

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

MURILO DE SOUZA NUNES

**CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS CELULARES OBTIDOS COM
ADITIVO INCORPORADOR DE AR COM DIFERENTES AREIAS**

FLORIANÓPOLIS, 2019

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

MURILO DE SOUZA NUNES

**CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS CELULARES OBTIDOS COM
ADITIVO INCORPORADOR DE AR COM DIFERENTES AREIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora:
Profa. Dra. Giovana Collodetti

Coorientador:
Prof. Dr. Alexandre Lima de Oliveira

FLORIANÓPOLIS, 2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Nunes, Murilo de Souza
Caracterização De Concretos Celulares Obtidos Com
Aditivo Incorporador De Ar Com Diferentes Areias / Murilo de
Souza Nunes ; orientação de Giovana Collodetti; coorientação
de Alexandre Lima Oliveira. - Florianópolis,
SC, 2019.

95 p.
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico
de Construção Civil.
Inclui Referências.

1. Concreto celular. 2. Ar incorporado. 3. Aditivos
químicos. 4. Consistência. 5. Retração. I. Collodetti,
Giovana. II. Oliveira, Alexandre Lima. III. Instituto
Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico
de Construção Civil. IV. Título.

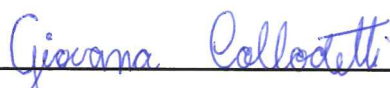
CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS CELULARES OBTIDOS COM ADITIVO INCORPORADOR DE AR COM DIFERENTES AREIAS

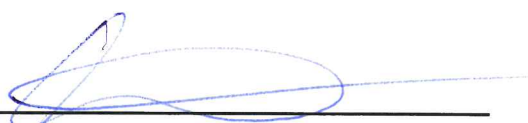
MURILO DE SOUZA NUNES

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

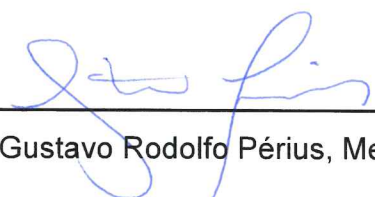
Florianópolis, 17 de Fevereiro, de 2020

Banca Examinadora:


Giovana Collodetti, Dra


Alexandre Lima de Oliveira, Dr


Andrea Murillo Betioli, Dra


Gustavo Rodolfo Périus, Me

RESUMO

Visando a otimização do processo da construção para economizar, simplificar e diminuir o tempo de execução, novas tecnologias relacionadas ao concreto leve estão sendo pesquisadas nos últimos anos. Desde o século XIX pensa-se na redução do peso de materiais cimentícios como uma forma de melhorar diversas características do concreto convencional, tais como: isolamento térmico, resistência ao congelamento e descongelamento, além da redução do seu peso próprio. Aliado a isso, o surgimento recente da norma de desempenho das edificações NBR 15575 (2013), vem trazendo desafios à indústria da construção e o concreto leve vem sendo aos poucos utilizados. Porém, a diminuição da densidade de massa do concreto geralmente vem acompanhada da redução da resistência mecânica e do aumento da sua retração. Estas características são influenciadas, entre outros fatores, pelo consumo de cimento, tipo e granulometria do agregado, adição de fibras e aditivos. No âmbito do concreto leve nacional, poucas pesquisas foram realizadas e atualmente é pouco utilizado. Ainda assim, devido às suas vantagens, o concreto leve celular vem sendo empregado na confecção de paredes monolíticas autoportantes concretadas *in-loco*, visando uma industrialização do processo de construção de habitações, com destaque para obras de cunho socioeconômico. Nesta pesquisa foram testados diferentes concretos celulares produzidos através de aditivo incorporador de ar com areias de granulometrias distintas (fina, média e grossa). Foram verificadas as características no estado fresco e endurecido: densidade de massa, consistência, resistência à compressão e retração. Também foram avaliadas as variações da densidade de massa ao longo do tempo de mistura e tempos de moldagem distintos. Como resultado, foi verificado que as areias fina e grossa prejudicaram a estabilidade das bolhas de ar nos concretos celulares enquanto que os concretos com areia média tiveram resultados mais satisfatórios. Os concretos com areia média e grossa obtiveram melhores resultados quanto à consistência, inclusive tendo potencial para serem autoadensáveis. Todos os concretos com areia fina e média se enquadraram nos requisitos quanto à densidade de massa e resistência à compressão da NBR 12646 (1992) para produção de paredes de concreto celular. Ao final da pesquisa conclui-se que a areia média é a mais indicada para a produção de concreto celular para composição de paredes autoportantes executadas no local para os tempos de mistura e moldagem analisados.

Palavras-chave: Concreto celular. Ar incorporado. Aditivos químicos. Consistência. Retração.

ABSTRACT

In order to optimize the construction process to save, simplify and decrease the execution time, new technologies related to lightweight concrete are being researched in the last years. Since the 19th century, it has been thought about reducing the weight of cementitious materials as a way to improve various characteristics of common concrete, such as: thermal insulation, resistance to freezing and thawing, in addition to reducing its self-weight. Allied to this, the recent publication of the building performance standard NBR15575 (2013), has brought challenges to the construction industry and lightweight concrete has been gradually used. However, the decrease in the mass density of the concrete usually comes together with the reduction of the mechanical strength and the increase of its shrinkage. These characteristics are influenced, among other factors, by the consumption of cement, type and granulometry of the aggregate, addition of fibers and admixtures. Within the scope of national lightweight concrete, little research has been carried out and it is currently underused. Even so, due to its advantages, lightweight cellular concrete has been used in the construction of self-supporting monolithic cast-in-place walls, aiming at an industrialization of the housing construction process with emphasis on socioeconomic buildings. In this research, different cellular concretes produced using an air-incorporating admixture with different grading sands (fine, medium and coarse) were tested. The characteristics in the fresh and hardened state were verified: bulk density, consistence, compressive strength and shrinkage. Bulk density variations over mixing time and different molding times were also evaluated. As a result, it was found that the fine and coarse sands reduced the stability of air bubbles in cellular concretes while those with medium grading sand had more satisfactory results. Concretes with medium and coarse grading sand obtained better results in terms of consistency, including the potential to be self-consolidating. All concretes with fine and medium grading sands met the requirements of NBR 12646 (1992) in relation to bulk density and compressive strength for the production of cellular concrete walls. At the end of the research, it was concluded that medium grading sand is more suitable for the production of cellular concrete for the composition of self-supporting cast-in-place walls for the analyzed mixing and modeling times.

Keywords: Cellular concrete. Entrained air. Chemical admixtures. Consistency. Shrinkage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação de concretos leves	8
Figura 2 – Espuma pré-formada e maquinário	8
Figura 3 - Dosagem de aditivos incorporadores de ar.....	9
Figura 4 - Diagrama dos tipos de concretos leves e suas variações.....	10
Figura 5 – Natureza básica química dos surfactantes.....	14
Figura 6 - Interação entre bolhas de ar e partículas de cimento	14
Figura 7- Escala de intervalo dimensional de sólidos e poros na pasta de cimento hidratada	15
Figura 8 - Seção polida de concreto convencional com ar incorporado (círculos escuros) vista de um microscópio	15
Figura 9 - Variação da densidade de massa com diferentes teores de aditivo incorporador de ar	18
Figura 10 - Abatimento de cone de Abrams de concretos celulares com diferentes níveis de incorporação	19
Figura 11 - Evolução de resistência à compressão de dois tipos de concretos celulares com massas específicas semelhantes.....	24
Figura 12 - Esquema dos procedimentos de produção, ensaios no estado fresco e moldagem.....	35
Figura 13 - Esquema de concretos celulares produzidos.....	40
Figura 14 – Processo de mistura de concretos celulares e concretos base.....	43
Figura 15 - Medição da densidade de massa no estado fresco	45
Figura 16 - Medição do espalhamento - mini slump-flow	47
Figura 17 - Molde de variação dimensional preparado	50
Figura 18 - Moldagem corpos de prova de retração.....	51
Figura 19 – Curvas granulométricas areias utilizadas.....	54
Figura 20 – Densidade de massa t_0' x Tempo de mistura aditivo incorporador de ar (t_m) em t_0	58
Figura 21 - Teor de ar incorporado xTempo de mistura (t_m) em t_0	59
Figura 22 - CCAF: Densidade de massa em t_0' e t_{30}' x Tempo de mistura (t_m)	60

Figura 23 - CCAM: Densidade de massa em t_0' e t_{30}' x Tempo de mistura (t_m)	61
Figura 24– CCAG: Densidade de massa em t_0' e t_{30}' x Tempo de mistura (t_m)	61
Figura 25 - Separação das bolhas de ar e segregação de material pesado	62
Figura 26 - Espalhamento dos concretos x Tempo de mistura ($t_{30,}$).....	63
Figura 27 - Espalhamentos de alguns concretos celulares	64
Figura 28 – CCAF: densidade de massa t_0 , e $t_{30,}$ e massa específica x Tempo de mistura (t_m)	66
Figura 29 – CCAM: densidade de massa e massa específica em t_0 , e $t_{30,}$ no estado fresco e endurecido x Tempo de mistura (t_m)	67
Figura 30 - CCAG: densidade de massa e massa específica t_0 , e $t_{30,}$ x Tempo de mistura (t_m)	68
Figura 31 - Exsudação em corpos de prova CCAG	69
Figura 32 - Ensaio de resistência à compressão.....	70
Figura 33 – Resistência à compressão x densidade de massa em t_0 , e $t_{30,}$	71
Figura 34 - Resistência à compressão x massa específica em t_0 , e $t_{30,}$	71
Figura 35 - Fator de eficiência concretos celulares em t_0'	72
Figura 36 - Fator de eficiência Concretos em t_{30}'	73
Figura 37 – CCAF: variação dimensional: massa	74
Figura 38 – CCAM: variação dimensional: massa.....	75
Figura 39 - CCAG: variação dimensional: massa.....	75
Figura 40 - CCAF: variação dimensional: retração.....	76
Figura 41 - CCAM: variação dimensional: retração.....	77
Figura 42 – CCAG: variação dimensional: retração	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes de espalhamento (slump-flow) - NBR 15823-1 (2017)	20
Quadro 2 - Classes de viscosidade plástica aparente t_{500} (sob fluxo livre) - NBR 15823-1 (2017).....	21
Quadro 3 - Classes de índice de estabilidade visual - NBR 15823-1 (2017)....	21
Quadro 4 - Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado) - NBR 15823-1 (2017)	21
Quadro 5 - Características do concreto apresentados projeto Habitação 1.0 ..	30
Quadro 6 - Valores de ψ_6 conforme o número de exemplares de ensaio.....	33
Quadro 7 - Descrição e características dos materiais industrializados utilizados	37
Quadro 8 - Consumo, proporção e teor de materiais para teste piloto	38
Quadro 9 - Consumo, proporção e teores ajustados.....	39
Quadro 10 - Características e composição dos concretos produzidos.....	41
Quadro 11 - Características das areias utilizadas	55
Quadro 12 - Resumo de resultados de densidade de massa dos concretos ...	56
Quadro 13 - Consumo de cimento corrigido concretos celulares produzidos ..	57
Quadro 14 - Resumo de resultados de densidade de massa e massa específicas dos concretos celulares.....	65

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Justificativa.....	3
1.2. Definição do problema	5
1.3. Hipótese	5
1.4. OBJETIVOS	6
1.4.1. Objetivo Geral.....	6
1.4.2. Objetivos Específicos	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. Concreto Leve	7
2.2. Materiais constituintes.....	10
2.2.1. Cimento	10
2.2.2. Água	11
2.2.3. Agregado miúdo	12
2.2.4. Aditivos	12
2.3. Propriedades do concreto celular espumoso	16
2.3.1. Concreto celular no estado fresco	17
2.3.2. Concreto celular no estado endurecido	22
2.4. Concreto celular	29
2.4.1. Dosagens usuais	29
2.4.2. Ensaio de caracterização do concreto <i>in loco</i>	31
2.4.3. Densidade de massa	31
2.4.4. Resistência à compressão simples.....	32
3. METODOLOGIA	34
3.1. Materiais.....	36

3.2.	Testes Piloto e Definição de Dosagem Padrão	37
3.3.	Produção de concretos celulares com diferentes tipos de areias e diferentes tempos de mistura;.....	40
3.4.	Procedimento de Produção dos Concretos	42
3.4.1.	Mistura dos componentes.....	42
3.5.	Ensaio Realizados no estado fresco e endurecido.....	43
3.5.1.	Densidade de massa	44
3.5.2.	Teor de ar incorporado	45
3.5.3.	Consistência	46
3.5.4.	Resistência à Compressão.....	48
3.5.5.	Massa específica	49
3.5.6.	Variação dimensional: massa e retração.....	50
4.	RESULTADOS	54
4.1.	Caracterização dos agregados miúdos.....	54
4.1.1.	Granulometria.....	54
4.1.2.	Massa específica, módulo de finura e diâmetro máximo	55
4.2.	Ensaio no estado Fresco.....	55
4.2.1.	Densidade de Massa e teor de ar incorporado.....	55
4.2.2.	Consistência	63
4.3.	Ensaio no estado Endurecido.....	65
4.3.1.	Massa específica	65
4.4.	Resistência à compressão	69
4.5.	Variação Dimensional: Massa.....	73
4.6.	Variação Dimensional: Retração.....	76
5.	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS.....	81

1. INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é o material de construção mais utilizado em todo mundo. Isso se deve ao fato de seus componentes serem produzidos de forma relativamente fácil e sua aplicação versátil (ROSSIGNOLO, 2010). Além disso, os concretos convencionais são duráveis, possuem resistência à compressão e rigidez adequadas e um custo relativamente baixo. Porém, o concreto convencional tem suas limitações tais como peso próprio elevado, baixa resistência à tração e a agentes químicos (CORTELASSI 2005, apud. TEZUKO, 1989).

