57
	0,82	1,06	1,05	0,77	1,04	1,31	0,72	0,85	0,95	1,60	2,13	3,00	1,27	1,80	2,20	0,99	1,09	1,97
	0,87	1,12	1,21	0,77	0,67	1,04	0,60	0,84	0,90	1,57	2,35	3,00	1,37	1,73	2,23	0,97	1,15	1,57

Tabela 29 - Resistência à compressão por amostra aos 3, 7 e 28 nos concretos CCP2, CCP3, CEP1, CEP2 e CEP3.

	Traço CCP2			Traço CCP3			Traço CEP1			Traço CEP2			Traço CEP3		
<b>Média</b>	1,00	1,04	1,07	0,90	1,04	1,11	1,13	1,24	1,60	0,93	1,06	1,34	0,90	1,01	1,08
<b>Desvio P</b>	0,02	0,10	0,10	0,12	0,10	0,09	0,15	0,07	0,16	0,12	0,14	0,19	0,06	0,15	0,08
<b>CV</b>	2,02	9,27	9,42	13,73	9,25	8,17	13,10	5,36	10,27	12,92	12,94	14,43	6,28	15,09	7,48
<b>Nº dos corpos de prova:</b>	18			18			18			18			18		
<b>Insira os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>
	1,00	0,92	0,97	0,99	1,10	1,18	1,21	1,23	1,85	1,14	0,82	1,45	0,95	1,12	1,06
	1,02	1,07	0,93	0,96	1,09	1,10	1,10	1,28	1,66	0,83	1,12	1,64	0,89	1,00	1,07
	1,03	1,14	1,18	1,01	0,91	1,10	1,14	1,23	1,60	0,91	1,01	1,23	0,82	1,04	1,14
	0,97	0,92	1,09	0,96	1,10	1,20	1,29	1,20	1,60	0,99	1,10	1,14	0,90	1,06	0,94
	1,00	1,09	1,06	0,78	0,92	1,12	0,86	1,35	1,35	0,86	1,23	1,17	0,86	1,14	1,15
	1,00	1,09	1,17	0,72	1,10	0,94	1,18	1,15	1,51	0,85	1,10	1,43	0,96	0,72	1,14

## APÊNDICE B – VELOCIDADE DE ONDA ULTRASSÔNICA DOS CONCRETOS CELULARES

Tabela 30 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica por amostra aos 3,7 e 28 nos concretos CCA1, CCA2, CCA3, CEA1, CEA2 e CEA3.

	Traço CCA1			Traço CCA2			Traço CCA3			Traço CEA1			Traço CEA2			Traço CEA3		
Média	1887,67	1888,72	1990,40	1661,67	1712,17	1753,93	1525,93	1663,67	1706,78	1753,91	1951,51	2199,20	1708,76	1910,67	2133,27	478,73	1535,18	1998,75
Desvio P	48,81	197,57	92,61	146,71	65,35	146,20	65,50	189,74	4,48	42,57	21,14	60,73	57,69	50,11	84,74	24,87	25,63	192,69
CV	2,59	10,46	4,65	8,83	3,82	8,34	4,29	11,40	0,26	2,43	1,08	2,76	3,38	2,62	3,97	5,20	1,67	9,64
Nº dos corpos de prova:	18			18			18			18			18			18		
Valores obtidos no ensaio de ultrassom	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>
	1855,00	1826,95	2023,12	1540,00	1793,00	1730,00	1409,00	1695,00	1705,47	1699,32	1969	2170,42	1673,71	1871,32	2109,5	474,15	1568,00	1906,09
	1886,00	1969,66	2083,30	1605,00	1780,00	2033,00	1496,00	2033,00	1702,53	1807,00	1922,00	2178,00	1709,28	1910,72	2106,5	467,46	1508,00	1867,20
	1883,00	1768,00	2062,00	1614,00	1688,00	1708,05	1573,00	1579,00	1709,63	1735,96	1930,1	2271,32	1642,00	1837,00	2135,6	466,08	1523,08	1896,00
	1874,00	1782,00	2022,00	1550,00	1689,00	1749,52	1547,00	1571,00	1700,94	1803,15	1974,00	2279,00	1730,57	1959,00	2022,00	523,9	1549,00	1836,39
	1982,00	2254,72	1897,00	1925,00	1617,00	1703,00	1589,00	1521,00	1710,10	1733,00	1953,00	2162,39	1809,00	1919,00	2282,00	453	1508,00	2282,94
1846,00	1731,00	1855,00	1736,00	1706,00	1600,00	1541,61	1583,00	1712,00	1745,00	1961,00	2134,07	1688,00	1967,00	2144,00	487,8	1555,00	2203,86	

Tabela 31 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica por amostra aos 3,7 e 28 nos concretos CCP2, CCP3, CEP1, CEP2 e CEP3.

