

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

CLEDSON ANDRÉ DE OLIVEIRA SILVA

**ESTUDO DE DOSAGEM E AVALIAÇÃO DE CONCRETO CELULAR COM FINS
ESTRUTURAIS**

Maceió - AL

2015

CLEDSON ANDRÉ DE OLIVEIRA SILVA

ESTUDO DE DOSAGEM E AVALIAÇÃO DE CONCRETO CELULAR COM FINS
ESTRUTURAIS

Dissertação apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes

Coorientador: Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima

Maceió - AL

2015

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

S586e Silva, Cledson André de Oliveira.
Estudo de dosagem e avaliação de concreto celular com fins estruturais /
Cledson André de Oliveira Silva. – 2015.
137 f. : il.

Orientador: Paulo César Correia Gomes.

Coorientador: Flávio Barboza de Lima.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Universidade
Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2015.

Bibliografia: f. 133-137.

1. Concreto celular. 2. Aditivos químicos. 3. Resistência à compressão.
4. Método de dosagem. I. Título.

CDU: 624.01



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia – CTEC
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil – PPGEC

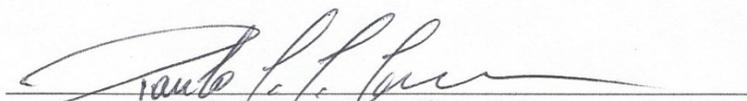


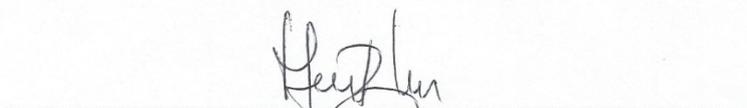
**ESTUDO DE DOSAGEM E AVALIAÇÃO DE CONCRETO CELULAR COM FINS
ESTRUTURAIS**

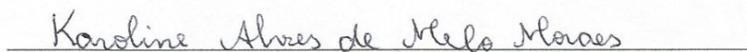
CLEDSON ANDRÉ DE OLIVEIRA SILVA

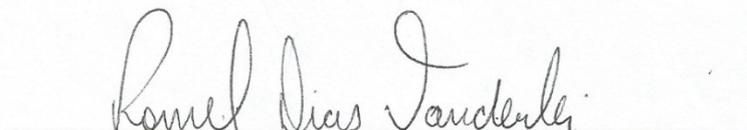
Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 26 do mês de maio do ano de 2015.

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes
Orientador – PPGEC/UFAL


Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima
Coorientador - PPGEC/UFAL


Prof. Dr. Karoline Alves de Melo Moraes
CTEC/UFAL


Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei
UEM

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, a toda minha família, aos meus orientadores e todas as pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta para o desenvolvimento do mesmo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me guiado por toda essa jornada e pelas conquistas.

A minha mãe Maria José de Oliveira e ao meu Pai José André da Silva, pelo amor incondicional, pelas palavras de incentivos e conforto durante toda a minha vida, em especial a todo o apoio dado durante os meus estudos.

A minha família, em especial aos meus irmãos, minha madrinha Luciana e minha Tia Amara, que sempre incentivaram e acreditaram no desenvolvimento deste trabalho.

A minha esposa Julyane Sabryne Vieira dos Santos, pela compreensão e incentivo aos meus estudos desde que nos conhecemos.

Ao orientador Paulo Cesar Correia Gomes, pela paciência e contribuição durante toda a elaboração deste trabalho, contribuindo para obtenção dos melhores resultados.

Ao co-orientador Flávio Barboza de Lima, por todos os comentários e sugestões para a elaboração desta dissertação.

A professora Aline da Silva Ramos Barboza e ao professor Wayne Santos de Assis, ambos do PPGEC/CTEC/UFAL, pelos comentários e sugestões para a construção desta dissertação, durante o meu Exame de Qualificação de Mestrado.

Aos amigos e companheiros de pesquisas do grupo, coordenado pelo professor Paulo César Correia Gomes, em especial a: Bárbara, José Wilson, Natália, Priscila, Raísa, Saran e Thiago.

Aos professores do PPGEC e CTEC, que contribuíram de forma direta ou indireta durante a minha formação acadêmica e no período de disciplina do Mestrado.

A professora Karoline Alves Melo Moraes, por todo apoio prestado durante a elaboração deste trabalho.

Aos amigos Lucas, Heleno, Hevânio, Rafael, Marcos Diego e aos amigos feitos no mestrado, Ingrid, Everton, Tassyano, Thabatta, Roberto, Osvaldo e Alexandre, pelo compartilhamento de conhecimentos durante o período de curso.

À empresa FORTMIX por todo o apoio prestado no desenvolvimento da pesquisa, através de doações de materiais e equipamentos.

À CAPES pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de mestrado.

Aos projetos UNIVERSAL/2012 (CNPq) E PROCAD/casadinho 552300/2011 (CNPq/CAPES) e FAPEAL, pelo apoio ao Programa e ao desenvolvimento da pesquisa.

Ao Laboratório de Estrutura e Materiais (LEMA) do CTEC/UFAL, por toda a infraestrutura fornecida.

Por fim, agradeço aos técnicos e funcionários do laboratório de estrutura e materiais do CTEC/UFAL, em especial: Jonas, Henrique, Sr. Cícero, Sr. Fábio, Sr. Valdemir, Sr(a) Girlei, Flabeu e Sidcley.

RESUMO

Atualmente o uso de concreto celular em edificações vem crescendo devido as suas vantagens (baixa densidade, melhor conforto ambiental e outras). Algumas normas já regularizam sua aplicação em paredes para edificações térreas, e projetos de normas, ainda em elaboração, que irão regularizar sua aplicação com fins estruturais em paredes de edificações de vários pavimentos. Entretanto, para a obtenção de concretos celulares ainda não existem métodos de dosagens que relacionem sua formulação com a resistência à compressão, além disso, há muitas variáveis (dosagem de aditivo, processo de geração das bolhas de ar, diâmetro, densidade e volume das bolhas, uso de agregados graúdos, etc.) que influenciam no processo de produção necessitando de um melhor entendimento. Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar a obtenção e as propriedades de diferentes tipos de concretos celulares, com o intuito de aplicação para fins estruturais em paredes de edificações. Para isso, três tipos de concretos celulares foram desenvolvidos adotando diferentes procedimentos de dosagens, materiais e composições. O primeiro com formação de espumas geradas através de geradores (CESP), utilizando aditivo químico espumígeno (AESP), sem agregado graúdo. O segundo com aditivo químico incorporador de bolhas de ar através da ação mecânica do misturador (CBAM), também sem agregado graúdo. E o terceiro com agregados graúdos (CBAMG) e aditivos incorporadores de bolhas de ar. Foram avaliadas as propriedades no estado fresco (densidade, consistência e teor de ar incorporado) e no estado endurecido (resistência à compressão). Com base na análise dos resultados verificou-se que a produção do CESP foi dificultada pelo uso dos geradores de espuma, prejudicando sua obtenção, apesar de atender os requisitos normativos para aplicações em edificações. Já o CBAM apresentou menor variabilidade no processo de obtenção proporcionando um melhor desempenho. Quanto ao CBAMG este apresentou uma melhora na trabalhabilidade comparado aos concretos de referência CBAM. As maiores resistências à compressão dos concretos celulares CESP, CBAM e CBAMG, aos 28 dias, foram, 6,5 MPa, 19,5 MPa e 23,5 MPa, respectivamente, podendo estes serem aplicados em paredes com fins estruturais.

Palavras-chave: Concreto celular. Aditivos químicos. Método de dosagem. Resistência à compressão.

ABSTRACT

The use of cellular concrete in buildings has been increasing recently due to its advantages (low density, better thermal comfort, among others). Some norms already regulate its application for walls of one floor buildings, and normative projects, still under development, which will regulate its application with structural purposes for walls of multi-level buildings. However, there still is not a specific dosage method that relates the formulation with the compression strength for cellular concrete manufacture, moreover, there are many variables (additive dosage, generation process of air bubbles, diameter, density and volume of bubbles, use of coarse aggregates, etc.), which influence the production process that needs a better understanding. Therefore, this study had as objective to evaluate the obtaining and properties of different types of cellular concrete, with the application intensio for structural purposes in construction walls. Thus, three types of cellular concrete procedures were developed adopting dosage procedures and different materials and compositions. The first with foam generated by generators (CESP), using foaming agent chemical additive (AESP), without coarse aggregate. The second with chemical additives incorporating the air bubbles through the mechanical action of the mixer (CBAM), also without coarse aggregate. And the third with coarse aggregates (CBAMG), and incorporating additives of air bubbles. The properties were evaluated in the fresh state (density, consistency and incorporating air content) and in the hardened state (compression strength). Based on results, the production of CESP was found to be made difficult by the use of foam-generator, damaging their manufacture, despite in agreement with the normative requirements for construction applications. CBAM presented a lower variability in the manufacturing process providing a better performance. Finally, CBAMG presented an improvement in workability compared to the CBAM concrete. The highest compression strength of cellular concrete CESP, CBAM and CBAMG, at 28 days, were 6.5 MPa, 19.5 MPa and 23.5 MPa, respectively, this can be applied in walls with structural purposes.

Keywords: Cellular concrete. Chemical additives. Methods dosages. Compression strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de concreto leve.....	17
Figura 2 – Classificação de concreto celular.....	24
Figura 3 – Espuma pré-formada.....	36
Figura 4 – Relação entre porosidade e resistência mecânica do concreto.....	51
Figura 5 – Relação empírica para a resistência à compressão e resistência à tração.....	57
Figura 6 – Comportamento típico de tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto.....	59
Figura 7 – Parâmetros que influenciam o módulo de elasticidade do concreto.....	60
Figura 8 – Curva granulométrica do agregado miúdo.....	73
Figura 9 – Curva granulométrica do agregado graúdo.....	73
Figura 10 – Etapas do método de dosagem dos CESP.....	74
Figura 11 – Densidades Médias das Espumas nas Proporções 1/20, 1/40 e 1/60.....	77
Figura 12 – Gerador de espuma.....	81
Figura 13 – Processo de mistura dos concretos CESP.....	82
Figura 14 – Espuma adicionada ao concreto base.....	83
Figura 15 – Processo de mistura dos concretos CBAM.....	84
Figura 16 – Processo de mistura dos concretos CBAMG.....	86
Figura 17 – Molde preenchido e identificado após desmolde.....	88
Figura 18 – Ensaio de resistência à compressão.....	91
Figura 19 – Densidades dos Concretos Bases.....	93
Figura 20 – Densidades médias no estado fresco dos CESP.....	94
Figura 21 – Teor de ar incorporado médio para os CESP.....	95
Figura 22 – Abatimento do CESP1/20.....	97

Figura 23 – Valores dos Abatimentos dos CESP.....	97
Figura 24 – Resistência à compressão média dos CESP nas idades de 7, 28 e 56 dias.....	99
Figura 25 – Densidades médias de massa aparente dos CBAM.....	103
Figura 26 – Teor de ar incorporado dos CBAM.....	104
Figura 27 – Valores dos Abatimentos dos CBAM.....	105
Figura 28 – Abatimento do CBAM78.....	106
Figura 29 – Resistência à compressão média dos CBAM nas idades de 7, 28 e 56 dias.....	108
Figura 30 – Densidades no estado fresco dos concretos bases (CB33).....	112
Figura 31 – Densidades no estado fresco dos concretos bases (CB17).....	113
Figura 32 – Densidades médias de massa aparente dos CBAMG33.....	114
Figura 33 – Densidades médias no estado fresco dos CBAMG17.....	114
Figura 34 – Teor de ar incorporado dos CBAMG33.....	116
Figura 35 – Teor de ar incorporado dos CBAMG17.....	116
Figura 36 – Valores dos abatimentos dos CBAMG33.....	118
Figura 37 – Valores dos abatimentos dos CBAMG17.....	118
Figura 38 – Abatimentos do CBAMG33/40.....	118
Figura 39 – Resistência à compressão média dos CBAMG33 nas idades de 7, 28 e 56 dias.....	122
Figura 40 – Resistência à compressão média dos CBAMG17 nas idades de 7, 28 e 56 dias.....	122
Figura 41 – Parede Analisada em planta baixa (cm).....	125

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Densidades x Trabalhabilidades dos CESP.....	98
Gráfico 2 – Densidades x Resistências dos CESP.....	101
Gráfico 3 – Aditivo/Cimento x Densidades.....	105
Gráfico 4 – Densidades x Trabalhabilidades dos CBAM.....	107
Gráfico 5 – Densidades x Resistências dos CBAM.....	110
Gráfico 6 – Agregado graúdo (%) x Densidades dos CBAMG33.....	115
Gráfico 7 – Agregado graúdo (%) x Densidades dos CBAMG17.....	115
Gráfico 8 – Densidades x Teor de ar incorporado CBAMG33 e dos CBAMG17.....	117
Gráfico 9 – Densidades x Trabalhabilidades dos CBAMG33.....	120
Gráfico 10 – Densidades x Resistências dos CBAMG aos 56 dias.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de CCE.....	28
Tabela 2 – Variação da massa específica aparente: variação da massa específica no Estado aparente e da resistência à compressão na idade de um dia.....	46
Tabela 3 – Densidade x Porcentagem de espuma.....	47
Tabela 4 – Abatimento x Teor de ar incorporado.....	50
Tabela 5 – Variação da resistência à compressão de concretos celulares com o consumo de cimento da mistura, com o fator água/cimento, com o fator areia/cimento e com a massa específica aparente seca.....	53
Tabela 6 – Massa unitária x Resistência.....	54
Tabela 7 – Resultados de resistência à compressão axial para duas cargas de velocidades	55
Tabela 8 – Massa unitária x Resistência à tração.....	58
Tabela 9 – Valores de módulo de deformação.....	61
Tabela 10 – Valores de módulo de deformação para cargas de curta e longa duração.....	61
Tabela 11 – Classe de agressividade ambiental x qualidade do concreto base.....	64
Tabela 12 – Classe de agressividade ambiental x resistência mínima à compressão do concreto celular estrutural.....	65
Tabela 13 – Classe de agressividade ambiental x Cobrimento nominal.....	65
Tabela 14 – Ensaio para caracterização dos agregados.....	72
Tabela 15 – Caracterização dos agregados.....	72
Tabela 16 – Parâmetros iniciais adotados.....	75
Tabela 17 – Densidades das espumas.....	76
Tabela 18 – Vazão do gerador de espuma.....	81

Tabela 19 – Composições dos CESP.....	92
Tabela 20 – Densidades dos CESP.....	94
Tabela 21 – Teor de ar incorporado para os CESP.....	95
Tabela 22 – Resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias dos CESP.....	99
Tabela 23 – Resistências à compressão aos 28 dias.....	100
Tabela 24 – Traços dos CBAM.....	102
Tabela 25 – Densidades de massa aparente dos CBAM.....	103
Tabela 26 – Resistência à Compressão aos 7, 28 e 56 Dias dos CBAM.....	107
Tabela 27 – Resistências à compressão aos 28 dias.....	109
Tabela 28 – Traços dos CBAM com agregado graúdo.....	111
Tabela 29 – Densidades de massa aparente dos CBAMG.....	113
Tabela 30 – Resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias dos CBAMG33.....	121
Tabela 31 – Resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias dos CBAMG17.....	121
Tabela 32 – Resistências a compressão aos 28 dias.....	123
Tabela 33 – Resistência à compressão aos 56 dias dos CBAMG.....	124

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Justificativa.....	18
1.2	Objetivos.....	19
1.3	Estrutura do trabalho.....	19
2	CONCRETO CELULAR.....	21
2.1	Definição e classificação.....	21
2.1.1	Concreto celular por aeração química.....	25
2.1.2	Concreto celular por agente espumígeno.....	27
2.2	Histórico.....	28
2.3	Aplicação.....	30
2.4	Materiais Constituintes.....	32
2.4.1	Cimento portland.....	33
2.4.2	Aditivos espumígenos.....	33
2.4.3	Aditivos químicos.....	37
2.4.4	Agregados.....	38
2.4.5	Fibras.....	41
2.5	Dosagem e Produção.....	41
2.6	Propriedades no estado fresco.....	44
2.6.1	Massa específica.....	45
2.6.2	Consistência.....	48
2.7	Propriedades no estado endurecido.....	50
2.7.1	Resistência à compressão.....	51
2.7.2	Resistência à tração.....	56

2.7.3	Módulo de elasticidade.....	58
2.8	Uso do concreto celular para fins estruturais em paredes.....	62
3	EXPERIMENTAÇÃO - MATERIAIS E MÉTODOS.....	70
3.1	Materiais.....	71
3.1.1	Aditivos químicos.....	71
3.1.2	Agregados.....	72
3.2	Métodos de dosagem.....	74
3.2.1	Formulação das composições dos CESP.....	74
3.2.2	Formulação das composições do CBAM.....	78
3.2.3	Formulação das composições dos CBAMG.....	79
3.3	Produção.....	80
3.3.1	Produção dos CESP.....	80
3.3.1.1	Vazão de espuma do gerador.....	80
3.3.1.2	Processo de mistura dos CESP.....	82
3.3.2	Produção dos CBAM.....	83
3.3.2.1	Processo de mistura dos CBAM.....	83
3.3.3	Produção dos CBAMG.....	84
3.3.3.1	Processo de mistura dos CBAMG.....	85
3.3.4	Moldagem, adensamento e cura dos corpos-de-prova.....	87
3.4	Ensaio no estado fresco.....	88
3.4.1.	Densidade de massa aparente.....	88
3.4.1.1	Concreto base.....	88
3.4.1.2	Concreto celular.....	89
3.4.2	Teor de ar incorporado.....	89
3.5	Ensaio no estado endurecido.....	90

3.5.1	Resistência à compressão.....	90
4	RESULTADOS E ANÁLISES.....	92
4.1	Concreto Celular com Espumas Pré-formada (CESP).....	92
4.1.1	Propriedades no estado fresco.....	93
4.1.2	Propriedades no estado endurecido.....	98
4.2	Concreto Celular com Bolhas de Ar Geradas na Mistura (CBAM).....	101
4.2.1	Propriedades no estado fresco.....	102
4.2.2	Propriedades no estado endurecido.....	107
4.3	Concretos CBAM com Adição de Agregados Graúdos (CBAMG).....	111
4.3.1	Propriedades no estado fresco.....	112
4.3.2	Propriedades no estado endurecido.....	120
4.4	Estudo de caso.....	125
4.4.1	Análise das cargas de solicitação.....	126
4.4.2	Pré-dimensionamento.....	127
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	130
	REFERÊNCIAS.....	137

1 INTRODUÇÃO

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

A grande utilização do concreto na construção civil está associada entre outras vantagens a sua excelente resistência à água, versatilidade e durabilidade. No entanto, algumas características como: baixa resistência a agentes químicos, o peso próprio elevado e a baixa resistência aos esforços de tração, limitam o seu uso em algumas situações, não atendendo a determinadas necessidades impostas na construção (CORTELASSI, 2005).

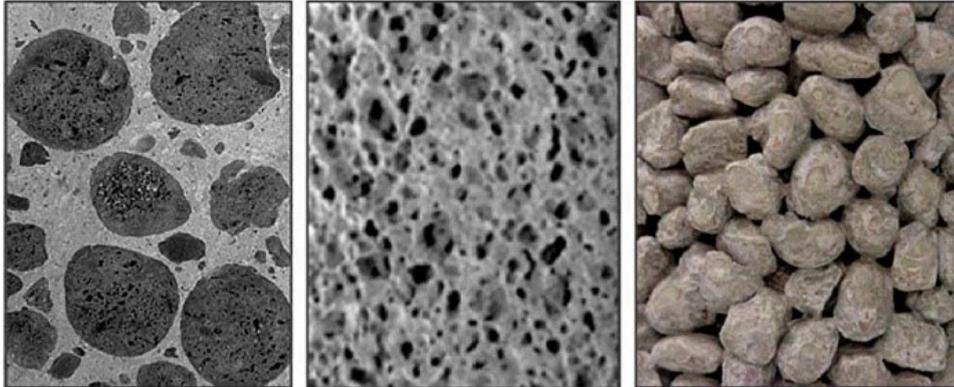
Na tentativa de reduzir essas desvantagens apresentadas pelo concreto convencional, ao longo dos anos percebeu-se a necessidade dos chamados concretos especiais, concretos estes com características particulares devido à evolução tecnológica, seja através da incorporação de propriedades inerentes ao material ou por meio da redução das deficiências do concreto convencional, ou ainda pelo emprego de técnicas avançadas de aplicação e moldagem.

Dentre os concretos chamados especiais, existem os concretos leves, cujos principais objetivos, são: reduzir o peso próprio e melhorar as propriedades quanto ao isolamento térmico e acústico. Segundo a NBR 8953:2015 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, 2015), define-se o concreto leve como o concreto cuja massa específica seca, de acordo com a ABNT NBR 9778:2005, seja inferior a 2000 kg/m³.

Tanto a massa específica reduzida quanto o isolamento térmico e acústico são propriedades que estão diretamente relacionadas ao volume de vazios existentes no concreto, sendo, portanto, a presença do ar em sua composição o fator determinante para a obtenção de concreto leve. O ar pode ser incorporado diretamente à massa através de espumas ou aditivos químicos, ou através de recursos que permitam o seu ingresso e manutenção dentro da estrutura do concreto, como a eliminação das partículas mais finas da granulometria do agregado ou a utilização de agregados graúdos ociosos ou porosos, podendo-se, ainda, obter concretos leves com uma combinação desses recursos.

Rossignolo (2009) classifica o concreto leve em concreto com agregados leves, concreto celular e concreto sem finos, respectivamente da esquerda para direita, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Tipos de concreto leve



Fonte: Rossignolo (2009)

Maycá, Cremonini e Recena (2008), seguindo essa classificação dos concretos leves, os definem da seguinte forma:

- ✓ Concretos celulares ou aerados: resultam da ação de produtos, em forma de gás ou espuma, que acrescentados à pasta, reagem produzindo gases que formam bolhas. Considerados especialmente leves, com massa específica entre 300 kg/m³ e 1900 kg/m³.
- ✓ Concretos sem finos: produzidos apenas com aglomerante e agregado graúdo, sua resistência está diretamente ligada à resistência do agregado e ao consumo de cimento. Considerados moderadamente leves, com massa específica variando entre 700 kg/m³ e 1800 kg/m³.
- ✓ Concretos com agregados leves: produzidos através da substituição total ou parcial dos agregados tradicionais por agregados leves. Massa específica variando entre 950 kg/m³ e 2000 kg/m³, a depender da utilização de agregados leves miúdos e graúdos, ou da combinação de agregado graúdo leve com areia natural.

Rossignolo (2005) justifica a ampla utilização dos concretos leves pelos benefícios gerados pela redução da massa específica do concreto, reduzindo os esforços devido ao peso próprio da estrutura, pela economia com fôrmas e cimbramento e pela diminuição dos custos com transporte e montagem de edificações pré-fabricadas.

Além disso, os concretos leves apresentam ótimo desempenho nas propriedades de resistência ao congelamento/descongelamento, isolamento térmico, isolamento acústico e de resistência ao fogo. Porém, ressalta-se que apesar da melhoria nessas propriedades, a substituição de parte dos materiais sólidos por ar ocasiona uma redução significativa nas propriedades mecânicas dos concretos leves (CORTELASSI, 2005).

Dentre esse contexto a utilização dos concretos celulares vem se destacando em edificações, principalmente em moradias populares a baixo custo, devido a incentivos por parte do Governo Federal, para suprir o déficit habitacional brasileiro, pois com a aplicação do sistema de paredes de concreto celular, garante-se um melhor conforto ambiental, no que diz respeito à propriedade térmica e acústica, além de reduzir o tempo de construção e gerar uma economia em relação aos sistemas convencionais.

Atualmente existem apenas três normas brasileiras que regulamentam o uso de concreto celular em paredes de edificações, NBR 12644:2014, NBR 12645:1992 e NBR 12646:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, 1992, 2014), no entanto, nenhuma dessas normas trata sobre projeto. Para suprir esta etapa existe o projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1 em elaboração que trata sobre projeto, controle e execução de paredes de concreto celular moldados no local.

Assim como para os concretos leves de modo geral as resistências mecânicas dos concretos celulares são relativamente menores quando comparado aos concretos convencionas, devido à alta porosidade presente na pasta de cimento, no entanto, já existem trabalhos na área de concreto celular que obtiveram resistências que dão possibilidades da aplicação deste material em elementos com finalidades estruturais.

1.1 Justificativa

Dentro das aplicações dos concretos celulares há uma grande necessidade de utilizar este material em elementos estruturais como, por exemplo, em paredes de edifícios com mais de dois pavimentos, para garantir um melhor conforto térmico e acústico, mas o fato de não existir métodos de dosagem que relacionem sua formulação com a resistência à compressão, e o reduzido conhecimento das suas variações no que diz respeito aos materiais utilizados, o processo de obtenção, a forma de produção das bolhas de ar e a ausência de norma, tem dificultado a aplicação deste material em larga escala.

Devido à crescente procura por esse material, principalmente em edificações térreas (com 1 pavimento), alguns trabalhos têm sido realizados, como: Cortelassi (2005); Freitas (2004); Freitas (2007), etc., no intuito de contribuir para a difusão de parte das propriedades destes concretos, como o presente trabalho, além dos incentivos e obstáculos para implementação deste material nos métodos construtivos, como apresentado por Breda (2012).

Dessa forma, é importante conhecer os materiais, o comportamento e as propriedades do concreto celular, além de suas particularidades quanto à sua produção e aplicação,

principalmente no que diz respeito a utilização para fins estruturais em paredes de edificações de múltiplos pavimentos.

1.2 Objetivos

O objetivo principal do estudo foi analisar a obtenção, produção e propriedades de diferentes concretos celulares com e sem agregados graúdos, para fins estruturais em paredes de edificações, utilizando diferentes aditivos e métodos de incorporação de bolhas de ar.

Como objetivos específicos tem-se:

- ✓ Obter conhecimento de métodos de dosagem aplicados para concreto celular;
- ✓ Identificar as peculiaridades no processo de produção dos concretos celulares, produzidos com dois tipos de aditivos geradores de bolhas de ar;
- ✓ Avaliar o uso dos agregados graúdos rochosos (pedrisco), com diâmetro máximo de 9,5 mm em concretos celulares;

1.3 Estrutura do trabalho

O estudo desenvolvido na dissertação será aqui apresentado em cinco seções, descritos da seguinte forma:

➤ **Seção 1**

Nessa seção é abordado uma introdução do tema em estudo, assim como a justificativa para a elaboração do presente trabalho e o objetivo principal e específicos.

➤ **Seção 2**

Apresenta uma revisão bibliográfica do concreto celular abordando: definições, classificações, histórico, aplicação, materiais constituintes, dosagens, produção, propriedades no estado fresco (massa específica e consistência), propriedades no estado endurecido (resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade) e normas nacionais e internacionais que podem auxiliar na sua utilização com fins estruturais.

➤ **Seção 3**

Materiais e métodos, apresenta a metodologia adotada e descreve a parte experimental, abordando os materiais que foram utilizados e os ensaios que foram aplicados para caracterizar estes materiais e as propriedades dos concretos no estado fresco (consistência, densidade de massa aparente e teor de ar incorporado) e no estado endurecido (resistência à compressão). Além disso esta seção também apresenta os métodos de dosagens e os procedimentos de produções adotados para os três grupos de concreto celulares produzidos neste estudo.

➤ **Seção 4**

Apresenta os resultados e análises das propriedades avaliadas no estado fresco e endurecido dos concretos celulares produzidos no presente trabalho, fazendo-se analogia entre estes e ao referencial bibliográfico apresentado na seção 2 além do pré-dimensionamento do número de pavimentos de um edifício sendo executado com os melhores concretos obtidos.

➤ **Seção 5**

São abordadas as considerações finais do trabalho, relatando resumidamente os principais resultados obtidos, apontando os pontos positivos e negativos no que se refere à aplicação destes concretos para fins estruturais, além de apresentar sugestões para trabalhos futuros.

➤ **Seção 6**

Por fim, esta seção apresenta as referências, que serviram de base para o desenvolvimento desse trabalho.

2 CONCRETO CELULAR

2.1 Definição e classificação

Ferreira (1986) define o concreto celular como um tipo de concreto leve resultante da pega de uma mistura de aglomerante e agregados finos, o qual passa por tratamentos mecânicos, físicos ou químicos, objetivando criar nessa massa uma alta porcentagem de poros esféricos, regularmente e milimetricamente dimensionados e distribuídos de forma uniforme por toda a massa, permanecendo estáveis, indeformáveis e incomunicáveis durante todo o processo, originando um concreto com uma massa específica aparente seca entre 400 kg/m^3 e 1850 kg/m^3 . Esses limites estão relacionados com o limite inferior da massa unitária seca da argamassa e com a menor densidade em que ainda consegue-se obter poros com dimensões regulares e milimétricas, resultando na constância das características físico-mecânicas dessa mistura.

Segundo a norma internacional ASTM C796 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2011), o concreto celular é um produto leve, de estrutura celular homogênea, composto por pasta de cimento portland, cimento pozolânico, cal pozolânica ou cal e sílica, ou ainda, misturas desses ingredientes, e possui vazios obtidos com a introdução de produtos químicos formadores de gás ou agentes espumígenos. Nesse concreto, a densidade desejada é obtida pela substituição de todo ou parte do agregado miúdo por células de ar macroscópicas. Normalmente o agregado graúdo não é utilizado, porém, agregados leves podem ser incluídos no concreto celular.

Já para a NBR 12646:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) o concreto celular é obtido pela introdução, nas argamassas, de bolhas de ar, com dimensões milimétricas, homogêneas, uniformemente distribuídas, estáveis, incomunicáveis e indeformadas ao fim do processo, cuja densidade de massa aparente no estado fresco deve estar compreendida entre 1300 kg/m^3 e 1900 kg/m^3 .

Enquanto o texto base do projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1, define como concreto celular estrutural, aqueles concretos de cimento portland, em que o aditivo incorpora, por agitação mecânica, bolhas de ar de dimensões milimétricas, incomunicáveis, homogêneas, uniformemente distribuídas, estáveis, e indeformáveis até o final do processo de lançamento e cura, mantendo inalterado a alcalinidade do concreto base, atendendo aos requisitos de desempenho do projeto estrutural, massa específica aparente no estado fresco entre 1480 kg/m^3 e 2000 kg/m^3 , relação água/cimento compreendida entre 0,45 e 0,60 e teor

máximo de ar incorporado de 37%, além das demais exigência da NBR 15575:2013 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, 2013).

O concreto base é definido pelo texto base do projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1, como concreto de cimento Portland, com massa específica seca compreendida entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³, antes da adição de bolhas de ar, que atendam às especificações das normas técnicas da ABNT NBR 5732:1991, NBR 5733:1991 NBR 5735:1991, NBR 5736:1991, NBR 5737:1992, NBR 11578:1991, NBR 12989:1993, NBR 13116:1994 e NBR 7212:2012, (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, 1991, 1992, 1993, 1994, 2012), com consumo mínimo de cimento e demais requisitos das normas técnicas NBR 6118:2014 e NBR 12655:2015 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, 2014, 2015). Na ausência de resultados experimentais, o mesmo considera a densidade no estado seco como sendo a densidade no estado fresco menos 80 kg/m³. Dessa forma, pode-se dizer que o limite da NBR 12646:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, 1992) para a densidade do concreto no estado seco seria 1820 kg/m³, valor este próximo do proposto por Ferreira (1986).

Assim, é possível identificar que dentre as definições dadas por diferentes autores e normas, ainda não há um consenso entre os intervalos de densidades dos concretos celulares e nem a forma de como estes são abordados, pois alguns autores apresentam limites das densidades no estado seco e outros no estado fresco.

Dessa forma, com base nas definições encontradas durante o levantamento bibliográfico realizado neste trabalho, pode-se definir o concreto celular como um concreto leve obtido através da incorporação, na matriz do concreto, de bolhas de ar ou gás, homogêneos, incomunicáveis e capazes de se manterem estáveis durante o processo de mistura, transporte, lançamento e adensamento do concreto.

Esse tipo de concreto, ainda segundo Petrucci (1982) é definido como poroso, celular ou aerado, e é obtido pela formação de gases ou espumas estáveis, que ficam aprisionadas no interior da massa. Também afirma que o termo “concreto” para esse tipo de material é impróprio, devido o mesmo ser um material poroso em que as bolhas de gás ou ar formam-se no interior de uma argamassa plástica.

Há ainda autores que alegam que, por definição, não se pode considerar o concreto celular como um concreto, pois, diferentemente do concreto convencional, ele é uma pasta endurecida, composta basicamente por cimento e água, que foi aerada antes da cura para a obtenção de uma estrutura celular homogênea. Esse nome foi dado ao concreto celular apenas

para facilitar sua inserção e aceitação no mercado, e lembrar que ele é também um produto a base de cimento Portland (SCHEFFLER; COLOMBO, 2005 apud GUGLIELMI, 2007).

Porém, alguns autores defendem que o ar pode ser considerado um agregado deste material de baixa densidade. Narayanan e Ramamurthy (1999) comprovaram, através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), que existe uma região de transição na interface poro-matriz de um concreto celular, analogamente às regiões existentes na interface agregado-matriz de um concreto convencional. Desta forma, podem-se considerar os poros de um concreto celular como agregados de densidade zero.

Vale ressaltar que, para referir-se a esse tipo de concreto, encontram-se na literatura os termos “concretos aerados” e “concretos celulares”. Trata-se de uma sinonímia, sendo o primeiro termo mais utilizado nos Estados Unidos – Aerated Concrete – e o segundo na Europa – Cellular Concrete ou Beton Cellulaire. Neste trabalho, será utilizado o termo “concreto celular”.

Com relação à classificação dos concretos celulares, Ferreira (1987) classifica, segundo o processo de cura, em curados ao ar e autoclavados. Esta classificação também leva em consideração as diferentes estruturas dos compostos daí resultantes, pois se compreende que as misturas que passam pelo processo de cura através das autoclaves apresentam em relação aos concretos curados ao ar, uma resistência à compressão da ordem do dobro e uma retração de cerca de metade.

Segundo o mesmo autor, isso pode ser compreendido, visto que uma mistura formada de cálcio e silício em proporções adequadas, quando submetida a uma temperatura que varia entre 160°C e 190°C e a uma pressão da ordem de 6 kgf/cm² a 12 kgf/cm² de uma autoclave, por um tempo de aproximadamente 5 horas, resulta na reação de seus compostos, que acabam por originar o monossilicato de cálcio, que também é aglomerante. Enquanto que na cura ao ar, tem-se uma reação comum de hidratação, onde os silicatos duplos de cálcio e os trisilicatos do cimento transformam-se em silicatos duplos e trisilicatos de cálcio hidratados. Para os autores Narayanan e Ramamurthy (2000), com base no processo de cura, o concreto celular pode ser não autoclavado (NCCA) ou autoclavado (CCA), sendo as propriedades de resistência à compressão, retração por secagem e absorção, influenciadas diretamente pelo método de cura e a duração deste.

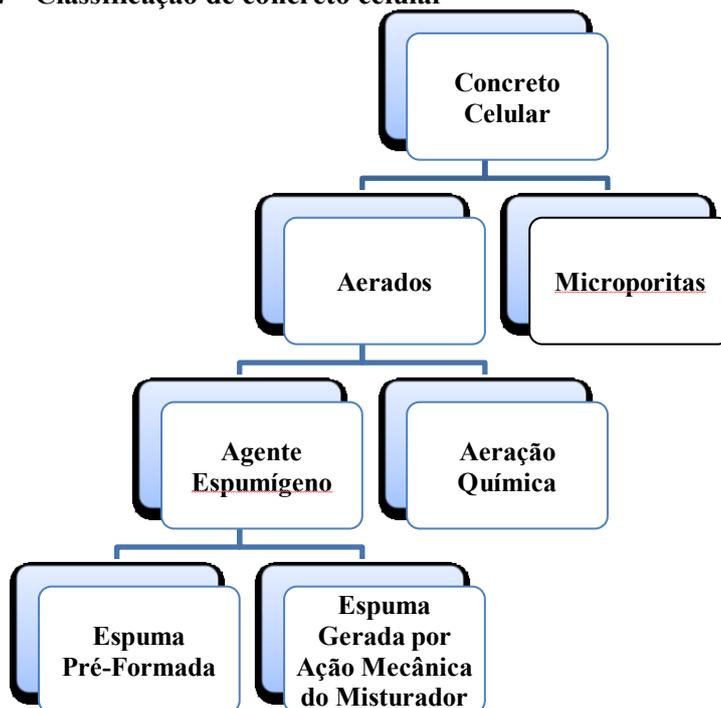
Já Scheffler e Colombo (2005, apud GUGLIELMI, 2007) dividem o concreto celular, conforme o processo de cura, em dois grupos:

- ✓ **Concreto Celular Curado a Baixa Temperatura (CCBT):** consiste numa pasta cimentícia, aerada através da adição e mistura de algum agente formador de bolhas e curada a uma temperatura próxima a 25°C. Método de cura utilizado para concretos celulares curados in loco, quando em aplicações geotécnicas e de preenchimento, apesar de também ser aplicado na fabricação de blocos pré-formados para a construção civil.
- ✓ **Concreto Celular Autoclavado (CCA):** consiste numa pasta cimentícia aerada, curada numa autoclave que opera ao longo da curva líquido-vapor da água, a temperaturas entre 180°C e 190°C, por um período de 10 a 12 horas. Método de cura utilizado na fabricação de blocos e painéis pré-formados para aplicações em construção civil.