Com o crescente avanço da tecnologia em diversos setores, particularmente no da construção, houve o impulsionamento para o surgimento de materiais que satisfizessem às necessidades impostas em obra. Os concretos especiais, segundo Neville e Brooks (2010), são concretos que tiveram sua matriz base modificada de alguma forma para melhoria de necessidades específicas e assim atender a objetivos especiais. Dentre os vários tipos de concretos especiais estão: concreto autoadensável, concreto coloidal, concreto colorido, concreto massa, concreto ciclópico, concreto pesado, concreto leve, concreto celular autoclavado, entre outros (KOSMATKA, KERKHOFF E PANARESE, 2008).

Segundo ABCP (2002), desde o século XIX pensa-se na redução do peso de materiais produzidos com cimento. Neste período também houve diversas experiências para produção de concretos com argamassas de sílica e cal aeradas através de agente metálico e curados em câmara de vapor. Em XX iniciou-se a fabricação de concretos celulares espumosos, através de espuma de cola vegetal, gelatina, formaldeídeos, sabões de resina, além de outros. Em 1929, foram criadas várias patentes de agentes espumígenos, além de equipamentos e procedimentos para mistura.

Na prática, a diminuição da densidade de massa do concreto é obtida graças à presença de vazios, substituindo parte dos materiais sólidos do concreto por ar, sejam através dos agregados, na argamassa ou nos interstícios entre as partículas de agregados graúdos (NEVILLE e BROOKS, 2010; ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2011).

Segundo Rossignolo e Agnesini (2011), a utilização de concretos leves como conhecemos hoje iniciou-se na I Guerra Mundial, quando nos EUA foram construídas embarcações com concreto de agregados leves (xisto expandido), tendo densidade de massa em torno de 1700 kg/m^3 e resistência à compressão de 30 MPa.

Um exemplo da aplicação racional do concreto leve é dado por Mehta e Monteiro (2008): O edifício de 52 andares, One Shell Plaza, localizado em Houston, Texas, foi construído com toda sua estrutura em concreto leve. As Paredes de contraventamento, pilares e radier foram executados com concreto de densidade de massa de 1840 kg/m^3 e com resistência à compressão de 41,2 MPa. Se, ao invés do concreto leve o edifício tivesse sido feito com concreto convencional, suportaria apenas 35 andares, devido ao limite da capacidade de suporte do solo.

Segundo Du e Folliard (2005), provavelmente um dos mais importantes avanços tecnológicos no último século foi o surgimento dos agentes de incorporação de ar no concreto. Com estes aditivos pode-se obter, além de outros materiais, os chamados concretos celulares.

O concreto celular é produzido através da introdução de bolhas de ar em uma argamassa plástica. Mais usualmente, é inserido na argamassa um tipo de espuma pré-formada gerada por maquinário e aditivos específicos, onde consegue-se um alto teor de ar incorporado. Outra possibilidade mais prática, porém menos utilizada, é a aplicação de aditivo incorporador de ar acrescentado durante a mistura do concreto (PETRUCCI, 1983).

Segundo Neville e Brooks (2013), o concreto celular é principalmente utilizado para proteção contra o fogo e isolamento térmico por conta da sua baixa condutividade térmica em comparação ao concreto convencional. Em aplicações estruturais, o material é geralmente empregado em formato de blocos autoclavados e em elementos pré-moldados, mas também substitui o material de enchimento em pisos ou lajes pré-fabricadas com vigotas.

Em nível nacional, este tipo de material também é utilizado para diversas aplicações: nivelamento de pisos, contrapisos, enchimento de rebaixo de lajes, isolamento térmico e acústico, isolamento de coberturas, paredes de divisória, painéis pré-moldados leves, blocos de alvenaria, etc. Mas, recentemente o concreto celular vem sendo aplicado no lugar do concreto convencional na confecção de paredes moldadas *in-loco*, processo construtivo que visa a otimização da mão de obra, racionalização dos materiais, pouca geração de entulho e principalmente a alta velocidade de execução. Pelas diversas vantagens, este método vem sendo bastante competitivo em habitações populares de baixa renda no Brasil entre os diferentes

processos construtivos utilizados (LAWRENCE, LORDSLEEM JÚNIOR e BARROS, 1998).

Segundo Silva (2015), a literatura classifica o concreto celular obtido com espuma pré-formada como o melhor para confecção de paredes estruturais moldadas *in-loco*. Porém, em sua pesquisa, o autor conclui que o concreto celular obtido com a inserção de agente incorporador de ar diretamente à mistura é tão vantajoso quanto aquele indicado pela literatura para tal produção. Isso se deve ao fato de se conseguir um controle na introdução e estabilidade de bolhas de ar com os aditivos de alta eficiência atuais. Adicionado a isso, estudos realizados por Menezes (2006) com mais de 11.000 residências apontam que um dos grandes problemas na utilização de concreto celular para a fabricação de paredes é o excesso de retração inerente ao material.

Este trabalho visa a elaboração e caracterização de concretos celulares obtidos com aditivos incorporadores de ar de alta incorporação com diferentes areias para composição de paredes monolíticas autoportantes moldadas *in-loco* e avaliar as suas propriedades no estado fresco e endurecido.

1.1. Justificativa

Segundo Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2008), um dos grandes avanços da tecnologia da construção foi o desenvolvimento do concreto com ar incorporado em meados de 1930. Atualmente, a incorporação de ar é obtida principalmente através de aditivos introduzidos ao concreto.

A incorporação de ar em teores maiores tem a capacidade de diminuir significativamente a densidade de massa do concreto, podendo chegar desde 2.000 kg/m³ até 300 kg/m³, no caso dos concretos leves (PETRUCCI, 1983).

No entanto, a diminuição da sua densidade de massa vem acompanhada da redução da sua resistência mecânica. Ainda assim, Zhang e Gjorv (1991) afirmam que quando utilizado para aplicações estruturais, a densidade do concreto leve é mais importante do que sua resistência. Isso pode ocorrer, uma vez que para um mesmo patamar de resistência, uma diminuição da densidade permite uma economia com peso próprio nos projetos estruturais e de fundação.

Por conta dos seus vazios de ar, os concretos leves também possuem bom isolamento térmico e tem uma durabilidade satisfatória, porém não contam com grandes resistências à abrasão. Em geral, concretos leves são mais caros, requerem mais cuidados na sua mistura, manuseio e adensamento em comparação aos concretos convencionais. Entretanto, para diversos usos, as vantagens do concreto leve ultrapassam suas desvantagens, e há uma contínua tendência mundial em se utilizar concreto leve em aplicações tais como concreto protendido, arranha-céus e até telhados em concha (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Segundo Teixeira Filho e Tezuka (1992), devido as suas propriedades térmicas e acústicas, o uso do concreto celular em detrimento do concreto convencional tem se mostrado vantajoso no processo de moldagem de paredes *in-loco*. Com esta substituição, consegue-se reduzir as desvantagens do concreto convencional sem prejuízo das necessidades impostas pelo processo, uma vez que as características físicas e mecânicas podem ser ajustadas com sua densidade de massa tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Porém, nos últimos anos, houve poucos estudos no desenvolvimento do concreto leve nacional e a sua utilização é reduzida dentro da indústria da construção (ANGELIN, 2014). Adicionado a isso, há o recente surgimento de aditivos incorporadores de ar de alta eficiência, os quais necessitam de estudos do potencial da sua aplicação em paredes de concreto celular autoportante moldadas no local.

No Brasil, por volta da década de 80, o concreto celular começou a ser utilizado na confecção de paredes moldadas *in-loco* para a construção de casas populares em Natal (RN) e Manaus (AM). Em 2002, somavam aproximadamente 40.000 casas construídas em todo o Brasil (ABCP, 2002). Com a experiência dessas construções, um dos fatores positivos mais destacados é o conforto térmico proporcionado pelas paredes.

O sistema de construção com paredes de concreto celular visa a industrialização e racionalização, desenvolvimento de tecnologias com emprego de componentes construtivos simples com caráter industrial, facilidade de montagem, redução de entulho, além de produzir uma moradia com custo acessível, segura, agradável ao usuário quanto à aparência, conservação e limpeza, conforto térmico e acústico e estanqueidade (MENEZES, 2006).

Menezes (2006) em sua pesquisa referente à avaliação de desempenho estrutural de residências com paredes de concreto celular com espuma pré-formada,

conclui que para alguns arranjos de paredes houve fissuras excessivas, e portanto não atenderam aos critérios de desempenho considerando o Estado Limite de Serviço (ELS) estabelecidos pelo Projeto de Norma 02.136.01.002 (ABNT, 2004, atual NBR 15575 - Parte 2 (ABNT, 2013)). O autor atribui o surgimento dessas fissuras à excessiva retração do concreto celular em relação a paredes totalmente armadas e, portanto, sugere uma complementação de armadura para controlar seu efeito.

Com o intuito de contribuir para o desenvolvimento do concreto celular obtido com aditivo incorporador de ar, este trabalho irá produzir, caracterizar e avaliar este material quanto ao tipo de agregado miúdo empregado, tempo de mistura e tempo de moldagem.

1.2. Definição do problema

O problema proposto para este trabalho pode ser definido pelas seguintes perguntas:

- a) Qual a influência de areias de diferentes granulometrias nas propriedades do concreto celular obtido com aditivo incorporador de ar nos estados fresco e endurecido?
- b) Quais os efeitos na retração de concretos celulares compostos de areias de diferentes granulometrias?

1.3. Hipótese

A presente pesquisa tem como hipótese que a composição de concretos celulares com areias de diferentes granulometrias, o tempo de mistura de e tempo de moldagem podem alterar as características do concreto celular tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, o que pode alterar a sua aplicação em paredes monolíticas autoportantes moldadas em loco.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo Geral

Esta pesquisa teve como objetivo analisar a elaboração e caracterização de diferentes concretos celulares, obtidos com aditivo incorporador de ar e compostos com diferentes granulometrias de areias e processos de mistura.

1.4.2. Objetivos Específicos

- a) Confeccionar concretos celulares compostos por areias de diferentes granulometrias e avaliar a ação do aditivo incorporador de ar com diferentes tempos de mistura e moldagem;
- b) Caracterizar os concretos produzidos, verificando-se as normas vigentes, quanto ao desempenho mecânico, propriedades físicas nos estados fresco e endurecido para composição de paredes monolíticas autoportantes moldadas no local.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Concreto Leve

Os concretos leves são caracterizados pela baixa densidade de massa em relação aos concretos convencionais. Os concretos ditos convencionais têm densidade de massa em torno de 2300 a 2500 kg/m³. Já os concretos leves podem ter desde 1800 kg/m³ e chegar até 300 kg/m³ (PETRUCCI, 1983, MEHTA; MONTEIRO, 2008).