	Traço CCP2			Traço CCP3			Traço CEP1			Traço CEP2			Traço CEP3		
Média	1486,45	1617,56	1610,30	1387,08	1466,04	1575,00	1398,53	1682,36	1809,65	486,65	1370,25	1702,26	511,83	1442,12	1690,96
Desvio P	50,83	92,58	27,22	18,58	47,34	21,35	91,69	51,85	72,05	100,21	63,15	59,65	67,67	77,14	60,65
CV	3,42	5,72	1,69	1,34	3,23	1,36	6,56	3,08	3,98	20,59	4,61	3,50	13,22	5,35	3,59
Nº dos corpos de prova:	18			18			18			18			18		
Valores obtidos no ensaio de ultrassom	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>	<b>3 Dias</b>	<b>7 Dias</b>	<b>28 Dias</b>
	1416,00	1566,51	1636,49	1351,00	1525,36	1558,00	1580,08	1757,28	1721,00	470,95	1382,83	1761,76	631,80	1501,00	1670,00
	1508,08	1538,00	1623,00	1400,00	1507,00	1581,00	1368,00	1670,86	1831,70	452,01	1386,30	1722,00	467,00	1369,57	1711,92
	1448,62	1591,00	1630,00	1385,00	1414,00	1563,00	1330,28	1617,00	1900,30	386,91	1383,36	1636,00	519,16	1486,34	1713,40
	1563,00	1600,00	1615,32	1391,00	1490,88	1614,00	1361,00	1721,05	1870,20	681,00	1325,00	1650,25	460,00	1465,00	1551,00
	1500,00	1798,83	1593,00	1395,48	1427,00	1576,00	1398,81	1638,95	1734,58	459,00	1279,00	1667,00	456,00	1507,90	1679,47
1483,00	1611,00	1564,00	1400,00	1432,00	1558,00	1353,00	1689,01	1800,09	470,00	1465,00	1776,56	537,00	1322,88	1692,44	

## APÊNDICE C– COMPOSIÇÃO DO CUSTO DOS CONCRETOS CELULARES

Os preços unitários foram coletados através de consulta a representantes comerciais dos produtos descritos na metodologia. O custo dos insumos naturais, como a areia, seguiu os valores comercializados na região e o custo da água foi fornecido pela empresa de abastecimento do estado. Para a composição dos preços unitários não foi levado em consideração a mão-de-obra com encargos sociais, tempo de execução, além da energia elétrica necessária para preparação (Tabela 32).

Tabela 32 - Composição Unitária dos materiais utilizados para produção dos concretos celulares na região metropolitana de Recife-PE.

Item	Descrição	Unid.	P.Unit.
			<b>MAT</b>
<b>1.00</b>	<b>Materiais</b>		R\$
1.01	Cimento Portland CPV – ARI MAX	Kg	0,43
1.02	Escória de alto forno, finura Blaine 4.647,00 cm <sup>2</sup> /g e índice de finura (#200) de 0,07 %	Kg	0,15
1.03	Silicato de sódio no estado líquido com módulo de sílica (SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O) de 1,72.	Kg	1,20
1.04	Areia lavada com módulo de finura: muito fina e massa específica de 2,63 g/cm <sup>3</sup>	Kg	0,03
1.05	Poliestireno expandido (EPS) diâmetro máximo até 6,3 mm	Kg	18,47
1.06	Aditivo espumígeno - Centripor SK 100	Kg	9,05
1.07	Água fornecida pela Companhia Pernambucana de Saneamento na modalidade industrial com esgotamento sanitário	L	0,003
1.08	Aditivo superplastificante - MAXIFLUID 960 H	Kg	9,72
1.09	Adesivo de Base PVA	Kg	11,00

Fonte: A autora (2019).