Uma diferença significativa entre esses dois grupos de concretos celulares está no tempo de formação de suas estruturas, pois enquanto o CCBT sofre mudanças microestruturais ao longo do tempo, o CCA atinge sua estrutura final durante o tratamento em autoclave, estando assim pronto para o uso logo após a autoclavagem.

Segundo Teixeira Filho e Tezuka (1992), a família dos concretos celulares abrange uma razoável quantidade de grupos com distintas características, podendo ser separado em dois grupos básico como indicado na Figura 2.

Figura 2 – Classificação de concreto celular



Fonte: Elaborada pelo autor (2015) - Adaptado de Teixeira Filho; Tezuka (1992).

A diferença entre os aerados e as microporitas reside no processo de formação de poros e na forma destes. Os concretos aerados tem em seu seio uma infinidade de poros macroscópicos distribuídos uniformemente em sua massa, enquanto os microporitas apresentam uma estrutura capilar uniforme, resultante da evaporação da excessiva quantidade de água e sua cura pode ser ao ar livre, a vapor ou em uma autoclave (CORTELASSI, 2005). Os poros presentes no concreto celular podem ser produzidos pela formação de gás na mistura devido à ação química ou através da adição de espuma ou agente espumante.

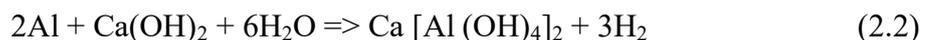
Os concretos celulares aerados, conforme apresentado na Figura 2, são divididos em dois grupos: os que contem agentes espumígenos e os aerados quimicamente (também chamados de gasosos), onde a diferença encontra-se no processo de formação e na forma dos poros.

A seguir, serão abordados os concretos celulares aerados, aqui denominados apenas pelo termo “concreto celular”, tanto os obtidos por aeração química, como os originados pela introdução de agentes espumígenos.

2.1.1 Concreto celular por aeração química

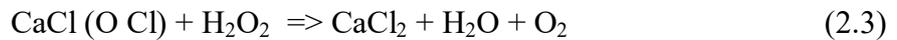
A aeração química resulta da reação de uma substância química com os outros componentes da argamassa, o que acaba por gerar os poros. Estas reações ocorrem antes do início da pega do cimento, gerando poros antes do seu endurecimento, e em função do tipo de aglomerante utilizado, haverá um processo de cura mais adequado (TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992). Para Petrucci (1982) os principais agentes formadores de gás são:

- ✓ Pó de alumínio, que reage com o hidróxido de cálcio e desprende hidrogênio, conforme reações apresentadas nas equações 2.1 e 2.2.



Ou seja, pode-se realizar a incorporação à pasta, de um produto suscetível de reagir com o ligante hidráulico em presença de água. Esse é o processo mais econômico e o mais utilizado. Porém, caso o cimento utilizado for pobre em hidróxido de cálcio, adiciona-se este à mistura, em proporções adequadas.

- ✓ Água oxigenada e cloreto de cal, que reagem entre si, formando cloreto de cálcio e desprendendo oxigênio, conforme reação apresentada na equação 2.3.



Logo, pode-se realizar a incorporação à pasta, de produtos químicos suscetíveis de reagir entre si.

- ✓ Carbureto de cálcio, que reage com a água formando acetileno, segundo reação da equação 2.4.



Um exemplo de concreto celular aerado obtido por aeração química é o concreto celular autoclavado (CCA). Este tipo de concreto celular apresenta uma grande utilização, na forma de blocos, aqui no Brasil. No exterior, principalmente na Europa, o uso de CCA manifesta-se nas construções de paredes de alvenaria e mais recentemente na América (OIANNOU et al., 2008).

Para Alexanderson (1979), o concreto celular autoclavado (CCA) é um produto onde a ligação consiste em hidratos de silicato de cálcio, podendo a mesma ser feita através de várias matérias-primas como cal, cimento, escória de alto forno granulada, areia e cinza de combustível pulverizada, sendo a estrutura celular formada, normalmente, pela inclusão de pó de alumínio fino na mistura. Este reage com a cal ou outra substância alcalina, para a produção de hidrogênio. E, após a produção desse concreto celular, tem que se aguardar por algumas horas, o seu endurecimento, antes de ele poder ser cortado e autoclavado.

Melo (2009) afirma que o CCA é adquirido através de processo industrial, onde se adiciona alumínio em pó a uma mistura de cimento, cal, areia e outros materiais silicosos. A autoclavagem – procedimento de cura a vapor, realizado em forno especial, sob pressão de 10 atmosferas e temperatura de 180°C - é a etapa mais importante no processo de fabricação deste tipo de concreto, pois este procedimento acelera a hidratação do mesmo e propicia uma segunda reação química, oferecendo ao CCA sua força, rigidez e estabilidade dimensional.

A NBR 13438:2013 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) define o CCA como um concreto leve, composto por materiais calcários e materiais silicosos finamente granulados, obtido através de um processo industrial. Esta composição sofre o processo de expansão através da introdução de produtos formadores de gases, águas e

aditivos, se for o caso, e é submetida à pressão e temperatura através de vapor saturado. Assim, este concreto contém células aeradas, fechadas e uniformemente distribuídas.

A estrutura desse concreto caracteriza-se pelo seu material sólido e pelos poros. Estes são classificados em: macroporos, resultado da ascensão do concreto, e microporos, que aparecem nas paredes entre os macroporos, sendo os restos dos espaços originalmente preenchidos com água e que ficam parcialmente ocupados pelos produtos da reação originada durante a autoclavagem. Essa estrutura depende do tipo e da quantidade dos agentes utilizados para provocar a reação, da porosidade e da distribuição do tamanho dos poros (ALEXANDERSON, 1979).

2.1.2 Concreto celular por agente espumígeno

Segundo Petrucci (1982), os concretos celulares espumosos (CCE) são produzidos pela formação de espuma estável na pasta da argamassa. Os principais formadores de espuma são proteínas hidrolisadas, resinas saponificáveis, agentes sintéticos de superfície ativa, sangue hidrolisado, cola animal. Estes agentes são protegidos por patentes, o que torna difícil o conhecimento exato de suas propriedades.

O CCE pode receber a incorporação de ar através de espuma pré-formada, onde a espuma, com características controladas, é gerada por equipamento específico e introduzida após o preparo da argamassa, ou através de espuma gerada por ação mecânica do misturador, onde o agente espumígeno é diluído em água e misturado juntamente com os outros materiais; a espuma vai sendo gerada pela velocidade de operação do misturador (CORTELASSI, 2005).

Nesse tipo de concreto, a formação dos poros se dá pela adição de um produto à pasta, que por agitação, forma uma espuma abundante de bolhas de ar, com a dimensão desejada, sendo, mais comumente, a espuma pré-formada e, só depois, misturada com a pasta.

A incorporação das bolhas de ar através da espuma pré-formada, devido ao equipamento específico utilizado, permite um controle de qualidade da espuma gerada e da quantidade adicionada à argamassa, o que reflete consideravelmente no produto final. A quantidade de ar incorporado à mistura final influencia diretamente na leveza do produto e no seu desempenho como isolante térmico e acústico. Porém, acaba também por interferir em outras propriedades do material, como a resistência mecânica (MELO, 2009).

O processo de se produzir concreto celular através de agentes espumígenos, segundo Narayanan e Ramamurthy (2000), é o mais econômico e controlável, pois não há reações

químicas envolvidas, uma vez que a introdução de poros é conseguida através de meios mecânicos, seja pela espuma pré-formada ou pela formação da espuma misturada à argamassa.

O CCE pode ainda ser agrupado de acordo com os materiais que o compõem. Teixeira Filho e Tezuka (1992) os classificam segundo apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Tipos de CCE

Concreto celular espumoso (CCE)	Concreto celular com cimento
	Concreto celular com cimento e areia
	Concreto celular com agregados leves
	Concreto celular modificado por:
	Agentes dispersantes de cimento
	Incorporação de fibras
	Aditivo expansivo

Fonte: Elaborada pelo autor (2015) - Adaptado de Teixeira Filho; Tezuko (1992)

O CCE é produzido apenas com cimento quando deseja-se obter um concreto com massa específica inferior a 800 kg/m^3 . Porém, quando o objetivo é produzir um concreto com massa específica superior a este valor, utiliza-se além do cimento, a areia. Já a inclusão dos agregados leves ao concreto celular deve-se à melhoria da relação da massa específica e da resistência mecânica.

Os CCE modificados por agentes dispersantes de cimento apresentam melhoria nas propriedades de resistência mecânica, como os acréscimos de 10% e 40% encontrados por Legatski, em 1978, nos concretos de massas específicas de 1440 kg/m^3 e 1760 kg/m^3 , respectivamente. Enquanto que as modificações por incorporação de fibras de vidro resistentes a álcalis e por aditivos expansores objetivam reduzir os efeitos da elevada retração por secagem apresenta pelo concreto celular (TEIXEIRA FILHO; TEZUKO, 1992).

2.2 Histórico

Segundo Ferreira (1987), o concreto celular não é uma ideia nova, embora o seu desenvolvimento seja relativamente recente. O concreto desde o seu surgimento, manifestou dificuldades na diminuição da massa específica o que obrigava a introdução de agregados leves para se obter alívio nas estruturas. No entanto, tais alívios de cargas ainda não mostravam-se satisfatório. A busca por novos caminhos levou à primeira patente de concreto celular.

O primeiro registro histórico da utilização do concreto celular ocorreu em Praga (Polônia), em 1889, quando Hoffmann patenteou um material como argamassa celular. O processo de produção consistia na criação de poros em uma argamassa composta de aglomerante (cimento ou gesso) e de ácido clorídrico que era incorporado à mistura como agente gerador de gás, reagindo com o bicarbonato de sódio (COTELASSI, 2005).

Ferreira (1987) explica que o processo de produção utilizado por Hoffmann ocorreu através da reação química entre ácido clorídrico e bicarbonato de sódio, criando poros numa pasta de cimento, sendo classificado como um concreto celular pertencente ao grupo dos concretos celulares aerados.

Freitas et al. (2004) afirmam que no ano de 1900 foram realizadas experiências nos Estados Unidos, onde se utilizou grãos de cloreto de cálcio cobertos por parafina como agregado, sendo estes eliminados no processo de cura. Porém, no que diz respeito à resistência, o resultado não foi satisfatório. Como geradores de gases, nesse mesmo ano, foram testados a cal, o alumínio e o zinco.

Mas só em 1917 Ericson, registra na Holanda a segunda patente de concreto celular. O processo consistia em uma argamassa de sílica e cal aerada por um agente metálico e curada numa câmara de vapor, tratando-se de um concreto celular aerado.

No entanto, somente em 1919 em Berlim aparece uma patente aplicada industrialmente, criado por Grösche, que utilizou o material desenvolvido por ele na produção de vigas armadas.

Levy (1955, apud FERREIRA 1987) aponta o sueco de Stockholm, Eriksson, como o pai dos concretos celulares por causa de sua patente, em 1923, pois foi a partir deste momento que este material começou a ter um grande desenvolvimento.

Após essa data, o número de patentes relativas à fabricação de concretos celulares aumentou, consideravelmente, mas boa parte destas surgiram ou como melhoramento de registros anteriores ou de forma diferente da liberação do gás que dava origem as bolhas de ar dentro da massa (CORTELASSI, 2005).

A aparição e desenvolvimento do concreto celular espumoso aconteceu bem posteriormente e também de forma lenta. Isso ocorreu, principalmente pelo fato do atrelamento deste material ao aprimoramento da química orgânica (FERREIRA, 1987).

A primeira patente de concreto celular espumoso surge em 1925 feita pelo sueco E. Chr. Bayer, que produziu concretos espumosos a partir de cola vegetal, gelatina, formaldeídos e sabões de resina.

No entanto, segundo Ferreira (1987), até meados da década de 60 os agentes espumantes eram quase que exclusivamente à base orgânica, e durante este período surgiram uma grande quantidade de patentes, todas procurando solucionar um grave problema: controle da expansão. Foi nesse período que surgiram os primeiros produtos sintéticos que mostravam espuma de boa estabilidade, mas com dificuldade de dispersão na massa.

Somente no início da década de 70 que apareceram produtos químicos orgânicos resolvendo o problema da expansão volumétrica e da estabilidade da massa, e é a partir deste momento que se experimenta nos países industrializados uma grande expansão na aplicação deste material. Apenas no final da década de 70 o concreto celular começou a ser aplicado industrialmente (FERREIRA, 1987).

Desde então, tem sido crescente a sua utilização. Muitos têm sido os fabricantes e aplicadores que tem surgido, mas realmente são raros aqueles que permaneceram no mercado, devido a sua baixa tecnologia.

O estudo das propriedades do concreto celular, no Brasil, foi realizado inicialmente em 1987, por Ferreira e em 1992 por Teixeira Filho e Tezuka, através de estudos experimentais, onde adicionaram areia à matriz de concreto celular, obtendo melhorias nas propriedades mecânicas, especialmente na resistência à compressão, de acordo com o aumento da massa específica.

Freitas e demais pesquisadores, em 2004, analisaram a influência de dois diferentes aditivos quanto à produção e resistência mecânica de concretos celulares adicionados de areia e agregados leves. Também, analisaram as misturas de concreto celular quanto ao volume de produção e a variação das propriedades mecânicas de concreto celulares produzidos com adição de areia e cinasita.

Segundo Guglielmi (2007), no ano de 1995 foram produzidos em cerca de 50 fábricas, mais de 31 milhões de metro cúbico de concreto celular em todo o mundo.

2.3 Aplicação

Ferreira (1987) declara que a redução da massa específica e da condutibilidade térmica são fatores primordiais na escolha da aplicação do concreto celular. Segundo o autor, as aplicações desse concreto podem ser divididas em concretagem na própria obra – “in loco” – e em produtos pré-moldados.

- ✓ Aplicações com concretagem “in loco”

São sem dúvida as mais comuns devido, principalmente, a facilidade de sua execução no canteiro. Dessa forma, aplica-se o concreto celular espumoso como:

- a) Isolante térmico de laje de cobertura e terraços;
 - b) Isolante térmico de linhas subterrâneas de água fria e quente;
 - c) Isolante térmico de frigorífico;
 - d) Isolante térmico de tanques de armazenamento de gasolina, gás liquefeitos, amônias, metano, propano, etileno e etc;
 - e) Isolante térmico de fornos de alta temperatura;
 - f) Isolante térmicos de paredes corta fogo;
 - g) Construção de paredes monolíticas, lajes e coberturas de unidades habitacionais;
 - h) Enchimento de pisos (contra pisos);
 - i) Enchimento e regularização do caimento em lajes de cobertura para posterior impermeabilização;
 - j) Revestimentos de estruturas metálicas;
 - k) Construção de barreiras para suavizar choques e absorver energias;
 - l) Construção de pisos flutuantes;
 - m) Assentamento de canalizações subterrânea;
 - n) Grauteamento de túneis abrigos e câmaras subterrâneas contra choques e movimentos do solo; e
 - o) Concreto projetado.
- ✓ Aplicações em pré-moldados

Sua aplicação nessa área ainda é limitada sobretudo devido aos altos custos em formas, mas de um modo geral tem-se as seguintes aplicações:

- a) Blocos de alvenaria para vedação ou fundação auto portante;
- b) Blocos para lajes nervuradas ou de caixão perdido;
- c) Blocos e placas para isolamento térmico;
- d) Placas para divisória com ou sem função auto-portante;
- e) Placas para pisos falsos;

Para ser utilizado em enchimentos de contra piso, deve-se atentar à ausência de resistência ao atrito dos concretos de baixa massa específica. Nesse caso, pode-se produzir um concreto com massa unitária superior a 1400 kg/m^3 , utilizando por cima um carpete direto, ou

adotar um concreto com massa unitária inferior a 1000 kg/m^3 , fazendo por cima um capeamento com um material que absorva tais esforços. No caso da construção de paredes e lajes monolíticas, é necessário que as fôrmas utilizadas sejam suficientemente estanques, devido à fluidez desse tipo de concreto (FERREIRA, 1987).

Tanto nas peças moldadas na obra como nos blocos, a massa unitária será definida de acordo com as solicitações a que o material estará submetido. Por exemplo, nas aplicações em que se exigem boas características térmicas, utilizam-se concretos com massas unitárias secas inferiores a 1000 kg/m^3 . Porém, quando se deseja aplicar esse concreto de forma estrutural, essa massa deve ser superior a 1200 kg/m^3 (FERREIRA, 1987).

O principal fator que limita o uso do concreto celular é a falta de conhecimento sobre seu desempenho em determinadas aplicações, ainda mais quando a durabilidade é uma preocupação. Diferentemente do concreto convencional, que apresenta um vasto arquivo, bem documentado, sobre durabilidade (TIKALSKY; POSPISIL; MACDONALD 2004).

Segundo a empresa ECOPORE (2013) – grupo privado de profissionais que atuam no desenvolvimento e pesquisa de soluções técnicas sustentáveis e ecológicas para engenharia -, o concreto celular pode ser empregado na execução de paredes portantes ou de paredes de vedação de edifícios, assim como nas paredes de casas de 1 ou 2 pisos.

O concreto celular tem a capacidade de ser produzido em condições operacionais elementares, não necessitando de equipamentos especiais (só o gerador de espuma) ou mão de obra especializada, é autonivelante, não tem necessidade de vibração e a cura é feita em condições atmosféricas normais (TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992).

2.4 Materiais constituintes

Os materiais utilizados na produção do concreto celular de forma geral não diferem muito dos materiais utilizados para os concretos convencionais. Sendo a maior diferença na utilização de aditivos que introduzem bolhas de ar na matriz do concreto.

Um outro material que difere por vezes entre esses concretos são os agregados, pois o uso destes em concreto celular depende das propriedades que se quer obter, ou seja, quando se deseja concretos celulares com densidades acima de 800 kg/m^3 é comum utilizar agregados miúdos, assim com a utilização de agregados graúdos leves para obter resistências maiores.

A seguir será apresentado um levantamento dos materiais como: cimento, aditivos, agregados e fibras, que geralmente são utilizados na produção do concreto celular, tanto os obtidos por aeração química como aqueles originados pela introdução do agente espumígeno.

No que diz respeito às exigências da qualidade da água utilizada para concretos celulares não há diferença dos padrões exigidos para os concretos convencionais.

2.4.1 Cimento portland

No que diz respeito aos concretos celulares obtidos por aeração química, Narayanan e Ramamurthy (2000) afirmam que a eficiência do processo, com a utilização do pó de alumínio, é influenciada pela finura, pureza e alcalinidade do cimento, juntamente com os meios utilizados para impedir a fuga do gás antes do endurecimento da argamassa. No caso de cimentos com baixa alcalinidade, torna-se necessária a adição de hidróxido de sódio ou cal para complementar essa deficiência.

Com relação aos concretos celulares obtidos com agentes espumígenos Ferreira (1987) afirma que o aglomerante mais utilizado é o cimento comum, podendo ser utilizado também com escória de alto forno e com pozolânico, sendo necessário, nesses dois últimos casos, serem realizadas as devidas alterações no que diz respeito às dosagens e, conseqüentemente, às características de endurecimento, sendo conveniente recorrer à análise experimental destas misturas para uma melhor avaliação de suas características. Já os cimentos de alta resistência inicial, devido à baixa resistência inicial apresentada pelo concreto celular quando da utilização dos aglomerantes comuns, são usados com vantagens nos CCEs.

A NBR 12645:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, 1992) estabelece que, para o CCE utilizado na execução de paredes moldadas na própria obra, devem ser usados cimentos que obedeam às especificações das normas NBR 5732:1991, NBR 5733:1991, NBR 5735:1991 e NBR 5736:1999 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, 1991, 1999), que dispõem sobre CPI comum, CPV de alta resistência inicial, CPIII de alto forno e CPIV pozolânico, respectivamente.

Os cimentos compostos quando utilizados podem resultar em taxas mais lentas no desenvolvimento das resistências nas primeiras idades de 3 à 5 dias, para concretos de baixas densidades de forma geral, devido ao seu processo de hidratação ser mais lento do que os cimento do tipo I e tipo III, por exemplo ACI 523-1, (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1986).

Salienta-se ainda que as características e propriedades dos concretos dependem da qualidade e da proporção dos materiais com que são compostos, sendo o cimento, do ponto de vista químico, o mais ativo. Alves (2000, apud CORTELASSI, 2005) afirma que as propriedades do concreto são influenciadas pela finura, pela composição química e pela

compatibilidade do cimento com os aditivos. A finura está relacionada com a velocidade de hidratação do cimento, pois quanto mais fino é o cimento, maior é a superfície específica das suas partículas e mais rápida ocorre a reação de hidratação, o que eleva a sua resistência à compressão nas primeiras idades. Em contrapartida, afirma-se que quanto mais fino é o cimento, maior é o consumo de água da mistura, o que interfere nas propriedades mecânicas.

2.4.2 Aditivos espumígenos

Devido à existência de patentes que protegem estes produtos, encontra-se grande dificuldade sobre a obtenção de dados esclarecedores sobre a composição química dos agentes espumígenos.

De acordo com Petrucci (1982), o ácido naftalino sulfúrico em pó foi o primeiro agente espumígeno utilizado na produção do concreto celular espumoso (CCE). O mesmo era dosado, geralmente, na proporção de 1% da massa de cimento utilizado. Também, em conjunto com esse aditivo, era utilizado o silicato de sódio, com o objetivo de realizar a estabilização da espuma gerada.

Segundo a NBR 12645:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), o agente espumante é definido como um produto de composição química capaz de produzir bolhas de ar estáveis no interior de pastas de cimento ou argamassas, as quais devem permanecer estáveis até o início da pega normal do cimento, resistindo aos esforços provenientes das etapas de mistura, lançamento e bombeamento.

Cortelassi (2005) afirma que os aditivos geradores de espuma são soluções especiais à base de tensoativos e espumantes estáveis, que quando em forma de espuma, são adicionados ao concreto ou argamassa, permitindo a confecção de concreto celular com excelentes propriedades. Sobre a influência desses aditivos no comportamento do CCE, o autor afirma que, nas propriedades do estado fresco, o agente espumante melhora a trabalhabilidade e permite a confecção de concretos leves com massa específica variando entre 600 kg/m³ e 1800 kg/m³. Nas propriedades do estado endurecido, melhora o isolamento termo-acústico do material.

Segundo o grupo Concretos Celulares Brasil (2013), os agentes espumantes podem ser classificados segundo sua origem, em:

- ✓ Agente espumante de origem vegetal: produzido a partir de sementes de soja ou de girassol;

- ✓ Agente espumante de origem animal: originado a partir de sangue animal, podendo ser bovino, suíno, entre outros. Esse sangue, obtido dos frigoríficos, é processado e estabilizado mediante processos químicos para seu uso;
- ✓ Agente espumante de origem sintética: produzido após a seleção de materiais de alta qualidade a base de álcool e silicone e preparado em laboratório, funcionando de forma eficiente como incorporador de ar e oferecendo uma grande estabilidade às bolhas de ar incorporadas à mistura.

Segundo Ferreira (1987), os agentes espumantes orgânicos tiveram o seu maior incremento nos anos 60, com a evolução da química orgânica, e são vinculados à neutralização e estabilização de proteínas de origem animal. Por permitirem um melhor controle sobre a expansão da argamassa e uma maior estabilidade volumétrica durante a cura, são os mais utilizados de um modo geral.

Os agentes espumantes sintéticos são de mais fácil e econômica obtenção. A gama de produtos espumantes sintéticos é extremamente grande e nada permite “a priori” dizer que um é melhor que o outro do ponto de vista técnico puro. Como exemplo, têm-se os saponáceos, albuminoides ou resinas vinílicas, neutralizados e estabilizados (FERREIRA, 1987).

Os vários agentes formadores de espuma utilizados são os detergentes, resina, sabão e proteínas hidrolisadas (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000). Para Melo (2009), existe espumígeno ou aditivo incorporador de ar fabricado a partir de sangue de animal ou sintéticos, à base de silicone, P.V.A. (acetato de polivinila), álcoóis naturais, sulfatos, dentre outros, sendo um bom aditivo aquele gerador de uma espuma com capacidade de resistir às múltiplas forças sofridas durante a mistura, que são da ordem de 10 kg/cm².

Já o ACI 523-1 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1986), afirma que as formulações das propriedades dos agentes espumígenos mais comumente utilizadas são baseadas em hidrolisados proteicos e surfactantes sintéticos. Onde estas composições químicas devem produzir células de ar estáveis dentro do concreto capazes de resistir as forças físicas e químicas impostas durante a mistura, bombeamento, lançamento e adensamento do concreto, caso contrário estas serão rompidas durante o processo provocando aumento na densidade.

A NBR 12645:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) especifica que o agente espumante pode ser de origem sintética ou protéica, podendo essa espuma ser gerada dentro da argamassa por agitação em misturador ou pré-formada para

posterior incorporação à argamassa, devendo, em ambos os casos, ser respeitados os prazos de validade dos agentes espumantes, especificados pelos fabricantes.

O presente trabalho fez uso de dois tipos de aditivos, sendo um aditivo espumígeno com espuma pré-formada para posteriormente ser incorporado ao concreto base, e o outro aditivo aqui chamado de aditivo mecânico, pois as bolhas de ar são produzidas pela ação mecânica de misturador. Para gerar a espuma pré-formada, como mostra a Figura 3, deve-se preparar uma solução de diluição, onde o aditivo espumante é diluído em água limpa, isenta de impurezas e de qualquer outro produto químico que altere ou reaja como o agente espumante.

Figura 3 – Espuma pré-formada



Fonte: Elaborada pelo autor (2015)

As proporções dessa diluição variam de acordo com cada fabricante do agente, porém, dependendo da densidade da espuma desejada, a mesma está entre 1:40 e 1:60 (CORTELASSI, 2005). É recomendado que o CCE aplicado na construção de paredes apresente uma espuma com densidade final na ordem de 80 kg/m^3 , com uma variação de $\pm 5\%$ (GETHAL, 2003).

Segundo o ACI 523-1 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1986), a espuma pré-formada é produzida por diluição do agente espumígeno em água, combinando esta solução com ar comprimido, em proporções predeterminadas, onde a passagem desta mistura através de um dispositivo provoca a expansão do líquido, gerando um volume de espuma em até cerca de 30 vezes do valor do volume da solução de diluição. A densidade da espuma pré-formada geralmente se dá no intervalo de 34 kg/m^3 à 64 kg/m^3 . Este sistema mecânico comumente utilizado para gerar a espuma pré-formada é chamado de gerador de espuma.

Em relação às espumas formadas devido à ação mecânica do misturador, o ACI 523-1 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1986), afirma que os agentes devem garantir as condições expostas anteriormente. O agente e a água são mais comumente misturados por um curto período de tempo geralmente antes da adição de cimento e agregado (quando houver), para permitir que a espuma seja formada no misturador. As bolhas de ar que são formadas em primeiro lugar são reduzidas em tamanho durante o processo de mistura.

A quantidade de agentes necessários é determinada por tentativas, e depende do tipo de agente utilizado, o tempo adotado na mistura, a eficiência do misturador, o volume de concreto produzido, e a densidade do concreto que se quer obter, ACI 523-1 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1986).

2.4.3 Aditivos químicos

Como visto anteriormente, os agentes químicos são utilizados na obtenção do concreto celular obtido por aeração química, sendo um importante exemplo deste tipo de material, o CCA.

Ramachandran (1995, apud GUGLIELMI, 2007) afirma que como agentes químicos pode-se utilizar pó de alumínio, magnésio ou zinco, que reagem com a pasta de cimento, liberando hidrogênio; peróxido de hidrogênio com hipoclorito de sódio, liberando oxigênio; compostos de nitrogênio e amônia, liberando nitrogênio; e, carbureto de cálcio, produzindo acetileno gasoso.

Segundo Petrucci (1982), os principais agentes formadores de gás no interior do concreto celular são: água oxigenada com cloreto de cal, o carbureto de cálcio e o pó de alumínio.

A reação da água oxigenada com o cloreto de cal resulta em cloreto de cálcio e água, o que gera o desprendimento de oxigênio. Pagani (2012) explica que inicialmente prepara-se o leite de cal numa proporção em massa de 1:1,5 (cloreto de cal:água), e em seguida adiciona-se uma parte em massa de água oxigenada para seis a nove partes de leite de cal.

Já o carbureto de cálcio reage com a água e forma o hidróxido de cálcio, o que acaba por gerar acetileno. Esse é o agente químico menos utilizado na produção do concreto celular por aeração química (PAGANI, 2012).

Para Gugliemi (2007), o pó de alumínio é o agente químico mais comumente utilizado. Para produzir uma maior quantidade de gás na mistura de CCA, o pó de alumínio deve ser bastante fino, passado na peneira de número 200 (superfície específica Blaine de

4600 cm²/g a 6000 cm²/g) (PETRUCCI, 1982). Esse agente expensor irá gerar uma reação com a cal e a água da mistura, produzindo o aluminato de cálcio e desprendendo hidrogênio.

Sobre o tempo dessa reação se concretizar, Barnett (2005, apud PAGANI, 2012) afirma que após duas horas do lançamento da argamassa no molde, a reação do pó de alumínio com a cal está completa, sendo então retirado do molde, recortado e colocado em autoclave por doze horas para completar a cura.

A quantidade de pó de alumínio a ser adicionada à mistura deve variar de 0,2% a 0,5% do peso de cimento, sendo esta medida de grande importância no resultado final da mistura, uma vez que a mesma determinará relevantes características do concreto celular, como porosidade, densidade e resistência, indicando a utilização que se deseja do concreto produzido.

Ioannou et al. (2008) mencionam o uso do pó de alumínio na obtenção do CCA, devendo o mesmo ser adicionado à pasta antes de decantar a mistura em um molde, permitindo que está sofra um aumento, desenvolvendo sua característica celular. Percebe-se que a utilização deste agente químico permanece por muitas décadas, pois são muitos os autores, de diferentes épocas e lugares, que apontam a sua utilização, como por exemplo, Alexanderson (1979), Georgiades e Marinos (1991) e Pagani (2012).

Sabe-se que o pó de alumínio é utilizado devido à liberação do gás hidrogênio, responsável pela formação dos poros da estrutura celular. Porém, a utilização desse pó vem sendo substituída pela escória de alumínio – material obtido a partir de sua reciclagem – devido ao custo elevado do pó, chegando a US\$ 5,00/kg, enquanto a escória não possui custo algum, já que é considerado um material de rejeito industrial (TAKAHASHI, 2006).

2.4.4 Agregados

Segundo a NBR 9935:2011 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011) os agregados são definidos como: “material granular, geralmente inerte com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto”.

Nos primeiros estudos sobre concreto pensava-se que os agregados eram apenas materiais para enchimento na composição e que sua única função era de baratear a fabricação, sendo considerados como inertes. No entanto, com o passar do tempo descobriu-se que os agregados afetam de forma direta em várias propriedades do concreto.

Segundo Formagini et al (2004), os agregados são materiais geralmente inertes e rígidos que servem para compor o esqueleto granular. Birsh e Shakhmenko (1998) relatam

que o tipo de agregado, suas dimensões e distribuição de suas partículas, afetam a trabalhabilidade do concreto, como também, propriedades mecânicas tais como permeabilidade, durabilidade e custo.

Santos (2008) afirma que numa mistura de concreto, a distribuição granulométrica influencia no teor de vazios e na densidade de empacotamento de suas partículas constituintes. Pileggi et al (2003) afirmam que um bom empacotamento é aquele em que se obtém o menor índice de vazios intergranulares, demandando desta forma o menor consumo de fluido possível e garantindo uma maior mobilidade das partículas.

Para Neville e Brooks (2013), na prática, não é possível determinar uma mistura granulométrica ideal de agregados, hipótese sustentada pela interação entre fatores que influenciam diretamente na trabalhabilidade da mistura, tais como área superficial do agregado, o volume relativo ocupado pelo agregado, a tendência à segregação e a quantidade de finos da mistura.

Contudo, estes mesmo autores enfatizam a importância de determinar uma granulometria que possibilite a obtenção de uma trabalhabilidade razoável, com mínima segregação, de maneira a obter um concreto resistente e econômico.

Segundo Martins (2008), os agregados utilizados no concreto apresentam importante influência em suas propriedades, não apenas em sua resistência mecânica, mas também em sua durabilidade e em seu desempenho estrutural. Salienta-se que a granulometria, a forma e a textura influenciam consideravelmente a maioria das características físico-mecânicas do concreto. Além de que, a presença de substâncias nocivas ou impurezas no agregado interfere no desenvolvimento da resistência mecânica da mistura.

Essas observações dadas à atuação dos agregados no concreto convencional deve ser a mesma oferecida ao concreto celular, com exceção dos concretos celulares de baixa massa específica, onde é possível a ausência de agregados.

Ferreira (1987), através da análise de testes de resistência à compressão em CCE, permite-se afirmar que para concretos com massa específica mais alta, superiores a 1400 kg/m³, é satisfatório utilizar areias mais grossas, e que para massas específicas mais baixas, inferiores a 800 kg/m³, é melhor usar um teor de finura maior. Entretanto, a porcentagem de finos na areia, com dimensão inferior a 250 µm, não deve exceder 20%.

Existem estudos realizados sobre a introdução de agregados leves ao CCE, com o objetivo de reduzir a quantidade de cimento por metro cúbico, aumentando o volume de produção sem perder as características mecânicas e muito menos a característica principal de baixo peso específico.

Freitas, Allende e Darwish (2004) realizaram estudos sobre uma mistura de CCE, com cimento e adição de cinasita, ou ainda, argila expandida, e com rejeito plástico industrial, produzido por processo de agitação mecânica, utilizando como aditivo promotor de espuma, aditivo orgânico à base de sangue de boi e aditivo inorgânico.

Como resultado, concluiu-se que a aplicação de agregados leves em matrizes de CCE é satisfatória. A utilização do rejeito plástico industrial, apesar de ter apresentado menores ganhos de resistência à compressão, em relação à cinasita, é mais indicada, pois além do aproveitamento do resíduo, da ausência de segregação e da maior homogeneidade das misturas, a mesma apresentou um considerável aumento de volume de produção para um mesmo consumo de cimento e aditivo espumígeno orgânico.

No levantamento bibliográfico realizado durante a elaboração do presente trabalho, não foram encontrados estudos que apresentassem uma produção de concretos celulares utilizando agregados graúdos de origem rochosas, e nem tão pouco explicações sobre esta não aplicação. No entanto, é possível compreender que esses agregados são evitados pelo fato de sua massa específica ser maior do que as densidades dos concretos leves, provocando um aumento da densidade destes concretos, além do seu peso próprio elevado quando comparada aos agregados miúdos, provocando um impacto maior nas bolhas de ar durante o processo de mistura favorecendo o rompimento destas, provando assim o aumento da densidade do concreto.

Referente à massa específica dos agregados, a NBR 12655:2006 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, 2006) declara que os agregados são considerados leves quando apresentarem massa específica menor que 1800 kg/m^3 , como os agregados de argila expandida. Quando a massa específica superar 3000 kg/m^3 , o agregado é pesado, como barita e magnetita. No caso da massa estar entre 1800 kg/m^3 e 3000 kg/m^3 , o agregado é considerado normal, como pedras britadas e areias.

Como foi apresentado anteriormente uma forma de se obter concretos leves é substituindo os agregados convencionais (areia e pedra britada) por agregados leves. Segundo Rossignolo (2009), os agregados leves são classificados em naturais e artificiais.

Os principais agregados naturais são: diatomita, pedra pomes, escória, cinza vulcânica e tufas (ALCANTARA, 2007). No entanto, estes agregados leves naturais têm pouca aplicação em concretos estruturais em função da grande variabilidade de suas propriedades e da localização e disponibilidade das jazidas (ROSSIGNOLO, 2009).

Já os principais agregados artificiais são: cinza volantes, escória de alto forno, resíduo de carvão, clínquer, argila expandida, ardósia expandida, vermiculita e a parlita. Dentre esses

agregados leves aqueles que são comumente utilizados para fins estruturais são: pedra pomes, argila expandida e ardósia (ALCANTRA, 2007).

Até o ano de 2009 segundo Rossignolo (2009), a argila expandida era o único agregado leve produzido no Brail. Onde 60% da produção destinava-se ao setor da construção civil nacional, e os outros 40% eram absorvidos pelos setores de lavanderia (20%), paisagismo, refratários e demais aplicações, como substrato.