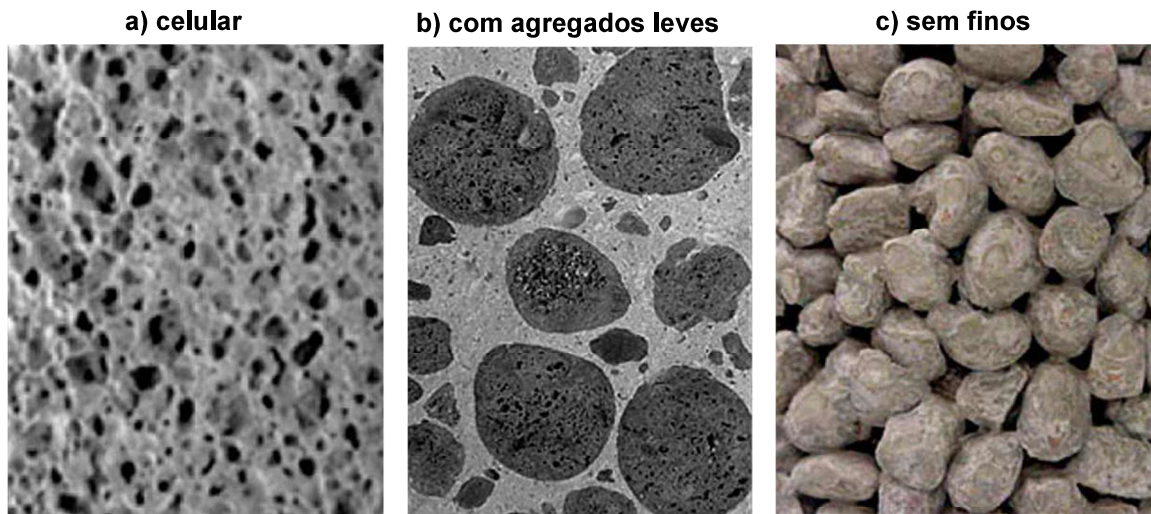
A NBR 8953 (ABNT, 2015) classifica os concretos segundo a sua massa específica seca como sendo: Concreto normal, entre 2000 e 2800 kg/m³, concreto leve, abaixo de 2000 kg/m³ e o concreto pesado acima de 2800 kg/m³.

Segundo Petrucci (1983), Rossignolo (2009), Neville e Brooks (2013) e Rossignolo e Agnesini (2011) o concreto leve pode ser classificado conforme seus métodos de obtenção, sendo eles:

- a) Concreto **celular, aerado, espumoso ou gasoso**: Produzido através da introdução de grande quantidade de vazios no concreto ou na argamassa;
- b) Concreto com **agregados leves**: Utilizando-se agregados leves de baixa densidade de massa aparente;
- c) Concreto **sem finos**: Obtido através da supressão de agregados miúdo da mistura.

Na Figura 1 são exemplificados os três tipos de concreto leve. Conforme classificação, uma das maneiras de se obter concreto leve é através da introdução de bolhas de gás na mistura da argamassa fresca (cimento, areia e aditivos) do concreto. O intuito é a produção de um material com estrutura celular contendo vazios com tamanho entre 0,1 e 1 mm. A película que envolve estes vazios ou “células” deve ser capaz de suportar o processo de mistura e adensamento. O resultado dessa mistura é conhecido como concreto poroso, concreto aerado ou ainda como concreto celular. Apesar disso, alguns autores afirmam que o termo “concreto”, é inapropriado, pois não há a presença de agregado graúdo na mistura deste material (PETRUCCI, 1983 e NEVILLE e BROOKS, 2013). Neste trabalho, a nomenclatura usual será mantida.

Figura 1 – Classificação de concretos leves



Fonte: Adaptado de Rossignolo (2009)

Ainda entre os concretos leves chamados de concreto celulares, pode-se classificá-los quanto à forma de introdução de bolhas de ar à mistura, segundo Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2008) e Neville e Brooks (2013):

- a) o **concreto gasoso** é obtido através de uma reação química que gera um gás na argamassa fresca. O gás se mantém até o endurecimento do concreto e fica incorporado em grande quantidade.
- b) Já o **concreto espumoso** pode ser obtido ainda de outras duas formas:
 - adicionando uma espuma pré-formada e estável à argamassa durante a mistura em misturador comum. Esta espuma deve ser gerada por maquinário específico (Figura 2).

Figura 2 – Espuma pré-formada e maquinário

a) Espuma pré-formada



Fonte: Menezes (2006)

b) Espuma pré-formada



Fonte: Menezes (2006)

- adicionando-se um agente espumante (proteínas hidrolisadas ou resinas de sabão são comumente utilizadas) que introduz e estabiliza bolhas de ar durante a mistura do concreto (Figura 3).

Figura 3 – Dosagem de aditivos incorporadores de ar

a) Dosagem de aditivo diretamente na betoneira



Fonte: HYTIMG (2019)

b) Dosagem de aditivo diretamente ao caminhão betoneira

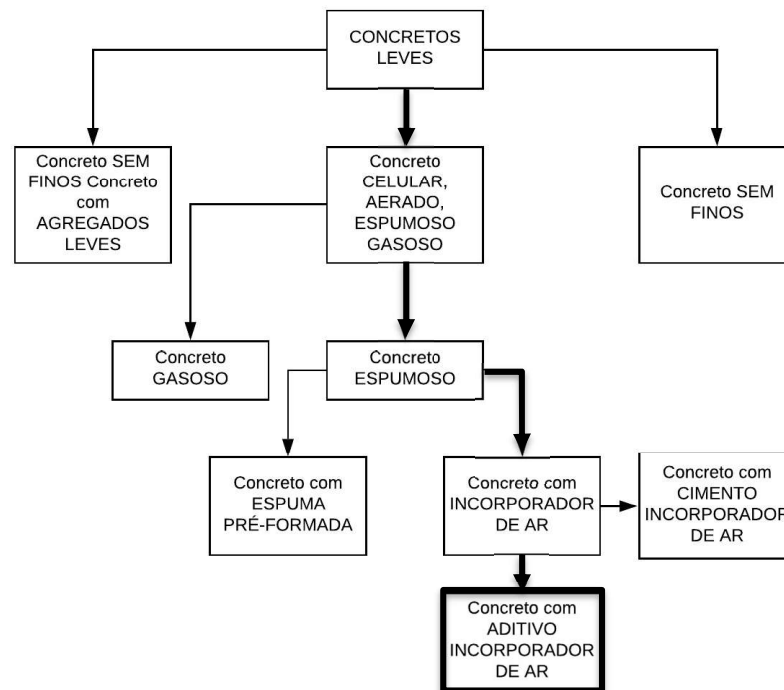


Fonte: CONCRETE DECOR (2019)

Neste último caso, o concreto de ar incorporado pode ser produzido tanto utilizando-se um aditivo incorporador de ar (agente espumante) ou um cimento incorporador de ar onde as adições de incorporação de ar são integradas ao clínquer durante a fabricação do cimento. Cimentos incorporadores de ar geralmente produzem uma quantidade adequada de incorporação de ar para a maioria das aplicações em que se necessita a introdução de bolhas de ar. Porém, podem haver casos em que não se atinja a quantidade esperada de ar incorporado somente com o uso deste tipo de cimento. Para essas situações deve-se utilizar aditivo incorporador para complementação (KOSMATKA, KERKHOFF E PANARESE, 2008).

Para um melhor entendimento, um diagrama que resume os tipos de concretos leves é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Diagrama dos tipos de concretos leves e suas variações



Fonte: Autor

Por conta da sua praticidade de aplicação e falta de estudos do seu uso, será utilizado nesta pesquisa o aditivo incorporador de ar como agente aerador para obtenção do concreto celular.

2.2. Materiais constituintes

O concreto leve celular é fabricado com cimento Portland, areia, água, espuma ou agentes incorporadores de ar, podendo também haver a presença de brita (SACHT, 2008). Também podem ser utilizados aditivos plastificantes para melhora da trabalhabilidade e adições para reforço, tais como fibras de diversos materiais. A seguir serão abordados os materiais que comumente compõem o concreto celular, suas influências no material e classificações normativas.

2.2.1. Cimento

Segundo Mehta e Monteiro (2011), cimentos hidráulicos são aqueles que endurecem pela reação com a água e também formam um material resistente a ela.

Atualmente são constituídos basicamente por cimento Portland e suas variantes. O qual é produzido basicamente através da mistura de um material cálcico (calcário ou giz, por exemplo), sílica e alumina (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Já a NBR 16679 (ABNT, 2018) define o cimento Portland como um ligante hidráulico obtido através da moagem de clínquer Portland onde formas de sulfato de cálcio e adições minerais são acrescentadas durante a sua produção. Das variações na sua composição, podem surgir diversos tipos de cimento Portland com a presença de diferentes propriedades. Alguns deles são: cimento Portland comum, pozolânico, branco, de baixo calor de hidratação, resistente à sulfatos, de alto-forno, de alta resistência inicial e de alta resistência inicial especial.

Segundo a referida norma, o cimento de alta resistência inicial (ARI) é o único que pode ser classificado com resistências significativas com até 24 horas de cura. Por isso, segundo Ferreira (1987), é que este tipo de aglomerante tem vantagens na composição de concretos celulares.

Devido à necessidade de desforma rápida em construções modulares, o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V - ARI) é uma ótima opção. Segundo Neville e Brooks (2013), este cimento tem crescimento de resistência rápida devido a dois fatores principais que os diferem dos demais tipos de cimento: maior teor de C_3S (silicato tricálcico) e maior finura, em torno de $325 \text{ m}^2/\text{kg}$ (ASTM, tipo III).

2.2.2. Água

Petrucci (1998) e Neville e Brooks (2013) afirmam que a água utilizada para amassamento em concretos não deve conter impurezas que possam prejudicar as reações entre ela e os compostos de cimento. Entretanto, alguma quantidade de impureza pode ser tolerada, em geral, águas que possuem menos 2000 ppm de sólidos dissolvidos podem ser utilizadas na constituição de concretos sem que haja demais precauções. Os autores destacam que, por via de regra, qualquer água passível de beber, pode ser empregada na confecção de concretos.

Porém, segundo Neville e Brooks (2013), o fato de a água ser potável, não necessariamente permite a sua utilização como água de amassamento. O autor destaca que águas com excesso de potássio e sódio podem fazer com que ocorra reação álcali-agregado.

2.2.3. Agregado miúdo

Os agregados utilizados no concreto celular costumam compor a maior parcela no material e devem ser definidos de forma semelhante à de argamassas convencionais. Porém, este tipo de concreto pode ser também obtido sem areia (agregado miúdo), ou seja, apenas com pasta de cimento. Com este uso, conseguem-se densidades de massa muito baixas, em torno de 300 kg/m^3 . Entretanto, este concreto só deve ser utilizado para fins não estruturais, tais como isolamento térmico (FERREIRA, 1987; NEVILLE e BROOKS, 2013).

A resistência mecânica dos agregados geralmente não afeta significativamente a resistência da mistura como um todo, pois a ruptura ocorre quase sempre na pasta ou na sua interface com o agregado. Somente considera-se a resistência mecânica do agregado quando esta é tão inferior que a ruptura possa ocorrer inicialmente no agregado. (COUTINHO, 1974 apud FERREIRA, 1987).

Ferreira (1987) ressalta que a granulometria, forma e textura dos grãos de areia influenciam significativamente na maioria das características físico-mecânicas do concreto celular e, portanto, devem ser verificadas.

O autor afirma que para faixas de concreto com densidades mais altas (1400 a 1800 kg/m^3) as areias mais grossas são mais indicadas, assim como para densidades reduzidas (por volta de 1000 kg/m^3) areias com teores de finura maior são mais eficientes. Entretanto, afirma Ferreira (1987), o teor de finos na areia (dimensões abaixo de $250 \mu\text{m}$), não deve ser ultrapassado em 20%.

Segundo Neville e Brooks (2010), agregados com partículas finas tem maiores superfícies específicas que demandam mais água para serem lubrificadas, assim como agregados com formas irregulares e textura rugosa requerem mais água que agregados arredondados.

Outras influências em que os agregados podem interferir nas características do concreto celular final são: a presença de substâncias nocivas ou impurezas contidas no agregado e levadas à mistura do concreto (FERREIRA, 1987).

2.2.4. Aditivos

Segundo Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2008), de um modo geral, o concreto deve ser trabalhável, de fácil acabamento, resistente, durável, resistente à água e às

intempéries. O autor ainda ressalta que essas qualidades podem, na maioria das vezes, serem obtidas facilmente e economicamente pela seleção de materiais adequados ao invés de recorrer a aditivos. Porém, uma exceção é justamente à incorporação de ar ao concreto que necessita de aditivos para ocorrer em quantidades consideráveis.

Para uma aplicação efetiva de qualquer aditivo, deve-se levar em conta fatores como: tipo, procedência e quantidade de cimento, teor de água, formato, granulometria e proporção dos agregados, tempo de mistura, abatimento (*slump*) e temperatura do concreto (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2008). Portanto, serão realizados ensaios preliminares para caracterização dos materiais a serem empregados no concreto a fim de ter dados para a realização da dosagem.