Na análise, foi utilizada a composição dos traços para a produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto celular. Manteve-se as mesmas proporções na dosagem de aglomerante, agregado miúdo e espuma (1:0,73:1,53), variando, apenas as relações a/agl e o tipo de agregado. O consumo de materiais utilizados para confecção dos concretos celulares está descrito na Tabela 33 e os custos do m<sup>3</sup> destes concretos estão apresentados na Tabela 34.

Tabela 33 - Consumo dos materiais para a produção do m<sup>3</sup> dos concretos celulares.

Traço	Cimento Portland (Kg)	Escória (Kg)	Areia (Kg)	EPS <sup>b</sup> (Kg)	Silicato (Kg)	Agt. Esp. <sup>c</sup> (Kg)	Água <sup>d</sup> (L)	SP (Kg)	Adesivo <sup>e</sup> (Kg)
CCA1	327,37	-	238,98	-	-	2,19	179,18	0,75	-
CCA2	286,33	-	209,02	-	-	1,92	168,17	0,52	-
CCA3	254,35	-	185,68	-	-	1,70	159,56	0,41	-
CEA1	-	328,96	273,36	-	101,10	2,51	149,34	-	-
CEA2	-	291,36	242,11	-	89,55	2,22	145,54	-	-
CEA3	-	267,42	222,21	-	82,19	2,04	145,75	-	-
CCP1	287,57	-	-	1,52	-	1,92	157,39	0,66	2,01
CCP2	287,11	-	-	1,52	-	1,92	168,63	0,52	2,01
CCP3	280,38	-	-	1,49	-	1,88	175,89	0,45	1,96
CEP1	-	255,28	-	1,54	78,46	1,94	115,89	-	2,03
CEP2	-	264,63	-	1,60	81,33	2,02	132,19	-	2,11
CEP3	-	273,53	-	1,65	84,07	2,08	149,09	-	2,18

<sup>a</sup> O aglomerante de escória álcali ativado é composto por: escória (87,85%) + parte sólida do silicato de sódio (12,15%). Porém, o silicato de sódio utilizado possui 45% de sólidos, e os outros 55% são corrigidos na água da mistura.

<sup>b</sup> A substituição em volume da areia por pérolas de EPS

<sup>c</sup> Para confecção da espuma o produto foi diluído na proporção 1:25 (aditivo:água), logo, 1 litro de agente espumígeno nessa concentração produz 228,59 litros de espuma

<sup>d</sup> Volume de água com correção da espuma e silicato de sódio

<sup>e</sup> Relação adesivo/aglomerante 0,007

Fonte: A autora (2019).

Tabela 34 - Composição do Custo/m<sup>3</sup> dos concretos celulares produzidos.

Traço	Valor (R\$) <sup>a</sup>									Total (R\$)
	Cimento Portland	Escória	Areia	EPS	Silicato	Agt. Esp.	Água	SP	Adesivo	
CCA1	139,13	0,00	6,15	0,00	0,00	19,83	0,56	7,32	0,00	172,99
CCA2	121,69	0,00	5,37	0,00	0,00	17,35	0,52	5,01	0,00	149,94
CCA3	108,10	0,00	4,77	0,00	0,00	15,41	0,49	3,96	0,00	132,73
CEA1	0,00	49,34	7,03	0,00	121,02	22,68	0,46	0,00	0,00	200,54
CEA2	0,00	43,70	6,23	0,00	107,19	20,09	0,45	0,00	0,00	177,66
CEA3	0,00	40,11	5,71	0,00	98,38	18,44	0,45	0,00	0,00	163,10
CCP2	122,02	0,00	0,00	28,09	0,00	17,39	0,52	5,02	22,11	195,16
CCP3	119,16	0,00	0,00	27,43	0,00	16,99	0,55	4,36	21,59	190,07
CEP1	0,00	38,29	0,00	28,43	93,92	17,60	0,36	0,00	22,38	200,98
CEP2	0,00	39,69	0,00	29,47	97,35	18,25	0,41	0,00	23,19	208,37
CEP3	0,00	41,03	0,00	30,46	100,63	18,86	0,46	0,00	23,97	215,42

<sup>a</sup> O custo por m<sup>3</sup> do concreto celular é o somatório do produto entre o valor unitário (Tabela 32) e o consumo (Tabela 33) de cada material utilizado na confecção do traço.

Fonte: A autora (2019).