2.4.5 Fibras

A NBR 12645:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, 1992) recomenda na produção de CCEs a utilização de elementos de controle de retração, podendo estes ser armaduras contínuas e/ou descontínuas. No caso das armaduras contínuas, podem-se empregar barras de aço e telas eletrossoldadas. Já como armaduras descontínuas, a norma menciona o emprego de fibras metálicas, sintéticas ou naturais, devendo, quando necessário, serem tomados os cuidados adicionais, como por exemplo, a confecção de juntas de construção ou de controle de retração, sendo estas, indicadas no projeto.

Para Gethal (2003), a redução do fenômeno de fissuração das paredes, provocado pelas tensões de tração provenientes da retração do concreto, se dá pela introdução de fibras ao concreto celular, sendo mais utilizadas as fibras de comprimento entre 25 mm e 30 mm. Recomenda-se, ainda, o consumo dessas fibras em cerca de 700 g/m³.

De acordo com o grupo Concretos Celulares Brasil (2013), as fibras especiais para concreto celular são leves, fortes, resistentes aos agentes químicos, não se oxidam e nem absorvem água. São cortadas em longitudes predeterminadas, permitindo que durante o processo de mesclado, as malhas se abram e se distribuam uniformemente.

2.5 Dosagem e produção

Tutikian e Helene (2011) definem o estudo da dosagem de concretos com cimento Portland como os procedimentos necessários para se obter a melhor proporção entre os materiais que constituem o concreto. Esta proporção, também conhecida como traço, pode ser expressa em massa ou em volume, sendo mais rigorosa a expressa em massa seca dos materiais.

Não é comum na literatura encontrar métodos de dosagem específicos para concretos celulares. Os métodos de dosagem geralmente partem de uma matriz de concreto convencional dosado através dos métodos já conhecidos, e a partir deste concreto base são

adicionados aditivos, que geram bolhas de ar ou gás, em dosagens distintas até se obter o concreto celular que se deseja.

Segundo Ferreira (1987), a definição das proporções em que cada componente deve entrar na mistura, depende principalmente das características desejadas pela aplicação. Assim, para cada uma há que qualificar, em primeiro lugar, as necessidades de massa específica. Uma vez está definida, tem-se enquadrada as demais características físico-mecânicas, ou seja, com a definição da massa específica tem-se a estimativa da resistência à compressão e da condutibilidade térmica. Tendo a resistência à compressão tem-se estimativa do consumo de cimento e do fator água/cimento. E tendo a condutibilidade térmica, tem-se uma estimativa da percentagem de ar incorporado.

Ferreira (1987) adota um método de dosagem para concretos celulares espumosos com pré-espuma, baseados em dois fatores principais:

- ✓ A soma dos volumes absolutos dos componentes da mistura (incluindo o ar) deverá ser de 1 m³; e
- ✓ A soma das massas dos componentes da mistura, excluindo o ar, já que este não pesa, deverá ser igual a massa unitária úmida do concreto celular.

Dessa forma, para determinar a composição do concreto celular espumoso, com base no método proposto por Ferreira (1987), é necessário inicialmente definir os seguintes parâmetros:

- ✓ Massa aparente no estado fresco do concreto celular que se quer obter - γ_{cf} ;
- ✓ O fator água/cimento – a/c ; e
- ✓ O consumo de cimento por m³ - C_c

Após essa definição e tendo determinado previamente a massa específica da espuma, da areia e do cimento, determina-se a quantidade de areia seca por m³, o volume de espuma e a água corrigida (devido à água presente na espuma), pelas seguintes expressões:

- Quantidade de Areia Seca por metro cúbico:

$$A_s = \gamma_{cf} - C_c - (a/c \times C_c) \quad (2.5)$$

- Volume de Espuma

$$V_{esp} = 1000 - \frac{A_s}{\gamma_{areia}} - \frac{C_c}{\gamma_c} - \left(\frac{a}{c} \times C_c\right) \quad (2.6)$$

➤ Água Corrigida

$$V_{\acute{a}gua} = (a/c \times C_c) - (V_{esp} \times \gamma_{esp}) \quad (2.7)$$

onde, γ_{areia} é a massa específica da areia, γ_c é a massa específica do cimento e γ_{esp} é a densidade da espuma.

Teixeira Filho e Tezuka (1992), com o intuito de conhecer melhor algumas propriedades do concreto celular espumoso, estudaram as relações entre a massa específica, relação água/cimento, resistência à compressão axial e retração linear, além de avaliar a carbonatação aos 90 dias. As misturas ensaiadas foram dosadas utilizando o método de dosagem proposto por Ferreira (1987), para massas específicas no estado fresco de 1100 kg/m³, 1300 kg/m³, 1500 kg/m³, 1700 kg/m³ e 1900 kg/m³, com relação água/cimento de 0,5, 0,6 e 0,7 e um consumo de cimento de 400 kg/m³.

Freitas, Allende e Darwish (2004) afirmam que para dosagem do CCE são consumidos cerca de sete sacos de cimento por metro cúbico, ou seja, uma média de 350 kg/m³, conforme recomendação dos fabricantes de agentes espumígenos no Brasil, o que acaba elevando o custo e o grau de retração deste material.

Sobre a proporção das fibras, sabe-se que a inclusão de fibras de polipropileno pode reduzir a trabalhabilidade do concreto quando o seu teor ultrapassa 0,5% em volume, porém é necessário saber qual o teor mínimo que deve ser utilizado para reduzir a fissuração por retração do concreto (LAWRENCE; LORSLEEM; BARROS, 1998).

Com relação ao processo de mistura adotado para os concretos celulares, a NBR 12645:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) adota a seguinte sequência de carregamento do misturador para concretos celulares espumosos:

➤ No caso de Espuma pré-formada

- Agregado miúdo;
- Fibras (quando utilizadas);
- Cimento;
- Água; e
- Espuma

Onde, a mistura dos três primeiros componentes deve ter duração mínima de 60 segundos para a perfeita dispersão das fibras.

- No caso de espuma gerada dentro do próprio misturador
 - Água;
 - Agente espumante;
 - Cimento;
 - Agregado miúdo; e
 - Fibras (quando utilizadas);

Onde, a agitação da massa deve prosseguir até ser atingida a densidade de massa aparente desejada.

Ainda segundo a norma NBR 12645:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), o concreto celular espumoso deve ser lançado no prazo máximo de 30 minutos, após o seu amassamento. Não deve ser permitida a interrupção no lançamento por um período superior a 60 minutos. Caso seja ultrapassado este tempo, caracteriza-se uma junta de concretagem. Em nenhuma hipótese se deve ser feito o lançamento após o início de pega do cimento.

É possível observar que a NBR 12645:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) faz referência apenas uma parte do grupo de concretos celulares, que são os espumosos, mas de maneira geral os concretos celulares são obtidos a partir de uma matriz de concreto base, seja este convencional ou especial, onde o processo de mistura até o momento antes de receber o aditivo espumígeno ou químico, depende do concreto base que será produzido. Cortelassi (2005), por exemplo, na busca de um concreto celular espumoso de alto desempenho, partiu de uma matriz de concreto base de alto desempenho, adotando para este um processo de mistura específico para esse tipo de concreto, onde a última etapa consistia na adição da espuma ao concreto base para ser misturada por um tempo de 5 minutos, para a completa incorporação da espuma, de tal forma que a mistura ficasse homogênea.

2.6 Propriedades no estado fresco

Dentre as propriedades do concreto no estado fresco, a seguir serão apresentadas a massa específica aparente e a consistência, abordando as recomendações das normas regulamentadoras vigentes, com algumas alterações quando necessário para o concreto em

estudo, além de alguns aspectos relatados por autores referentes a estas propriedades para concreto celular.

2.6.1 Massa específica

A massa específica utilizada como um parâmetro definidor do concreto celular foi considerada por Teixeira Filho e Tezuka (1992) como “parâmetro básico para definição deste material”.

A NBR 12646:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) define densidade de massa aparente no estado fresco, para concretos celulares obtidos pela introdução de agente espumígeno, como o “quociente do valor da massa do CCE no estado fresco, lançado num recipiente, pelo valor do volume deste recipiente”.

A NBR 12646:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) especifica que a condição de densidade de massa aparente no estado fresco não deve ser inferior a 5% do valor da densidade de massa aparente no estado fresco indicado no projeto, e a determinação dessa propriedade, que deve seguir as especificações da ABNT NBR 12644, devendo ser feito a cada 1 m³ do CCE, quando este for produzido em betoneiras estacionárias ou misturadores especiais.

No caso do CCE ser produzido em caminhões betoneiras ou centrais de mistura, o ensaio deve ser efetuado no momento da descarga do caminhão. Se o resultado estiver dentro do limite estipulado, toda a carga é aprovada; caso contrário, o primeiro meio metro cúbico deve ser descartado e novas determinações de massa específica serão feitas até que se obtenha um valor que atenda ao mínimo especificado.

A massa específica do concreto, conforme Freitas (2004), pode ser classificada de três diferentes formas:

- ✓ Massa específica no estado fresco – medida com a mistura em seu estado fresco;
- ✓ Massa específica aparente – medida logo após a desforma do material;
- ✓ Massa específica seca – medida após a secagem em estufa até a constância do peso.

Desta forma, percebe-se que a densidade denominada pela norma NBR 12646:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) como densidade de massa aparente no estado fresco é classificada por Freitas (2004) como massa específica no estado fresco.

Ainda segundo Freitas (2004), a quantidade de água contida na mistura, influência de forma muito significativa, qualquer um destes três tipos de massa específica apresentadas, em especial, na massa específica aparente porque as variações nas condições de temperatura e umidade relativa do ar podem provocar grandes variações nas medições.

A massa específica ainda pode ser influenciada pelo tempo de mistura empregado na produção do concreto celular espumoso, pois o tempo de mistura influencia a uniformidade e a distribuição das bolhas de ar na massa.

Essa influência do tempo de mistura foi comprovada, experimentalmente, por Ferreira (1986), utilizando espuma pré-formada (no mesmo gerador), cimento e areia nas proporções devidas para a obtenção de uma massa específica de 800 kg/m^3 , ele variou o tempo da mistura do concreto celular, em betoneira em 3, 5 e 10 minutos. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos nesse ensaio.

Tabela 2 – Variação da massa específica aparente: variação da massa específica no estado aparente e da resistência à compressão na idade de um dia

Tempo de mistura (minutos)	Massa específica aparente (kg/m ³)	Resistência à compressão f_{c24h} (MPa)
3	875	3,2
5	890	4,1
10	1050	5,9

Fonte: Ferreira (1986).

Analisando os resultados é fácil perceber que o aumento do tempo de mistura provoca um aumento da massa específica aparente e conseqüentemente há um aumento da resistência à compressão dos concretos celulares espumosos.

Ferreira (1986), explica que para um tempo excessivo de mistura, as bolhas de ar começam a unir-se e subdividir-se, transformando as macro-células em micro-células, diminuindo, assim, a quantidade de ar incorporado e também o volume da mistura. Aumentando assim a massa específica, e como conseqüência aumenta a resistência à compressão.

A quantidade de espuma adicionada à mistura também influencia diretamente na massa específica dos concretos celulares espumosos. O aumento do teor de espuma aumenta a quantidade de vazios na massa do concreto que tem como conseqüência direta a redução da massa específica do material. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos por Cortelassi (2005), que confirma a relação do volume de espuma com a densidade do concreto celular.

Tabela 3 – Densidade x Porcentagem de espuma

Concretos	Densidade (kg/m ³)	Porcentagem de espuma (%)	Teor de ar incorporado (%)
Amostra 2,432	2432	0	3,9
Amostra 2,009	2009	21	15,0
Amostra 1,874	1874	33	22,0
Amostra 1,859	1859	32	20,0
Amostra 1,720	1720	54	29,0

Fonte: Cortelassi (2005).

Com base nos resultados obtidos por Cortelassi (2005), que obteve concretos celulares de alto desempenho a partir de um concreto base de alto desempenho adicionado diferentes porcentagens de espuma, é possível identificar que quanto maior a quantidade de espuma adicionado maior será o teor de ar incorporado ao concreto base e conseqüentemente menor será a densidade do concreto celular.

Segundo Teixeira Filho e Tezuka (1992), para a produção de concretos celulares com massas específicas abaixo de 800 kg/m³, utiliza-se apenas cimento, mas para obter massas específicas acima é recomendável a colocação de areia, como agregado miúdo, nas composições. Para melhorar a relação massa específica x resistência mecânica pode-se misturar agregados leves ao concreto celular.

Segundo Ferreira (1987), a escolha da massa específica é o elemento primordial para cada aplicação. Há a efetiva necessidade de compatibilizar as características físico-mecânicas do material com as necessidades técnicas de eficiência do material aplicado. Dessa forma, pode-se observar os seguintes critérios gerais:

- ✓ Nas aplicações em que se exija dos materiais características térmicas, utilizam-se massas unitárias secas inferiores a 1000 kg/m³;
- ✓ Nas aplicações em que se exija dos materiais características estruturais, utiliza-se massas unitárias secas superiores a 1200 kg/m³.
- ✓ Nas peças moldadas “in situ” e nos blocos de concretos celulares, a massa unitária será definida de acordo com as solicitações a que o material vai estar sujeito.

2.6.2 Consistência

A propriedade de consistência do concreto pode ser definida como a maior ou o menor grau de fluidez da mistura fresca. Para Almeida (2002), esta propriedade traduz as características inerentes à mistura fresca relacionadas com a mobilidade da massa e a coesão entre os elementos que a constituem, objetivando adquirir a uniformidade e a compacidade do concreto.

A consistência pode ainda ser definida como uma medida através do qual se obtém a propriedade de trabalhabilidade, que nada mais é do que a combinação das propriedades relacionadas à coesão, consistência, plasticidade e viscosidade. Logo, a trabalhabilidade torna-se uma característica, a mais importante no estado fresco do concreto, de difícil conceituação (PETRUCCI, 1982).

Neville (1997) afirma que a trabalhabilidade do concreto é influenciada pela forma e granulometria do agregado e pela introdução de aditivo e quantidade de água na mistura, sendo esta o fator principal, uma vez que as misturas muito fluidas de concreto com elevada consistência tendem a segregar e exsudar, comprometendo a sua aplicação.

Todos os concretos requerem uma certa trabalhabilidade, adequada a cada situação específica. Os condicionantes vêm definidos pelos projetos arquitetônicos e estruturais (fôrmas, taxas de armadura, detalhes geométricos), pelos equipamentos a serem utilizados (bomba, carrinhos, giricas, caçambas, projeção, submerso, autoadensável), pelas necessidades de acabamento (sarrafeado, polido, lixado, aparente, desempenado) e pelas condições ambientais (temperatura, insolação, ventos, umidade relativa).

Os concretos devem ser coesos e viscosos, ou seja, para cada caso devem permitir ser transportados adequadamente até sua posição final sem apresentar segregação, bicheiras, ninhos, exsudação, variações de cor e escorrimentos exagerados.

A trabalhabilidade do concreto é uma variável complexa que depende de fatores intrínsecos e extrínsecos ao material, conforme alerta Tattersall (1978). No caso da consideração exclusiva de fatores intrínsecos ao concreto, adota-se, no Brasil, a consistência do concreto fresco como o parâmetro principal.

Essa consistência pode ser obtida a partir da retirada de amostra representativa conforme a NBR NM 33:1998 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998) e ensaio em conformidade com a NBR NM 67:1998 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998), que apresenta a determinação da consistência pelo

abatimento do tronco de cone, método de ensaio, equivalente à ASTM C143/C143M-10a Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete.

Já segundo Metha e Monteiro (1994), a trabalhabilidade é uma propriedade composta, tendo como principais componentes a consistência (fluidez) e a coesão (estabilidade). A consistência é definida como a tendência de mobilidade ou fluidez do concreto fresco, sendo medida universalmente pelo ensaio de abatimento do tronco de cone e esta é influenciada, principalmente pela quantidade de água na mistura. A coesão pode ser definida como uma medida qualitativa das características da estabilidade, ou seja, segregação e exsudação.

A NBR 8953:2015 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) classifica os concretos com base em três critérios: massa específica no estado seco, resistência à compressão e trabalhabilidade (consistência). Para classificar os concretos pela sua trabalhabilidade, foram criadas 5 classes:

- ✓ S10: São concretos de consistência seca, aplicados como concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado, cujo o abatimento vai de 10 mm até 49 mm;
- ✓ S50: São concretos pouco trabalháveis, aplicados em alguns tipos de pavimento e de elementos de fundações, cujo o abatimento vai desde 50 mm até 99 mm;
- ✓ S100: São concretos de aplicação normal, aplicados em elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto, cujo o abatimento vai desde 100 mm até 159 mm;
- ✓ S160: São os concretos plásticos, aplicados em elementos estruturais com lançados por bombeamento, cujo abatimento vai desde 160 mm até 219 mm; e
- ✓ S220: São os concretos fluídos, aplicados em elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras, cujo abatimento é maior ou igual a 220 mm.

No que diz respeito a consistência sabe-se que os concretos leves têm comportamento diferenciado dos concretos normais, pois com um mesmo abatimento, o concreto leve apresenta melhor trabalhabilidade. O fator de adensamento dos concretos leves subestima a trabalhabilidade, pois a força oriunda da gravidade que adensa o concreto é menor quando sua massa específica é menor (SILVA, 2003).

No concreto convencional a trabalhabilidade é maior quanto maior for à quantidade de vazios da mistura e a quantidade de partículas finas. O ar aprisionado é mais facilmente expelido, em concretos de alta relação água/cimento, porque facilita a fluidez, a mobilidade e

a bombeabilidade de concretos convencionais, sem que se perda a estabilidade coesiva entre os componentes da mistura, evitando-se, deste modo, a segregação (FREITAS, 2004).

Dessa forma, os concretos celulares espumosos apresentam maior trabalhabilidade que os concretos convencionais, uma vez que tem maior quantidade de vazios em sua estrutura. Breda (2012), ressalta ainda que a incorporação de ar melhora a trabalhabilidade do concreto celular, entretanto reduz consideravelmente sua resistência à compressão.

Neville (1997) explica que as bolhas de ar presentes no concreto celular espumoso se comportam na mistura como agregado miúdo de grande elasticidade e baixo atrito superficial, razão da grande trabalhabilidade, fluidez e plasticidade da matriz. Esta afirmação pode ser confirmada com base nos resultados encontrados por Cortelassi (2005), para concretos celulares obtidos a partir de uma matrix de concreto de alto desempenho, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Abatimento x Teor de ar incorporado

Massa unitária (kg/m ³)	Teor de ar incorporado (%)	Abatimento (cm)
2432	3,9	24,0
2009	15,0	27,0
1874	22,0	28,0
1859	20,0	28,0
1720	29,0	29,0

Fonte: Cortelassi (2005)

Durante o processo de bombeamento dos concretos celulares pode haver a perda do ar incorporado. A correção da quantidade de espuma e ar incorporado à mistura deve ser feita de acordo com o tipo de bombeamento, pressão do bombeamento, comprimento e bitola da mangueira e altura de bombeamento. Este cuidado deve ser tomado para que não haja perda da principal característica do concreto celular, que é a baixa massa específica (FERREIRA, 1986).

2.7 Propriedades no estado endurecido

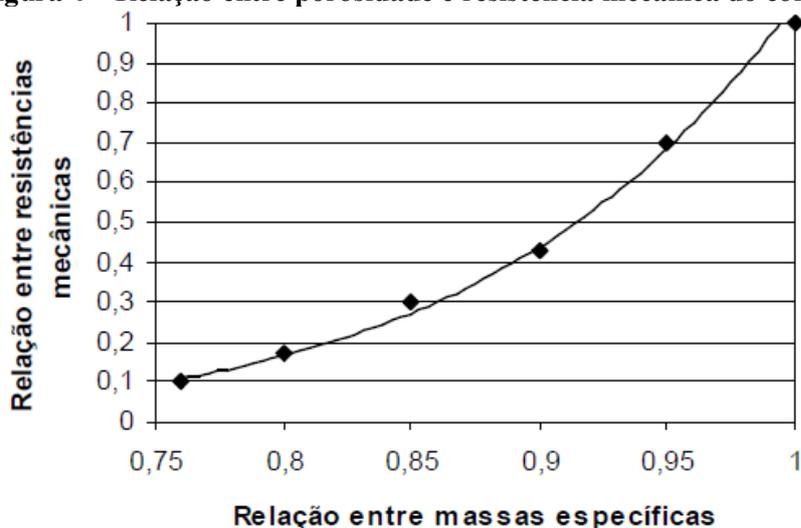
Dentre as propriedades do concreto no estado endurecido, a seguir serão apresentadas a resistência à compressão, resistência a tração e módulo de elasticidade, abordando as recomendações das normas regulamentadoras vigentes, com algumas alterações quando necessário para o concreto em estudo, além de alguns aspectos relatados por autores referentes a estas propriedades para concreto celular.

2.7.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão dos concretos tem sido tradicionalmente utilizada como parâmetro principal de dosagem e controle da qualidade dos concretos destinados a obras correntes. Isso se deve, por um lado, à relativa simplicidade do procedimento de moldagem dos corpos-de-prova e do ensaio de compressão, e, por outro, ao fato de a resistência à compressão ser um parâmetro sensível às alterações de composição da mistura, permitindo inferir modificações em outras propriedades do concreto (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Nos concretos convencionais a resistência é limitada pela porosidade da pasta e da interface pasta/agregado, uma vez que os agregados usuais normalmente são densos e resistentes. Ocorre uma relação fundamental inversa entre porosidade e resistência de sólidos homogêneos (TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992).

Figura 4 – Relação entre porosidade e resistência mecânica do concreto



Fonte: Teixeira Filho e Tezuka (1992)

A Figura 4 confirma a redução da resistência mecânica pela presença de vazios. Mostrando que um volume de poros de 5% (0,95 na relação de massas específicas) resulta numa redução de 30% da resistência mecânica. Esse efeito é justificado pela expressão de FERET, que relaciona a resistência com a soma dos volumes de cimento, água e ar na pasta endurecida:

$$R = K \left(\frac{C}{C + W + A} \right)^2 \quad (2.8)$$

Onde, R é a resistência do concreto, C é o volume absolutos de cimentos, W é a água, A é o ar e K é constante de FERET.

FERET formulou a sua expressão geral em 1886. Para concretos convencionais, onde o teor de poros é pequeno, esta expressão foi simplificada por DUFF ABRAMS em 1918.

Ao observa os concretos celulares espumosos, fica evidente a imagem de uma argamassa, ou pasta, que apresenta um elevado teor de ar incorporado. Neste caso, a relação proposta por ABRAMS não é válida e torna-se necessária a aplicação da expressão geral de FERET.

Nos concretos celulares os teores de ar incorporados são tão elevados que o efeito da relação água/cimento na resistência mecânica chega a ser inverso àquele indicado pela relação de ABRAMS (TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992).

Ferreira (1987) recomenda que os testes de resistência à compressão sejam feitos em corpos de prova cilíndricos e de acordo com NBR 5738:2015 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), fazendo a ressalva de não adensar o concreto, através de apiloamento, mas tão somente dar umas leves batidas com martelo de borracha enquanto o molde está sendo preenchido. Além de citar que a resistência à compressão do concreto celular espumoso varia com os seguintes fatores:

- ✓ Massa Específica;
- ✓ Consumo de Cimento;
- ✓ Tipo de Finura do Cimento;
- ✓ Fator água/cimento;
- ✓ Qualidade e finura da areia;
- ✓ Idade e temperatura da cura; e
- ✓ Sistema e metodologia de produção.

Pode-se dizer que a resistência à compressão varia na razão direta da massa específica, do consumo de cimento e superfície específica deste, ou seja, da finura do cimento. Varia também na razão inversa do volume de espuma, ou seja, da quantidade de ar incorporada na massa (FERREIRA, 1987).

Com base nos dados do Boletim Técnico da empresa CHEECOL (1949, apud CORTEPASSI 2005) apresentado na Tabela 5, é possível confirmar a afirmação de que a resistência à compressão varia na razão direta da massa específica e do consumo de cimento utilizado na dosagem do concreto celular espumoso.

Tabela 5 – Variação da resistência à compressão de concretos celulares com o consumo de cimento da mistura, com o fator água/cimento, com o fator areia/cimento e com a massa específica aparente seca

Massa específica seca (kg/m ³)	Massa específica aparente (kg/m ³)	Fator areia cimento (massa)	Fator água cimento (massa)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)
670	800	0,79	0,6	335	1,8
690	800	0,55	0,5	390	2,1
670	800	0,29	0,5	446	2,8
830	960	1,27	0,6	335	2,5
850	960	0,96	0,5	390	2,8
830	960	0,65	0,5	446	3,5
990	1120	1,75	0,6	335	3,2
1010	1120	1,37	0,5	390	3,5
1010	1120	1,06	0,45	446	4,2
1150	1280	2,22	0,6	335	4,2
1170	1280	1,78	0,5	390	4,6
1170	1280	1,42	0,45	446	5,3
1360	1440	2,85	0,45	335	7,7
1330	1440	2,19	0,5	390	7,7
1330	1440	1,78	0,45	446	9,1
1470	1600	3,18	0,6	335	8,8
1510	1600	2,65	0,45	390	12
1490	1600	2,14	0,45	446	12,7
1630	1760	3,66	0,6	335	14,1
1670	1760	3,06	0,45	390	18,3
1630	1760	2,44	0,5	446	17,6
1770	1920	3,32	0,6	390	23,3
1790	1920	2,8	0,50	445	24,7

Fonte: Cheecol (1949, apud CORTEPASSI, 2005).

Com base nos resultados encontrados por Cortelassi (2005) apresentado na Tabela 6 , que produziu concretos celulares de alto desempenho adicionando espuma em uma matriz de um concreto de alto desempenho com um consumo de cimento de 490 kg/m³, também pode-se confirmar que a resistência à compressão varia na razão direta da massa específica do concreto celular obtido.

Tabela 6 – Massa unitária x Resistência

Concretos	Massa unitária (kg/m ³)	Porcentagem de espuma (%)	Teor de ar incorporado (%)	f _{c,28} (MPa)
Amostra 2,432	2432	0	3,9	71,0
Amostra 2,009	2009	21	15,0	27,5
Amostra 1,874	1874	33	22,0	25,2
Amostra 1,859	1859	32	20,0	18,8
Amostra 1,720	1720	54	29,0	14,5

Fonte: Cortelassi (2005).

Sobre a interferência do processo de cura na resistência mecânica, Ferreira (1987) declara que o processo de cura utilizado é decisivo no resultado da resistência, pois no processo da autoclavagem consegue-se obter, em aproximadamente seis horas, resistências duas vezes superiores ao da cura ao ar.

Ferreira (1987) ainda mostra que os concretos celulares espumosos curados ao ar, mais que dobram a sua resistência à compressão entre o segundo e o sétimo mês, ao contrário do que acontece com os concretos convencionais. Por essa razão, a Deustch Industri Norme (D. I. N) não mais considera a resistência à compressão dos concretos celulares aos 28 dias, mas sim aos 56 dias.

O processo de cura de autoclavagem aumenta a resistência à compressão significativamente, sendo, neste caso, a resistência final, alcançada de acordo com a pressão e a duração da autoclavagem. No caso de concretos celulares cujo processo de cura não for autoclavagem, sua resistência aumenta de $30 \pm 80\%$ entre 28 dias e 6 meses (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000).

Teixeira Filho e Tezuka (1992) reconhecem que a umidade no concreto celular é essencial para a determinação da resistência à compressão. Estudos sobre a relação entre a umidade e a resistência à compressão para concretos celulares curados a vapor em pressão atmosférica e autoclave foram realizados por Bessey e Dilnot (1949, apud TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992). Os autores comprovaram que apesar da redução da resistência final ser da mesma ordem de grandeza dos concretos convencionais, os primeiros 2% e 3% de umidade provocam uma queda muito acentuada na resistência.

Para Narayanan e Ramamurthy (2000) a resistência à compressão varia inversamente com a umidade. Na secagem ao equilíbrio, com uma atmosfera normal, há um aumento na resistência; e na secagem completa, um aumento maior ainda. Por isso, é recomendado que os materiais utilizados na produção do concreto tenham atingido o equilíbrio com o ambiente.

Com relação ao agregado utilizado e sua quantidade, Teixeira Filho e Tezuka (1992), relatam que estes foram objetos de estudo do McCormick (1967). Sua análise comparou resultados de concretos celulares produzidos com areias naturais de quartzo e com argilas expandidas por sinterização. McCormick conclui que módulos de finura menores conduzem a maiores resistências à compressão. Não são feitos comentários sobre a relação a/c usada ou consistência obtida nas misturas ensaiadas. McCormick surpreende ao comentar que o consumo de areia não afeta de maneira consistente a resistência mecânica, embora comente também uma elevação da relação a/c, com o aumento da quantidade de areia.

Com relação a velocidade de carga durante o ensaio de resistência à compressão, Teixeira Filho e Tezuka (1992), identificaram através dos resultados apresentados na Tabela 7, que para concretos celulares espumosos não há influência.

Tabela 7 – Resultados de resistência à compressão axial para duas cargas de velocidades

Massa Específica (kg/m ³)	Relação a/c	Cimento (kg/m ³)	Areia Seca (kg/m ³)	Água (l/m ³)	Espuma (l/m ³)	Velocidade de Carga (kgf/cm ² /s)	
						1,5	2,5
						Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	
1100	0,7	400	420	245,4	432	-	-
	0,6	400	460	203,4	457	4,3	4,4
	0,5	400	500	161,5	481	2,0	1,9
1300	0,7	400	620	251,5	356	-	-
	0,6	400	660	209,5	381	3,6	4,3
	0,5	400	700	167,5	406	2,2	1,8
1500	0,7	400	820	257,5	281	4,9	4,9
	0,6	400	860	215,5	306	6,2	6,2
	0,5	400	900	173,6	330	4,5	4,5
1700	0,7	400	1020	236,6	205	10,0	9,9
	0,6	400	1060	221,6	230	8,4	7,2
	0,5	400	1100	179,6	255	7,1	7,7
1900	0,7	400	1220	269,6	130	9,7	8,8
	0,6	400	1260	227,4	155	7,9	6,7
	0,5	400	1300	185,6	180	10,4	11,3

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

Ainda com base nos resultados apresentados na Tabela 7, Teixeira Filho e Tezuka (1992) detectaram que com a variação da resistência à compressão axial com a massa específica e a relação água/cimento, em massa, não é a mesma observada para os concretos convencionais. Onde para as massas específicas abaixo de 1500 kg/m^3 ocorreu um aumento da resistência à compressão axial com a elevação da relação água/cimento. Mostrando a necessidade que para os concretos celulares espumosos deve-se considerar simultaneamente, as quantidades de ar e água para a previsão da resistência à compressão axial.

2.7.2 Resistência à tração

A propriedade de resistência à tração pode ser analisada nos concretos convencionais, tratando-se de ensaios experimentais, através dos ensaios normatizados: tração direta, compressão diametral e tração na flexão. De acordo com o método de ensaio adotado, podem-se obter diferentes valores para essa resistência. Na ausência de resultados experimentais, podem-se utilizar expressões, segundo a NBR 6118:2014 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), que fornecem resultados com boas aproximações. Almeida (2002), afirma que essa propriedade depende de vários fatores, sendo o principal deles a aderência dos grãos dos agregados com a argamassa.

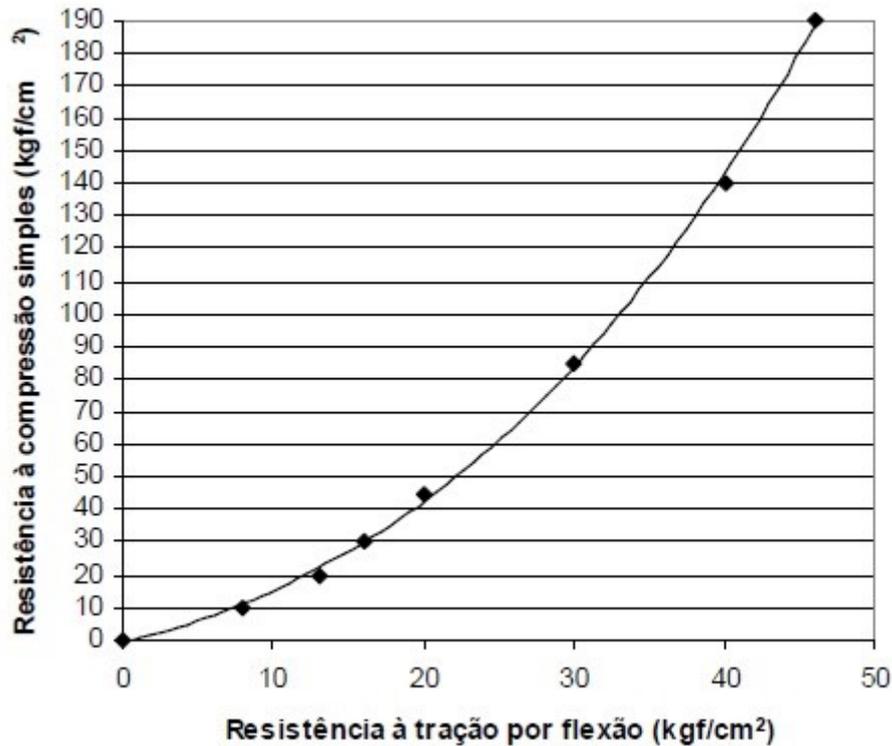
Diferentemente do concreto convencional, a propriedade de resistência à tração do concreto celular espumoso pode ser determinada apenas de duas maneiras: compressão diametral e tração na flexão (CORTELASSI, 2005).

Rossignolo (2009) afirma que os valores de resistência à tração encontrados para os concretos leves, através desses ensaios, são inferiores aos observados nos concretos com massa específica normal, para o mesmo nível de resistência à compressão.

Segundo Tezuko (1989, apud CORTELASSI, 2005), a resistência à tração dos concretos celular é de cerca de metade da resistência à compressão quando se trata de resistências pequenas e cerca de $1/5$ no caso de resistências maiores.

A Figura 5 apresenta uma relação parabólica, entre resistência à tração e resistência à compressão, para diferentes tipos de concretos leves, apresentado por Graf (1951, apud TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992) através de sua pesquisa empírica.

Figura 5 – Relação empírica para a resistência à compressão e resistência à tração



Fonte: Graf (1951, apud TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992).

Já Legatski (1978, apud FREITAS, 2004), afirma que para os concretos celulares e leves a resistência à tração varia, normalmente, entre 20% a 30% da resistência à compressão. Cabendo observar que o valor de 1/5 ou 20% para a resistência a tração com relação a resistência à compressão proposto por Tezuko, encontra-se dentro dos limites estabelecidos por Legatski.

Enquanto Cortelassi (2005) nos resultados de resistência à tração ensaiadas por compressão diametral, apresentados na Tabela 8, constatou que para os concretos celulares espumosos de alto desempenho varia de 5,16 a 8,93% de suas respectivas resistências à compressão, valores estes bem inferiores as porcentagens definidas por Tezuko e por Legatiske.

Tabela 8 – Massa unitária x Resistência à tração

Concretos	Massa unitária (kg/m ³)	Resistência à tração (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Relação entre as resistências (%)
Amostra 2,432	2432	6,45	71,0	9,09
Amostra 2,009	2009	21	27,5	27,5
Amostra 1,874	1874	33	25,2	25,2
Amostra 1,859	1859	32	18,8	18,8
Amostra 1,720	1720	54	14,5	14,5

Fonte: Cortelassi (2005).

Segundo Cortelassi (2005), os valores de resistência à tração encontrados estão mais próximos dos obtidos nos concretos convencionais onde a resistência a tração é de aproximadamente 10% da resistência a compressão. Acredita-se que isso tenha ocorrido em virtude de as bolhas de ar incorporadas provocarem um efeito de arco no comportamento do concreto. Como a matriz é de alta resistência à compressão, faz com que o material apresente uma resistência à compressão bem maior que à tração, considerando que na tração não age o mecanismo de arco.

Essa relação para concretos celulares obtidos pelo processo de cura por autoclavagem, Valore (1954, apud NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000) afirma que a relação é de 15% a 35%, enquanto que para Legatski (1978, apud NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000) essa relação está entre 10% e 15%.

2.7.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é uma das propriedades que possuem papel preponderante nas análises de deformações ocorridas nas estruturas de concreto. De acordo com a NBR:2014 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) as deformações ocorridas no estado-limite de deformações excessivas (ELS – DEF) representam o estado em que as deformações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal da construção.

Assim, de forma geral pode-se dizer que O módulo de elasticidade do concreto mede a deformação que o material sofre quando submetido a carga de curta duração. Trata-se por isso, das características físico-mecânica de maior importância no dimensionamento estrutural, para análise de deformação.