2.2.4.1. *Aditivos Incorporadores de ar*

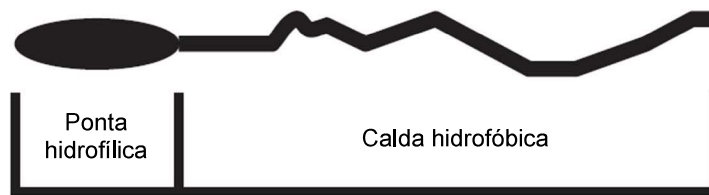
Os aditivos incorporadores de ar são utilizados para introduzir e estabilizar bolhas de ar microscópicas no concreto. A introdução de ar pode ser tanto para diminuição da densidade do concreto quanto melhorar a sua durabilidade em ciclos de congelamento e descongelamento e a resistência à degradação superficial causada por agentes químicos descongelantes nos casos de lugares que sofrem com problemas devido à baixas temperaturas. Além disso, melhora significativamente a trabalhabilidade, e reduz ou elimina a segregação e a exsudação (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2008).

Segundo Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2008), vários aditivos incorporadores de ar comerciais são fabricados com diversos materiais. A maioria deles é constituído de um ou mais dos seguintes materiais: Resina de madeira (resina Visol), hidrocarboneto sulfonados, ácidos graxos e resinosos e resinas sintéticas.

Segundo Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2008), o aditivo incorporador de ar estabiliza as bolhas formadas durante o processo de mistura, eleva a incorporação de bolhas de vários tamanhos pela redução da tensão superficial da água de amassamento, impedindo a coalescência das bolhas e fixa elas às partículas de cimento e agregado. Os aditivos de incorporação de ar aniônicos são hidrofóbicos e eletricamente carregados (aditivos não iônicos ou sem carga também podem existir), compostos de surfactantes (ver Figura 5). A carga elétrica negativa (parte da ponta do surfactante) é atraída pela carga positiva dos grãos de cimento, o que ajuda na

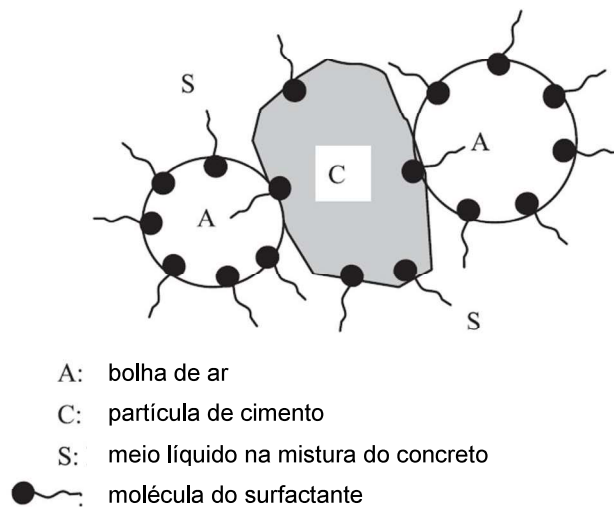
estabilização das bolhas. O aditivo forma uma película repelente à água e firme, semelhante à película de espuma, que tem resistência e elasticidade suficiente para conter e estabilizar as bolhas de ar e evitar que elas se unam. A película hidrofóbica também mantém a água fora das bolhas como mostrado na Figura 6. A ação da mistura mecânica dispersa as bolhas de ar. As partículas dos agregados finos também agem com uma malha tridimensional que ajuda a manter as bolhas na mistura.

Figura 5 – Natureza básica química dos surfactantes



Fonte: Adaptado de DU e FOLLIARD, 2004

Figura 6 - Interação entre bolhas de ar e partículas de cimento



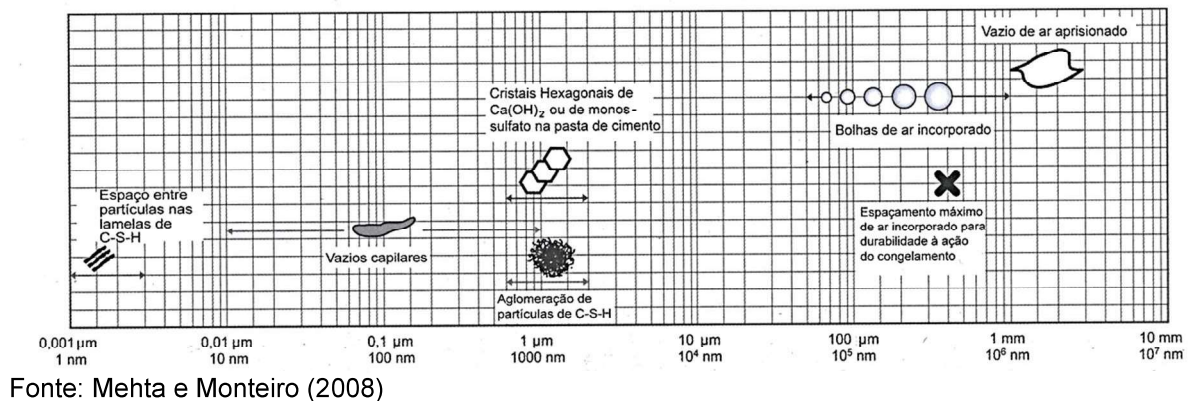
Fonte: Adaptado de DU e FOLLIARD, 2004

Mehta e Monteiro (2008), ressaltam que os vazios de ar incorporado não podem ser confundidos com os vazios capilares e nem com os vazios de ar aprisionado. Os vazios capilares são espaços não preenchidos pelos componentes sólidos da pasta de cimento hidratada, e em algumas pastas podem variar de 10 a 50 nm. Já os vazios de ar aprisionado, segundo Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2008), são resultado da mistura, manejo e adensamento e estão presentes em todos os concretos e, em grande parte, ocorrem devido às características dos agregados. As bolhas de ar intencionalmente incorporadas ao concreto têm dimensões

extremamente pequenas, diâmetros entre 10 e 1000 μm . Enquanto os vazios de ar aprisionados têm aproximadamente 1000 μm ou mais.

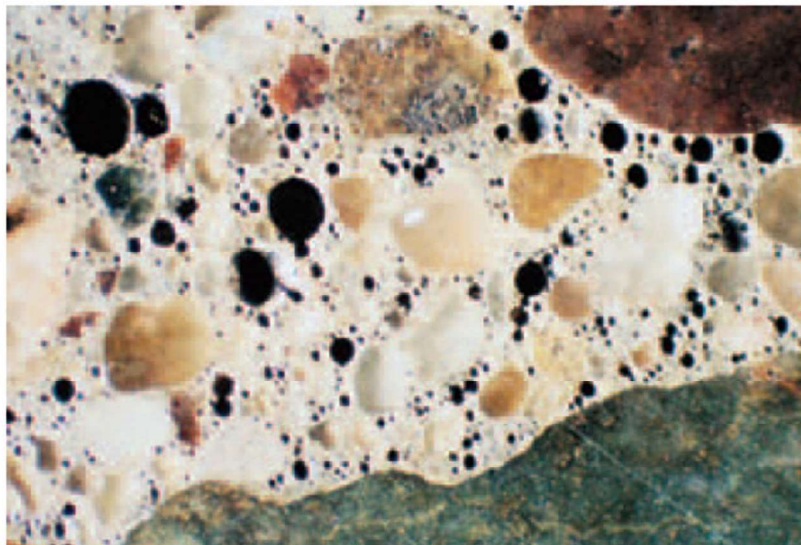
Para melhor exemplificação, na Figura 7 é ilustrada uma escala com as dimensões destes e outros componentes do concreto.

Figura 7 - Escala de intervalo dimensional de sólidos e poros na pasta de cimento hidratada



A maioria dos vazios de ar incorporado, estão em diâmetros entre 10 e 100 μm , como mostrado na Figura 8, onde as bolhas de ar são bem dispersas, aleatoriamente distribuídas e não são interconectadas (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2008).

Figura 8 - Seção polida de concreto convencional com ar incorporado (círculos escuros) vista de um microscópio



Fonte: KOSMATKA, KERKHOFF E PANARESE (2008)

Segundo Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2008), em concretos convencionais, sem a incorporação de ar, o ar contido fica em torno de 1,5% para agregados de no máximo 25 mm de diâmetro. Para este mesmo concreto resistir às condições severas de baixa temperatura, seria necessário ter por volta de 6%, tanto de ar aprisionado (vazios com grandes dimensões) quanto para ar incorporado (vazios pequenos).

2.2.4.2. Aditivo superplastificante

Os aditivos superplastificantes são utilizados para aumentar a fluidez dos concretos e reduzir a sua relação água/cimento. Podem ser compostos de: condensados de formaldeído de melamina sulfonada, condensados de formaldeído de naftaleno sulfonado, lignosulfonatos e policarboxilatos (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2008).

Semelhante aos aditivos incorporadores de ar, segundo Mehta e Monteiro (2008), os aditivos superplastificantes são surfactantes que quando adsorvido nas partículas do cimento o carregam negativamente o que ajuda na diminuição significativa da tensão superficial da água entorno dessas partículas fazendo com que eleve consideravelmente a fluidez da mistura. Pelo efeito descrito, os superplastificantes podem causar uma redução de três a quatro vezes do teor de água de amassamento ao se comparar os redutores de água normais. Por isso, também, são chamados de aditivos redutores de água de alta eficiência.

Além da redução da relação água/cimento, os superplastificantes causam o aumento da resistência inicial nos concretos celulares, sem haver perda da sua trabalhabilidade. Por conta deste efeito, a retração higroscópica também diminui o que evita o surgimento de fissuras por conta da redução das tensões internas (TEIXEIRA, 1992 apud MENEZES, 2006).

2.3. Propriedades do concreto celular espumoso

Por conta da variação principalmente da sua densidade de massa em relação aos demais tipos de concreto, outras propriedades do concreto celular também são alteradas, tais como: resistência mecânica, módulo de elasticidade, condutibilidade térmica, etc. (NEVILLE E BROOKS, 2010). A fim de entender estas variações e outras

características, são apresentadas a seguir as propriedades do concreto celular no estado fresco e no estado endurecido mais significativas.

2.3.1. Concreto celular no estado fresco

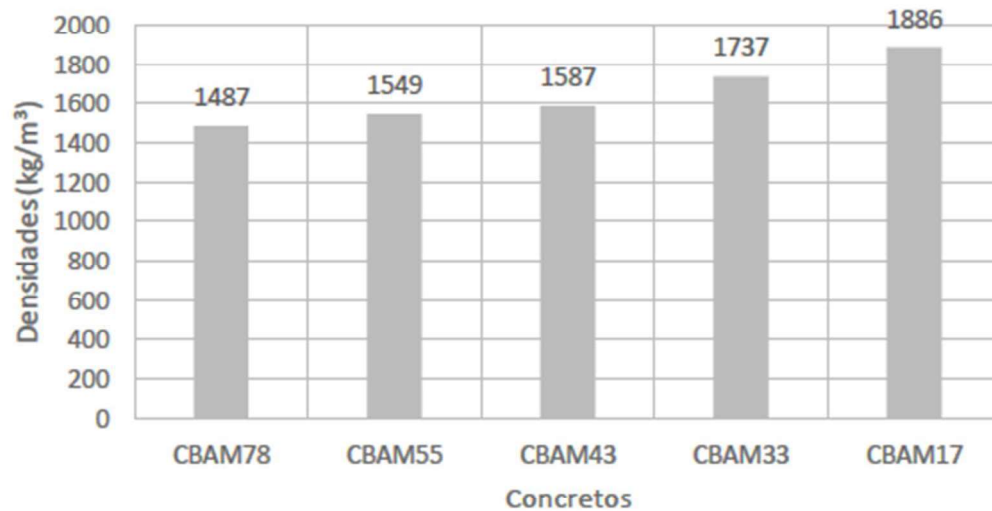
A seguir serão apresentadas as duas características mais importantes do concreto celular no estado fresco, a saber: a densidade de massa e a consistência. Também serão abordados os requisitos e classificações normativas, bem como relatos e recomendações de autores da área.

2.3.1.1. *Densidade de massa*

A densidade de massa é determinada logo após a mistura dos componentes do concreto com ele ainda fresco. Segundo Neville e Brooks (2013), a densidade de massa do concreto é necessária para a avaliação de fatores como a trabalhabilidade e teor de ar. Esta característica do concreto pode ser facilmente mensurada com a determinação da massa do concreto fresco em um recipiente padrão de volume conhecido.

A densidade de massa no concreto celular pode ser alterada conforme a necessidade, variando-se também o teor de aditivo empregado na mistura. Silva (2014) apresenta algumas dosagens de concreto celular onde modificou-se o teor de aditivo incorporador de ar e obteve-se diferentes densidades de massa. Os resultados são apresentados na Figura 9, onde o valor dos teores de aditivo incorporador de ar dos concretos CBAM78, 55, 43, 33 e 17 são respectivamente: 0,78; 0,55; 0,43; 0,33 e 0,17% em relação à massa de cimento.

Figura 9 - Variação da densidade de massa com diferentes teores de aditivo incorporador de ar



Fonte: SILVA, 2018

Pode-se perceber a relação direta da diminuição da densidade de massa com o aumento do teor de aditivo. Esta diminuição ocorre, conforme apontado por Silva (2014, p. 103), “devido ao aumento da concentração de bolhas de ar na mistura gerado pela ação mecânica do misturador”.

Com estes resultados devem ser realizados testes de dosagem a fim de verificar o teor de aditivo ótimo para uma certa densidade de massa especificada.

2.3.1.2. Consistência

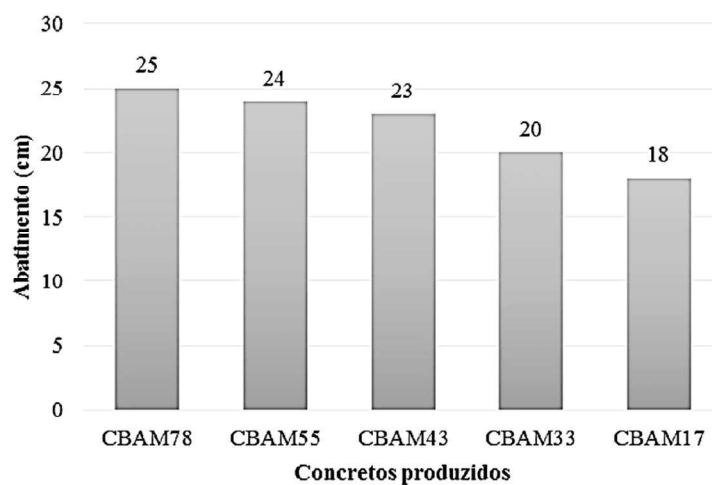
Segundo Ferreira (1986) apud SILVA (2014), os concretos celulares são autoadensáveis por conta da sua alta fluidez e, portanto, não necessitam de vibração no seu adensamento. Porém, o conceito de concreto autoadensável mais atual é diferente e esta propriedade precisa ser melhor estudada no concreto celular. Além disso, segundo o mesmo autor, uma característica importante do concreto celular é que a vibração durante o adensamento não é permitida pois acaba por eliminar as bolhas de ar.

Neville e Brooks (2010) define que diversos fatores influenciam na trabalhabilidade do concreto, sendo eles: quantidade de água da mistura, tipo e granulometria do agregado, teor de agregado/cimento, presença de aditivos e finura do cimento.

Segundo Rossignolo (2009), os concretos leves podem ter sua trabalhabilidade medida conforme é aplicado para os concretos convencionais, através do abatimento de tronco de cone, conhecido como *slump-test* (NM67, 1998). Porém, para um menor valor de abatimento, os concretos leves podem ter uma mesma trabalhabilidade que os concretos convencionais devido à menor deformação do concreto leve pela ação da gravidade. Outra forma adequada de medir a consistência do concreto leve, segundo o mesmo autor, é através do espalhamento na mesa de Graff dada pela NM 68 (ABNT, 1998), onde após o desmolde do mesmo tronco de cone do ensaio anterior, são aplicados golpes erguendo-se e soltando-se (levantamento e queda) a mesa de base desta moldagem.

Em estudos recentes realizados por Silva (2018), foram produzidos concretos celulares com diferentes níveis de incorporação de ar e medidos os seus respectivos abatimentos de cone de Abrams (*slump-test*). O resultado é apresentado na Figura 10, onde os teores de aditivo incorporador de ar foram os mesmos descritos na Figura 9. Foram encontrados maiores abatimentos, ou seja, uma consistência mais fluida, para teores mais altos de incorporador de ar, ratificando o aumento da fluidez do concreto celular pela incorporação de bolhas de ar. Segundo o autor, este ganho na fluidez é devido à maior quantidade de bolhas que ajudam na dispersão das partículas sólidas do concreto, funcionando também como agregados sem atritos.

Figura 10 - Abatimento de cone de Abrams de concretos celulares com diferentes níveis de incorporação



Fonte: SILVA, 2018

Porém, mesmo com abatimentos significativamente altos, os concretos considerados mais fluidos pela NBR 8953 (ABNT, 2015) (abatimento mínimo de 22 cm) e os concretos celulares comumente fabricados (Figura 10) podem não satisfazer os requisitos atuais do concreto autoadensável.

O concreto autoadensável é definido como “um concreto fluido que pode ser moldado *in-loco* sem o uso de vibradores para formar um produto livre de vazios (sem espaços não preenchidos no interior da fôrma) e falhas (isto, é sem ar aprisionado).” (MEHTA E MONTEIRO, 2008, p. 489, grifo do autor). Não se deve confundir, portanto, estes vazios nas fôrmas com os vazios de ar introduzidos pelo agente incorporador de ar no caso dos concretos celulares. Entende-se este primeiro como defeitos durante o adensamento do concreto em encontro de formas tais como em arestas de paredes e de encaixe de esquadrias.

Para a classificação inicial de um concreto autoadensável é necessário o enquadramento dentro dos requisitos de fluidez, viscosidade plástica aparente e estabilidade visual. Estas características são verificadas respectivamente pelos ensaios de espalhamento, tempo de escoamento e índice de estabilidade visual prescritos pela NBR 15823-2 (ABNT, 2017) e classificados pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017). Estes testes são realizados utilizando-se os mesmos equipamentos comumente utilizados em ensaios de fluidez de concreto convencional com o cone de Abrams, porém ao invés de medir a altura de abatimento, mede-se o diâmetro de espalhamento do concreto fluido. Os parâmetros de classificação de cada ensaio conforme a NBR 15823-1 (ABNT, 2017) são apresentados nos Quadro 1, Quadro 2 e Quadro 3.

Quadro 1 - Classes de espalhamento (slump-flow) - NBR 15823-1 (2017)

Classe	Espalhamento mm	Método de ensaio
SF 1	550 a 650	ABNT NBR 15823-2
SF 2	660 a 750	
SF 3	760 a 850	

Fonte: ABNT, 2017

Quadro 2 - Classes de viscosidade plástica aparente t_{500} (sob fluxo livre) - NBR 15823-1 (2017)

Classe	Tempo de escoamento de $\phi 200$ a $\phi 500$ mm (t_{500})s	Método de ensaio
VS 1	≤ 2	ABNT NBR 15823-2
VS 2	>2	

Fonte: ABNT, 2017

Quadro 3 - Classes de índice de estabilidade visual - NBR 15823-1 (2017)

Classe	Índice de Estabilidade Visual (<i>IEV</i>)	Método de ensaio
<i>IEV 0</i>	Sem evidência de segregação ou exsudação	ABNT NBR 15823-2
<i>IEV 1</i>	Sem evidência de segregação e leve exsudação	
<i>IEV 2</i>	Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10 mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto	
<i>IEV 3</i>	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades (auréola de argamassa > 10 mm)	

Fonte: ABNT, 2017

É importante ressaltar que para a completa classificação de um concreto autoadensável convencional necessita-se, no mínimo, ainda realizar o ensaio de habilidade passante, sendo pelo método do anel J, caixa L ou ainda pelo funil V (ABNT, 2017). A classificação do tempo de escoamento do funil V é apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 - Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado) - NBR 15823-1 (2017)

Classe	Tempo de Escoamento Funil V s	Método de ensaio
VF 1	< 9	ABNT NBR 15823-5
VF 2	9 a 25	

Fonte: ABNT, 2017

Como o concreto autoadensável é usualmente feito com base em um concreto convencional, a NBR 15823 (ABNT, 2017) traz a necessidade de uma avaliação

individualizada para a junção do concreto autoadensável com outros tipos de concretos que não os convencionais:

“NOTA Convém avaliar, de forma individualizada, a aplicabilidade dos requisitos desta parte da norma ABNT NBR 15823 para o concreto adensável (CAA) com **incorporação intencional de ar**, agregados leves, agregados pesados ou fibras, cuja densidade de massa classifique o **concreto como leve** ou pesado conforme a ABNT NBR 8953.” (ABNT,2017, p.1, grifo do autor).

Apesar da caracterização completa do concreto autoadensável necessitar de todos os testes mencionados, para fins desta pesquisa, apenas será avaliada a potencialidade dos concretos celulares produzidos quanto ao enquadramento como concreto autoadensável. Para isso, serão utilizados apenas os valores de diâmetro de espalhamento apresentados no Quadro 1.

2.3.1.3. *Teor de ar incorporado*

O teor de ar incorporado é consequência da introdução de bolhas de ar devido à ação do misturador mecânico mediante à presença de aditivo incorporador de ar. Este fator deve ser controlado já que o volume total de ar incorporado faz parte da dosagem do concreto. Além disso, o teor de incorporação de ar pode indicar a eficiência do aditivo e/ou do procedimento de mistura usados.

O cálculo deste teor é realizado comparando-se o volume inicial da mistura sem a incorporação de ar com o volume final do concreto já com a incorporação de ar (SILVA, 2014). Não há valores limites especificados para o controle do teor de ar incorporado, porém, a ABCP (2002) indica valores de dosagens usuais os quais apresentam teores de 35 a 45% de volume de vazios, já contando em torno de 1,5% de ar aprisionado inerente aos concretos convencionais.

2.3.2. Concreto celular no estado endurecido

Depois da densidade de massa, as três propriedades mais importantes a serem levadas em conta no concreto celular segundo Petrucci (1998) são a resistência mecânica, retração e condutividade térmica. Assim, se fixada uma densidade de massa mínima, o material deverá também apresentar uma resistência mecânica mínima, as quais estão relacionadas à condutividade térmica e à retração.

Além dessas, para considerações em projetos e aplicação, também devem ser levados em conta o módulo de elasticidade e absorção de água do concreto celular.

2.3.2.1. Resistência à compressão

Mehta e Monteiro (2008), definem a resistência de um material como “a capacidade para resistir à tensão sem se romper”. Os fatores que afetam a resistência à compressão do concreto leve celular espumoso são (FERREIRA, 1987, p.6):

- “
- 1 - densidade de massa;
 - 2 - consumo de cimento;
 - 3 - tipo de finura do cimento;
 - 4 - fator água/cimento;
 - 5 - qualidade e finura da areia;
 - 6 - idade e temperatura de cura;
 - 7 - sistema e metodologia de produção.”

Pode-se dizer que a resistência mecânica varia em proporção direta à densidade de massa, o consumo e a superfície específica do cimento, enquanto que o volume de ar incorporado varia na razão inversa (FERREIRA, 1987).

No caso dos concretos celulares há uma diferença na evolução da resistência à compressão ao longo do tempo em relação aos concretos convencionais.

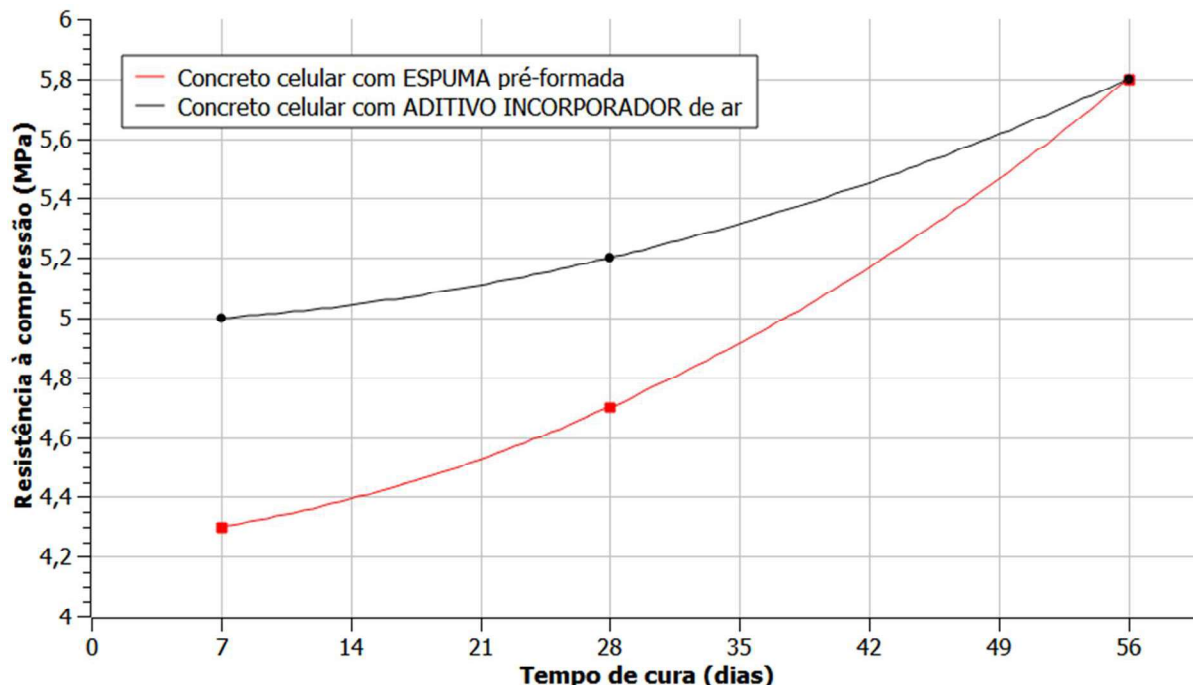
Ferreira (1987) afirma que os concretos celulares curados ao ar têm a sua resistência praticamente dobrada entre o segundo e o sétimo mês de cura. Por isso o Instituto Alemão para Normatização (DIN) não considera a resistência à compressão dos concretos celulares aos 28 dias, como nos concretos convencionais, e sim aos 56 dias de cura.