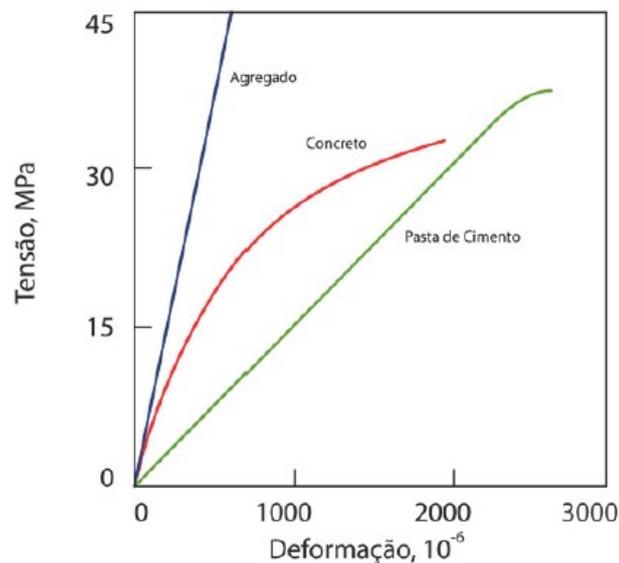
Metha e Monteiro (2008) juntamente com Neville (1997), concordam em afirmar que a curvatura da relação tensão-deformação do concreto, apresentado na Figura 6, deve-se à

presença da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento. Essa zona de transição possui características que afetam o módulo de elasticidade do concreto, tais como a presença de espaços vazios, concentração de cristais de hidróxido de cálcio e as microfissuras.

A zona de transição está sujeita ainda a porosidade controlada por fatores como a relação água/cimento, adições minerais, características de execução, distribuição granulométrica do agregado, interação química entre o agregado e a pasta de cimento e o grau de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

É possível observar na Figura 6 que o agregado e a pasta de cimento submetidos separadamente ao carregamento uniaxial apresentam comportamentos lineares, e é possível observar a importância dos agregados devido aos altos valores atingidos pelo seu módulo de elasticidade. Já o comportamento do concreto não permanece com as características lineares do agregado e da pasta de cimento e na medida em que o carregamento aumenta a curvatura fica mais acentuada.

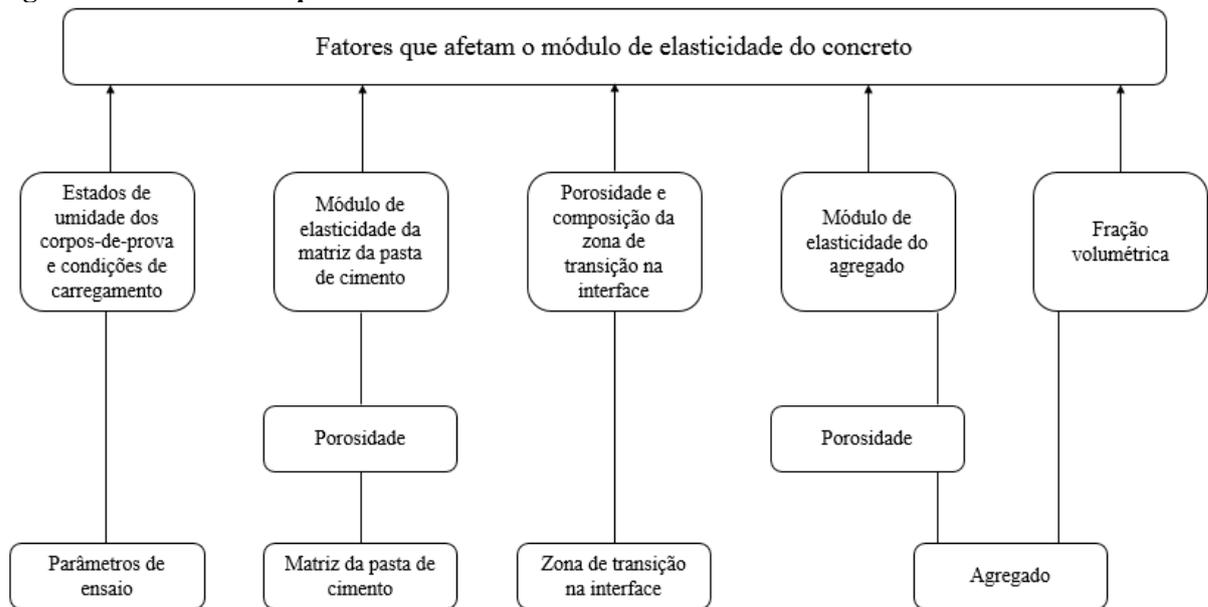
Figura 6 – Comportamento típico de tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto



Fonte: Metha e Monteiro (2008).

Como pode ser observado na Figura 7, o módulo de elasticidade segundo Metha e Monteiro (2008), é afetado de forma e intensidade diferente pelas características e proporções dos materiais que formam o concreto e está dividido em três níveis que aumentam a sua importância quando se aproximam do topo da figura.

Figura 7 – Parâmetros que influenciam o módulo de elasticidade do concreto



Fonte: Metha e Monteiro (2008).

No primeiro nível, o mais externo, estão a matriz da pasta de cimento, os parâmetros de ensaios, agregado e zona de transição na interface, que determinam o comportamento elástico do compósito. No segundo nível está a porosidade; e no terceiro nível estão contidos o módulo de elasticidade da matriz da pasta de cimento, porosidade e composição na zona de transição na interface, fração volumétrica, módulo de elasticidade do agregado, e por fim, o estado de umidade dos corpos-de-prova e as condições de carregamento. De todas as propriedades citadas, a que mais influencia o módulo de elasticidade é a porosidade, visto que ela é inversamente proporcional à densidade. Com isso, agregados mais densos propiciam valores mais altos para o módulo de elasticidade (METHA; MONTEIRO, 2008).

Dessa forma, sabendo que as porosidades tanto dos agregados quanto da pasta de cimento afetam diretamente o módulo de elasticidade, é sensato acreditar que o módulo de elasticidade dos concretos celulares são mais baixos quando comparados aos concretos convencionais, pois estes possuem uma pasta de cimento com um alto teor de poros.

Segundo Freitas (2004), o concreto celular e o concreto leve de um modo geral seguem regras distintas do concreto convencional quanto à deformabilidade. Embora, os fatores que influenciam os módulos de elasticidade continuem a ser os mesmos: a pasta de cimento, a argamassa e os agregados.

Tezuko (1989, apud CORTEPASSI 2005), afirma que os concretos celulares apresentam módulos de deformações mais baixos que os concretos convencionais conforme apresenta a Tabela 9.

Tabela 9 – Valores de módulo de deformação

Massa Específica (kg/m ³)	800	1000	1200	1400
Módulo de Deformação (GPa)	2,760	3,495	9,500	10,650

Fonte: Tezuko (1989, apud CORTEPASSI, 2005)

Os concretos celulares, além das deformações elásticas – o material retorna ao seu estado inicial após cessar a aplicação da carga –, sofrem deformações plásticas quando submetidos a ação de cargas de longa duração, não retornando, nesse caso, ao seu estado original. Ferreira (1986), através de uma análise experimental, avaliou os módulos de deformação obtidos na aplicação de carga de curta e de longa duração, para concretos celulares com diferentes massas específicas, conforme pode ser observado na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores de módulo de deformação para cargas de curta e longa duração

Massa Específica (kg/m ³)	f _{c28} (MPa)	Módulo de Deformação (GPa)	
		Curta duração	Longa duração
1200	5,5	3,70	2,20
1400	10,0	5,00	3,00
1600	15,0	6,10	3,60
1800	23,0	7,50	4,50

Fonte: Ferreira (1986)

Observa-se que nos resultados apresentados por Ferreira (1986) assim como os resultados apresentados por Tezuko (1989), que os maiores módulos de deformação para os concretos celulares foram para aqueles com maiores massas específicas, o que já era de se esperar, uma vez que esses concretos apresentam maiores resistências devido ao menor teor de poros.

É importante lembrar que as diferenças de valores de módulo de deformação entre os valores obtidos por Tezuko e por Ferreira para massas específicas iguais ocorrem devido à dosagem empregada e as características específicas dos materiais constituintes empregados.

Em um estudo realizado por Bave (1973, apud FERREIRA, 1987), onde se realizou a comparação do comportamento apresentado por lajes e prismas armados de concreto convencional e de concreto celular com massa específica de 500 kg/m³, submetidos a idênticas condições de carregamento durante dois anos e meio, concluiu-se que os efeitos da deformação plástica são praticamente os mesmos nos dois concretos.

2.8 Uso do concreto celular para fins estruturais em paredes

Desde o ano de 2009 no Brasil o mercado imobiliário direcionado a habitações de interesse social teve um grande aquecimento, este fato se deve ao incentivo do Governo Federal através do Programa Minha Casa Minha Vida (SHIMIZU, 2010). Segundo Faria (2008) o grande número de unidades habitacionais aliada ao curto prazo do programa fez com que as empresas buscassem novas tecnologias para atender a demanda do programa e ao mesmo tempo racionalizar os processos construtivos presente neste tipo de empreendimento, garantindo conforto e segurança.

Assim, entra nesse contexto os edifícios de paredes de concreto moldados no local, pois a produção é extremamente rápida, além de reduzir os custos, o desperdício e as etapas construtivas de uma obra, quando comparado ao sistema convencional (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2007). Porém para a construção de edifícios com mais de 2 pavimento tem-se utilizado atualmente no Brasil concreto convencional. No entanto, apesar da produção com concreto convencional garantir segurança, estes não oferecem bons confortos térmicos e acústico. Uma maneira de remediar este problema é a utilização de concreto leve, seja ele celular ou não.

Como pode ser visto no referencial apresentado neste trabalho, para se obter um concreto leve a necessidade de introduzir vazios (poros) no concreto seja ele no agregado ou na pasta do cimento ou até mesmo sem a produção de agregados miúdos.

No entanto, segundo Rossignolo (2009) apenas a argila expandida até o ano de 2009 era o único agregado leve produzido no Brasil, ou seja, a utilização destes em larga escala seria de grande dificuldade. Já os aditivos para obtenção de concretos celulares estão cada vez mais presentes no mercado Brasileiro.

Dessa forma, surgiu à necessidade de utilizar em larga escala o concreto celular para fins estruturais. Atualmente no Brasil, existe um projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1 para regulamentar a aplicação do concreto celular com fins estruturais em paredes de edifícios moldadas no local.

Segundo o projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1, a especificação do concreto celular estrutural, atendendo às especificações do projeto estrutural e às exigências do responsável pela execução da obra, deve considerar:

Densidade de massa aparente máxima no estado fresco;

Resistência característica à compressão para retirada de cimbramento e desforma, compatíveis com o ciclo de produção;

Resistência característica à compressão e módulo de elasticidade aos 28 dias (f_{ck});
 Resistência característica à compressão e módulo de elasticidade em idades variadas, quando necessário;

Classe de agressividade ambiental do local de implantação da estrutura.

Na ausência de ensaios, podem ser empregados os seguintes valores estimados:

$$f_{ct,m} = 0,21(f_{ck})^{2/3} \quad (2.9)$$

$$E_{cs} = 0,043\rho_c^{1,5} \sqrt{f_{ck}} \quad (2.10)$$

Onde, $f_{ct,m}$ é a resistência a tração média do concreto celular estrutural; E_{cs} é o módulo de elasticidade secante do concreto celular estrutural (MPa); ρ_c é o peso específico aparente seco do concreto celular estrutural (kg/m^3); f_{ck} é a resistência característica do concreto celular estrutural à compressão (MPa).

Já o E_{ci} , módulo de elasticidade inicial do concreto celular estrutural (MPa), pode ser estimado da seguinte forma:

$$E_{ci} = E_{cs}/\alpha_i \quad (2.11)$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 f_{ck}/80 \quad (2.12)$$

O coeficiente de Poisson do concreto celular estrutural, pode ser considerado, como: $\nu = 0,2$.

Além disso, pode-se adotar os seguintes requisitos complementares durante a elaboração do projeto estrutural na ausência de resultados experimentais:

- ✓ Retração do concreto celular estrutural. Na ausência de resultados experimentais, pode-se adotar o valor estimado pela ABNT NBR 6118 acrescido de 50%.
- ✓ Deformação lenta do concreto celular estrutural. Na ausência de resultados experimentais, pode-se adotar o valor estimado pela ABNT NBR 6118 acrescido de 20%.
- ✓ Coeficiente de dilatação térmica do concreto celular estrutural. Na ausência de resultados, pode-se adotar $0,5 \times 10^{-5} / ^\circ \text{C}$.

A durabilidade das estruturas depende em alto grau das características do concreto base e da espessura e qualidade do concreto celular estrutural de cobertura da armadura. Para garantir a durabilidade, deve-se adotar os seguintes critérios em projeto:

- ✓ Devem ser evitadas disposições arquitetônicas ou construtivas que possam reduzir a durabilidade da estrutura;
- ✓ Deve ser previsto em projeto o acesso para inspeção e manutenção de partes da edificação com vida útil inferior à vida útil da estrutura;
- ✓ Não é permitido o uso de aditivos contendo cloreto na sua composição em estruturas de concreto celular estrutural armado ou protendido;
- ✓ O cobrimento mínimo da armadura deve ser adotado o menor valor existente ao longo de todo o elemento considerado, constituindo-se em critério de aceitação;
- ✓ Além do cobrimento nominal mínimo, devem ser tomadas medidas especiais para o aumento da proteção da armadura se o concreto celular estrutural for submetido a agente agressivo (ambiente marinho ou agente químico), à abrasão, a alta ou baixa temperatura (acima ou abaixo o da temperatura média do período de observação ± 15 C), ou a corrente elétrica; e
- ✓ O projetista da estrutura objetivando garantir a proteção da armadura face à agressividade ambiental, deve indicar procedimento especial de proteção e conservação. A execução de paredes de concreto celular moldadas no local atenderá as exigências de Execução e controle de obra desta norma.

A classificação das classes de agressividades contemplada na NBR 6118:2014 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) é a mesma apresentada pelo projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1. A Tabela 11, apresenta as exigências para a qualidade do concreto base em função da classe de agressividade ambiental.

Tabela 11 – Classe de agressividade ambiental x qualidade do concreto base

Concreto ^{a)}	Classe de agressividade ambiental			
	I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe do concreto (ABNT NBR 8953)	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$

^{a)} O concreto base empregado na execução da estrutura deve atender aos requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655

Fonte: Projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1

Já para o concreto celular estrutural o projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1 classifica a resistência mínima a compressão em função da classe de agressividade e do número de pavimentos, conforme a Tabela 12.

Tabela 12 – Classe de agressividade ambiental x resistência mínima à compressão do concreto celular estrutural

Número de pavimentos	Classe de agressividade ambiental			
	I	II	III	IV
Até 2 pavimentos	≥ 5	≥ 8	≥ 12	≥ 16
Até 5 pavimentos	≥ 7	≥ 10	≥ 14	≥ 18
Acima de 5 pavimentos	≥ 9	≥ 12	≥ 16	≥ 20

^{a)} $f_{ck} \geq 10$ MPa para concreto celular estrutural em contato com o solo, além de proteção contra a penetração de umidade e ataque de agentes agressivos.

Fonte: Projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1

O cobrimento para os elementos de parede produzidas com concreto celular estrutural deve ser adotado em função da classe de agressividade segundo o projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1, conforme a Tabela 13.

Tabela 13 – Classe de agressividade ambiental x Cobrimento nominal

Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
	I	II	III	IV
	Cobrimento nominal (mm)			
Parede	30	35	45	55

Para parede interna (sem contato com o ambiente externo ou solo) pode-se adotar o cobrimento nominal mínimo desta tabela subtraído de 5mm.

Fonte: Projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1

Quando houver um adequado controle de qualidade e rígidos limites de tolerância da variabilidade das medidas durante a execução, pode ser adotado $\Delta c = 5$ mm, com a exigência de controle rigoroso explicitada no projeto estrutural. Permite-se, nesse caso, a redução dos cobrimentos nominais prescritos na Tabela 13 em 5 mm (ABNT/CEE 185:000.01-001-1).

No que concerne à normatização no Brasil, pode-se afirmar que são poucas as normas que tratam de concreto celular. Referentes aos concretos celulares, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), existem apenas três normas brasileiras:

- ✓ NBR 12644:1992: Concreto celular espumoso - Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco - Método de ensaio;
- ✓ NBR 12645:1992: Execução de paredes de concreto celular espumoso moldadas no local – Procedimento;
- ✓ NBR 12646:1992: Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local – Especificação.

É importante frisar que norma NBR 12644:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) sofreu revisão no ano de 2014, estando em vigor atualmente com o seguinte título:

- ✓ NBR 12644:2014: Concreto leve celular estrutural: determinação da densidade de massa aparente no estado fresco: método de ensaio;

Assim, é possível observar na mudança do título da norma NBR 12644:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) para a norma atual em vigor NBR 12644:2014 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) que atualmente existe já um consenso para guiar a aplicação do concreto leve celular em elementos estruturais. Assim que o projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1 entrar em vigor, este irá atualizar e substituir as normas ABNT NBR 12645:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) e a norma ABNT NBR 12646:1992).

Existem ainda normas brasileiras que abordam blocos produzidos com concretos celulares autoclavado. São elas:

- ✓ NBR 13438:2013 – Blocos de concreto celular autoclavado – Especificação;
- ✓ NBR 13439:1995 - Blocos de concreto celular autoclavado – Verificação da resistência à compressão – Método de ensaio;
- ✓ NBR 13440:1995 - Bloco de concreto celular autoclavado – Verificação da densidade de massa aparente seca – Método de ensaio;
- ✓ NBR 14956-1:2003 - Blocos de concreto celular autoclavado – Execução de alvenaria sem função estrutural – Parte 1: Procedimento com argamassa colante industrializada;
- ✓ NBR 14956-2:2003 - Blocos de concreto celular autoclavado – Execução de alvenaria sem função estrutural – Parte 2: Procedimento com argamassa convencional.

Porém, salienta-se que todas essas normas, tocantes ao concreto celular autoclavado, foram revisadas em 2012 pelo Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (CB-18) da ABNT, sendo realizadas algumas alterações. Logo, atualmente, as normas em vigor são:

- ✓ NBR 13438:2013 – Blocos de concreto celular autoclavado - Requisitos;
- ✓ NBR 13440:2013 - Blocos de concreto celular autoclavado – Métodos de ensaio;

- ✓ NBR 14956-1:2013 - Blocos de concreto celular autoclavado – Execução de alvenaria sem função estrutural – Parte 1: Procedimento com argamassa colante industrializada;
- ✓ NBR 14956-2:2013 - Blocos de concreto celular autoclavado – Execução de alvenaria sem função estrutural – Parte 2: Procedimento com argamassa convencional.

Pode-se notar que a ABNT NBR 13439 foi cancelada. Isto se deve ao fato de que todo o seu conteúdo agora está sendo abordado pela ABNT NBR 13440:2013, que passou a tratar da verificação da densidade de massa aparente seca, como também da resistência à compressão e outros métodos de ensaios.

Já a ABNT NBR 13438:2013 apresentou uma alteração em sua denominação, porém as mudanças em seu conteúdo não foram expressivas. A ABNT NBR 14956-1:2013 recebeu pequenos ajustes e foi adequada ao novo formato de apresentação das normas brasileiras. Por fim, a ABNT NBR 14956-2:2013 passou a contemplar requisitos mais específicos em relação à argamassa de assentamento dos BCCAs, como módulo de elasticidade e capacidade de retenção de água, além da forma de como executar a alvenaria.

Quando se trata da normatização internacional, observa-se que o estudo sobre concreto celular é bem mais desenvolvido e em maior número são as normas norte americanas publicadas, principalmente para o CCA. Atualmente, pela American Society for Testing and Materials (ASTM), algumas das normas que estão em vigor são:

- ✓ ASTM C796/ C796M – 12 - Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam - fornece o método de ensaio, em laboratório, para medição do desempenho do produto químico utilizado para geração de espuma pré-formada, para produção do concreto celular;
- ✓ ASTM C869/ C869M – 11 - Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete - fornece as especificações dos agentes espumantes utilizados para a produção da espuma pré-formada a ser introduzida durante a fabricação do concreto celular. Essas especificações proporcionam os meios para avaliação do desempenho do agente espumígeno;
- ✓ ASTM C1691 – 11 - Standard Specification for Unreinforced Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Masonry Units – trata da especificação padrão, para unidades de alvenaria, sem reforço, fabricados a partir do concreto celular autoclavado, como

as tolerâncias dimensionais, limites máximos para a retração por secagem e requisitos do transporte e manuseio;

- ✓ ASTM C1686 – 09 - Standard Practice for Installation and Testing of Reinforced Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Units – trata da prática padrão para instalação e testes em unidades sólidas reforçadas, feitas de concreto celular autoclavado;
- ✓ ASTM C1660 – 10 - Standard Specification for Thin-bed Mortar for Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Masonry – trata da especificação padrão para argamassa fina para alvenaria de concreto celular autoclavado, como as necessidades dos materiais e o desempenho.

Ainda existem as normas que não são direcionadas especificamente para o concreto celular, mas que auxiliam no desenvolvimento de importantes estudos e descobertas para com esse tipo de concreto leve. Como exemplo, pode-se citar a norma ASTM C666/ C666M – 03 - Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, que pode ser utilizada em estruturas pré-formadas de CCE nos ciclos de gelo e degelo.

Atualmente pelo Instituto Concrete American (ACI), existem algumas normas em vigor referente ao concretos celular como:

- ✓ 523.1R - 06 - Guide for Cast-in-Place Low Density Cellular Concret – Trata-se de um guia para aplicação de concretos celulares de baixa densidade moldados no local.
- ✓ 523.2R - 96 - Guide for Precast Cellular Concrete Floor, Roof, and Wall Units – Trata-se de um guia para aplicação de concretos celulares em pisos, telhados e unidades de paredes pré-moldados.
- ✓ 523.3R - 14 - Guide for Cellular Concretes Above 50 lb/ft³ (800 kg/m³) – Trata-se de um guia para concreto celulares com densidades acima de 800 kg/m³.
- ✓ 523.4R - 09 - Guide for Design and Construction with Autoclaved Aerated Concrete Panels – Trata-se de um guia para projeto e construção de painéis com concreto aerado autoclavado.

É possível observar que as normais internacionais abrangem mais o tema concreto celular do que a situação atual do Brasil, no entanto percebe-se que há uma grande desproporção nos concretos celulares autoclavado quando comparados aos concretos celulares curados ao ar livre. Como os concretos celulares que serão abordados no presente trabalho não serão curados por um processo de autoclavagem, então será dado ênfase as considerações

do projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1 para aplicação deste concreto com fins estruturais, em paredes moldadas no local de edificações.

3 EXPERIMENTAÇÃO - MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos do trabalho, além da revisão bibliográfica sobre o tema já apresentada, foi desenvolvido um trabalho experimental. Neste sentido, esta seção apresenta os tipos de concretos celulares que foram obtidos e avaliados, os materiais utilizados, os métodos de ensaios aplicados, as etapas de produção (dosagem, mistura, lançamento e cura) e as propriedades analisadas no estado fresco e endurecido.

As características dos agregados (granulometria, massa específica e absorção) foram determinadas de acordo com as normas brasileiras indicadas para cada ensaio. As propriedades físicas e químicas dos aditivos foram obtidas das fichas técnicas.

Os três tipos de concretos celulares obtidos e avaliados foram:

O concreto celular com aditivo espumígeno AESP, cuja espuma é pré-formada, sem agregados graúdos, denominado de CESP;

O concreto celular com aditivo espumígeno ABAM, cujas bolhas de ar são geradas na mistura, sem agregados graúdos denominado de CBAM; e

O concreto celular com adição de agregado graúdo (pedrisco) e aditivo ABAM, denominado de CBAMG.

A produção dos concretos celulares teve como objetivo garantir as propriedades de leveza e ao mesmo tempo de resistência que permitisse o concreto ser aplicado em elementos de painéis com fins estruturais. Inicialmente foram realizadas produções com os concretos CESP, por se tratar do mais comum encontrado na literatura e na prática de produção de concretos celulares, cujo aditivo usado é auxiliado por geradores para geração de pré-espuma. Em seguida foram realizadas produções dos CBAM com aditivos mecânicos na tentativa de eliminar mais uma variável (gerador de espuma) na produção do concreto celular e alcançar uma melhor uniformidade. Por fim, o CBAMG foi produzido com agregados graúdos na tentativa de avaliar a influência destes agregados na obtenção e propriedades dos concretos celulares, nos estados fresco e endurecido (densidade, trabalhabilidade e resistência à compressão), para esses concretos o CBAM foi usado como referência. Todos esses concretos de acordo com o exposto na revisão bibliográfica, teve como base uma matriz de concreto convencional, sem aditivo, denominado de concreto base (cimento, água e agregado).

Em resumo, os concretos CESP e CBAM têm a mesma composição, sem agregado graúdo, diferenciando no aditivo utilizado e na forma de geração da espuma. E o CBAM e CBAMG, diferenciando na adição do agregado graúdo.

As características avaliadas dos concretos são: densidade, trabalhabilidade, teor de ar incorporado e resistência à compressão. Para determinar estas características foram utilizados métodos normatizados de acordo com as normas brasileiras indicadas para cada ensaio, com exceção do teor de ar incorporado que foi determinado de acordo com o método proposto no estudo.

No que diz respeito aos métodos de dosagens aplicados para os concretos celulares em estudo, este trabalho adotou o método de Ferreira (1987) para os concretos CESP. Como não foi encontrado na literatura consultada métodos de dosagens próprios para o CBAM fez-se uma adaptação do método de dosagem adotado para os CESP para dosar os concretos celulares CBAM e CBAMG.

As produções dos concretos celulares foram realizadas tomando-se como base a norma NBR 12645:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), que especifica, por exemplo, a sequência de carregamento do misturador, além de algumas recomendações indicadas por autores citados na seção 2 como, por exemplo, o tempo de mistura de 5 minutos após a adição da espuma ao concreto.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados nas composições dos concretos celulares foram: cimento Portland composto CP II-F 32, normatizados de acordo com a NBR 11578:1997; agregado miúdo, areia quartzosa; agregado graúdo, rocha britada (pedrisco) de basalto; e aditivos químicos, um espumígeno, que gera espuma pré-formada através de geradores, denominado de AESP, e um incorporador de bolhas de ar, que gera as bolhas durante o processo de mistura através da ação mecânica do misturador, denominado de ABAM. Algumas características desses materiais são apresentadas a seguir.

3.1.1 Aditivos químicos

O aditivo espumígeno de espuma pré-formada (AESP), é um aditivo de natureza química, fornecido no estado líquido, de densidade $1,01 \text{ g/cm}^3$, pH: 8,2 à 10,2, de cor castanho escuro e solúvel em água. Tem sido muito utilizado para produção de concretos celulares, aplicados para isolamento térmico, acústico e camadas de regularização.

Segundo os fabricantes são utilizados para conferir alta estabilidade dos poros, aumento da homogeneidade dos concretos, maior plasticidade, boa retenção de água, além de

reduzir a densidade do material através do aumento de volume, sem ganho praticamente de peso, provocando uma melhora nas propriedades térmica e acústica.

Já o aditivo com geração de bolhas de ar no próprio equipamento de mistura do concreto, denominado aqui como aditivo mecânico (ABAM), também é de origem química, fornecido no estado líquido, de densidade 1,00 g/cm³, pH: 7,0 à 9,0, de cor castanho e solúvel. Suas principais aplicações, são em concretos para pontes, pavimentos rígidos, barragens e para concretos resistentes às reações de gelo e degelo.

Sua aplicação em concretos garantem melhorias na: reologia, homogeneidade, segregação, efluorescência, além de reduzir a densidade do material, provocando uma melhora nas propriedades térmica e acústica. Uma das suas vantagens com relação ao aditivo AESP, é que o mesmo já vem pronto para uso, não requerendo equipamentos específicos.

3.1.2 Agregados

A Tabela 14 apresenta as normas nacionais utilizadas para caracterização dos agregados graúdos e miúdos.

Tabela 14 – Ensaios para caracterização dos agregados

Ensaio	Normas
Composição Granulométrica	NBR 7211(ABNT,2009) e NM 248(ABNT,2003)
Massa Específica – Agregado Miúdo	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Massa Específica – Agregado Graúdo	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Absorção – Agregado Miúdo	NBR NM 30 (ABNT, 2001)
Absorção – Agregado Graúdo	NBR NM 53 (ABNT, 2009)

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A Tabela 15 apresenta os resultados das caracterizações dos agregados miúdos e graúdos realizados conforme normas regulamentadoras citadas.

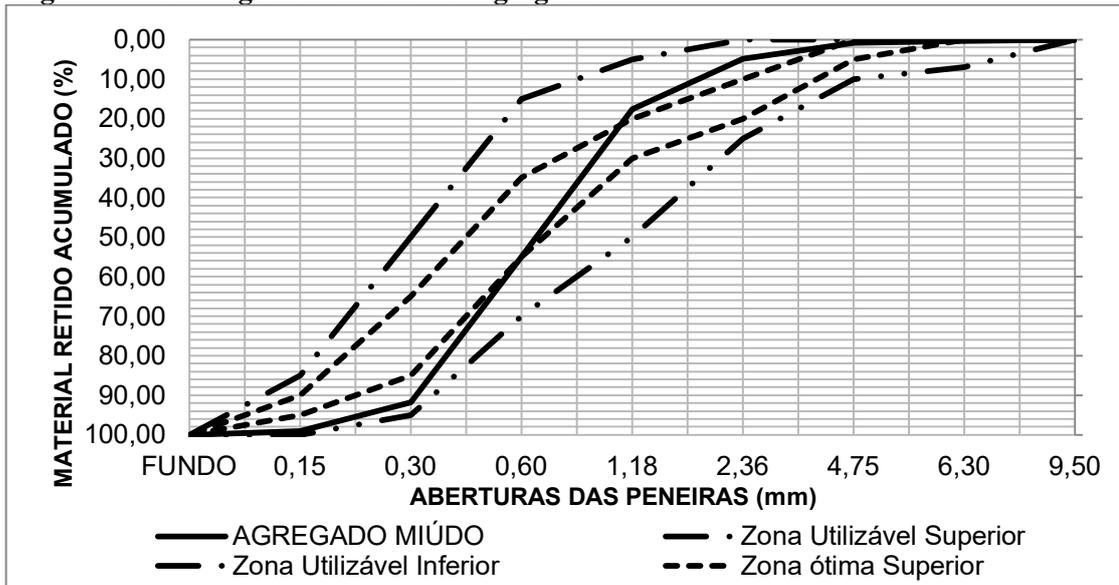
Tabela 15 – Caracterização dos agregados

Ensaio	Pedrisco	Areia
Massa específica (g/cm ³)	2,65	2,63
Índices granulométricos		
Dimensão característico máximo (mm)	9,50	4,75
Módulo de finura	5,85	2,69

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A Figura 8 representa a curva granulométrica do agregado miúdo, inserida dentro das faixas da zona ótima e zona utilizável, e a Figura 9 representa a curva granulométrica do agregado graúdo.

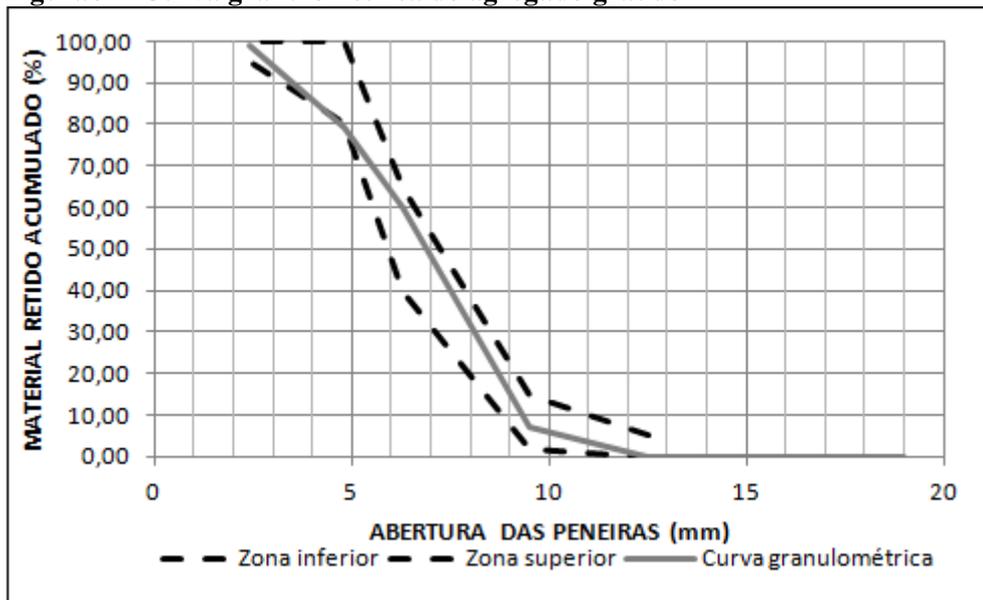
Figura 8 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

É possível observar na Figura 8 que a curva granulométrica do agregado miúdo não ficou dentro do limite de zona ótima, mas ficou dentro do limite de zona utilizável. Dessa forma, de acordo com a NBR 72112009 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), o agregado miúdo ensaiado pode ser utilizado para produção de concreto. Além disso, o módulo de finura obtido para a areia média encontra-se no intervalo de valores estabelecidos para os módulos de finura da zona ótima.

Figura 9 – Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

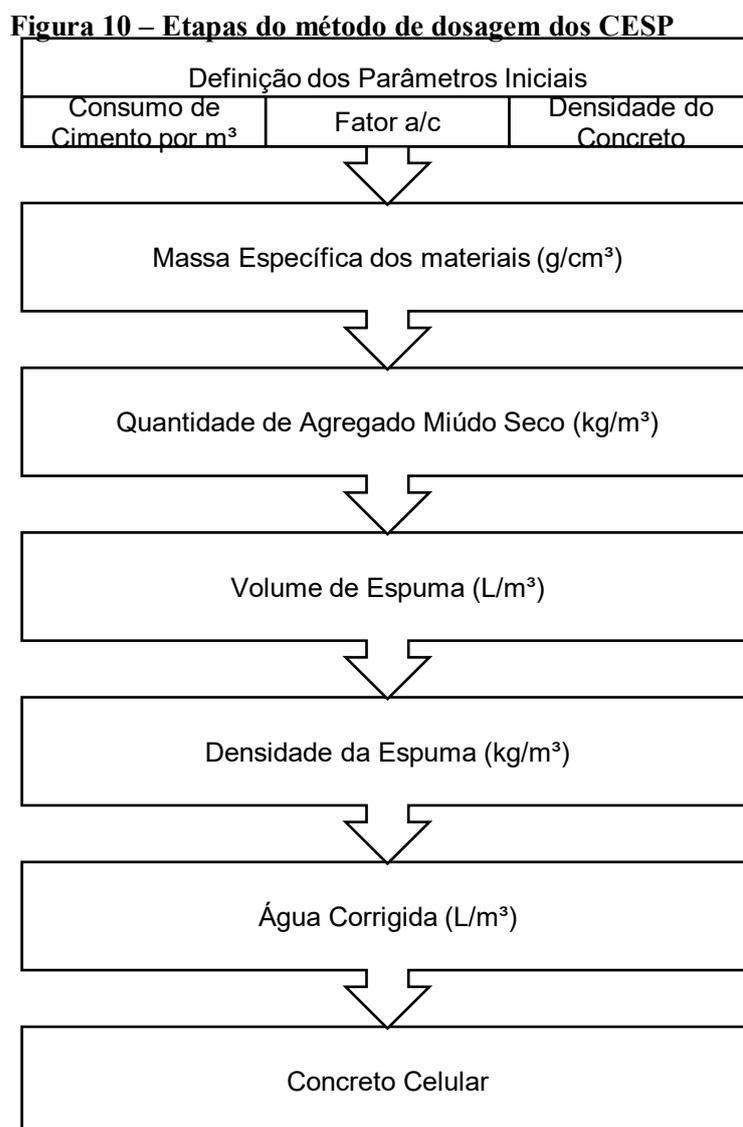
Analisando-se a Figura 9, é possível observar que a curva granulométrica do agregado graúdo, cujo o dimensão máximo determinado foi de 9,5 mm, permaneceu dentro dos limites inferiores e superiores para agregados com diâmetros entre 4,8 mm e 12,5 mm. Dessa forma, de acordo com a NBR NM 248:2003 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), este agregado pode ser utilizado para produção de concreto.

3.2 Métodos de dosagem

A seguir serão apresentados os métodos de dosagens adotados para os três tipos de concretos celulares produzidos neste trabalho.

3.2.1 Formulação das composições dos CESP

A Figura 10 apresenta as etapas do método de dosagem que foi aplicado para formulação das composições dos CESP, proposto por Ferreira (1987) apresentado na revisão bibliográfica.



Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Como é visto na figura acima para aplicar as etapas do método de dosagem, foi necessário inicialmente definir alguns parâmetros de entrada, ter conhecimento de algumas características físicas já definidas dos componentes envolvidos como, por exemplo, massa específica, além da densidade de espuma para corrigir a quantidade de água a ser utilizada.

Sabendo que o principal objetivo deste trabalho é obter concreto leve com resistência para fins estruturais, adotou-se como parâmetros para avaliar o atendimento das composições dos concretos a essas finalidades (leveza e resistência) duas propriedades: densidade e resistência à compressão. Dessa forma, este trabalho iniciou-se com formulações de composições de concretos com densidades dentro do limite superior para concretos leves, pois com base na literatura, sabe-se que há uma relação direta da resistência à compressão com a massa específica.

Portanto, o parâmetro de entrada de densidade para a composição do concreto no estado fresco adotado foi de 1900 kg/m³, que segundo a classificação da NBR 12646:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) é o limite para concreto celular.

Com a incorporação de bolhas de ar no concreto a resistência à compressão reduz consideravelmente. No sentido de compensar essa perda uma elevada dosagem de cimento foi adotada ficando em 400 kg/m³. Com relação ao fator água/cimento foi adotado 0,5, atendendo a recomendação para a maioria das zonas de agressividade do concreto segundo a NBR 6118:2014 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). A Tabela 16 resume os dados mencionados de entrada para formulação das composições dos concretos que foram produzidos.

Tabela 16 – Parâmetros iniciais adotados

Densidade no estado fresco (kg/m ³)	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Fator água/cimento
1.900,00	400,00	0,50

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Além dos parâmetros de entrada foi necessário ter conhecimento da massa específica dos materiais (cimento, água e agregados miúdos) utilizados para calcular a quantidade em massa dos agregados secos por m³, através do método de dosagem exposto na revisão bibliográfica, conforme a Equação 2.5.

$$A_s = \gamma_{cf} - C_c - (a/c \times C_c) \quad (2.5)$$

Tendo conhecido a quantidade em massa por m³ e as massas específicas destes materiais (agregados secos, cimento e água) determina-se o volume destes materiais (concreto base). Determinado o concreto base é necessário definir o volume de espuma para um 1m³ de concreto celular. O valor do volume da espuma é definido pela diferença entre o volume do concreto base e 1 m³ de mistura, conforme a Equação 2.6.

$$V_{esp} = 1000 - \frac{A_s}{\gamma_{areia}} - \frac{C_c}{\gamma_c} - \left(\frac{a}{c} \times C_c\right) \quad (2.6)$$

Sabe-se que a espuma contém água e o fator a/c do concreto base definido nos parâmetros de entrada deve ser corrigido. Pelo método de dosagem aplicado o peso da espuma é devido à água presente, então o volume de água presente na espuma deve ser descontado do volume de água da mistura (FERREIRA, 1986).

Para calcular o volume de água da espuma é necessário conhecer a densidade, essa depende da proporção da solução (aditivo/água) adotada para formação da espuma. As proporções de aditivo/água na solução recomendadas na literatura são 1/40 e 1/60, que dependem do aditivo utilizado. No estudo foram utilizadas as seguintes proporções da solução: 1/20, 1/40 e 1/60. A solução de 1/20 foi aplicada no sentido de verificar se o aumento da dosagem do aditivo traz um melhor desempenho das propriedades desejadas (densidade, trabalhabilidade e resistência). A seguir será determinada a densidade para cada solução utilizada.

As densidades das espumas geradas para cada solução (1/20, 1/40 e 1/60) foram determinadas como o quociente da relação entre a massa da espuma e o volume de um recipiente ocupado pela espuma (5 litros).

A determinação da densidade foi repetida seis vezes para cada solução. A Tabela 17 apresenta as densidades das espumas gerada por cada solução.

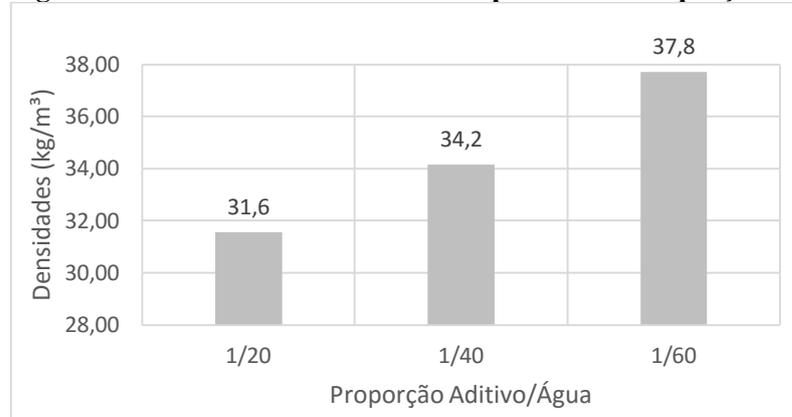
Tabela 17 –Densidades das espumas

Números de repetições	Densidades na Proporção 1/20 (kg/m ³)	Densidades na Proporção 1/40 (kg/m ³)	Densidades na Proporção 1/60 (kg/m ³)
1º	29,1	34,0	35,8
2º	31,9	34,9	39,1
3º	32,6	33,5	38,8
4º	32,4	33,9	38,5
5º	31,3	34,1	38,1
6º	32,1	34,6	36,2

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A Figura 11 apresenta as densidades médias calculadas com base nos dados apresentados na Tabela 17 para cada proporção ensaiada.

Figura 11 – Densidades Médias das Espumas nas Proporções 1/20, 1/40 e 1/60



Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Com base nos resultados apresentados na Figura 11 e na Tabela 17, pode-se notar que a medida que se aumenta o teor do aditivo, na solução, ocorre uma redução na densidade da espuma obtida. Dessa forma, pode-se dizer que para um mesmo volume de solução (aditivo/água) aquela que estiver com uma maior concentração de espumígeno irá gerar um maior volume de espuma.

A GETHAL (2003) recomenda uma densidade de espuma na ordem de 80 kg/m³, enquanto o ACI523-1 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1986) recomenda uma densidade no intervalo de 34 kg/m³ à 64 kg/m³. Assim a massa específica da espuma obtida por cada solução ficou próxima do limite inferior estabelecido pelo ACI 523-1 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1986), com exceção da solução 1/20 que apresentou menor densidade, porém pode ser justificado por não ser uma dosagem comum.

Assim, tendo conhecimento da densidade da espuma gerada é possível calcular a água corrigida, conforme a Equação 2.7, ou seja, o volume de água a ser utilizado na produção do concreto celular dosado, com o desconto da água presente no volume da espuma.

$$V_{\text{água}} = (a/c \times C_c) - (V_{\text{esp}} \times \gamma_{\text{esp}}) \quad (2.7)$$

Sendo, γ_{areia} é a massa específica da areia, γ_c é a massa específica do cimento e γ_{esp} é a densidade da espuma.

3.2.2 Formulação das composições do CBAM

No levantamento bibliográfico realizado durante a elaboração deste trabalho não foi encontrado método de dosagem específico para concretos celulares obtidos com o uso de ABAM (aditivo cujas bolhas de ar são geradas pelo processo mecânico do misturador). Dessa forma, foi baseado no método de dosagem utilizado para os concretos celulares CESP com adaptações.

Sabendo-se que o método de dosagem do CESP, baseia-se na soma das massas dos componentes e na soma dos volumes absolutos, este trabalho adotou a primeira parte do método proposto por Ferreira (1987) para calcular a quantidade de agregados em massa. A dosagem do aditivo foi em massa com relação à massa do cimento (Aditivo/cimento).

Os parâmetros de entrada para a dosagem do concreto base do CBAM são os mesmos utilizados na dosagem do concreto base do CESP (Tabela 16) assim como a determinação da dosagem de areia seca por metro cúbico.

Portanto, para o CBAM é necessário fixar uma dosagem de aditivo para poder gerar as bolhas de ar nos concretos, diferente do CESP que introduzia no concreto um determinado volume de espuma. Na revisão bibliográfica não foi encontrada nenhuma relação que definisse uma dosagem de aditivo para um determinado teor de bolhas de ar. Então este trabalho adotou uma porcentagem inicial de dosagem de aditivo, e a partir dos resultados obtidos no concreto produzido reduzia-se ou aumentava-se a proporção até alcançar um concreto com densidade próxima do valor definido no parâmetro de entrada do método.

Vale salientar que as massas dos materiais determinadas para o concreto base, conforme exposto anteriormente, são para 1 m³ de concreto, e que esse volume (1 m³) é determinado somando o volume do concreto base com volume das bolhas de ar geradas pelo aditivo através da ação mecânica do próprio misturador. Dessa forma, o elemento responsável para completar o volume da mistura para atingir 1m³ é o volume das bolhas de ar.

Assim, quando a densidade de massa aparente no estado fresco obtida apresentar um valor próximo da densidade definida no parâmetro de entrada, significa que o volume final da mistura chegou próximo de 1m³ e conseqüentemente a proporção de aditivo/cimento utilizado é o valor correto para os parâmetros definidos. Para os volumes de concreto utilizados a dosagem do aditivo foi muito baixa, e a correção da água da mistura, isto é o desconto da água do aditivo, foi insignificante.

3.2.3 Formulação das composições dos CBAMG

O método de dosagem adotado para os CBAMG (com agregados graúdos) é semelhante ao método de dosagem adotado para os CBAM, como pode ser observado a seguir:

- Quantidade de agregados secos por metro cúbico:

$$A_{gs} = \gamma_{cf} - C_c - \left(\frac{a}{c} \times C_c\right) - \left(\frac{Ad}{c} \times C_c\right) \quad (3.1)$$

- Quantidade de agregado miúdo seco por metro cúbico:

$$A_s = A_{gs} \times (1 - \alpha_1) \quad (3.2)$$

- Quantidade de agregado graúdo seco por metro cúbico:

$$B_s = A_{gs} \times \alpha_1 \quad (3.3)$$

Onde, Ad/c é a relação em massa do aditivo com relação ao cimento, B_s é a quantidade de agregado graúdo seco em massa, e α_1 é a parcela em porcentagem que agregado graúdo representa dentre os agregados secos da mistura.

Devido ao pequeno volume de concreto produzido para cada mistura a dosagem do aditivo utilizado no CBAMG foi muito baixa, fazendo com que a correção da água da mistura, isto é o desconto da água do aditivo, tornasse insignificante.

Assim, com base nas equações apresentadas percebe-se que não há diferença entre as equações que determinam o agregado seco total, quando comparada com o método adotado para os CBAM. O que difere é que neste método deve-se escolher uma porcentagem do agregado miúdo para ser substituído em massa pelo agregado graúdo.

Essa substituição é feita em massa ao invés de volume, pois o método de dosagem adotado inicialmente procura manter o princípio de que a soma das massas dos componentes da mistura, excluindo o ar, já que este não pesa, deverá ser igual a densidade de massa aparente do concreto celular no estado fresco.

Dessa forma, o volume necessário para completar 1 m³ adotado no método de dosagem, fica sob a responsabilidade do aditivo químico utilizado para gerar bolhas de ar dentro do concreto, ou seja, deve-se encontrar a porcentagem correta de aditivo que deverá ser adicionado a mistura para que este consiga expandir o volume da mistura até 1 m³.

Os parâmetros de entrada como: densidade, consumo de cimento e o fator água/cimento foram mantidos os mesmos adotados anteriormente e foram fixados para todos os traços CBAMG.

Para determinar as composições dos CBAMG este trabalho utilizou como referência os concretos CBAM33 e CBAM17, ou seja, adotou-se as porcentagens de 0,033 % e 0,017 % de aditivo/cimento, pois como será apresentado na seção 4 estes concretos foram os que apresentaram melhores resistência à compressão.

Com relação à quantidade de agregado graúdo utilizado, este trabalho foi substituindo gradativamente em intervalos de 10%, utilizando como parâmetro limite para a substituição a densidade de massa aparente do concreto no estado fresco máxima de 2.000 kg/m³.

3.3 Produção

3.3.1 Produção dos CESP

Foram produzidos três concretos celulares obtidos com espuma pré-formada (CESP), diferenciando apenas a proporção do aditivo/água denominados de CESP1/20, CESP1/40 e CESP1/60, onde CESP significa: concreto celular com espuma pré-formada, e o sufixo 1/x representa a proporção do aditivo/água utilizado na solução para gerar a espuma.

Inicialmente será determinada a vazão do gerador de espuma, pois durante a produção de CESP é comum a espuma ser adicionada diretamente do gerador ao misturador, mas para poder fazer esta aplicação direta, é necessário determinar a vazão, pois com essa medida é possível adicionar o volume de espuma necessário calculado controlando o tempo durante a adição. Em seguida será apresentado o processo de mistura adotado baseado nas normas regulamentadoras.

3.3.1.1 Vazão de espuma do gerador

Sabendo que a vazão é a quantidade de volume que passa em uma determinada seção durante um intervalo de tempo, para determinar esta propriedade mediu-se o tempo necessário para encher um recipiente de volume conhecido. Através do quociente entre o volume do recipiente e tempo necessário para enchê-lo, pôde-se determinar a vazão em L/s do equipamento gerador de espuma. A Figura12 apresenta o gerador utilizado.

Figura 12 – Gerador de espuma

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Para este ensaio, foi utilizado um recipiente de volume com capacidade de 220 litros e a proporção de 1/40 de aditivo/água, que nesse caso é indiferente para a vazão do equipamento. A Tabela 18 apresenta a vazão do gerador de espuma.

Tabela 18 – Vazão do gerador de espuma

Vazão (l/s)	Volume Recipiente (l)	Tempo de enchimento (s)
6,70	220,00	33,00

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

O gerador utilizado para produção foi um de larga escala, ou seja, é um gerador utilizado para fins industriais, então era de se esperar que a vazão do mesmo apresentasse um valor alto.

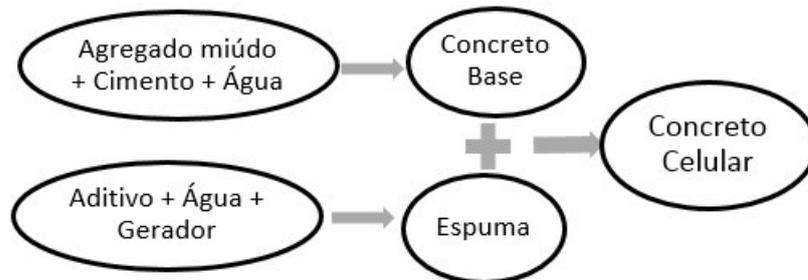
Por causa da elevada vazão do gerador, durante as produções dos concretos a espuma não foi adicionada direto do gerador ao misturado, pois o volume de espuma necessário para a quantidade de concreto produzido em cada traço era pequeno, de tal forma que em apenas 1 segundo o gerador adicionaria um volume de espuma maior que o calculado.

Dessa forma, para contornar este problema a espuma foi adicionada em massa, ou seja, a espuma gerada foi depositada em um recipiente de massa conhecido, pois subtraindo o peso do recipiente do peso total (recipiente mais espuma) obtinha o peso do volume de espuma, e tendo conhecimento da densidade da espuma foi possível pesar a quantidade necessária.

3.3.1.2 Processo de mistura dos CESP

A Figura 13, apresenta o processo de mistura dos concretos celulares com aditivos de pré-espuma.

Figura 13 – Processo de mistura dos concretos CESP



Fonte: Elaborada pelo autor (2015)

O processo de mistura para obtenção dos concretos CESP, apresentado na Figura 13, adotado com base nas recomendações da NBR 12645:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), foi dividido em três etapas:

➤ 1º Etapa:

Inicialmente era colocado o agregado miúdo e o cimento para serem misturados durante 60 segundos.

➤ 2º Etapa:

Nessa etapa, era adicionado água a mistura já com o agregado miúdo e o cimento homogeneizado, e misturava-se estes durante 60 segundo. Em seguida, desprendia-se o material da parede e do fundo do misturador por 30 segundos, e misturava por mais 60 segundos, ou seja, esta etapa tinha uma duração média de 2,5 minutos, onde o produto final é o concreto base.

➤ 3º Etapa:

Na última etapa da mistura, era adicionado a espuma (Figura 14), previamente produzida através do gerador de espuma para a solução de aditivo/água adotada, e misturava-se por 2,5 minutos. Em seguida, desprendia o material da parede e fundo do misturador por 30 segundos e misturava por mais 2,5 minutos, ou seja, esta etapa tinha uma duração média de 5

minutos e 30 segundos. O tempo de 5 minutos de mistura após a adição da espuma foi adotado com base nas recomendações apresentadas neste trabalho na revisão bibliográfica.

Figura 14 – Espuma adicionada ao concreto base



Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Após a conclusão das misturas, determinava-se a trabalhabilidade através de ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, e fazia-se a moldagem dos corpos de provas com base nos métodos citados anteriormente.

3.3.2 Produção dos CBAM

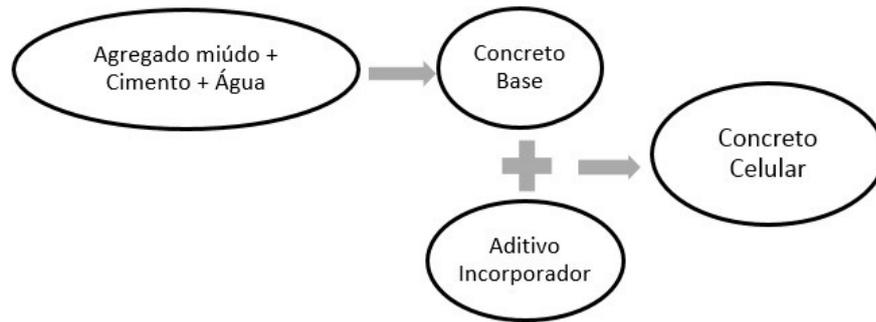
Como o método de dosagem é iterativo, foi necessário produzir 05 (cinco) CBAM, para obter o concreto com densidade de massa aparente no estado fresco próximo do parâmetro de entrada adotado.

Esses concretos receberam as seguintes denominações: CBAM78, CBAM55, CBAM43, CBAM33 e CBAM17, onde os números representam a porcentagem do aditivo em relação a massa do cimento, por exemplo, no concreto CBAM78 foi adicionado em massa 0,078% de aditivo em relação a massa do cimento.

3.3.2.1 Processo de mistura dos CBAM

A Figura 15, apresenta o processo de mistura dos concretos celulares com aditivo mecânico sem agregado graúdo.

Figura 15 – Processo de mistura dos concretos CBAM



Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Com base na Figura 15, pode-se observar que no processo de produção dos concretos celulares com bolhas de ar gerada na mistura, a única diferença com relação ao processo de mistura adotado para os concretos CESP, ocorre na terceira etapa, pois em vez de adicionar o volume de espuma é adicionado a quantidade em massa do aditivo químico em relação ao cimento, mantendo o mesmo tempo de mistura.

Após a conclusão das misturas, determinava-se a trabalhabilidade através de ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, e fazia-se a moldagem dos corpos de provas com base nos métodos citados anteriormente.

3.3.3 Produção dos CBAMG

Para avaliar a influência do agregado graúdo (pedrisco) de origem rochosa nos concretos celulares com bolhas de ar geradas na mistura, este trabalho fez uso basicamente de duas etapas:

➤ 1º Etapa:

É sabido que o agregado graúdo utilizado apresenta uma massa específica maior do que o agregado miúdo, então era de se esperar que ao substituir parte do miúdo pelo agregado graúdo a densidade do concreto final aumentaria. Dessa forma, não seria viável partir inicialmente com um concreto referência com densidade próxima do limite para concreto leve. O limitante de substituição do agregado graúdo adotado foi a densidade média aparente do concreto no estado fresco, pois o objetivo deste trabalho é produzir concreto com densidade abaixo de 2000 kg/m³, para que este seja classificado como concreto celular.

Dessa forma, nessa primeira etapa o concreto CBAM33 apresentado anteriormente foi utilizado como concreto referência, pois este apresentou uma densidade média aparente no

estado fresco próximo de 1750 kg/m^3 , além de uma boa trabalhabilidade e resistências moderadas.

A partir deste concreto foram produzidas 6 novas misturas, substituindo em massa parte do agregado miúdo pelo agregado graúdo. Estes concretos foram nomeados como CBAMG33/10, CBAMG33/20, CBAMG33/30 e CBAMG33/40, CBAMG33/50, CBAMG33/60, onde CBAMG significa: concreto celular com bolhas de ar gerada na mistura e com agregado graúdo, e o sufixo 33/10, por exemplo, representa a porcentagem de aditivo e a porcentagem de agregado miúdo substituído por agregado graúdo, respectivamente.

➤ 2º Etapa:

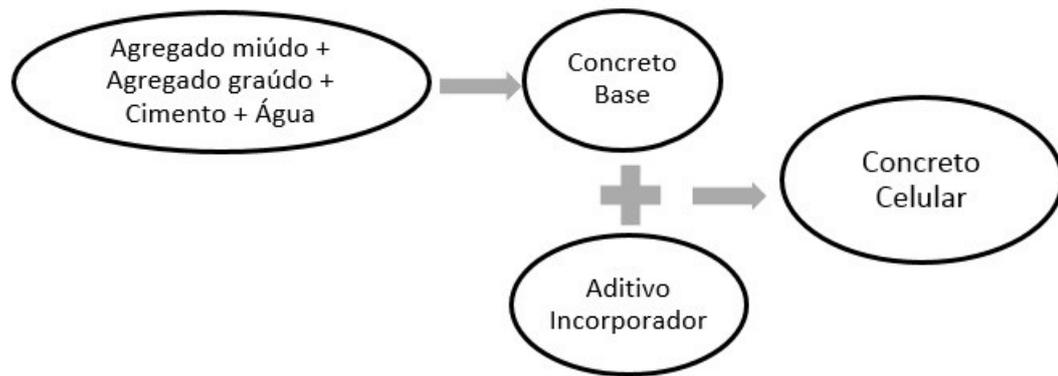
O concreto CBAM17 foi utilizado como referência nessa segunda etapa, pois com base nos resultados obtidos na 1º etapa, pôde-se observar que os concretos apresentaram uma melhora com relação a trabalhabilidade, e como o CBAM17 apresentou uma trabalhabilidade baixa, este trabalho produziu 2 novas misturas a partir deste concreto no intuito de obter uma melhora nesta propriedade.

O limitante de substituição do agregado graúdo na segunda etapa também foi a densidade média aparente no estado fresco. Dessa forma, para as duas amostras produzidas fez-se uma substituição de 10% e 20% do agregado miúdo em massa pelo agregado graúdo. Estas foram nomeados como: CBAMG17/10 e CBAMG17/20, seguindo a mesma ideia dos concretos produzidos na primeira etapa.

3.3.3.1 Processo de mistura dos CBAMG

A Figura 16, apresenta o processo de mistura dos concretos celulares com aditivo mecânico com agregado graúdo.

Figura 16 – Processo de mistura dos concretos CBAMG



Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Com base na Figura 16, pode-se notar que a sequência de mistura adotada na produção dos CBAMG é semelhante ao processo adotado para os CBAM. A diferença é devido a adição do agregado graúdo, gerando mais uma etapa no processo de mistura, totalizando 4 etapas, obedecendo a sequência a seguir:

➤ 1º Etapa:

Inicialmente era depositado o agregado miúdo e o agregado graúdo para serem misturado durante 60 segundos.

➤ 2º Etapa:

Na segunda etapa era adicionado o cimento aos agregados já homogêneos e misturava-se durante 60 segundos.

➤ 3º Etapa:

Nessa etapa, era adicionado água à mistura já com os agregados e o cimento homogêneos e misturava-se estes durante 60 segundos, em seguida desprendia-se o material da parede e do fundo do misturador por 30 segundos e misturava-se por mais 60 segundos, ou seja, esta etapa tinha uma duração média de 2,5 minutos, onde o produto final é o concreto base.

➤ 4º Etapa:

Na última etapa da mistura, era adicionado o aditivo espumígeno e misturava-se por 2,5 minutos, em seguida desprendia o material da parede e fundo do misturador por 30

segundos e misturava-se por mais 2,5 minutos, ou seja, esta etapa tinha uma duração média de 5 minutos e 30 segundos. O tempo de 5 minutos de mistura após a adição da espuma foi adotado com base nas recomendações apresentadas neste trabalho.

Após a conclusão das misturas, determinava-se a trabalhabilidade através de ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, e fazia-se a moldagem dos corpos de provas com base nos métodos citados anteriormente.

3.3.4 Moldagem, adensamento e cura dos corpos-de-prova

A moldagem e cura dos corpos-de-prova foram realizadas conforme as recomendações indicadas na NBR 5738:2015 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), fazendo-se uma ressalva apenas na etapa de adensamento.

Para cada concreto produzido neste trabalho, foram moldados 6 corpos de provas em moldes cilíndricos com dimensões básica (diâmetro) de 10 cm e conseqüentemente 20 cm de altura, conforme as recomendações normativas.

Inicialmente os moldes cilíndricos eram pesados e identificados, para que suas massas posteriormente pudessem ser descontadas durante o cálculo das densidades de massa aparente no estado fresco.

Os preenchimentos dos moldes cilíndricos utilizados para moldar os corpos de provas foram realizados em 2 camadas, onde ao término de cada camada dava-se em média cinco leves batidas nas paredes laterais, pois sabe-se que para os concretos celulares deve-se evitar o adensamento para não romper as bolhas de ar.

Deve-se ressaltar que este trabalho adotou esse procedimento de preenchimento com o objetivo de minimizar problemas relacionados com a heterogeneidade entre os corpos-de-prova, pois sabe-se que para o concreto celular devido à distribuição das bolhas de ar dentro do concreto é natural a ocorrência desta heterogeneidade.

Depois de preenchidos (Figura 17)), estes moldes já identificados eram pesados. Em seguida eram cobertos com placas de vidro, e após vinte e quatro horas eram desmoldados (Figura 17), identificados e imersos no tanque com água saturada de cal para a cura, onde ficavam até o dia dos ensaios de resistência à compressão. A temperatura durante o período de cura não foi verificada.

Figura 17 – Molde preenchido e identificado após desmolde



Fonte: Elaborada pelo autor (2015)

3.4 Ensaios no estado fresco

As propriedades dos concretos produzidos avaliadas foram: consistência (trabalhabilidade), densidade de massa aparente e teor de ar incorporado.

A consistência dos concretos celulares, foi realizada pelo ensaio do abatimento do tronco de cone, conforme as recomendações citadas na NBR NM 67:1998 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998) e modificado para atendimento ao tipo de concreto. O preenchimento do cone com concreto foi realizado em três camadas sem adensamento, apenas ao término de cada camada dava-se em média 5 leves batidas na lateral do cone, novamente para evitar o rompimento das bolhas.

3.4.1 Densidade de massa aparente

Conforme foi relatado na revisão bibliográfica, a densidade do concreto celular no estado fresco deve ser menor que 2000 kg/m^3 e a densidade do concreto base deve estar compreendida no intervalo de 2000 kg/m^3 até 2800 kg/m^3 . Dessa forma, para cada concreto produzido este trabalho avaliou-se, conforme serão apresentadas, as densidades no estado fresco do concreto base e do concreto celular.

3.4.1.1 Concreto base

Sabe-se que o volume de uma mistura de concreto pode ser estimado somando o volume dos componentes envolvidos, então após a definição das parcelas em massa de cada material, é possível calcular o volume inicial da mistura, ou seja, o volume do concreto base,

antes do aumento do volume devido a incorporação do ar, pois a massa específica de cada material utilizado é conhecida.

Assim, dividindo a massa de cada material pela sua massa específica, tem-se a parcela de volume que este representa na mistura. A Equação 3.4 apresenta o cálculo do volume inicial.

$$V_{inicial} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\rho_i} \quad (3.4)$$

Onde, n é número de material envolvidos na mistura, m é a parcela em massa de cada elemento e ρ é a massa específica de cada material.

Sabendo ainda que a densidade pode ser determinada fazendo-se o quociente entre a massa de um corpo e o volume ocupado por este, então é possível estimar a densidade do concreto base no estado fresco através da Equação 3.5.

$$D_{inicial,teórica} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{V_{inicial}} \quad (3.5)$$

3.4.1.2 Concreto celular

Conforme relatado anteriormente para cada concreto produzido foram preenchidos 6 moldes cilíndricos. Para cada molde foi determinada a densidade de massa aparente no estado fresco com base nas recomendações da NBR 12644:2014 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), sendo a densidade média dos moldes adotada como densidade de massa aparente no estado fresco para o concreto celular produzido.

3.4.2 Teor de ar incorporado

Como foi apresentado na revisão bibliográfica, os concretos celulares devem obter densidades de massa aparente no estado fresco abaixo de 2000 kg/m³, através da incorporação de ar na mistura. Dessa forma, é importante estimar o teor de ar incorporado (incorporação), pois o projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1, limita a 37% do volume total de concreto fresco, para concretos celulares com fins estruturais aplicados em paredes moldados no local.

Assim, tendo conhecido o volume inicial da mistura, para conhecer o aumento do volume da mistura devido à incorporação do ar, é necessário conhecer o volume final do concreto e então subtrair deste o volume inicial previamente conhecido.

Para estimar o volume final da mistura após a produção de cada concreto, este trabalho somou o volume de cada corpo de prova preenchido com o volume do concreto excedente, ou seja, aquele concreto que não foi utilizado para preencher os moldes.

Conhecendo a densidade de massa aparente do concreto no estado fresco, então é possível calcular o volume do concreto excedente, dividindo o valor do peso deste pela densidade. A Equação 3.6 e a Equação 3.7 apresentam respectivamente, o volume final e o aumento do volume da mistura devido o teor de ar incorporado.

$$V_{final} = \left(\sum_{i=1}^n V_i \right) + \frac{p}{d} \quad (3.6)$$

$$\Delta V = V_{final} - V_{inicial} \quad (3.7)$$

Onde, n é número de corpos de provas preenchidos, V é volume do corpo de prova, p é peso do concreto excedente e d é a densidade do concreto no estado fresco.

Conhecendo o aumento do volume da mistura e o volume inicial, é possível então estimar o teor de ar incorporado, através da equação 3.8.

$$I = \frac{\Delta V}{V_{final}} \times 100 \quad (3.8)$$

Sendo I dado em porcentagem (%).

3.5 Ensaio no Estado Endurecido

No estado endurecido este trabalho determinou, através de métodos normatizados, as resistências à compressão dos corpos de provas moldados.

3.5.1 Resistência à compressão

Este trabalho realizou ensaios de resistência à compressão segundo as recomendações da NBR 5739:2007 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), nas idades de 7, 28 e 56 dias. Para cada idade eram ensaiados dois corpos de prova, pois assim era possível fazer uma média e com isso obter resultados mais confiáveis. A Figura 18 mostra o ensaio de resistência à compressão de um corpo de prova.

Figura 18 – Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Elaborada pela autor (2015).

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Concreto Celular com Espuma Pré-Formada (CESP)

Tendo definido os parâmetros iniciais (densidade de massa aparente do concreto no estado fresco, consumo de cimento por m³, e o fator a/c), massa específica (cimento, água e agregado) e a densidade das espumas geradas para cada proporção de solução aditivo/água (1/20, 1/40 e 1/60) foi possível formular os concretos através do método adotado.

As composições das misturas dos concretos celulares CESP dosados para um volume de concreto final de 1 m³, apresentadas na Tabela 19, foram calculadas como no exemplo seguinte:

- Quantidade de Areia Seca por metro cúbico:

$$A_s = \gamma_{cf} - C_c - (a/c \times C_c) \quad (2.5)$$

$$A_s = 1900 - 400 - (0,5 \times 400) = 1300 \text{ kg/m}^3$$

- Volume de Espuma

$$V_{esp} = 1000 - \frac{A_s}{\gamma_{areia}} - \frac{C_c}{\gamma_c} - \left(\frac{a}{c} \times C_c\right) \quad (2.6)$$

$$V_{esp} = 1000 - \frac{1300}{2,63} - \frac{400}{3,15} - (0,5 \times 400) = 179 \text{ l/m}^3$$

- Água Corrigida

$$V_{\acute{a}gua} = (a/c \times C_c) - (V_{esp} \times \gamma_{esp}) \quad (2.7)$$

$$V_{\acute{a}gua} = (0,5 \times 400) - (179 \times 0,0316) = 194,5 \text{ l/m}^3$$

Tabela 19 – Composições dos CESP

Concretos	Areia (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Espuma (L/m ³)
CESP1/20	1.300	400	194,5	179
CESP1/40	1.300	400	194,0	179
CESP1/60	1.300	400	193,5	179

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Pode-se observar nos dados apresentados na Tabela 19 que em termos de quantitativo entre os materiais constituintes nas misturas, ocorre uma pequena diferença na água, pois esta é corrigida no final devido à quantidade de água presente no volume de espuma, sendo esta

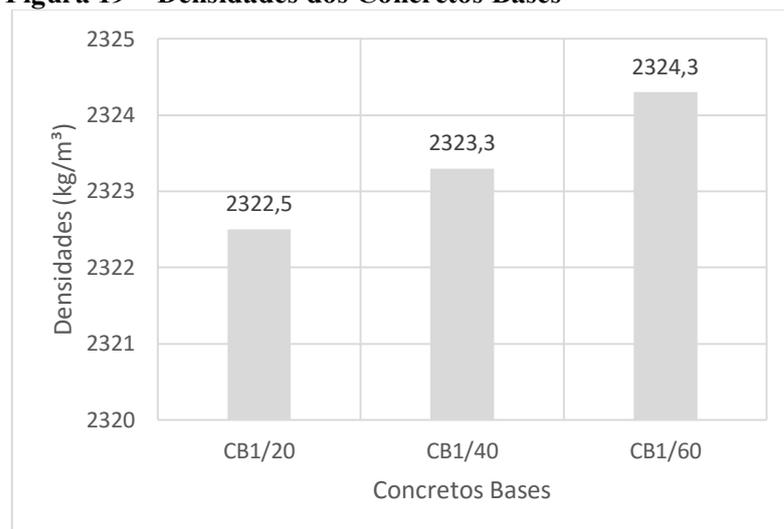
correção dependente das densidades de cada espuma, mas como os valores de densidades obtidos das espumas foram muito próximos, então praticamente não há diferença na correção final da água entre os concretos.

A seguir serão abordadas e discutidas as propriedades dos concretos CESP1/20, CESP1/40 e CESP1/60 no estado fresco: (densidade, consistência, teor de ar incorporado); e no estado endurecido: (resistência à compressão).

4.1.1 Propriedades no estado fresco

A Figura 19 apresenta uma estimativa das densidades no estado fresco dos concretos bases, denominados de CB1/20, CB1/40 e CB1/60 utilizados para obter os concretos CESP1/20, CESP1/40 e CESP1/60, respectivamente.

Figura 19 – Densidades dos Concretos Bases



Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

As densidades no estado fresco dos concretos bases estimadas, apresentaram valores muito próximos, pois praticamente não há diferença nos seus traços, ocorrendo uma pequena diferença apenas no elemento água, devido a correção da água existente nas espumas. Além disso pode-se observar que os valores apresentados ficaram dentro do limite proposto para concretos bases pelo projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1.

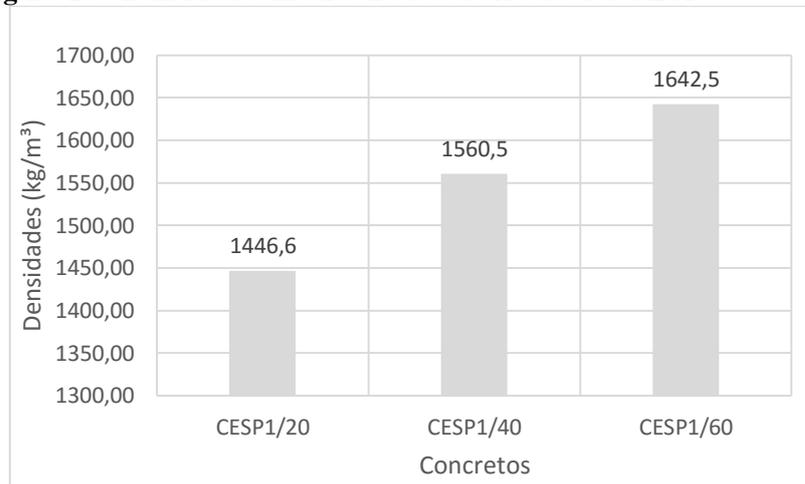
A Tabela 20 apresenta as densidades de massa aparente dos corpos de prova dos concretos produzidos no estado fresco.

Tabela 20 – Densidades dos CESP

CPs	CESP1/20	CESP1/40	CESP1/60
	Densidades (kg/m ³)	Densidades (kg/m ³)	Densidades (kg/m ³)
1	1.448,3	1.544,2	1.657,0
2	1.442,2	1.564,2	1.652,8
3	1.453,3	1.564,7	1.628,7
4	1.444,8	1.580,1	1.629,9
5	1.448,7	1.547,8	1.637,7
6	1.442,5	1.562,0	1.649,1
Desvio Padrão	4,3	13,0	12,1

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A Figura 20 apresenta as densidades médias dos concretos CESP1/20, CESP1/40 e CESP1/60 calculados com base nos dados apresentados na Tabela 20.

Figura 20 – Densidades médias no estado fresco dos CESP

Fonte: Elaborada pelo Autor (2015).