Entretanto Silva (2014), atribui a medida de resistência à compressão aos 56 dias não ao grande crescimento em idades avançadas, mas sim ao pequeno crescimento entre o 7º e 28º dias de cura.

Com essa afirmação, avaliando-se o trabalho de Silva (2014), onde foram testadas diversas dosagens de concreto celular, pode-se verificar que o crescimento de resistência à compressão entre o 7º e 28º dias de cura foi de 7% para concretos com espuma pré-formada e 3% para o concreto com incorporador de ar diretamente à mistura, enquanto que entre o 28º e 56º dias o crescimento foi de 19% e 10% para os mesmos concretos, respectivamente. Com isso, verifica-se que a diferença entre resistência à compressão entre 28 e 56 dias de cura é mais evidente no concreto

celular com espuma pré-formada. Essa evolução pode ser verificada no gráfico da Figura 11.

Figura 11 - Evolução de resistência à compressão de dois tipos de concretos celulares com massas específicas semelhantes



Fonte: Adaptado SILVA, 2018

Neste caso os concretos produzidos com aditivo incorporador de ar tiveram resultados de resistência inicial (7 dias de idade) aproximadamente 16% maiores em relação ao concreto celular produzido através de espuma pré-formada. O cimento utilizado para ambos os concretos foi o CII-F 32.

2.3.2.2. Resistência à tração

Segundo Cortelassi (2005) apud Tezuka (1989), a determinação da resistência à tração de concretos celulares pode ser realizada tanto com o ensaio de compressão diametral quanto com o ensaio de tração na flexão. Ainda segundo o autor, pode-se relacionar a resistência à compressão com a resistência à tração, entretanto essa relação varia conforme a grandeza da primeira: em pequenas resistências à compressão a relação entre elas é de 50% enquanto que em resistências à compressão maiores a relação chega a 20%. Em suas pesquisas, Tezuka (1992)

encontrou valores de referência em ensaios realizados por Graf (1951) em que concretos com resistência a compressão de aproximadamente 2 MPa apresentaram resistência à tração por volta de 1,2 MPa, enquanto que concretos com aproximadamente 14 MPa, alcançaram resistências à tração de 4 MPa.

2.3.2.3. *Módulo de elasticidade*

Segundo Neville e Brooks (2013), os fatores que influenciam o módulo de elasticidade do concreto, em geral, podem ser relacionados à resistência. Inclusive faz-se relações entre estas duas características. Porém, estas relações não são aplicadas a todos os casos. A presença de umidade, por exemplo, pode aumentar o módulo de elasticidade de um corpo de prova, enquanto diminui a resistência à compressão deste. Outro fator importante são as características dos agregados, que podem influenciar o módulo de elasticidade, mas por vezes não contribuem para a resistência à compressão do concreto.

O autor afirma ainda que, no concreto leve com agregados leves, pelo fato do módulo de elasticidade do agregado ser similar à pasta de cimento, pouca é a interferência das proporções das misturas sobre o módulo de elasticidade do concreto.

Com essa relação pode-se ainda afirmar que há a uma grande diminuição do módulo de elasticidade no concreto celular por conta da ausência de agregados graúdos de módulo de elasticidade significativo e no seu lugar são acrescentadas as bolhas de ar.

Os concretos celulares usualmente têm módulo de elasticidade entre 1,7 e 3,5 GPa. A fluência (tensão/resistência) para esses tipos de concreto em comparando-se aos concretos ditos convencionais, é praticamente a mesma. No entanto, aplicando-se uma mesma tensão, a deformação resultante do concreto leve é maior em relação ao concreto convencional (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Porém, autores brasileiros (ABCP, 2002) afirmam que para algumas utilizações, como para composição de paredes autoportantes, o concreto celular pode ter módulo de elasticidade em torno dos 5 GPa (concretos com densidade de massa entre 1300 e 1900 kg/m³).

Portanto, não há uma relação fixa que possa ser empregada para determinação do módulo de elasticidade de um concreto celular, devido aos diversos fatores que influenciam na sua magnitude. Desta forma devem ser realizados testes para a sua

determinação quando variada a dosagem do concreto celular, inclusive quanto ao teor de ar incorporado.

2.3.2.4. *Retração*

Segundo Neville e Brooks (2013), a retração é um fenômeno que causa uma variação de volume que induz a tensões no concreto, podendo ocasionar fissuras e assim comprometendo a durabilidade do material, principalmente devido a tensões de tração, já que o concreto conta com baixa resistência a esse tipo de esforço.

Melo Neto (2002), resume os diferentes tipos de retração em materiais compostos de cimento na seguinte ordem:

- a) **Retração plástica:** Ocorre pela rápida evaporação inicial da água de amassamento ainda no estado fresco antes do término da pega do cimento. A evaporação ocorre através da superfície exposta com o surgimento de fissuras superficiais.
- b) **Retração por secagem:** Acontece em ambientes não saturados, pois é causada pela evaporação da água de poro logo após o fim da pega do cimento.
- c) **Retração química:** Quando produtos anidros são hidratados e tem seu volume diminuído causando a redução dimensional do material (contração de Le Chatelier).
- d) **Retração autógena:** Causada apenas pela redução da umidade relativa no interior dos poros ao longo da hidratação do cimento (apud POWERS, 1968).
- e) **Contração térmica:** Ocorre devido o acúmulo de calor excessivo da hidratação do cimento nas primeiras idades e posterior resfriamento com a diminuição da taxa de hidratação.

Além destas, há a retração por carbonatação. Segundo Neville e Brooks (2010), este tipo de retração ocorre após o processo de carbonatação que acontece da superfície para o interior do concreto. A carbonatação é a reação do gás carbônico com o cimento já hidratado e ocorre quando o CO_2 reage com a umidade e forma ácido

carbônico, o qual reage com o $Ca(OH)_2$ do cimento hidratado formando $CaCO_2$, além da decomposição de outros compostos do cimento.

Petrucci (1998) afirma que a variação dimensional devido à retração em concretos celulares é mais importante do que em concretos densos (convencionais). Isso porque o concreto celular apresenta retrações mais altas por ter um teor de cimento maior, além de elevada relação água/cimento e por conta dos vazios, a influência da retração na pasta é maior. O autor ainda estima que a retração neste tipo de concreto fica entre 1,5 e 3,5 mm/m verificada já nos dois primeiros meses de cura.

Neville e Brooks (2013) afirma que enquanto a pasta de cimento ainda está no estado plástico, sofre contração da ordem de 1% do volume de cimento seco. Este efeito é chamado de retração plástica e é causada pela perda de água por evaporação da superfície do concreto, ou também pela sua sucção da parte mais interna do concreto. A contração causa tensões de tração na superfície do concreto devido essas contrações estarem restringidas pelo concreto mais interno o qual não sofreu retração, e como o concreto está pouco resistente no estado plástico, a fissuração plástica pode ocorrer facilmente na superfície.

Segundo Neville e Brooks (2013), a retração plástica varia conforme a velocidade de evaporação da água do concreto, que pode ser afetada pelos seguintes fatores: temperatura do concreto, temperatura e umidade do ar e velocidade do vento incidente sobre a superfície do concreto. Portanto, a redução da perda de água (por evaporação ou absorção da pasta de cimento) é um fator que pode ajudar no controle da fissuração. Portanto, tem-se um aumento da retração quanto maior for o consumo de cimento por conta da sua absorção, adicionado a isso, quanto menor for o teor de agregado, o qual restringe a movimentação na argamassa.

A retração por secagem ocorre por conta da saída da água do concreto já endurecido em contato com ar não saturado. Segundo o autor, essa movimentação pode ser dividida em duas: uma parte reversível (movimentação de umidade) e a parte irreversível. Segundo Neville e Brooks (2013), concretos celulares podem ter retração por secagem da ordem de 700×10^{-6} .

Ainda segundo os autores, na prática, a determinação da retração é dada realizando-se apenas a medida da deformação linear, dada em mm/mm. Porém, a redução de volume devido a retração chega a ser 3 vezes a contração linear.

Segundo Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2008), as fissuras plásticas podem ser controladas através da redução da evaporação da superfície com o uso de vapor, barreiras de vento, sombreamento, cobertura com películas plásticas, mantas úmidas, retardadores de evaporação e com o uso de fibras plásticas.

Como mencionado anteriormente, um dos principais fatores na dosagem do concreto que influenciam na retração é o teor de agregado da mistura. Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2008), retratam que concretos celulares com curas úmidas podem fissurar em torno de 0,1 a 0,6%, e que esta quantidade varia conforme a quantidade de areia utilizada. Neville e Brooks (2013) e Mehta e Monteiro (2008) apresentam a Equação 1 que relaciona a retração da pasta de cimento (S_p), retração do concreto (S_c) e o volume de agregado (g) no concreto convencional.

$$\frac{S_c}{S_p} = (1 - g)^n \quad (1)$$

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o fator n depende do módulo de elasticidade do agregado e pode variar de 1,2 a 1,7. Já Neville e Brooks (2013), afirmam que este fator é diretamente relacionado não só ao módulo de elasticidade do agregado, mas também do concreto além do coeficiente de Poisson de ambos.

Para os concretos leves com agregados leves, o módulo de elasticidade do agregado influencia de tal forma que a retração é maior neste tipo de concreto do que aqueles produzidos com agregados normais (NEVILLE e BROOKS, 2013). Já para concretos leves com ar incorporado, pode-se, de certa forma, relacionar as bolhas de ar do concreto celular com pequenos agregados de módulo de elasticidade próximo de (se não igual a) zero. Devido à presença de vazios o módulo de elasticidade do concreto celular é significativamente baixo, podendo ser inclusive menor do que os concretos com agregados leves.

Mehta e Monteiro (2008), ainda citam Kulka e Polivra (1978), os quais afirmam que a fluência e a retração obtidas em ensaio de laboratório não equivalem exatamente a quando o material é aplicado em sua destinação final. Para isso, os autores exemplificam que ao projetar uma estrutura de ponte de concreto leve, os valores de retração e fluência são reduzidos em torno de 50% devido às diferenças entre dimensões dos elementos, umidade do ambiente e à presença de armadura.

Além da retração, pode ocorrer a expansão durante a cura úmida do concreto. Este fenômeno é devido à absorção da água pelo gel do cimento e é na faixa de 10 a 20 vezes em concretos convencionais e, especialmente em concretos leves, na ordem de 20 a 80% da retração do concreto endurecido após 10 anos.

2.4. Concreto celular

As NBR 12645 (ABNT, 1992) e 12646 (ABNT, 1992) definem o concreto celular espumoso como sendo:

Concreto leve obtido pela introdução, nas argamassas, de bolhas de ar, com dimensões milimétricas, homogêneas, uniformemente distribuídas, estáveis, incomunicáveis e indeformadas ao fim do processo, cuja densidade de massa aparente no estado fresco deve estar compreendida entre 1300 kg/m³ e 1900 kg/m³. (ABNT, 1992a e ABNT, 1992b).

A NBR 12645 (ABNT, 1992) define o agente espumante como um produto químico que tem a capacidade de produzir bolhas de ar estáveis no interior de pastas e argamassas cimentícias. Esses agentes devem fazer com que as bolhas de ar resistam aos esforços decorrentes da mistura, bombeamento e lançamento do concreto, devendo manter sua estabilidade até o início da pega do cimento. (ABNT, 1992).