Com base nos dados apresentados na Figura 20 e na Tabela 20, pode-se notar que o resultado encontrado neste trabalho condiz com o relatado no referencial bibliográfico, pois à medida que se aumenta o teor do aditivo na solução de diluição, ocorre o aumento do volume de espuma gerado e por consequência há uma diminuição de densidade. Além disso é possível observar com base nos valores de desvio padrão, que relata a dispersão dos dados experimentais, que o concreto CESP1/20 obteve uma distribuição de bolhas de ar com uma melhor uniformidade dentro do concreto, quando comparado com o CESP1/40 e o CESP1/60.

No entanto, vale salientar que para as dosagens definidas o volume de espuma que precisava ser adicionado era igual para as três amostras, ou seja, as densidades finais das amostras deveriam ter apresentados valores próximos do parâmetro de entrada estimado que foi de 1900 kg/m³, mas na ordem crescente como encontrado nos concretos produzidos.

Este resultado mostra que o volume de espuma adicionado nas misturas ainda continha aditivo sem sofrer expansão, e após ser adicionado a mistura a ação mecânica do misturador gerou mais espumas, aumentando assim o volume final sem ganho de massa e consequentemente reduzindo a densidade final destes concretos.

Para determinar o teor de ar incorporado através do método apresentado na seção 3, foram repetidas três produções para cada mistura dos concretos CESP, onde o volume inicial do concreto, ou seja, volume do concreto base era de 24,5 litros e o volume dos concretos celulares produzidos com o aditivo de pré-espuma esperado era de 30 litros. Dessa forma, pode-se dizer que o volume de ar incorporado necessário para os concretos CESP era de 5,5 litros, ou seja, o equivalente a um teor de ar incorporado de 18,3% com relação ao volume final. A Tabela 21 apresenta o teor de ar incorporado em porcentagem com relação ao volume inicial do concreto.

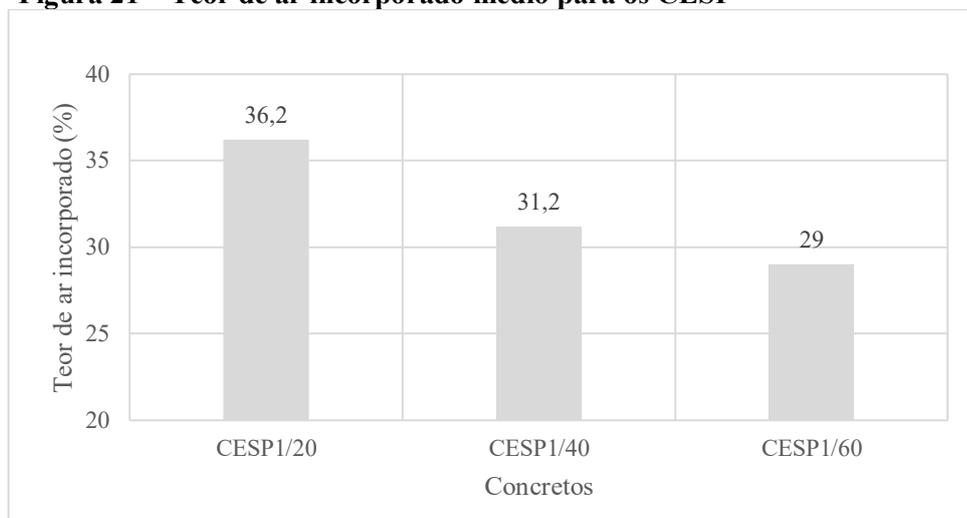
Tabela 21 – Teor de ar incorporado para os CESP

Produção	CESP1/20	CESP1/40	CESP1/60
	Ar Incorporado (%)	Ar Incorporado (%)	Ar incorporado (%)
1ª	36,7	30,8	29,6
2ª	36,2	30,2	29,2
3ª	35,7	32,5	28,2

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A Figura 21 apresenta o teor de ar incorporado médio em porcentagem com relação ao volume inicial para os CESP, calculados com base na Tabela 21.

Figura 21 – Teor de ar incorporado médio para os CESP



Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Observa-se que todos os concretos CESP apresentaram um teor de ar incorporado menor do que os 37% recomendado pelo projeto de norma em votação ABNT/CEE 185:000.01- 001- 1. Além disso, todos apresentaram uma incorporação acima dos 18,3% necessários, acarretando em valores de densidades inferior ao parâmetro de entrada de 1900 kg/m³. Isto aconteceu, pois o volume de espuma adicionado nas misturas ainda continha aditivo sem sofrer expansão, e após ser adicionado à mistura a ação mecânica do misturador gerou mais espumas, aumentando o teor de ar incorporado que por sua vez reduziu a densidade dos concretos produzidos.

Sabendo que o aumento do volume do concreto celular devido ao teor de ar incorporado não altera o peso do concreto base, pois o ar não pesa, então pode-se estimar numericamente a densidade do concreto celular, fazendo-se o quociente do peso do concreto base para 1 m³ pelo volume final do concreto celular, por exemplo, o peso do CB1/20 para 1 m³ é de 2322,5 kg e o volume final do concreto CESP1/20 alcançado após a incorporação de ar foi de 1,57 m³, então a densidade estimada de massa aparente no estado fresco é de 1479 kg/m³, valor este muito próximo da densidade apresentada anteriormente obtida experimentalmente.

O responsável pela geração de espuma para uma dada solução de diluição é o gerador. Dessa forma, a qualidade deste é de suma importância para a produção do concreto, pois é necessário que seja eficiente, ou seja, deve ser capaz de produzir a máxima quantidade de espuma que o aditivo pode gerar, pois só assim irá menos aditivo para o concreto junto com o volume de espuma sem sofrer expansão, impedindo que este gere mais espuma devido a ação mecânica do misturador, reduzindo assim a variabilidade do experimento, obtendo concretos com densidades próximos do parâmetro inicial definido.

Com relação a trabalhabilidade dos CESP, a Figura 22 mostra o CESP1/20 após o ensaio do slump test realizado.

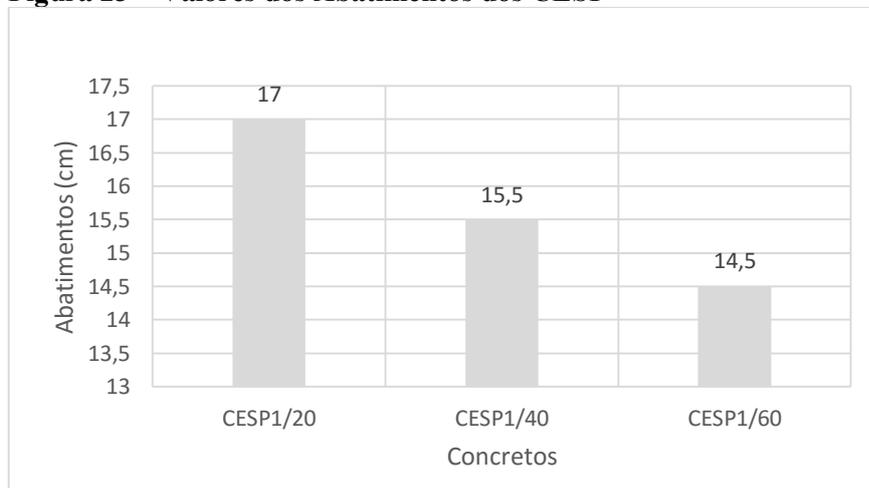
Figura 22 – Abatimento do CESP1/20



Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A Figura 23 apresenta os valores de abatimento dos concretos obtido através do ensaio de abatimento do tronco de cone mais conhecido como slump test.

Figura 23 – Valores dos Abatimentos dos CESP



Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

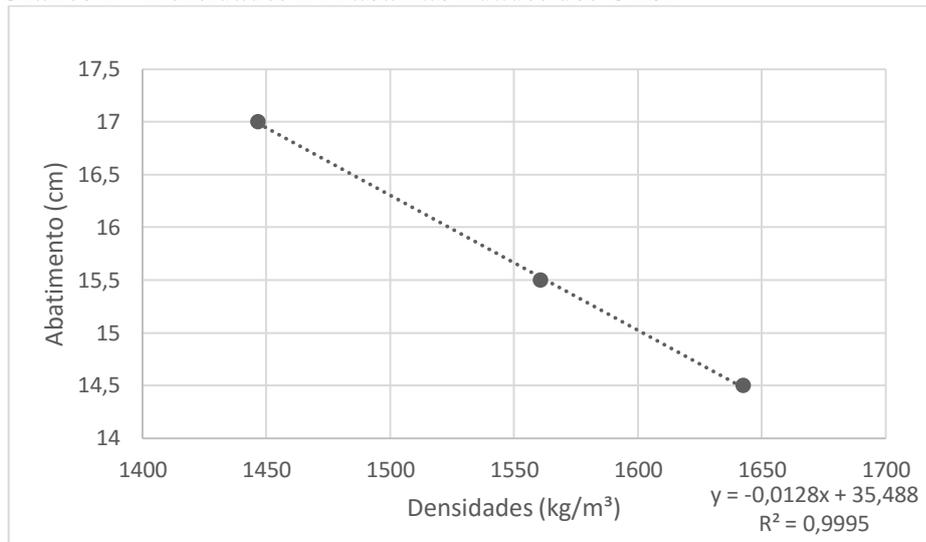
Com base nos valores de abatimento dos concretos CESP, pode-se classificar a trabalhabilidade destes conforme a NBR 8953:2015 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) da seguinte forma:

- ✓ CESP1/20: Concreto plástico lançado por bombeamento – S160;
- ✓ CESP1/40: Concreto de aplicação normal, com lançamento convencional – S100;

- ✓ CESP1/60: Concreto de aplicação normal, com lançamento convencional – S100.

O Gráfico 1 apresenta a relação do abatimento com a densidade do concreto no estado fresco, além da equação linear que representa a linha de tendência para os dados obtidos junto com o valor do coeficiente de correlação (R) que indica quão essa equação é confiável para representar os dados experimentais.

Gráfico 1 – Densidades x Trabalhabilidades dos CESP



Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

É possível identificar que os resultados de abatimento (trabalhabilidade) e a relação densidade e trabalhabilidade apresentados na Figura 23 e no Gráfico 1 respectivamente, apresentaram valores coerentes, pois quanto maior o teor de aditivo na solução de diluição maior será a quantidade de espuma gerada, provocando uma redução na densidade, pois há um aumento de volume sem praticamente ocorrer um acréscimo no peso desta mistura, além de tornar este concreto mais fluido, pois as bolhas de ar da espuma funcionam como agregados sem atritos proporcionando uma maior fluidez a mistura.

4.1.2 Propriedades no estado endurecido

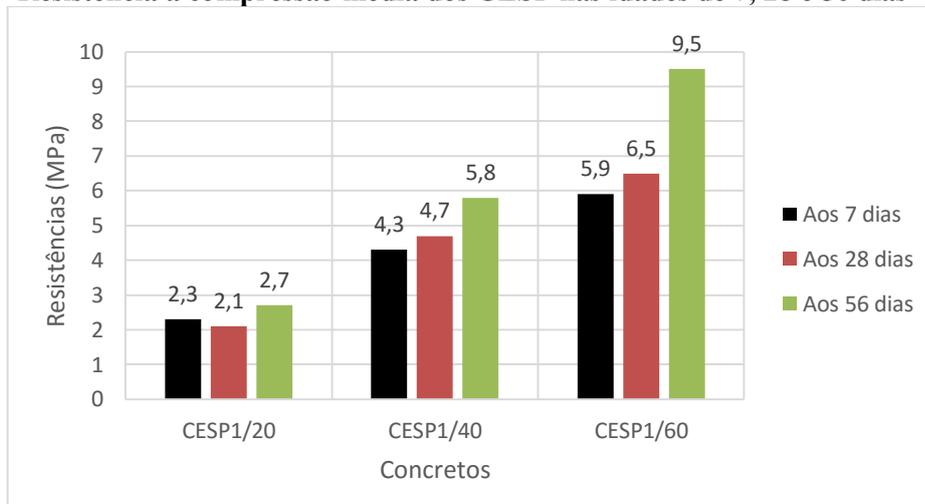
A Tabela 22 apresenta as resistências à compressão de cada corpo de prova dos concretos produzidos nas idades de 7, 28 e 56 dias, junto com as suas respectivas densidades no estado fresco.

Tabela 22 – Resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias dos CESP

Idade	Cps	CESP1/20		CESP1/40		CESP1/60	
		Densidade (kg/m ³)	Resistência (MPa)	Densidade (kg/m ³)	Resistência (MPa)	Densidade (kg/m ³)	Resistência (MPa)
$f_{c,7}$	1	1.448,3	2,4	1544,2	4,1	1657,0	6,0
	2	1.442,2	2,2	1564,2	4,5	1652,8	5,8
$f_{c,28}$	3	1.453,3	2,2	1564,7	4,7	1628,7	6,4
	4	1.444,8	2,0	1580,1	4,6	1629,9	6,5
$f_{c,56}$	5	1.448,7	3,2	1547,8	5,4	1637,7	8,5
	6	1.442,5	2,2	1562,0	6,2	1649,1	10,5

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Analisando a Tabela 22, pode-se observar que para aquelas densidades maiores, as resistências obtidas nas idades de 7, 28 e 56 dias apresentaram valores superiores. Através da Figura 24 que apresenta os valores médios das resistências encontradas para os concretos produzidos nas idades analisadas, pode-se entender melhor este conceito, pois sabe-se que CESP1/60 apresentou uma densidade maior que o CESP1/40, assim como o CESP1/40 obteve densidade superior ao CESP1/20.

Figura 24 – Resistência à compressão média dos CESP nas idades de 7, 28 e 56 dias

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Com base nas recomendações do projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1, dentre os concretos produzidos com aditivos de pré-espuma, o CESP1/20 e o CESP1/40 não poderiam ser aplicados com fins estruturais em paredes de edificações moldadas no local, pois os valores de resistência média dos corpos de prova aos 28 dias obtidos foram menores que 5 MPa. No entanto, segundo a NBR 12646:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) o concreto CESP1/40 poderia ser utilizado em paredes de edificações térreas (com 1 pavimento), pois para tal aplicação a resistência mínima é de 2,5 MPa.

Já o concreto CESP1/60 apresentou um teor de ar incorporado abaixo de 37 %, resistência do corpo de prova aos 28 dias de 6,5 MPa, podendo ser aplicado com fins estruturais em paredes de edificações de até 2 pavimentos, localizadas em regiões classificadas na classe de agressividade I, após análises de tensões de solicitações e de resistências, segundo o projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1.

A Tabela 23 apresenta uma comparação entre as resistências à compressão encontradas por Teixeira Filho e Tezuka (1992), apresentado no referencial para as densidades de 1300, 1500 e 1700 kg/m³, com as resistências aos 28 dias dos concretos CESP que atingiram densidades próximas dessas.

Tabela 23 – Resistências à compressão aos 28 dias

Densidades (kg/m ³)	Teixeira Filho e Tezuka (1992)	CESP
	f _{c,28} (MPa)	f _{c,28} (MPa)
1300 à 1450	2,2	2,1
1500 à 1600	4,5	4,7
1600 à 1700	7,1	6,5

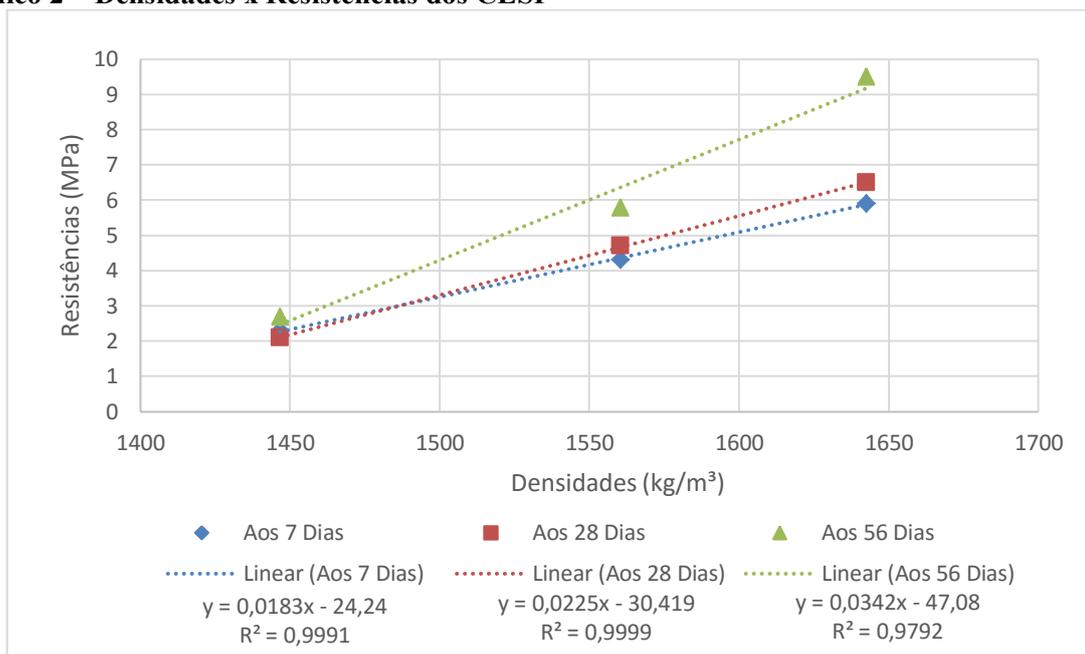
Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Com base na Tabela 23, pode-se observar que os concretos obtidos apresentaram resistências muito próximas das resistências obtidas por Teixeira Filho e Tezuka (1992).

Com base nos dados expostos na Figura 24 é possível identificar que para os concretos com densidades menores que atingiram consequentemente resistências menores já nas primeiras idades, não ocorre uma evolução nas idades superiores nesta propriedade na mesma proporção que aqueles concretos que alcançam resistência maiores já nas primeiras idades. Por exemplo, o CESP1/20 aumentou 17% da sua resistência alcançadas aos 7 dias quando atingiu os 56 dias, enquanto o CESP1/40 e o CESP1/60 aumentaram 35% e 61%, respectivamente.

O Gráfico 2 abaixo, mostra uma tendência linear entre as resistências à compressão dos concretos CESP para diferentes densidades nas idades de 7, 28 e 56 dias.

Gráfico 2 – Densidades x Resistências dos CESP



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Pode-se observar através do Gráfico 2, que os resultados obtidos seguem linhas de tendências cujo valor "R" ficaram muito próximos de 1, mostrando assim uma boa confiabilidade nos resultados.

Dessa forma, é possível fazer uso das equações lineares que representam as resistências atingidas pelos CESP nas idades de 7, 28 e 56 dias, para estimar quais as resistências que se obteria com concretos de densidades maiores, por exemplo, para um concreto com uma densidade de 1900, 1950 e 2000 kg/m³ as resistências alcançadas aos 56 dias seriam: 17,9 MPa, 19,6 MPa e 21,3 MPa, respectivamente.

Com isso para os concretos com densidades no extremo do limite de classificação como leve, os concretos celulares com espuma pré-formada com os materiais e métodos utilizados neste trabalho, atingiriam resistências maiores que 20 MPa, que segundo o projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1 poderiam ser utilizados com fins estruturais em paredes de edifícios, moldadas no local, para edificações com mais de 5 pavimentos e localizada em qualquer uma das classes de agressividade.

4.2 Concreto Celular com Bolhas de Ar Geradas na Mistura (CBAM)

Com os parâmetros iniciais adotados (densidade de massa aparente do concreto no estado fresco, consumo de cimento por m³, e o fator a/c), conhecidos as massas específicas (cimento, água e agregado) e fixados as porcentagens dos aditivos em massa com relação a

massa do cimento, é possível calcular as parcelas em massa de cada componente, para uma estimativa de um volume final na mistura após a incorporação de ar de 1 m^3 .

As composições das misturas dos concretos celulares CBAM, apresentadas na Tabela 24, foram calculadas como no exemplo seguinte:

➤ Areia Seca

$$A_s = \gamma_{cf} - C_c - \left(\frac{a}{c} \times C_c\right) - \left(\frac{Ad}{c} \times C_c\right) \quad (3.1)$$

$$A_s = 1900 - 400 - (0,5 \times 400) - (0,00078 \times 400) = 1300 \text{ kg/m}^3$$

Tabela 24 – Traços dos CBAM

Concretos	Areia (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (%)
CBAM78	1.300,00	400,00	200,00	0,078
CBAM55	1.300,00	400,00	200,00	0,055
CBAM43	1.300,00	400,00	200,00	0,043
CBAM33	1.300,00	400,00	200,00	0,033
CBAM17	1.300,00	400,00	200,00	0,017

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Pode-se observar nos dados apresentados na Tabela 24, que em termos de quantitativo entre os materiais constituintes nas misturas, não houve diferença no que diz respeito a areia, cimento e água. Como as porcentagens do aditivo com relação ao cimento em massa adotadas foram pequenas, então praticamente não há diferença na quantidade de agregado miúdo (areia) para as composições adotadas.

A seguir serão abordados e discutidas as propriedades no estado fresco: densidade, teor de ar incorporado e consistência, e no estado endurecido: resistência à compressão nas idades de 7, 28 e 56 dias, para os concretos CBAM78, CBAM55, CBAM43, CBAM33 e CBAM17.

4.2.1 Propriedades no estado fresco

Com base nos traços apresentados para os concretos CBAM, pôde-se observar que não há diferenças nos valores em massa dos elementos que compõem as misturas. Dessa forma, pode-se dizer que o concreto base (agregado miúdo, cimento e água) para estes concretos celulares são iguais, e apresenta uma densidade estimada no estado fresco de 2314 kg/m^3 , obedecendo a recomendação do projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1.

A Tabela 25 apresenta as densidades encontradas experimentalmente para os corpos de prova dos concretos celulares produzidos.

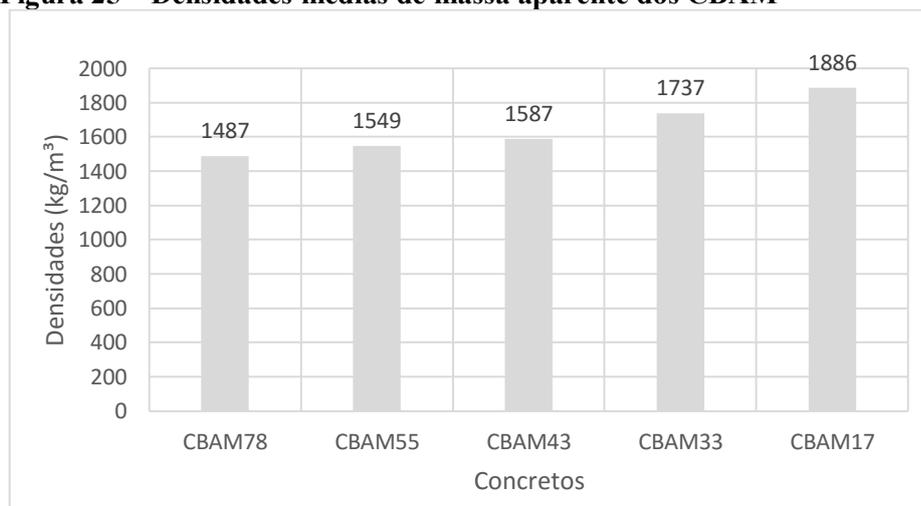
Tabela 25 – Densidades de massa aparente dos CBAM

CPs	CBAM78	CBAM55	CBAM43	CBAM33	CBAM17
	Densidades (kg/m ³)				
1	1.471	1.516	1.573	1.643	1.822
2	1.516	1.592	1.605	1.815	1.911
3	1.471	1.522	1.561	1.669	1.885
4	1.503	1.567	1.605	1.790	1.911
5	1.484	1.535	1.592	1.726	1.892
6	1.478	1.561	1.586	1.777	1.898
Desvio Padrão	18,3	29,5	17,8	69,4	33,3

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A Figura 25 apresenta as densidades médias dos concretos CBAM calculados com base nos dados apresentados na Tabela 25.

Figura 25 – Densidades médias de massa aparente dos CBAM



Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

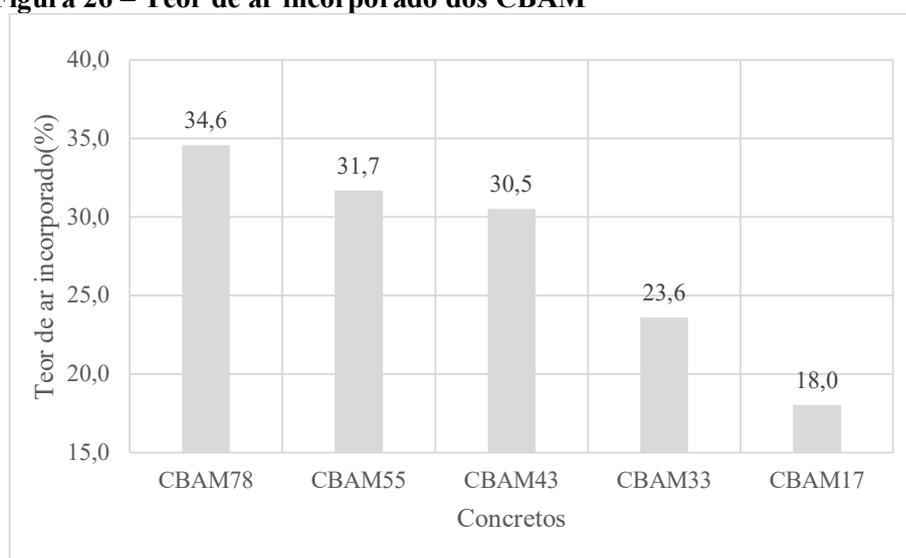
Com base nos dados apresentados na Figura 25 e na Tabela 25, pode-se notar que a medida que se aumenta a porcentagem do aditivo na mistura, ocorre uma queda na densidade provocada pelo aumento da concentração de bolhas de ar na mistura gerado pela ação mecânica do misturador.

A Figura 26 apresenta o teor de ar incorporado (incorporação) para cada concreto produzido, calculados conforme o procedimento apresentado na seção 3, onde o volume inicial era de 12,3 litros e o final desejado após a incorporação era de 15 litros, ou seja, era necessário ganhar 2,7 litros, o equivalente a uma incorporação de 18% para obter o concreto com características próximas dos parâmetros de entrada. Vale ressaltar que o teor de ar

incorporado necessário para os CBAM apresentou o mesmo valor dos concretos CESP, pois os parâmetros de entrada que formam o concreto base foram mantidos iguais para ambos os concretos.

Dessa forma, aqueles concretos que apresentar uma incorporação maior do que 18%, consequentemente terá uma densidade no estado fresco menor que 1900 kg/m^3 , enquanto aqueles que apresentarem uma incorporação menor do que 18% terá uma densidade acima daquela adotada nos parâmetros de entrada do método.

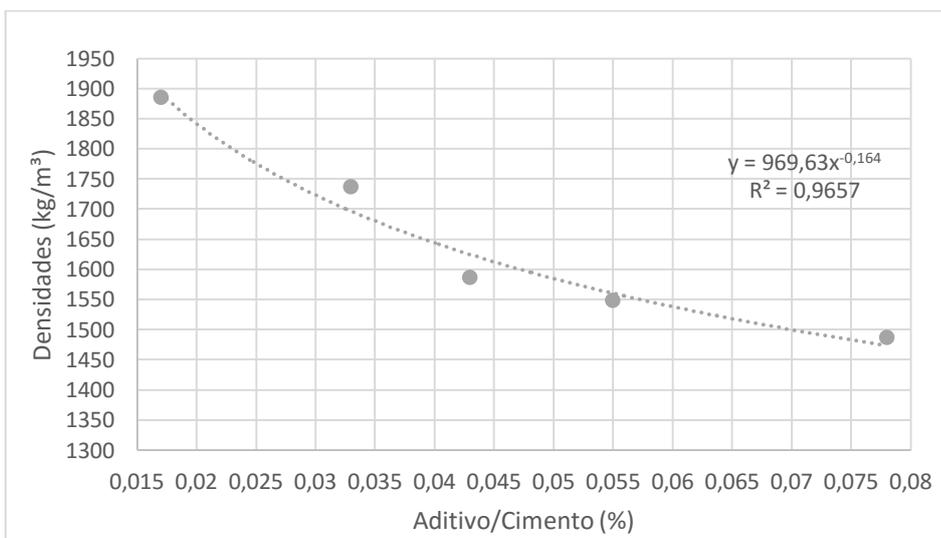
Figura 26 – Teor de ar incorporado dos CBAM



Fonte: Elaborada pelo Autor (2015).

Analisando as Figura 25 e Figura 26, confirma-se a hipótese de que quanto maior o teor de ar incorporado menor será a densidade do concreto obtido, além de concluir que a porcentagem de 0,018% de aditivo/cimento adotada para a mistura CBAM17, foi a correta, pois esse concreto obteve uma densidade média próximo de 1900 kg/m^3 , além de apresentar uma incorporação de 18%. Também é possível verificar que todos os concretos CBAM apresentaram uma incorporação menor que 37% recomendado pelo projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1 para concreto celular estrutural.

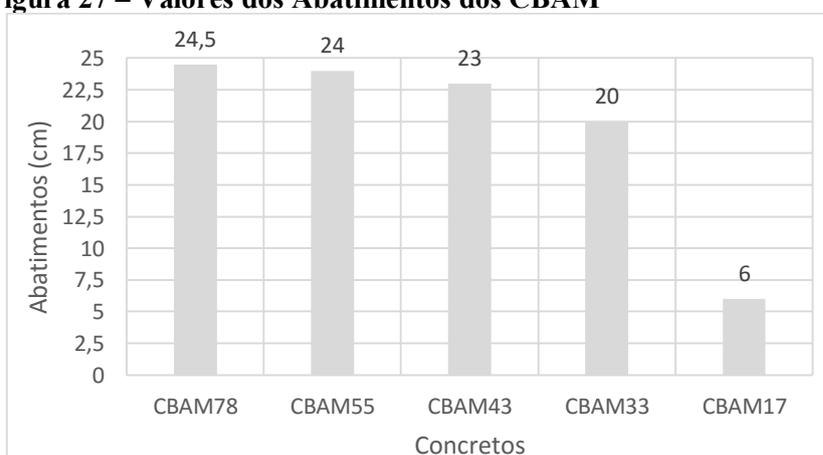
Através dos dados apresentados na Figura 25 e na Tabela 25, foi possível gerar o Gráfico 3, onde a partir deste pode-se estimar aproximadamente qual a porcentagem de aditivo deve-se adotar para alcançar uma determina densidade.

Gráfico 3 – Aditivo/Cimento x Densidades

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

É possível observar fazendo-se uma análise no Gráfico 3, que a porcentagem de aditivo em relação ao cimento adicionado ao concreto, não possui relação linear com as densidades, além de mostrar que aumentando-se a porcentagem do aditivo a mistura poderá atingir um nível máximo de incorporação, ou seja, a partir deste ponto a quantidade de aditivo que será adicionado a mais não fará com que a densidade diminua sem que ocorra uma alteração no processo de mistura ou nos elementos envolvidos.

No que diz respeito a trabalhabilidade, a Figura 27 apresenta os valores de abatimento dos concretos através de ensaio do abatimento do tronco de cone de acordo com NBR NM 67:1998 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998), fazendo-se a ressalva apenas para não adensar, tendo dessa forma um parâmetro de medida da trabalhabilidade.

Figura 27 – Valores dos Abatimentos dos CBAM

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A Figura 28 mostra o CBAM78, após o ensaio do slump test realizado.

Figura 28 – Abatimento do CBAM78

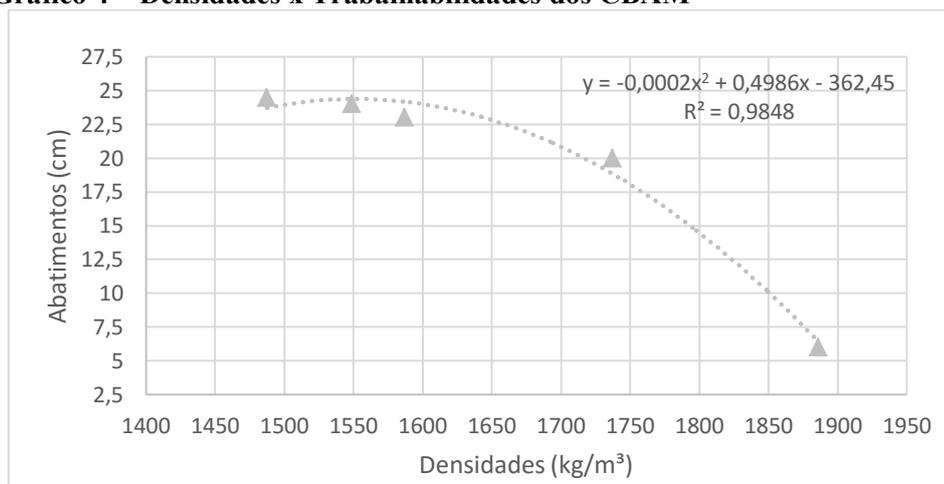


Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Com base nos valores de abatimento dos concretos CBAM pode-se classificar a trabalhabilidade destes, conforme a NBR 8953:2015 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) da seguinte forma:

- CBAM78: Concreto fluido – S220;
- CBAM55: Concreto fluido – S220;
- CBAM43: Concreto fluido – S220;
- CBAM33: Concreto plástico – S160; e
- CBAM17: Concreto pouco trabalhável, aplicado em alguns tipos de pavimento e elementos de fundação – S50.

O Gráfico 4, apresenta a relação da densidade de massa aparente no estado fresco média dos concretos com o abatimento, além de apresentar a linha de tendência para os dados obtidos.

Gráfico 4 – Densidades x Trabalhabilidades dos CBAM

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Era de se esperar que os concretos que apresentassem uma menor densidade consequentemente apresentariam uma melhor trabalhabilidade, pois as bolhas de ar gerada pelo o aditivo espumígeno através da ação mecânica do misturador funcionam como um agregado miúdo sem atrito proporcionando uma maior fluidez a mistura.

4.2.2 Propriedades no estado endurecido

A Tabela 26 apresenta as resistências à compressão nas idades de 7, 28 e 56 dias de cada corpo de prova dos concretos produzidos, junto com as suas respectivas densidades no estado fresco.

Tabela 26 – Resistência à Compressão aos 7, 28 e 56 Dias dos CBAM

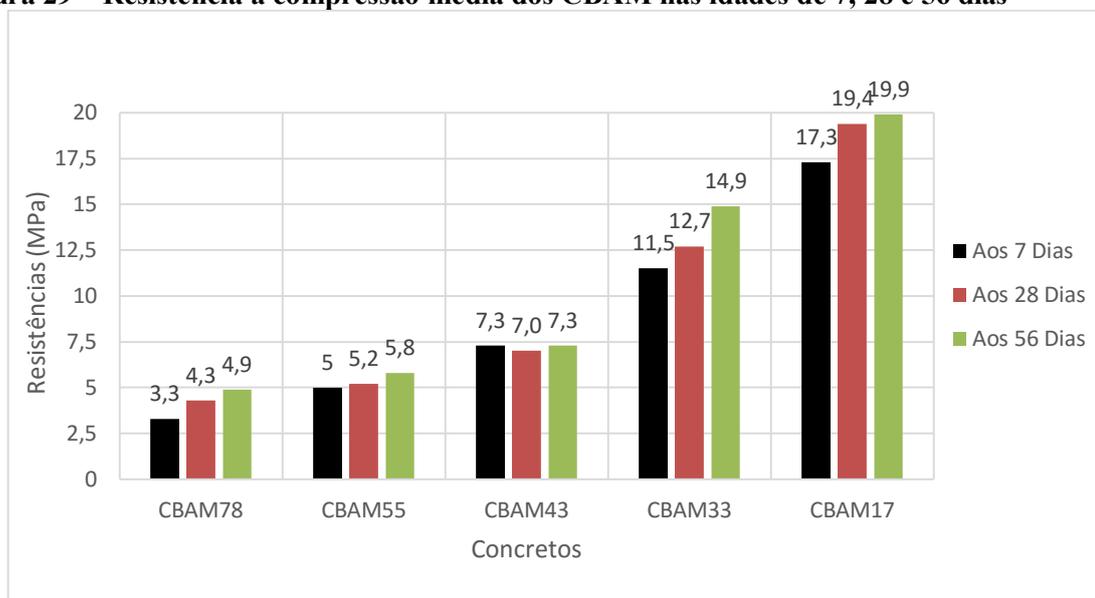
Concretos	Aos 7 Dias		Aos 28 Dias		Aos 56 Dias	
	Densidade (kg/m³)	Resistência (MPa)	Densidade (kg/m³)	Resistência (MPa)	Densidade (kg/m³)	Resistência (MPa)
CBAM78	1.471,3	3,1	1.471,3	3,2	1.484,1	5,0
	1.515,9	3,4	1.503,2	5,4	1.477,7	4,7
CBAM55	1.515,9	4,3	1.522,3	4,3	1.535,0	5,7
	1.592,4	5,7	1.566,9	6,0	1.560,5	5,9
CBAM43	1.573,2	7,0	1.560,5	6,8	1.592,4	7,6
	1.605,1	7,5	1.605,1	7,0	1.586,0	7,0
CBAM33	1.643,3	7,8	1.668,8	11,3	1.726,1	13,3
	1.815,3	15,2	1.789,8	14,1	1.777,1	16,4
CBAM17	1.821,7	15,9	1.885,4	21,0	1.891,7	22,0
	1.910,8	18,6	1.910,8	17,8	1.898,1	17,8

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Os dados apresentados na Tabela 26, mais uma vez confirmam que aqueles concretos que apresentam maiores densidades consequentemente apresentam maiores resistência à compressão, pois quanto maior a densidade menor a incorporação, ou seja, menor será o

índice de vazios dentro do concreto e como a resistência é inversamente proporcional ao índice de vazios, então estes apresentam maiores resistências. A Figura 29 apresenta as resistências médias dos CBAM nas idades analisadas.

Figura 29 – Resistência à compressão média dos CBAM nas idades de 7, 28 e 56 dias



Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Com base nas recomendações do projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1, os concretos CBAM78 não poderiam ser aplicados com fins estruturais em paredes de edificações moldadas no local, pois o valor de resistência à compressão obtidos aos 28 dias foi menor que 5 MPa, mas para a norma NBR 12646:1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) este concreto pode ser utilizado em edificações térreas.

Os concretos CBAM55 e CBAM43 apresentaram um teor de ar incorporado abaixo de 37 % e resistência do corpo de prova aos 28 dias de 5,2 e 7,0 MPa respectivamente, podendo ser aplicados com fins estruturais em paredes de edificações de até 2 pavimento, localizadas em regiões classificadas na classe de agressividade I. O concreto CBAM33 pode ser aplicado com fins estruturais em parede, de edificações de até 2 pavimento, localizadas em regiões classificadas na classe de agressividade III ou em edificações com mais de cinco pavimentos, localizadas em regiões classificadas na classe de agressividade de no máximo II. Já o concreto CBAM17 poderia ser utilizado com fins estruturais em paredes de edifícios, moldadas no local, para edificações com mais de 5 pavimentos localizadas em qualquer uma das classes de agressividade.

A Tabela 27 apresenta uma comparação entre as resistências à compressão encontradas por Teixeira Filho e Tezuka (1992), apresentado no referencial para as

densidades de 1300, 1500 e 1700 kg/m³, com as resistências aos 28 dias dos concretos CESP que atingiram densidades próximas dessas.

Tabela 27 – Resistências à compressão aos 28 dias

Densidades (kg/m ³)	Teixeira Filho e Tezuka (1992)	CBAM
	f _{c,28} (MPa)	f _{c,28} (MPa)
1450 à 1500	4,5	4,3
1700 à 1750	7,1	12,7
1900	10,4	19,4

Fonte: Elaborada pelo autor (2015)

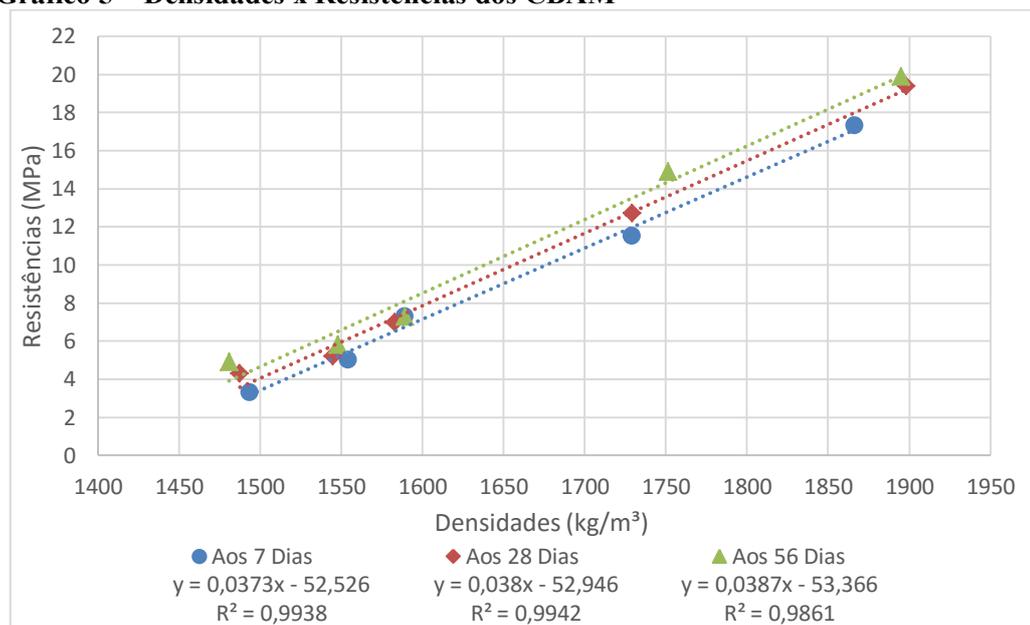
Com base na Tabela 27, pode-se observar que os concretos obtidos apresentaram valores de resistências à compressão maior do que os resultados encontrados por Teixeira Filho e Tezuka (1992). O fator a/c e o consumo de cimento por metro cúbico adotado no presente trabalho para os concretos CABM foram os mesmos adotados por Teixeira Filho e Tezuka (1992), ou seja, a diferença nas dosagens encontra-se na quantidade de agregado miúdo utilizado e no processo de produção, pois Teixeira Filho e Tezuka (1992) utilizaram aditivos de pré-espuma, enquanto o presente estudo utilizou aditivo mecânico para produzir os CBAM. Dessa forma, acredita-se que a melhora na resistência se deu por conta do processo de produção adotado, pois para os concretos de densidades de 1900 kg/m³, os parâmetros de entradas foram os mesmo para ambas as produções.

Semelhante ao que aconteceu nos concretos CESP, aqueles concretos que atingem resistências maiores já nas primeiras idades ocorre uma evolução em uma proporção maior do que aqueles com resistências menores que 7 MPa. No entanto, fazendo uma analogia com os CESP é possível identificar que a evolução deles obteve uma maior proporção quando comparado aos CBAM.

De forma geral, é possível identificar que os CBAM apresentados aos 7 dias já atingem uma resistência média de 90,4% e 83,5% das resistências alcançadas aos 28 e 56 dias, respectivamente.

Dessa forma, percebe-se que as resistências alcançadas aos 28 dias não diferem muito daquelas atingidas aos 7 dias, por esse motivo alguns autores recomendam que as resistências adotadas como parâmetros para os concretos celulares sejam aos 56 dias em vez de 28 dias como ocorre para os concretos convencionais.

Com base nos dados apresentados na Tabela 26, foi possível gerar o Gráfico 5, que apresenta uma tendência linear entre as resistências à compressão dos concretos CBAM para diferentes densidades nas idades de 7, 28 e 56 dias.

Gráfico 5 – Densidades x Resistências dos CBAM

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Através das equações lineares apresentadas no Gráfico 5 é possível estimar as resistências aos 7, 28 e 56 dias em função de uma dada densidade. Pode-se observar que os valores de correlações das equações deram muito próximo de 1, mostrando assim uma boa confiabilidade nos resultados obtidos.

Com base nas equações de tendências lineares é possível estimar que as resistências que seriam alcançadas para um concreto com densidades de 1900 kg/m³, 1950 kg/m³ e 2000 kg/m³ aos 56 dias seriam: 20,2 MPa, 22,1 MPa e 24,0 MPa, respectivamente.

Pode-se verificar ainda que o valor de resistência à compressão do Boletim Técnico da CHECOOL apresentado na seção 2, para a densidade aparente seca de 1920 kg/m³, foi de 23,3 MPa, ou seja, com base no projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1 pode-se estimar que essa densidade no estado fresco era de 2000 kg/m³. Substituindo essa densidade no estado fresco nas equações de tendências lineares aos 56 dias os concretos CBAM em estudo atingiriam 24 MPa. Portanto, pode-se observar que os concretos em estudos apresentaram valores muito próximos dos resultados encontrados nas literaturas.

Fazendo-se uma comparação com as estimativas realizadas para as mesmas densidades com os concretos CESP, pode-se observar que as resistências alcançadas pelos os concretos CBAM apresentam valores maiores. Este fato pode estar correlacionado a forma de distribuição das bolhas de ar nos concretos CBAM, evitando assim aglomerações destas que provocam vazios de diâmetros maiores e conseqüentemente reduz a resistência do concreto.

4.3 Concretos CBAM com Adição de Agregados Graúdos (CBAMG)

Com os parâmetros iniciais adotados, com as porcentagens de aditivo/cimento e de substituição do agregado miúdo definidas, e conhecido as massas específicas dos componentes envolvidos, é possível calcular as parcelas em massa de cada componente para uma estimativa de um volume final na mistura após a incorporação de ar de 1 m³.

As composições das misturas dos concretos celulares CBAM, apresentadas na Tabela 28, foram calculadas como no exemplo seguinte:

- Quantidade de agregados secos por metro cúbico:

$$A_{gs} = \gamma_{cf} - C_c - \left(\frac{a}{c} \times C_c\right) - \left(\frac{Ad}{c} \times C_c\right) \quad (3.1)$$

$$A_{gs} = 1900 - 400 - (0,5 \times 400) - (0,00033 \times 400) = 1300 \text{ kg/m}^3$$

- Quantidade de agregado miúdo seco por metro cúbico:

$$A_s = A_{gs} \times (1 - \alpha_1) \quad (3.2)$$

$$A_s = 1300 \times (1 - 0,1) = 1170 \text{ kg/m}^3$$

- Quantidade de agregado graúdo seco por metro cúbico:

$$B_s = A_{gs} \times \alpha_1 \quad (3.3)$$

$$B_s = 1300 \times 0,1 = 130 \text{ kg/m}^3$$

Tabela 28 – Traços dos CBAM com agregado graúdo

Concretos	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (%)
CBAMG33/10	1.170,00	130,00	400,00	200,00	0,033
CBAMG33/20	1.040,00	260,00	400,00	200,00	0,033
CBAMG33/30	910,00	390,00	400,00	200,00	0,033
CBAMG33/40	780,00	520,00	400,00	200,00	0,033
CBAMG33/50	650,00	650,00	400,00	200,00	0,033
CBAMG33/60	520,00	780,00	400,00	200,00	0,033
CBAMG17/10	1.170,00	130,00	400,00	200,00	0,017
CBAMG17/20	1.040,00	260,00	400,00	200,00	0,017

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Pode-se observar nos dados apresentados na Tabela 28, que em termos de quantitativo entre os materiais constituintes nas misturas, não há diferença no que diz respeito ao cimento.

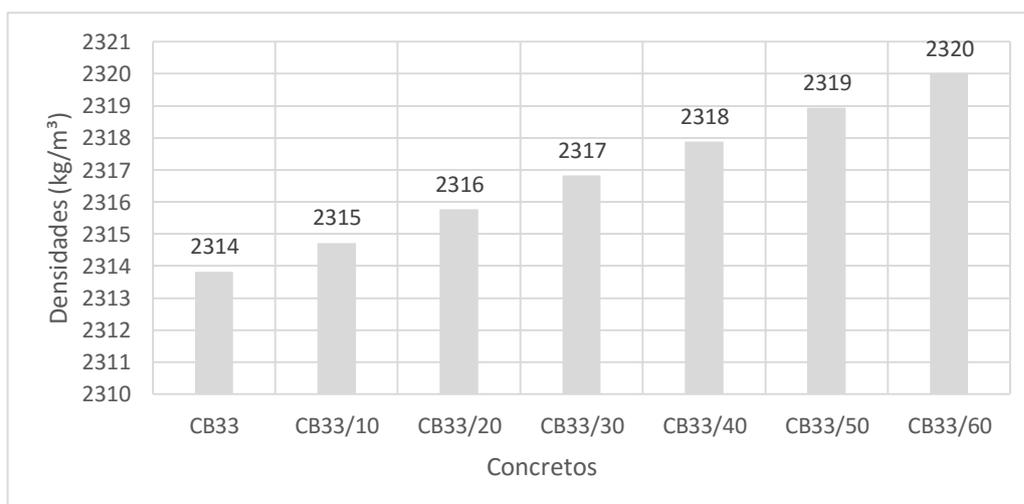
Observe que aquelas misturas que apresentam a mesma porcentagem de substituição no agregado miúdo, o que difere nestas são as porcentagens do espumígeno mecânico adotado.

A seguir serão abordados e discutidas as propriedades no estado fresco: densidade, teor de ar incorporado e consistência e no estado endurecido: resistência à compressão nas idades de 7, 28 e 56 dias, para os concretos CBAMG.

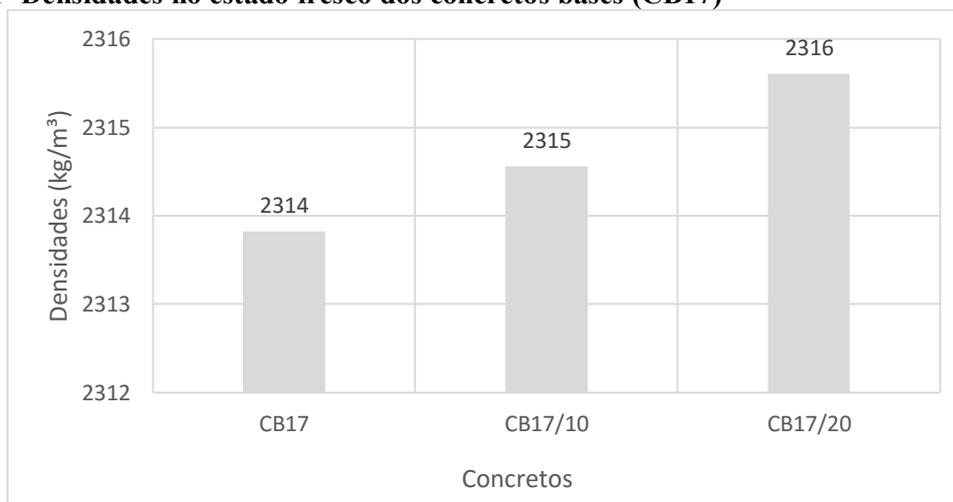
4.3.1 Propriedades no estado fresco

A Figura 30 e a Figura 31 apresentam estimativas das densidades no estado fresco dos concretos bases, chamados de CB33/10, CB33/20, CB33/30, CB33/40, CB33/50, CB33/60, CB17/10 e CB17/20, utilizados para obter os concretos CBAMG33/10, CBAMG33/20, CBAMG33/30, CBAMG33/40, CBAMG33/50, CBAMG33/60, CBAMG17/10 e CBAMG17/20, respectivamente.

Figura 30 – Densidades no estado fresco dos concretos bases (CB33)



Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Figura 31- Densidades no estado fresco dos concretos bases (CB17)

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Analisando a Figura 30 e a Figura 31, pode-se observar que as densidades estimadas para os concretos bases obedecem a recomendação do projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01- 001- 1. Além disso, percebe-se que a diferença entre as densidades dos concretos bases foram pequenas, pois a massa específica do agregado graúdo utilizado é praticamente igual à massa específica do agregado miúdo.

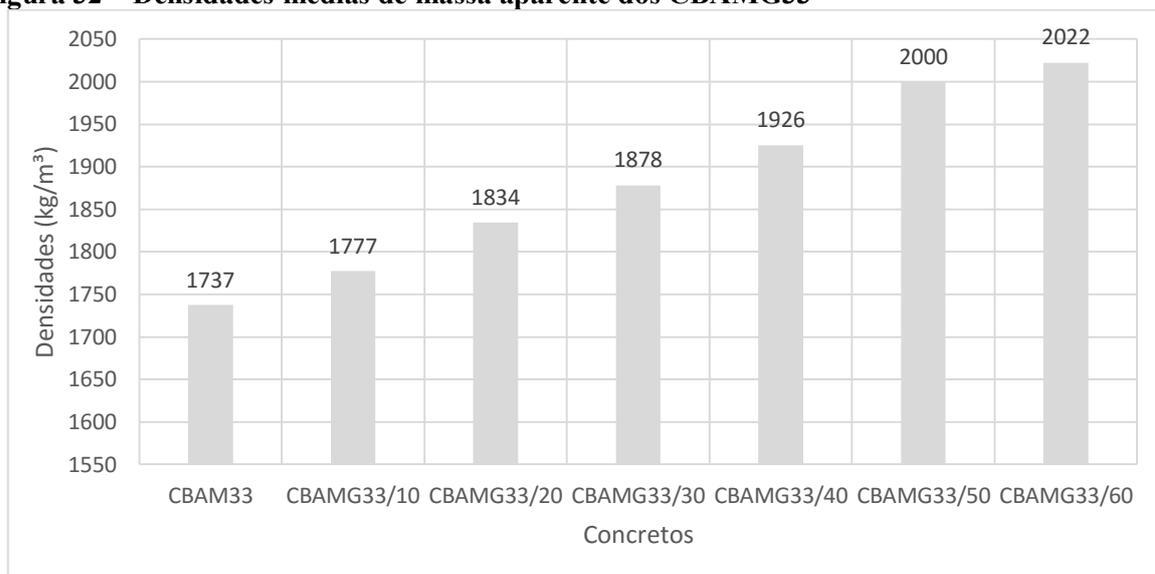
A Tabela 29 apresenta as densidades encontradas experimentalmente para os corpos de prova dos concretos celulares produzidos.

Tabela 29 – Densidades de massa aparente dos CBAMG

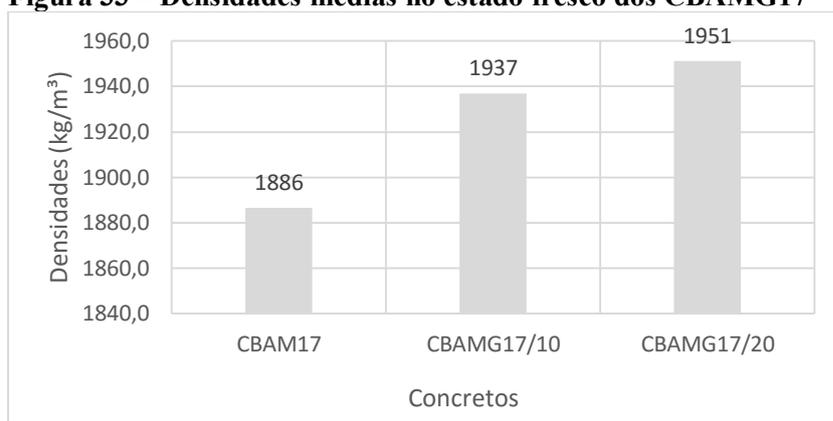
Concreto	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Desvio Padrão
	Densidade (kg/m³)						
CBAM33	1.643,3	1.815,3	1.668,8	1.789,8	1.726,1	1.777,1	69,4
CBAMG33/10	1.719,8	1.831,2	1.729,3	1.828,0	1.767,5	1.796,2	48,0
CBAMG33/20	1.748,4	1.942,7	1.780,3	1.866,2	1.802,5	1.847,1	69,5
CBAMG33/30	1.834,4	1.939,5	1.847,1	1.907,6	1.891,7	1.875,8	38,9
CBAMG33/40	1.879,0	1.984,1	1.898,1	1.945,9	1.933,1	1.929,9	36,9
CBAMG33/50	1.971,3	2.035,0	1.984,1	2.006,4	1.984,1	2.006,4	22,8
CBAMG33/60	1.980,9	2.057,3	2.047,8	2.003,2	2.019,1	2.038,2	28,9
CBAM17	1.821,7	1.910,8	1.885,4	1.910,8	1.891,7	1.898,1	33,3
CBAMG17/10	1.920,4	1.965,0	1.920,4	1.949,0	1.936,3	1.929,9	17,5
CBAMG17/20	1.917,2	1.977,7	1.936,3	1.974,5	1.939,5	1.961,8	24,0

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A Figura 32 e a Figura 33 apresentam respectivamente, as densidades médias dos concretos CBAMG obtidos utilizando as proporções de 0,033% e 0,017% de aditivo incorporador de bolhas de ar, em massa com relação ao cimento, calculados com base nos dados apresentados na Tabela 29.

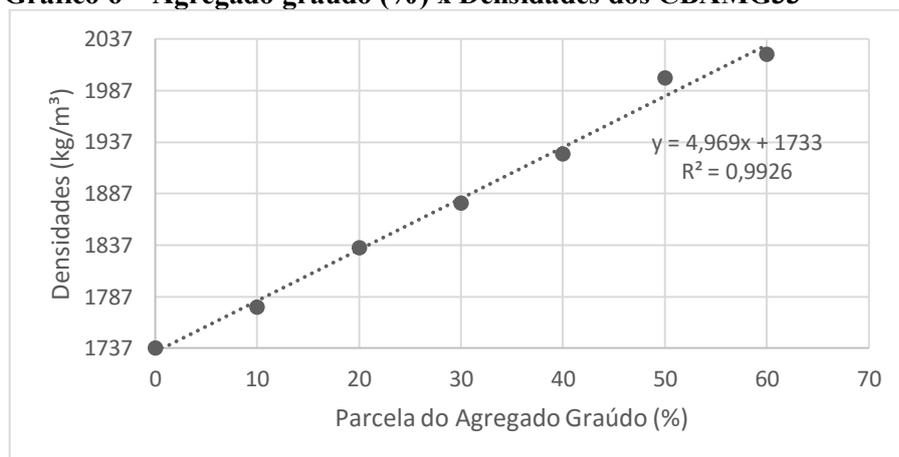
Figura 32 – Densidades médias de massa aparente dos CBAMG33

Fonte: Elaborada pelo Autor (2015).

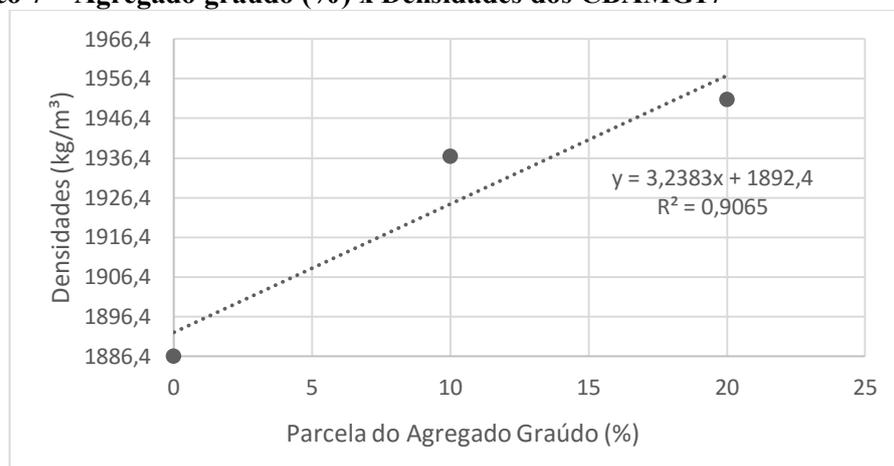
Figura 33 – Densidades médias no estado fresco dos CBAMG17

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Pode-se observar na Figura 32 e na Figura 33 que a medida que se aumenta a percentagem de substituição do agregado miúdo por agregado graúdo as densidades de massa aparente tendem a aumentar linearmente como mostra os Gráficos 6 e 7 a seguir.

Gráfico 6 – Agregado graúdo (%) x Densidades dos CBAMG33

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

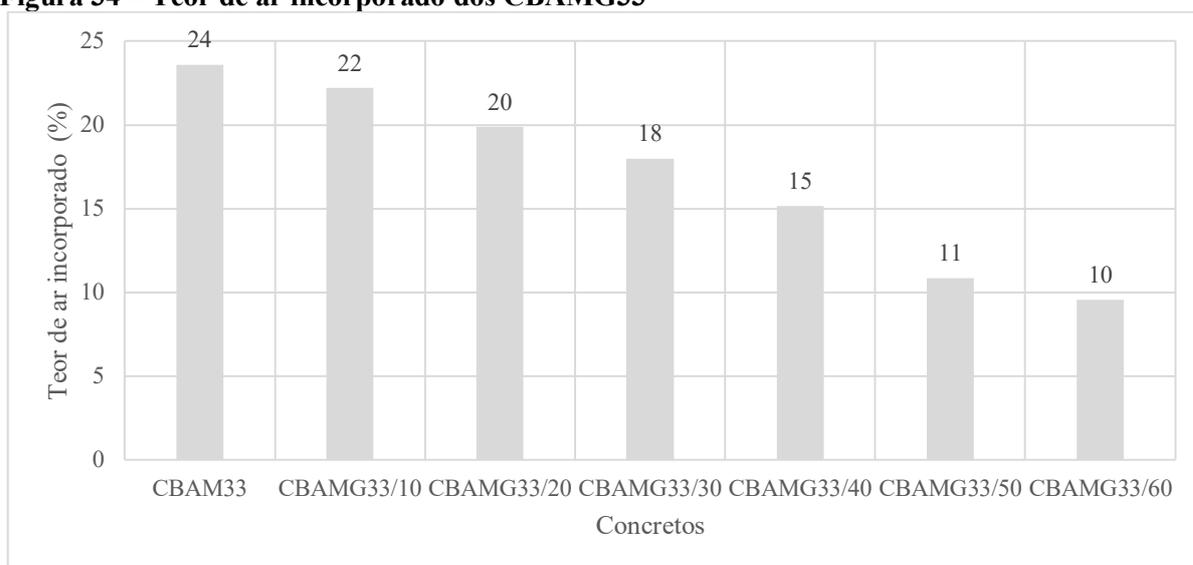
Gráfico 7 – Agregado graúdo (%) x Densidades dos CBAMG17

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

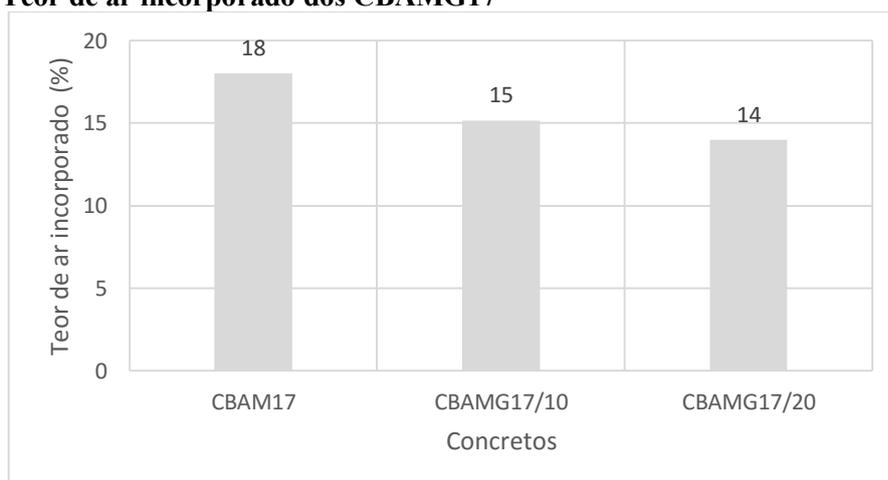
Com base nos Gráficos 6 e 7 é possível estimar qual a porcentagem de agregado graúdo deve-se adicionar para atingir uma determinada densidade de massa aparente no estado fresco desejada. Além disso, estes confirmam a tendência linear no aumento da densidade à medida que se aumenta a proporção de agregado graúdo.

Este aumento na densidade do concreto à medida que é adicionado mais agregado graúdo à mistura em substituição do agregado miúdo é natural, pois sabe-se que a massa específica do agregado graúdo ainda que pequena a diferença, é maior do que a massa específica do agregado miúdo.

A Figura 34 e a Figura 35 apresentam o teor de ar incorporado para cada concreto produzido, onde o volume inicial era de aproximadamente 12,3 litros, e o final desejado após a incorporação era de 15 litros, ou seja, para que o concreto produzido apresentasse a densidade igual ao parâmetro de entrada adotado no método de dosagem era necessário ganhar 2,7 litros aproximadamente, o equivalente a um teor de ar incorporado de 18%.

Figura 34 – Teor de ar incorporado dos CBAMG33

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Figura 35 – Teor de ar incorporado dos CBAMG17

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Todos dos concretos CBAMG apresentaram uma incorporação menor que 37% recomendado pelo projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1 para concreto celular estrutural. É possível observar novamente fazendo-se uma comparação entre as Figura32e Figura 33 de densidades e as Figura 34 e Figura 35 de teor de ar incorporado, que quanto maior a incorporação menor será a densidade do concreto obtido.

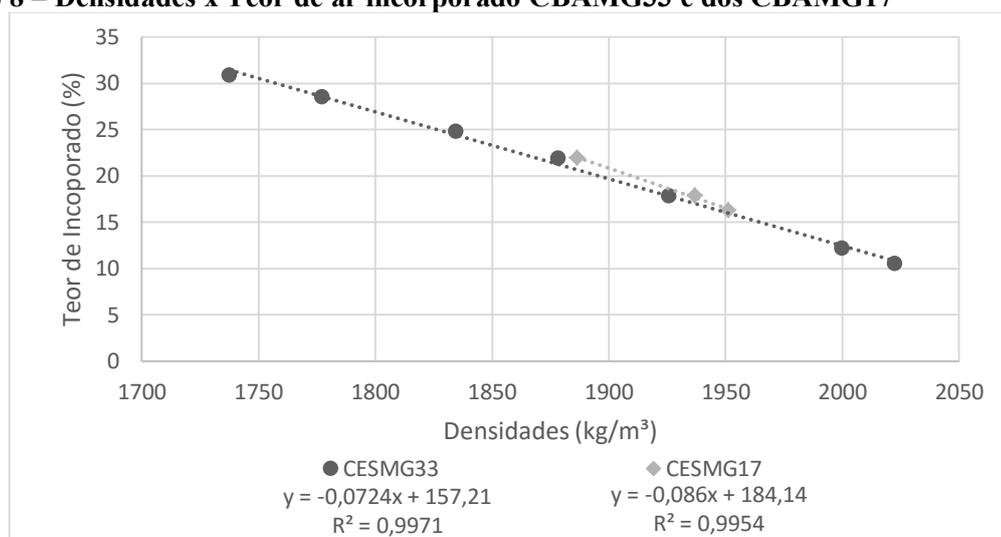
Ainda é possível identificar que ao substituir apenas 10% do agregado miúdo por agregado graúdo, fez-se com que as incorporações tivessem uma redução aproximadamente de 2,0% e 4% com relação ao CBAM33 e ao CBAM17, respectivamente, mostrando que quanto menor o teor de aditivo químico na mistura, esta redução será mais acentuada, ou seja, menor será a incorporação deste concreto.

Ainda é possível verificar na Figura 34 que o concreto CBAMG33/30 apresentou uma incorporação de 18%, o que lhe garantiu uma densidade de massa aparente no estado fresco próximo de 1900 kg/m³, confirmando a hipótese levantada anteriormente de que a mistura que apresentasse uma incorporação próxima deste valor apresentaria um volume final de 15 litros e conseqüentemente uma densidade próxima ao parâmetro de entrada definido.

O ganho de densidade de massa aparente no estado fresco dos concretos CBAMG devido ao aumento da proporção de agregado graúdo, está correlacionado com a queda da incorporação como apresenta a Figura 34 e a Figura 35. Isto pode ser explicado pelo fato da partícula do agregado graúdo possuir uma dimensão maior que a partícula do agregado miúdo, e conseqüentemente seu peso é maior, provocando uma maior destruição das bolhas de ar gerada no processo de mistura.

O Gráficos 8 apresentam a relação entre as densidades e as incorporações obtidos dos concretos produzidos, a partir dos CBAM33 e do CBAM17.

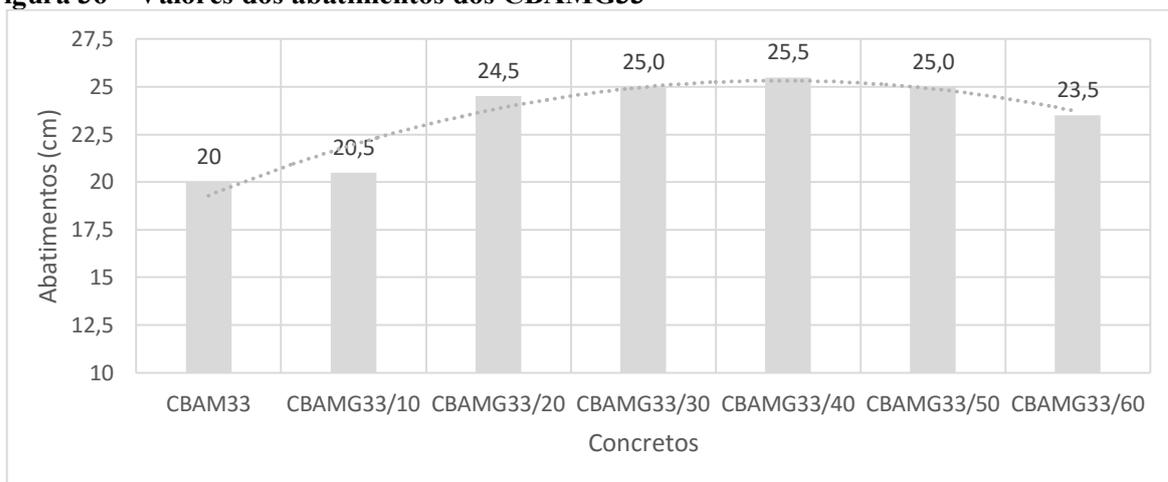
Gráfico 8 – Densidades x Teor de ar incorporado CBAMG33 e dos CBAMG17



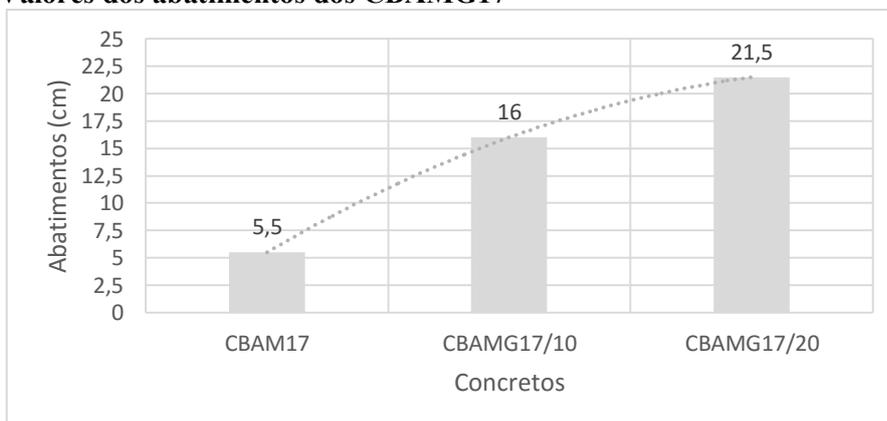
Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

O Gráfico 8 apresenta a linearidade entre as densidades e as incorporações obtidas, além de enriquecer a afirmação feita anteriormente de que a redução na incorporação para aqueles concretos com menor teor de aditivo espumígeno é mais acentuada, pois a inclinação da linha de tendência dos concretos CBAMG17, que neste caso possui um menor teor de aditivo comparado aos CBAMG33, apresentada no gráfico é maior.

Com relação a trabalhabilidade dos CBAMG a Figura 36 e a Figura 37 apresentam os valores dos abatimentos obtidos, conforme os procedimentos citados na seção 3, para os concretos CBAMG33 e CBAMG17, respectivamente.

Figura 36 – Valores dos abatimentos dos CBAMG33

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Figura 37 – Valores dos abatimentos dos CBAMG17

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A Figura 38 mostra o CBAMG33/40, após o ensaio do slump test realizado.

Figura 38 – Abatimentos do CBAMG33/40

Fonte: elaborada pelo autor (2015).

Através da Figura 36 e da Figura 37 identifica-se que todas os concretos produzidos a partir dos concretos CBAMG33 e CBAMG17 apresentaram melhora na propriedade de trabalhabilidade, sendo está mais acentuada nos concretos CBAMG17.

Ainda é possível perceber analisando os resultados de trabalhabilidade, que esta propriedade atinge um ponto máximo para uma determinada proporção de substituição, e após este ponto o abatimento tende a diminuir. Com base nos resultados dos abatimentos obtidos para os concretos CBAMG pode-se classificar a trabalhabilidade destes, conforme a NBR 8953:2015 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) da seguinte forma:

- Classificação dos concretos CBAMG33:
 - ✓ CBAM33: Concreto plástico – S160;
 - ✓ CBAMG33/10: Concreto plástico – S160;
 - ✓ CBAMG33/20: Concreto fluido – S220;
 - ✓ CBAMG33/30: Concreto fluido – S220;
 - ✓ CBAMG33/40: Concreto fluido – S220;
 - ✓ CBAMG33/50: Concreto fluido – S220;

- Classificação dos concretos CBAMG17.
 - ✓ CBAM17: Concreto pouco trabalhável – S50.
 - ✓ CBAMG17/10: Concreto plástico – S160; e
 - ✓ CBAMG17/20: Concreto plástico – S160;

Portanto, com relação à classificação da norma verifica-se que apenas o concreto CBAMG33/10 continuou no mesmo grupo do concreto referência, enquanto os demais apresentaram uma melhora mais acentuada a ponto de se enquadrar em grupos mais trabalháveis.