Ainda conforme a referida norma, somente podem ser utilizados os cimentos que cumprem os requisitos das antigas normas NBR 5732 (ABNT, 2018), NBR 5733 (ABNT, 2018), NBR 5735 (ABNT, 2018) e NBR 5736 (ABNT, 2018). Atualmente, estas normas encontram-se canceladas, porém atualizadas e unidas pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

2.4.1. Dosagens usuais

Segundo Silva (2014), métodos de dosagem específicos para concretos celulares não são encontrados na literatura. Comumente, parte-se de uma matriz de concreto convencional (concreto base) e a partir dela são introduzidos os aditivos até se conseguir uma incorporação de ar suficiente para atingir a densidade de massa pretendida.

As dosagens utilizadas para casas populares apresentadas por Menezes (2006) em sua pesquisa, as quais requeriam uma resistência à compressão de 2,5 MPa e densidade de massa entre 1300 e 1800 kg/m³, utilizavam as seguintes proporções de materiais secos: 280 kg de cimento e 2420 kg de areia.

Tendo as características no Quadro 5 descritas pela ABCP (2002) e utilizadas por Menezes (2006):

Quadro 5 - Características do concreto apresentados projeto Habitação 1.0

Características	Valores
Resistência característica à compressão (fck)	2,5 MPa
Módulo de elasticidade	~5 GPa
Densidade de massa aparente	1300 a 1800 kg/m ³
Absorção de água (em massa)	22 a 28%
Volume de vazios	35 a 45 %
Consumo de cimento Portland por volume de concreto	280 a 320 kg/m ³
Módulo de finura MF agregado (areia)	1,7 a 3,4
Dimensão máxima pedrisco (se for utilizado)	9 mm
Água total	160 a 180 l/m ³
Aditivo espumígeno por volume de concreto	0,6 l/m ³
Aditivo superplastificante por volume de concreto	2 l/m ³
Fibras de polipropileno por volume de concreto	1 kg/m ³
Tela eletro-soldada de ϕ 3,4 mm, malha 15 x 15 cm (área de tela por área de parede produzida):	2 m ² /m ²

Fonte: ABCP, 2002

Silva (2014) adaptou um método de dosagem proposto por Ferreira (1987), que propõe uma relação entre os consumos de cimento, água, areia, aditivo incorporador de ar por metro cúbico de concreto celular a ser produzido ao qual também se estipula uma densidade de massa pretendida. Na pesquisa deste autor foram testados diversos teores de aditivo incorporador de ar, onde a densidade de massa de entrada foi de 1900 kg/m³ e os concretos celulares produzidos variaram de 1500 a 1900 kg/m³

aproximadamente. Os teores de ar ficaram entre 18 a 35%, enquanto que os abatimentos de tronco de cone oscilaram de 6 a 25 cm. Nos casos estudados pelo autor, as resistências à compressão aos 28 dias ficaram entre 4,3 MPa, para os concretos celulares menos densos, e 19,4 MPa para os concretos celulares mais densos. A fórmula que representa a relação aplicada pelo autor é dada pela Equação 2.

$$A_s = \gamma_{cf} - C_c - (a/c \times C_c) - (A_d/c \times C_c) \quad (2)$$

Onde:

- γ_{cf} : é a densidade de massa no estado fresco pretendida para o concreto celular em kg/m³;
- C_c : é o consumo de cimento em kg/m³.
- a/c : é a relação água cimento;
- A_d : é o teor de aditivo incorporador de ar em relação à massa de cimento, e;
- A_s : é o consumo de agregado miúdo dado em kg.

2.4.2. Ensaios de caracterização do concreto *in loco*

Para o controle de qualidade do concreto celular em paredes moldadas *in-loco* a NBR 12645 (ABNT, 1992) estipula apenas 2 aspectos mínimos: a densidade aparente no estado fresco, verificada logo antes da concretagem, e a resistência à compressão.

2.4.3. Densidade de massa

A norma 12644 (2014) define a densidade de massa aparente do concreto leve no estado plástico como sendo a relação entre a massa do concreto leve no estado fresco, contido em um recipiente completamente preenchido, e o volume deste recipiente (ABNT, 2014). Para fins de controle, a NBR 12646 (ABNT, 1998) ainda define como requisito de densidade que, quando medida em campo, não deva ser inferior em 5% da estipulada em projeto (ABNT, 1992).

O controle em obra deve ser feito a cada 1 m³ de concreto celular produzidos em betoneiras estacionárias e a cada caminhão betoneira no caso de dosagens em centrais de mistura. Neste último caso, a verificação deve ocorrer no início do descarregamento do caminhão. Se a amostra não estiver enquadrada dentro da margem dos 5% estipulada em projeto, os 0,5 m³ iniciais devem ser descartados e realizada nova medida, repetindo-se o procedimento até se atenda ao especificado para aprovação do restante do carregamento do material.

2.4.4. Resistência à compressão simples

Para o controle da resistência a NBR 12646 (ABNT, 1992) define que os lotes ensaiados devem seguir a NBR 5739 (ABNT, 2018) e devem apresentar f_{ckest} no mínimo 2,5 MPa aos 28 dias de idade.

Na amostragem devem ser definidos lotes de forma a corresponder a no máximo 30 ou 250 m² de parede concretada (dependendo da grandiosidade da obra). Cada lote deve conter duas amostras com quatro corpos de prova cada uma, totalizando assim oito corpos de prova por lote. Cada exemplar deve ser retirado de massadas diferentes, distribuídas ao longo do lote e seus dois corpos de prova moldados no mesmo ato e da mesma massada.

Para a aceitação devem ser realizados ensaio de compressão simples aos 28 dias em 3 dos 4 exemplares moldados por lote. Com as resistências à compressão de cada exemplar deve-se tomar a Equação 3.

$$f_{ckest} = \psi_6 \times f_1 \quad (3)$$

Onde:

f_{ckest} é a resistência à compressão simples;

f_1 é o valor da menor resistência dentre as amostras do lote, e;

ψ_6 é dado pelo Quadro 6 conforme n exemplares ensaiados:

Quadro 6 - Valores de ψ_6 conforme o número de exemplares de ensaio

n	6	7	8	10	12	14	16	18
ψ_6	0,89	0,91	0,93	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04

Fonte: NBR 12646 (ABNT, 1992)

A aceitação automática é realizada para os lotes que satisfizerem a Equação 4:

$$f_{ckest} \geq f_{ck} \quad (4)$$

A norma ainda traz que caso não seja verificada a condição acima, deve ser aferida a resistência à compressão simples aos 45 dias da quarta amostra previamente reservada. No caso desta resistência ser maior ou igual à f_{ckest} o lote deve ser aceito.

3. METODOLOGIA

Para cumprir o objetivo deste trabalho de avaliar as características nos estados fresco e endurecido de concretos celulares obtidos com aditivo incorporador de ar e com diferentes granulometrias de areia foram realizados a caracterização dos materiais, definição de dosagem padrão, produção dos concretos e, por fim, ensaios para avaliação dos concretos produzidos.

Para isso foram escolhidas 3 areias classificadas como: areia fina, média e grossa. Também foram avaliados o tempo de mistura com aditivo incorporador de ar, para isso, 3 tempos de mistura com este aditivo foram empregados na produção dos concretos celulares. Os materiais, procedimentos de produção e ensaios são descritos ao longo deste capítulo.

A produção dos concretos celulares teve o intuito de alcançar as características que assim o definem e para aplicação em paredes estruturais autoportantes que foram apresentadas na Referência Bibliográfica. Além disso, a consistência foi medida através do espalhamento para se verificar a potencialidade de se obter concretos celulares autoadensáveis. Também foi medida a variação dimensional (retração e massa). Todos os concretos celulares dos testes definitivos partiram de uma mesma dosagem de concreto base com quantidades de cimento, água, agregado miúdo, aditivo superplastificante e aditivo incorporador de ar fixos.

Para a definição da dosagem padrão foram utilizados dados e métodos propostos por outros autores e posteriormente ajustados em teste piloto apresentados no item 3.2. Posteriormente foram produzidos os concretos celulares conforme descrito no item 3.3, seguido dos procedimentos de confecção dos concretos base e celulares descritos no item 3.4. Por fim, foram realizados os ensaios conforme descritos no item 3.5.

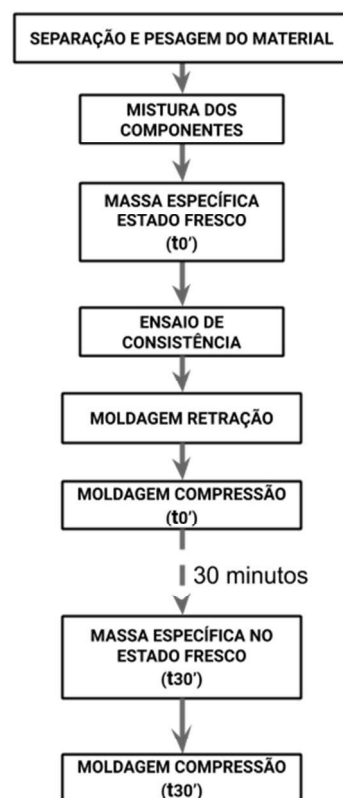
Os concretos foram confeccionados em argamassadeira para ter sua execução facilitada (menor volume). Devido a isso, alguns ensaios tiveram de ser adaptados e foram utilizadas algumas normas para argamassa ao invés das normas para concreto ou concreto celular. Os procedimentos para estes ensaios puderam ser facilmente adaptados pela ausência de agregado graúdo na composição do concreto celular e, portanto, devido a sua semelhança com argamassas.

As características medidas através dos ensaios nos concretos produzidos foram:

- a) Densidade de massa (adaptado NBR 13278 (ABNT, 2005) e 12644 (ABNT, 2014));
- b) Teor de ar incorporado (NBR 13278 (ABNT, 2005));
- c) Consistência a partir do espalhamento (adaptado NBR 158231-1 (ABNT, 2017) e NBR 13276 (ABNT, 2016) e baseado em Nepomuceno, 2014);
- d) Massa específica (adaptado NBR 9778 (ABNT, 2005));
- e) Resistência à compressão (NBR 7215 (ABNT, 2019));
- f) Variação dimensional - massa e retração (adaptado NBR 15261 (ABNT, 2005))

A Figura 12 mostra um fluxograma do procedimento de produção, ensaios no estado fresco e moldagem dos corpos de prova.

Figura 12 - Esquema dos procedimentos de produção, ensaios no estado fresco e moldagem



Fonte: Autor

3.1. Materiais

Para a realização dos estudos propostos neste trabalho foram utilizados os equipamentos e materiais disponíveis no Laboratório de Solos e Materiais de Construção Civil do Câmpus Florianópolis do IFSC com exceção das areias fina e grossa que foram cedidas por empresas de construção da região e do aditivo incorporador que foi disponibilizado pelo fabricante. Os materiais que foram consumidos no decorrer desta pesquisa são, entre outros, os listados abaixo:

a) Para a produção dos concretos:

- Água potável da rede de distribuição (CASAN);
- Cimento CP-IV 32;
- Areia quartzosa fina
- Areia quartzosa média;
- Areia quartzosa grossa;
- Aditivo incorporador de ar;
- Aditivo superplastificante (policarboxilato);

b) Para os procedimentos de ensaio:

- Água potável da rede de distribuição (CASAN);
- Água deionizada (ensaio densidade de massa de agregados finos);
- Cal hidratada (para o tanque de cura).

3.1.1.1. Caracterização dos materiais

Os dados para caracterização do cimento, aditivo incorporador de ar e aditivo superplastificante foram obtidos através dos fabricantes destes materiais. Somente a caracterização dos agregados miúdos (areias fina, média e grossa) foi realizada em laboratório. As descrições e características obtidas pelos fabricantes dos materiais estão descritas no Quadro 7.

Quadro 7– Descrição e características dos materiais industrializados utilizados

Material	Marca	Tipo / Referência	Densidade de massa (g/cm³)
Cimento	Votoran	CP IV - 32	2,80 - 3,15
Aditivo Superplastificante	GCP	Adva (SP II)	1,05 - 1,10
Aditivo Incorporador de Ar	Gethal	Incorporador de ar	1,02

Fonte: Autor

Para a caracterização das areias foram utilizados os ensaios de granulometria: NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2009). A densidade de massa foi determinada conforme a NM 52 (ABNT, 2009). Também foram utilizados os métodos de redução e preparação de amostras descritas pela NM 27 (ABNT, 2001) e NM 26 (ABNT, 2009).