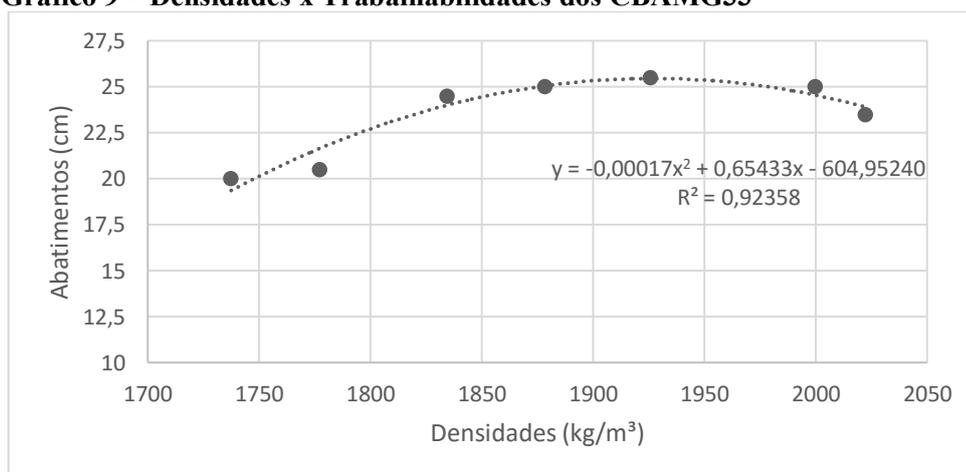
Sabe-se que para os concretos celulares de forma geral a trabalhabilidade quando comparada ao concreto convencional é melhor, pois as bolhas de ar funcionam como agregados miúdos de baixa atrito o que garante esta melhoria.

Mas, para os concretos CBAMG em questão sabe-se que as incorporações de ar apresentaram valores menores do que seus concretos de referência, o que poderia induzir que

estes apresentassem uma redução nas propriedades de trabalhabilidade, pois contém menos bolhas de ar internamente.

No entanto, a melhora na propriedade de trabalhabilidade dos concretos CBAMG está correlacionada com a melhora na granulometria da mistura como citado no referencial bibliográfico. O Gráfico 9 apresenta a relação das densidades médias com os abatimentos obtidos dos concretos CBAMG33.

Gráfico 9 – Densidades x Trabalhabilidades dos CBAMG33



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Através do Gráfico 9 é possível estimar a partir de uma determinada densidade de massa aparente no estado fresco qual o abatimento que o concreto irá apresentar aproximadamente, além de perceber claramente que a trabalhabilidade atinge um ponto máximo para uma densidade próximo de 1925 kg/m³, coincidindo exatamente com a densidade do concreto CBAMG33/40 que apresentou a melhor trabalhabilidade.

4.3.2 Propriedades no estado endurecido

A Tabela 30 e a Tabela 31 apresentam as resistências à compressão nas idades de 7, 28 e 56 dias de cada corpo de prova dos concretos produzidos, junto com as suas respectivas densidades no estado fresco, dos concretos CBAMG33 e CBAMG17, respectivamente.

Tabela 30 – Resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias dos CBAMG33

Concretos	Aos 7 Dias		Aos 28 Dias		Aos 56 Dias	
	Densidade (kg/m ³)	Resistência (MPa)	Densidade (kg/m ³)	Resistência (MPa)	Densidade (kg/m ³)	Resistência (MPa)
CBAM33	1.643,3	7,8	1.668,8	11,3	1.726,1	13,3
	1.815,3	15,2	1.789,8	14,1	1.777,1	16,4
CBAMG 33/10	1.719,8	10,4	1.729,3	12,9	1.767,5	13,4
	1.831,2	12,5	1.828,0	13,2	1.796,2	15,9
CBAMG 33/20	1.748,4	11,5	1.780,3	14,2	1.802,5	18,8
	1.942,7	13,7	1.866,2	16,6	1.847,1	15,3
CBAMG 33/30	1.834,4	11,7	1.847,1	12,3	1.891,7	16,3
	1.939,5	13,1	1.907,6	15,2	1.875,8	16,3
CBAMG 33/40	1.879,0	9,7	1.898,1	14,8	1.933,1	17,8
	1.984,1	15,2	1.945,9	14,7	1.929,9	17,2
CBAMG 33/50	1.971,3	12,3	1.984,1	16,5	1.984,1	18,3
	2.035,0	16,2	2.006,4	17,4	2.006,4	18,5
CBAMG 33/60	1.980,9	13,9	2.047,8	16,6	2.019,1	18,2
	2.057,3	13,9	2.003,2	18,2	2.038,2	19,9

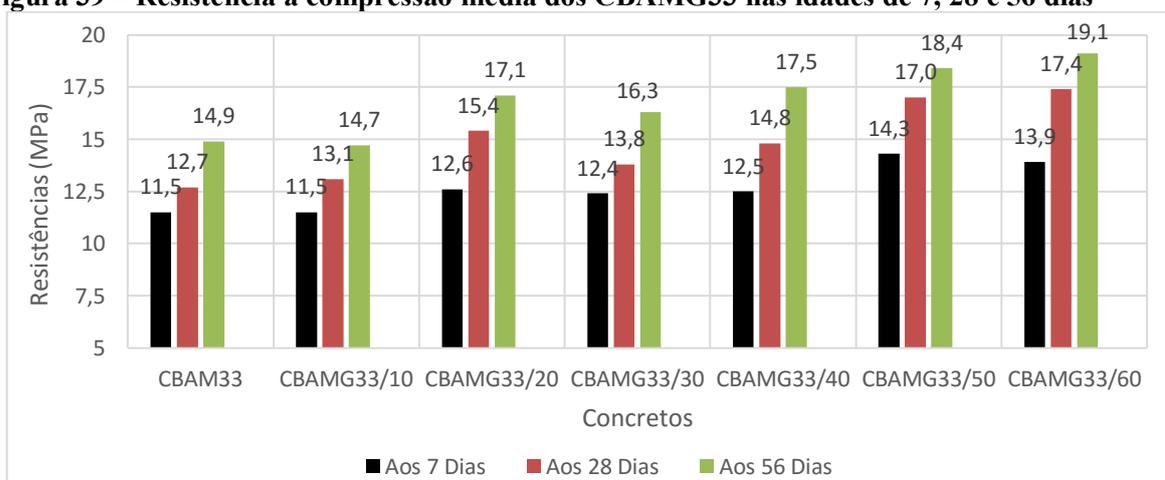
Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Tabela 31 – Resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias dos CBAMG17

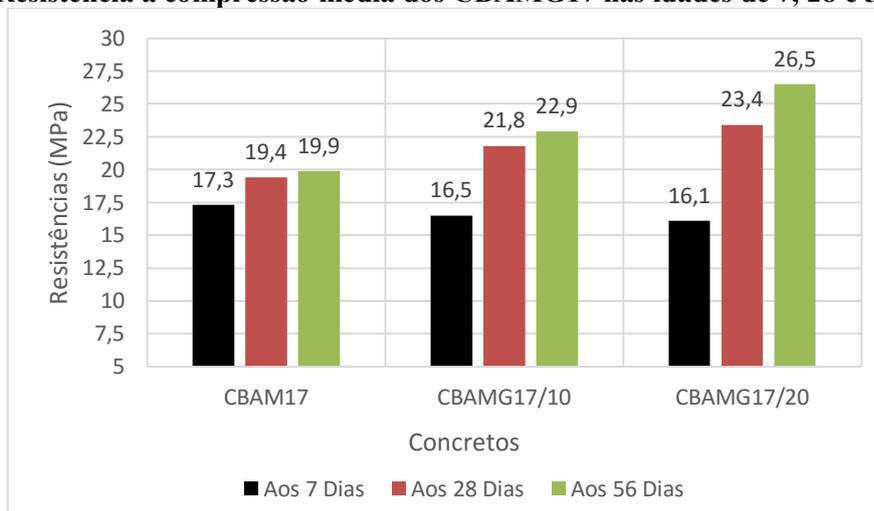
Concretos	Aos 7 Dias		Aos 28 Dias		Aos 56 Dias	
	Densidade (kg/m ³)	Resistência (MPa)	Densidade (kg/m ³)	Resistência (MPa)	Densidade (kg/m ³)	Resistência (MPa)
CBAM17	1.821,7	15,9	1.885,4	21,0	1.891,7	22,0
	1.910,8	18,6	1.910,8	17,8	1.898,1	17,8
CBAMG 17/10	1.920,4	14,9	1.920,4	21,3	1.936,3	24,3
	1.965,0	18,0	1.949,0	22,2	1.929,9	21,4
CBAMG 17/20	1.917,2	12,5	1.936,3	22,8	1.939,5	25,2
	1.977,7	19,7	1.974,5	23,9	1.961,8	27,8

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Com base nos dados na Tabela 30 e na Tabela 31, fica claro que aqueles concretos produzidos com a mesma porcentagem de aditivo apresentam resistências à compressão proporcionalmente às densidades, ou seja, quanto maior a densidade do concreto maior a resistência à compressão, coincidindo com os resultados já apresentados neste trabalho. A Figura 39 e a Figura 40 apresentam as resistências médias nas idades de 7, 28 e 56 dias para os concretos CBAMG33 e CBAMG17, respectivamente.

Figura 39 – Resistência à compressão média dos CBAMG33 nas idades de 7, 28 e 56 dias

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Figura 40 – Resistência à compressão média dos CBAMG17 nas idades de 7, 28 e 56 dias

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Com base nas recomendações do projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1, todos os concretos CBAMG podem ser utilizados com fins estruturais em paredes para de edificações, sendo o número de pavimentos restringido, conforme suas resistências à compressão e a classe de agressividade, apresentado na Tabela 12. Já os concretos CBAMG17/10 e CBAMG17/20 poderiam ser utilizados com fins estruturais em paredes de edifícios, moldadas no local, para edificações com mais de 5 pavimentos localizadas em qualquer uma das classes de agressividade.

A Tabela 32 apresenta uma comparação entre as resistências à compressão aos 28 dias, dos valores óbitos por Cortelassi (2005), para concretos celulares de alto desempenho, com os valores obtidos no presente trabalho para concretos celulares obtidos com aditivos mecânico usando agregado graúdo (pedrisco), com densidades no estado fresco próximas.

Tabela 32 – Resistências a compressão aos 28 dias

Densidades (kg/m ³)	Cortelassi (2005)	CBAMG
	f _{c,28} (MPa)	f _{c,28} (MPa)
1700 à 1750	14,5	13,1
1900 à 1950	25,2	21,8
2000 à 2050	27,5	23,4

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

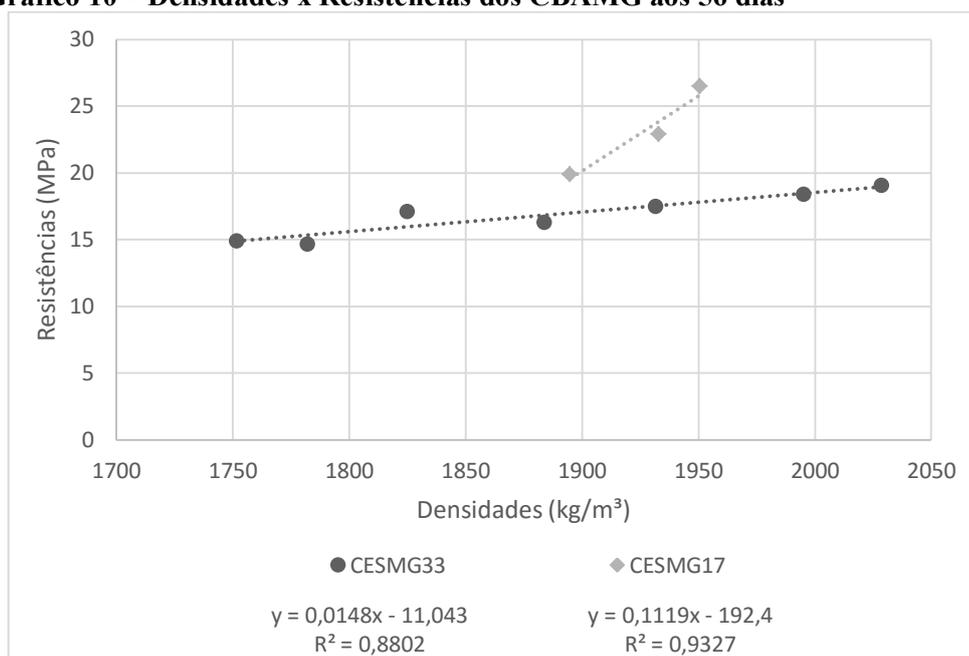
Com base na Tabela 32, pode-se observar que os concretos obtidos no presente trabalho atingiram resistências próximas das resistências encontradas por Cortelassi (2005), que utilizou como concreto base uma matriz de um concreto de alto desempenho com um consumo de cimento de 490 kg/m³, consumo este superior ao adotado no presente trabalho. O concreto base apresentado por Cortelassi possui uma densidade maior que o concreto base adotado no presente trabalho, assim para atingir a mesma densidade que o concreto celular produzido no presente estudo Cortelassi (2005) precisou gerar mais vazios na matriz do concreto base, ou seja, seus concretos apresentaram um teor de ar incorporado maior do que o os CBAMG, para uma mesma densidade, impedindo de alcançar resistências mais elevadas.

Semelhante ao que ocorreu com os concretos CBAM, a maior parte dos concretos CBAMG não sofreram grandes evoluções para as resistências obtidas aos 28 dias quando comparadas com as resistências obtidas aos 7 dias. Para os concretos CBAMG33 essa evolução representou uma média de 17% da resistência aos 7 dias, enquanto para os CBAMG17 representou uma média de 29%. Já com relação as resistências aos 56 dias, os CBAMG33 apresentaram uma evolução de 33% e os CBAMG17 apresentaram uma média de 39,5%, ambos com relação as resistências atingidas aos 7 dias.

Este resultado mais uma vez mostra que as resistências alcançadas aos 28 dias, não diferem muito daquelas atingidas aos 7 dias, confirmando a recomendação de alguns autores para adotar como parâmetro para os concretos celulares as resistências aos 56 dias em vez de 28 dias como ocorre para os concretos convencionais.

Dessa forma, adotando como parâmetro a idade de 56 dias, e com base nos dados apresentados na Tabela 30 e na Tabela 31 é possível gerar o Gráfico 10 que representa a relação densidade e resistência.

Gráfico 10 – Densidades x Resistências dos CBAMG aos 56 dias



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

O Gráfico 10 deixa claro que para aqueles concretos produzidos com a mesma quantidade de aditivo espumígeno, aqueles que alcançam uma maior densidade atingem uma maior resistência. No entanto, observe que para dois concretos celulares com valores de densidades próximos, aquele que tiver uma menor quantidade de agregado graúdo irá atingir uma maior resistência à compressão.

Esta hipótese pode ser observada na Tabela 33 que resume as densidades e as resistências obtidas aos 56 dias, dos concretos CBAMG33 e CBAMG17 que apresentaram densidades próximas.

Tabela 33 – Resistência à compressão aos 56 dias dos CBAMG

Concretos	Aos 56 Dias	
	Densidade (kg/m³)	Resistência (Mpa)
CBAMG33/30	1.884	16
CBAMG33/40	1.932	18
CBAM17	1.895	20
CBAMG17/10	1.933	23

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Analisando a Tabela 33 é possível observar que os concretos CBAMG33/30 e CBAMG33/40, que apresentaram densidades próximas dos concretos CBAM17 e CBAMG17/10, respectivamente alcançaram resistências mais baixas.

E com base nos resultados apresentados anteriormente, sabe-se que aqueles concretos celulares que receberem uma maior quantidade de bolhas de ar na mistura terão uma densidade menor e conseqüentemente uma menor resistência.

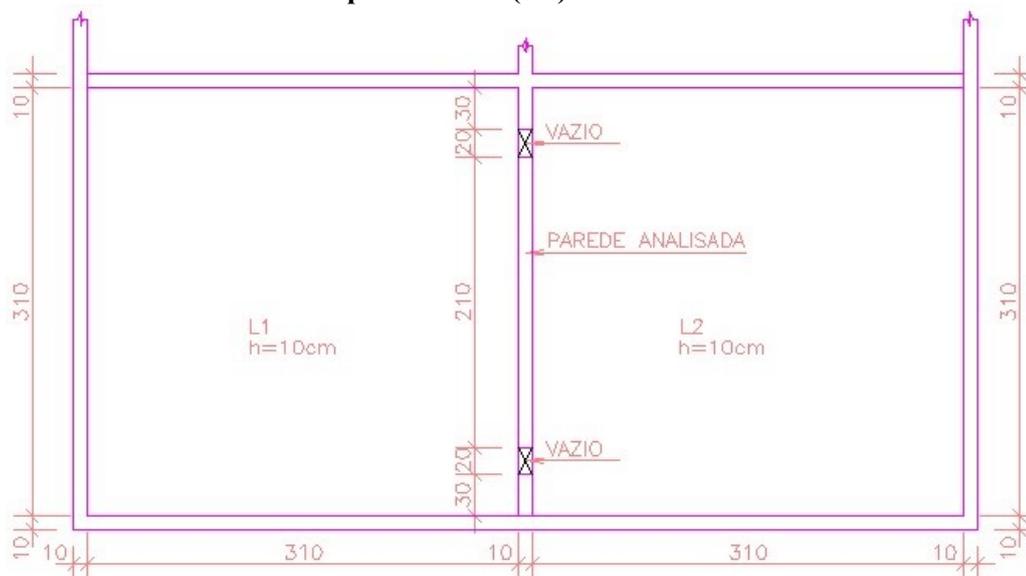
Dessa forma, é sensato concluir que para os concretos celulares que apresentarem uma densidade de massa aparente no estado fresco próximas, aquele que tiverem na sua composição uma menor quantidade de bolhas de ar apresentarão um valor de resistência à compressão superior, ou seja, esse resultado mostra que apesar da melhora na trabalhabilidade dos concretos celulares em acrescentar agregados graúdos, não é vantagem substituir estes em grandes porcentagens, pois para garantir uma baixa densidade será necessário adicionar mais aditivos ao concreto o que acarretará na redução da resistência à compressão.

4.4 Estudo de caso

Este tópico apresenta um pré-dimensionamento simples e prático para estimar quantos pavimentos um determinado edifício poderia ser construído utilizando os concretos CESP, CBAM e CBAMG considerando as melhores resistências alcançadas no presente trabalho, adotando distribuição de carga e análise de resistência última à compressão conforme as recomendações do projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1. Vale salientar que devido à simplicidade e por se tratar apenas de um pré-dimensionamento não será levado em consideração a ação do vento na estrutura.

Para essa análise será considerada uma parede interna, conforme a Figura 41, apoiada no topo e na base e nas laterais com espessura de 10 cm, com uma altura de piso a piso (pé-esquerdo) de 2,80 m, apoiando laje de 10 cm de espessura sob ação de carga permanente de 1 kN/m² para o revestimento e de carga variável de 1,5 kN/m².

Figura 41 – Parede Analisada em planta baixa (cm)



PLANTA BAIXA

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

4.4.1 Análise das cargas de solicitação

Sabe-se que para um edifício residencial as cargas verticais são determinadas somando-se o peso próprio dos elementos estruturais com as ações permanentes e variáveis, e que atualmente para o cálculo de edifícios de paredes de concreto armado, são utilizados procedimentos análogos aos empregados na alvenaria estrutural. A reação da laje que é distribuída na parede foi calculada através do processo das áreas conforme a NBR 6118:2014 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), considerando-se simplesmente apoiada em todos os lados.

- Para o concreto CESP1/60
 - Peso próprio da parede para 1 pavimento

$$P = 0,1 \times 2,8 \times 16,4 = 4,6 \text{ kN/m}$$

- Reação total das lajes por pavimento

$$R = \left(\frac{(0,1 \times 25 + 1 + 1,5) \times 3,1}{4} \right) \times 2 = 7,8 \text{ kN/m}$$

- Para o concreto CBAM17
 - Peso próprio da parede para 1 pavimento

$$P = 0,1 \times 2,8 \times 18,9 = 5,3 \text{ kN/m}$$

- Reação da laje por pavimento

$$R = \left(\frac{(0,1 \times 25 + 0,1 + 0,15) \times 3,1}{4} \right) \times 2 = 7,8 \text{ kN/m}$$

- Para o concreto CBAMG17/20
 - Peso próprio da parede para 1 pavimento

$$P = 0,1 \times 2,8 \times 19,5 = 5,5 \text{ kN/m}$$

- Reação da laje por pavimento

$$R = \left(\frac{(0,1 \times 25 + 0,1 + 0,15) \times 3,1}{4} \right) \times 2 = 7,8 \text{ kN/m}$$

Observa-se que o peso próprio da parede por pavimento apresentou valores diferentes para cada concreto, pois suas densidades obtidas são diferentes, no entanto a reação da laje se manteve a mesma, pois para os três casos o peso próprio da laje adotado foi de 25 kN/m³, peso próprio do concreto armado.

4.4.2 Pré-dimensionamento

O pré-dimensionamento foi realizado fazendo-se uma estimativa da resistência limite da parede sob solicitação normal, conforme o projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1 e a NBR 16055:2012 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012), calculado através da Equação 4.1.

$$n_{d,resist} = \frac{(0,85 \cdot f_{cd} + \rho \cdot f_{scd}) \cdot t}{k_1 \cdot [1 + 3 \cdot k_2 \cdot (2 - k_2)]} \leq \frac{(0,85 \cdot f_{cd} + \rho \cdot f_{scd}) \cdot t}{1,643} \leq 0,4 \cdot f_{cd} \cdot t \quad (4.1)$$

Onde, $n_{d,resist}$ é a força normal resistente de cálculo, por unidade de comprimento, admitida no plano médio da parede, f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão dado por $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$ tal que $\gamma_c = 1,4 \cdot 1,2 = 1,68$, ρ é a taxa geométrica da armadura vertical da parede, não superior a 1%, f_{scd} é a resistência de cálculo à compressão do aço dado por $f_{scd} = E_s \cdot 0,002/\gamma_s$, e t é a espessura da parede (sem revestimento).

Sendo que os coeficientes k_1 e k_2 depende do índice de esbeltez da parede que é definido pela Equação 4.2.

$$\lambda = \frac{l_e \cdot \sqrt{12}}{t} \quad (4.2)$$

Onde, l_e é o comprimento equivalente da parede que é obtido em função das vinculações da parede, definido conforme as normas citadas.

$$\lambda = \frac{l_e \cdot \sqrt{12}}{t} \quad (4.3)$$

$$\text{Para: } 35 \leq \lambda \leq 86 \rightarrow k_1 = \lambda/35 \text{ e } k_2 = 0 \quad (4.4)$$

$$\text{Para: } 86 \leq \lambda \leq 120 \rightarrow k_1 = \lambda/35 \text{ e } k_2 = \frac{\lambda-86}{35} \quad (4.4)$$

Em se tratando de um pré-dimensionamento, este trabalho utilizou para taxa de armadura vertical o valor mínimo exigido por norma de 0,09%. Como a parede em análise está sendo considerada apoiada no topo e na base, então $l_e = 2,8 \text{ m}$. Sabendo que o esforço de cálculo não deve ser superior a resistência de cálculo, então este trabalho estimou o número de pavimentos dividindo a resistência de cálculo da parede para cada concreto pelo o esforço de cálculo por pavimento estimado anteriormente.

➤ Pré-dimensionamento considerando o concreto CESP1/60

Com base na formulação e nas condições citadas acima, a resistência de cálculo para a parede analisada a nível de fundação foi de:

$$n_{d,resistente} = 50,0 \text{ kN/m}$$

Então, o número de pavimento estimado para o caso em estudo foi de:

$$n^{\circ}_{pavimentos} = \frac{50,0}{1,4 \times (4,6 + 7,8)} = 2,9$$

Como o número de pavimento deve ser inteiro, então para as condições adotadas, este concreto resistiria para um edifício de até 2 pavimento, coincidindo com o número de pavimento máximo que o projeto de norma restringi para a obra executada com esse concreto localizada na classe de agressividade I.

➤ Pré-dimensionamento considerando o concreto CBAM17

Com base na formulação e nas condições citadas acima, a resistência de cálculo para a parede analisada a nível de fundação foi de:

$$n_{d,resistente} = 141,0 \text{ kN/m}$$

Então, o número de pavimento estimado para o caso em estudo foi de:

$$n^{\circ}_{pavimentos} = \frac{141,0}{1,4 \times (5,3 + 7,8)} = 7,7$$

Dessa forma, para as condições adotadas este concreto resistiria para um edifício de até 7 pavimentos. Assim, com base na Tabela 12 que restringe o número de pavimento em função da resistência do concreto e da classe de agressividade, conforme as recomendações do projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1, o edifício produzido com este concreto com 7 pavimento poderia estar localizado numa classe de agressividade de no máximo III, mas para um edifício executado com esse concreto com até 5 pavimento pode estar localizada em qualquer classe de agressividade.

➤ Pré-dimensionamento considerando o concreto CBAM17/20

Com base na formulação e nas condições citadas acima, a resistência de cálculo para a parede analisada a nível de fundação foi de:

$$n_{d,resistente} = 170,0 \text{ kN/m}$$

Então, o número de pavimento estimado para o caso em estudo foi de:

$$n^{\circ}_{pavimentos} = \frac{170}{1,4 \times (5,5 + 7,8)} = 9,1$$

Dessa forma, para as condições adotadas este concreto resistiria para um edifício de até 9 pavimentos. Assim, com base na Tabela 12 que restringe o número de pavimentos em função da resistência do concreto e da classe de agressividade, conforme as recomendações do projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1, o edifício produzido com este concreto com 9 pavimento poderia estar localizado em qualquer classe de agressividade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todas as densidades dos concretos bases utilizados para a produção dos concretos celulares ficaram dentro do intervalo de 2000 à 2800 kg/m³, conforme recomendação das normas regulamentadoras e do projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1.

Apesar da literatura classificar a produção do concreto celular com a incorporação das bolhas de ar através da espuma pré-formada como a melhor forma de obter um controle da qualidade do produto final, pois permite um controle da espuma gerada e da quantidade adicionada à argamassa, no presente trabalho os concretos CESP apresentaram uma variabilidade na produção maior que os concretos produzidos com aditivos incorporadores de ar (mecânico), devido a ineficiência do equipamento responsável pela geração da espuma utilizado.

Dentre os concretos CESP, o concreto CESP1/60 foi quem apresentou uma melhor resistência à compressão, atingindo 6,5 e 9,5 MPa aos 28 e 56 dias respectivamente, podendo este ser utilizado conforme as recomendações do projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1, para fins estruturais em paredes de edificações de até 2 pavimentos, localizadas em região enquadrada na zona de agressividade I.

Com base nos valores de densidades obtidas para os concretos CESP, produzidos para as três proporções de aditivo/água utilizada para gerar a espuma, pôde-se perceber que quanto maior a quantidade de aditivo na solução aditivo/água maior será o volume de espuma gerado, implicando em um maior teor de bolhas de ar incorporado, pois a densidade obtida pelo concreto CESP1/20 foi menor do que a do CESP1/40 que por sua vez foi menor do que a do CESP1/60.

Foi possível observar nas produções dos concretos celulares do presente trabalho que o teor de bolhas de ar incorporado, é inversamente proporcional a densidade e a resistência, e diretamente proporcional a trabalhabilidade, conforme relatado no referencial bibliográfico.

Com base nos resultados encontrados pode-se confirmar que os métodos de dosagens adotados apresentam valores coerentes, pois os concretos celulares que atingiram o teor de ar incorporado próximo do valor necessário previsto previamente nas composições, atingiram densidades no estado fresco próximas do valor adotado no parâmetro de entrada no método de dosagem, por exemplo, o concreto CBAM17 e o concreto CBAMG33/30 apresentaram um teor de ar incorporado de 18%, igual ao calculado previamente com base na composição das misturas, resultando em densidades de massa aparente no estado fresco próximas do valor de 1900 kg/m³ adotado no parâmetro de entrada.

Quando comparado os concretos CESP e CBAM com densidades de massa aparente no estado fresco próximas, pode-se observar que os concretos obtidos com aditivos químicos que incorporam bolhas de ar através da ação mecânica do próprio misturador (CBAM) apresentaram uma melhor trabalhabilidade e alcançaram resistências maiores.

Dentre os concretos CBAM produzidos, apenas o concreto CBAM78 não poderia ser utilizado com fins estruturais em paredes de edificações, conforme as recomendações do projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1, pois este apresentou resistências à compressão de 4,3 e 4,9 MPa, aos 28 e 56 dias, respectivamente. Já o concreto CBAM17, apresentou resistências à compressão de 19,4 e 19,9 MPa, aos 28 e 56 dias, respectivamente, podendo ser utilizado com fins estruturais em paredes de edificações com mais de 5 pavimentos.

Ao substituir os agregados miúdos dos concretos celulares, produzidos com aditivos incorporadores de bolhas de ar, por agregados graúdos (pedrisco) de origem rochosa, houve uma redução no teor de ar incorpora, e conseqüentemente houve um aumento da densidade de massa aparente no estado fresco, no entanto, apesar de ter ocorrido a redução do teor de ar incorporado, os concretos CBAMG apresentaram uma melhora bastante considerável na trabalhabilidade chegando alcançar um abatimento de 25,5 mm no ensaio de consistência através do slump test.

Com relação a resistência à compressão quando comparado os concretos CBAM e CBAMG com valores densidades de massa aparente no estado fresco próximos, os concretos produzidos sem agregados graúdos (CBAM) atingem resistências maiores, pois como a massa específica dos agregados graúdos é maior, então para os concretos CBAMG atingir a mesma densidade de um concreto CBAM para os mesmos parâmetros de entrada, é necessário incorporar um volume de bolhas de ar maior, provocando uma queda na resistência a compressão.

Todos os concretos CBAMG apresentaram resistências à compressão acima de 13 MPa aos 28 dias, onde a melhor resistência alcançada foi de 23,4 MPa e de 26,5 MPa aos 28 e 56 dias, respectivamente, pelo o concreto CBAMG17/20. Dessa forma, com base nas recomendações do projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1, estes concretos podem ser utilizados para fins estruturais em paredes de edificações com mais de 5 pavimentos.

No que diz respeito a utilização do agregado graúdo em substituição ao agregado miúdo, concluiu-se pelo presente trabalho que o uso destes agregados graúdos (pedrisco) de origem rochosa, é vantajoso quando se quer atingir concretos celulares com densidade

próximas do limite de concretos leves, cujo o concreto celular de referência sem agregados graúdos não apresenta boa trabalhabilidade.

Para o estudo de caso adotado no presente trabalho, pode-se concluir que para os melhores valores de resistências alcançados para os três grupos de concretos celulares produzidos, seria possível executar edifícios com 2, 7 e 9 números de pavimento para os concretos CESP1/60, CBAM17 e CBAMG17/20, respectivamente, confirmando a capacidade da aplicação destes concretos com fins estruturais em paredes.

Portanto, com base nos resultados expostos, pode-se concluir que o presente trabalho obteve propriedades no estado fresco e endurecido obedecendo as afirmações expostas no referencial bibliográfico, além da maioria dos resultados encontrados para trabalhabilidades e resistências serem suficientes para aplicação com fins estruturais em paredes de edificações, conforme o projeto de norma ABNT/CEE 185:000.01-001-1, pois sabe-se que além da resistência é necessário que estes concretos para tal aplicação sejam fluídos, ou seja, alcance um abatimento acima de 22mm com base nas classificações da NBR 8953 (ABNT, 2015), onde 60% dos concretos CBAM e 75% dos concretos CBAMG foram classificados como fluídos.

Como sugestão de trabalhos futuros, tem-se:

- Avaliação das propriedades mecânicas como: resistência à tração e módulo de elasticidade, dos concretos celulares sem e com agregado graúdo;
- Produzir concretos celulares com densidades de massa aparente nos intervalos de 1300 à 1500 kg/m³, de 1500 à 1800 kg/m³ e de 1800 à 2000 kg/m³, variando as proporções de água/cimento e o consumo de cimento;
- Obter concretos celulares com agregado graúdo leve, por exemplo, argila expandida;
- Obter concretos celulares com agregados leves recicláveis;
- Avaliar a durabilidade dos concretos celulares, sem agregado graúdo, com agregados graúdos de origem rochosa, com agregado leves e com agregados leves recicláveis;
- Fazer uma aplicação dos concretos celulares sem e com agregados graúdos em painéis, para avaliar desde a problemática da produção até as resistências mecânicas dos painéis;
- Obter concreto celular autoadensável.

REFERÊNCIAS

ALEXANDERSON, J. Relations between structure and mechanical properties of autoclaved aerated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 9, n. 4, p. 507-514, 1979. ISSN 0008-8846.

ALMEIDA, L. C. **Notas de aula da disciplina concreto armado**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Tech Committee. **ACI 523-1R-86**: guide for cast-in-place low density cellular concret. Detroit, 1986.

_____. **ACI 523.2R-96**: guide for precast cellular concrete floor, roof, and wall units. Detroit, 1996.

_____. **ACI 523.3R-14**: guide for cellular concretes above 50 lb/ft³ (800 kg/m³). Detroit, 2014.

_____. **ACI 523.4R -09**: guide for design and construction with autoclaved aerated concrete panels. Detroit, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM/C 796-04**: standard test method for foaming agents for use in producing cellular concrete using preformed foam. West Conshohocken, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP); ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM (ABESC); INSTITUTO BRASILEIRO DE TELAS SOLDADAS (IBTS). **Parede de Concreto**: coletânea de ativos: 2007/2008. Disponível em: <http://abesc.org.br/arquivos/coletania-aditivos.pdf>. Acesso em: 4 dez. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR NM 30**:agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 52**:agregado miúdo: determinação da massa específica e massa aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 13438**: blocos de concreto celular autoclavado: requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 67**: concreto:determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

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

_____. **NBR 5739**: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7222**: argamassa e concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 8522**: concreto – determinação dos módulos de elasticidade e de deformação e da curva tensão: deformação. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9935**: agregados: terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 12655**. concreto de cimento portland: preparo, controle e recebimento: procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 16055**: parede de concreto moldada no local para a construção de edificações: requisitos e procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12644**: concreto leve celular estrutural: determinação da densidade de massa aparente no estado fresco: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 12645**: execução de paredes de concreto celular espumoso moldadas no local: procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

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

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

_____. **NBR NM 248**: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BREDA, C. F. **Concreto celular espumoso moldado no local**: identificação dos incentivos e obstáculos enfrentados pelas empresas construtoras para a implementação do método construtivo. 2012. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

CONCRETO CELULARES BRASIL. [Home page]. Disponível em: < <http://www.concretoscelulares.com.br> />. Acesso em: 10 out. 2013.

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

ECOPORE. [Home page]. Disponível em: < <http://www.ecopore.com.br/>>. Acesso em: 3 dez. 2013.

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

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

FREITAS, I. **Produção e propriedades físicas e mecânicas do concreto celular espumoso**. 2004. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal Fluminense, Niterói. 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**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 24., 2004. Florianópolis. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2004. p. 2783-2790. **ISSN ENEGEP: 23183349**. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2004_Enegep0502_1789.pdf. Acesso em: 4 dez. 2014.

IOANNOU, I.; HAMILTON, A.; HALL, C. Capillary absorption of water and n-decane by autoclaved aerated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 6, p. 766-771, 2008. ISSN 0008-8846.

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

GEORGIADIS, A.; MARINOS, J. Effect of micropore structure on autoclaved aerated concrete shrinkage. **Cement and Concrete Research**, v. 21, n. 4, p. 655-662, 1991. ISSN 0008-8846.

GUGLIELMI, P. O. **Investigação da porosidade e resistência mecânica de um concreto celular argiloso curado em autoclave**. 2007. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

LAWRENCE, K.; LORSLEEM, A. C. J.; BARROS, M. M. B. **A influência do teor de fibras e de cimento nas características do concreto celular espumoso para emprego em vedações verticais de edifícios**. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO - Soluções para o Terceiro Milênio. 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, 1998.

MARTINS, P. B. M. **Influência da granulometria do agregado miúdo na trabalhabilidade do concreto**. 2008. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2008.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

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

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

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

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. edição. Ed. Pini. São Paulo. 1997.

PAGANI, A. **Aderência de Revestimento de Argamassa em Bloco de Concreto Celular Autoclavado**. 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

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

PROJETO ABNT/CEE 185:000.01-001-1: parede de concreto celular estrutural moldada no local para a construção de edificações: projeto, execução e controle: procedimento. São Paulo, 2014. Não tem valor normativo.

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

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

SILVA, M. D. **Estudo comparativo entre a utilização dos concretos convencional e leve nos elementos horizontais das estruturas de edifícios**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

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

TIKALSKY, P. J.; POSPISIL, J.; MACDONALD, W. A method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 5, p. 889 -893, 2004. ISSN 0008-8846.

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