3.2. Testes Piloto e Definição de Dosagem Padrão

Como não existe um método de dosagem estabelecido em que se relacionam todas as variáveis de um concreto celular, definiu-se uma dosagem inicial com parâmetros de outros autores para realização de testes piloto e validação dos resultados. Após isso se procedeu aos testes definitivos.

A dosagem de partida utilizada para o teste piloto foi obtida pela fórmula de Ferreira (1987) adaptada por Silva (2014) já apresentada na referência bibliográfica deste trabalho (Equação 5), ao qual estipula-se uma densidade de massa aparente desejada, além da relação água/cimento, consumo de cimento e relação de teor de aditivo incorporador de ar (por consumo de cimento). Com esses dados, pode-se então chegar ao teor de areia necessário para produção do concreto celular com a densidade de massa definida.

$$A_s = \gamma_{cf} - C_c - (a/c \times C_c) - (Ad/c \times C_c) \quad (5)$$

Os valores de entrada para a definição da massa de areia foram estipulados para obtenção de um concreto celular com menor densidade de massa possível segundo os limites estudados no capítulo anterior, sendo eles:

- γ_{cf} : definido como 1400 kg/m³ por conta do limite de densidade de massa para areias grossas indicado por Ferreira (1987).
- C_c : o consumo de cimento por m³ de concreto foi definido como sendo 350 kg/m³ como recomendado per fabricantes nacionais, conforme Silva (2004) apud Freitas, Allende e Darwish (2004).
- a/c : a relação água cimento foi padronizada em 0,5 por conta dos resultados de resistência mecânica encontrados por Teixeira Filho e Tezuka (1992);
- A_d o teor de aditivo incorporador de ar foi considerado 0,20% em relação à massa de cimento;

Com esses valores de entrada resultou-se num teor de areia (A_s) de 874,93 kg por metro cúbico de concreto a ser produzido. Após este cálculo foi estipulado um teor de aditivo superplastificante de 0,50% (abaixo do limite recomendado pelo fabricante). O Quadro 8 mostra o consumo e proporção de partida de cada material.

Quadro 8 – Consumo, proporção e teor de materiais para teste piloto

Materiais	Consumo (kg/m³)	Proporção e Teor
Cimento	350,00	1,00
Água	175,00	0,50
Areia	874,93	2,50
Aditivo Incorporador de Ar	0,70	0,20%
Aditivo Superplastificante	1,75	0,50%

Fonte: Autor

Para validar estas informações de partida, o concreto celular do teste piloto foi produzido com areia média (previsão de resultados intermediários) para verificar se era possível atingir um valor próximo da densidade de massa almejada, se o tempo de mistura era aceitável (próximo do convencional, entre 3 e 10 minutos) e se a consistência do concreto estava adequada para o ensaio (espalhamento na mesa de *flow-table* próximo de 35 cm, ver ensaio de consistência no item 3.5.3). Além disso, os testes pilotos serviram para se definir um procedimento padrão da mistura dos componentes do concreto celular como já apresentado. Neste teste piloto, a

densidade de massa durante a mistura era verificada a cada 1 minuto até alcançar a densidade de massa de aproximadamente 1400 kg/m^3 .

Como resultado deste teste piloto alcançou-se a densidade de massa de aproximadamente 1400 kg/m^3 em tempo de mistura (em torno de 8 minutos) Porém, foi necessário acréscimo de água de amassamento por conta da consistência extremamente baixa do concreto base, tanto que a incorporação de ar não foi possível com a quantidade de água prevista. Neste teste inicial a relação água/cimento foi de 0,50 para 0,58. Como não se desejava aumentar ainda mais a relação água/cimento para evitar a redução da resistência à compressão e os resultados de consistência também não foram satisfatórios, foram realizadas adições de superplastificante até ser encontrado resultados aceitáveis em outra dosagem deste concreto celular. A dosagem resultante em que foram encontrados bons resultados de referência foi adquirida com a adição de 0,75% de aditivo superplastificante em relação à massa de cimento e, para reduzir o tempo de incorporação e facilitar os testes, o teor de incorporador de ar foi ajustado para 0,25%, também em relação a massa de cimento.

Com esta dosagem obteve-se bons resultados de densidade de massa em torno de 1400 kg/m^3 , tempo de mistura para esta densidade de massa de aproximadamente 6 minutos e espalhamento por volta de 35 cm. Os parâmetros finais da dosagem de cada material resultante dos ajustes feitos são demonstrados no Quadro 9.

Quadro 9 – Consumo, proporção e teores ajustados

Materiais	Consumo (kg/m^3)	Proporção e Teor
Cimento	350,00	1,00
Água	175,00	0,50
Areia	874,93	2,50
Aditivo Incorporador de Ar	0,87	0,25%
Aditivo Superplastificante	2,63	0,75%

Fonte: Autor

Com a confirmação dos parâmetros de dosagem para uma areia intermediária se procedeu aos testes definitivos com a dosagem encontrada. O volume calculado para produção dos concretos celulares com 1400 kg/m^3 foi 2,50 L de acordo com o limite da argamassadeira.

3.3. Produção de concretos celulares com diferentes tipos de areias e diferentes tempos de mistura;

Para se avaliar as características de diferentes concretos celulares com areias distintas e mesmas densidades de massa, optou-se por produzir 3 concretos celulares, 1 para cada areia:

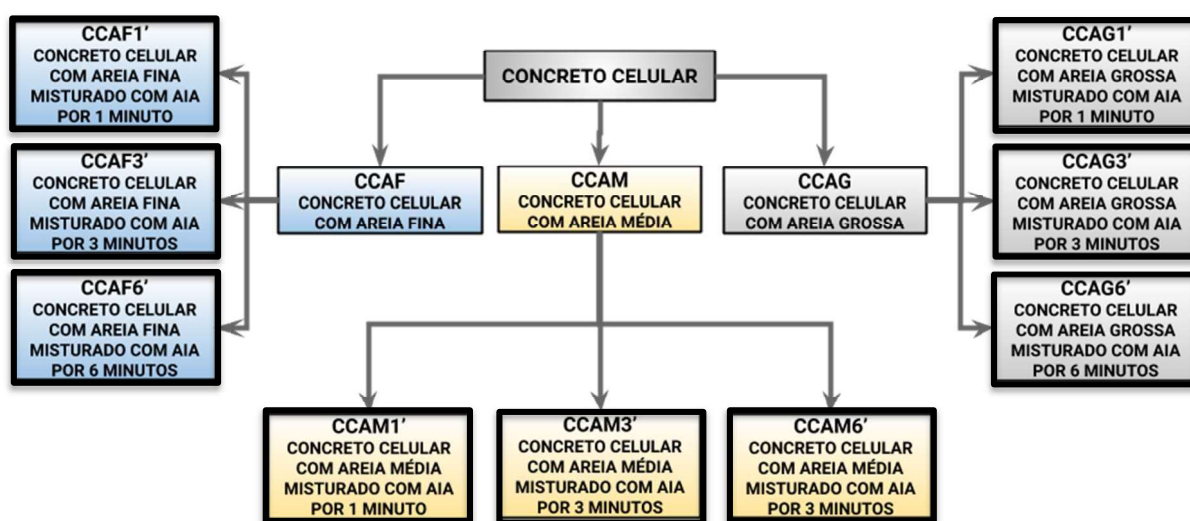
- CCAF: Concreto celular com Areia Fina;
- CCAM: Concreto celular com Areia Média;
- CCAG: Concreto celular com Areia Grossa.

Com o intuito de avaliar as características dos concretos com diferentes tempos de mistura com aditivo incorporador, foram estipulados 3 tempos de mistura (t_m):

- $t_m = 6$ minutos, tempo onde se alcançou 1400kg/m^3 no teste piloto com a areia média;
- $t_m = 3$ minutos, metade do tempo anterior, e;
- $t_m = 1$ minuto, para verificação da incorporação de ar inicial dos concretos.

Portanto, para avaliar os concretos celulares em cada tempo de mistura com as 3 granulometrias de areias diferentes foram produzidos 9 concretos celulares. Um resumo esquemático dos concretos celulares produzidos é mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Esquema de concretos celulares produzidos



Fonte: Autor

Além disso, para fins de comparação, foram produzidos 1 concreto de referência (concreto base) para cada tipo de areia, o qual não teve adição de incorporador de ar, totalizando 12 concretos produzidos. O resumo dos concretos, suas respectivas dosagens, tempo de mistura e nomenclatura são apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 - Características e composição dos concretos produzidos

Concretos	Tipo de Areia Utilizada	Tempo de Mistura com Aditivo Incorporador de Ar	Cimento	Água	Areia	Aditivo Superplastificante	Aditivo Incorporador de Ar
			kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	%
CBAF	Fina	Base	350,00	175,00	874,93	0,75	-
CCAF1'		1'	350,00	175,00	874,93	0,75	0,25%
CCAF3'		3'	350,00	175,00	874,93	0,75	0,25%
CCAF6'		6'	350,00	175,00	874,93	0,75	0,25%
CBAM	Média	Base	350,00	175,00	874,93	0,75	-
CCAM1'		1'	350,00	175,00	874,93	0,75	0,25%
CCAM3'		3'	350,00	175,00	874,93	0,75	0,25%
CCAM6'		6'	350,00	175,00	874,93	0,75	0,25%
CBAG	Grossa	Base	350,00	175,00	874,93	0,75	-
CCAG1'		1'	350,00	175,00	874,93	0,75	0,25%
CCAG3'		3'	350,00	175,00	874,93	0,75	0,25%
CCAG6'		6'	350,00	175,00	874,93	0,75	0,25%

Fonte: Autor

No Quadro 10 percebe-se que o traço é igual para todos os concretos celulares, diferenciando apenas o tipo de agregado utilizado e o tempo de mistura com aditivo incorporador de ar (t_m). É importante ressaltar que os valores do consumo de cimento por metro cúbico de concreto produzido são referentes a um concreto celular com densidade de massa de 1400kg/m³. Portanto, para concretos em que a densidade de massa resultante esteja acima deste valor, o consumo de cimento por metro cúbico será maior e para os concretos com densidade de massa abaixo deste valor, o consumo de cimento por metro cúbico de concreto produzido será menor.

3.4. Procedimento de Produção dos Concretos

Para os testes definitivos elaborou-se um procedimento experimental baseado em Silva (2015) e definido ao longo do teste piloto. O procedimento de mistura dos materiais é descrito a seguir.

3.4.1. Mistura dos componentes

O processo de mistura de cada concreto foi realizado em sua totalidade em argamassadeira planetária com opção de 2 velocidades: velocidade lenta (em torno de 60 RPM) e velocidade rápida (aproximadamente 120 RPM). O procedimento seguiu a seguinte ordem:

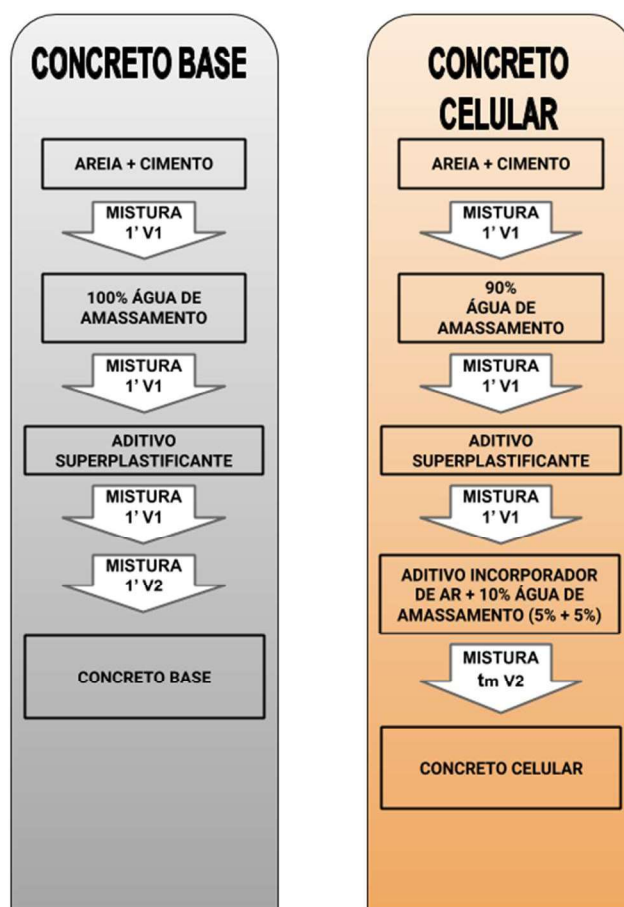
- a) Mistura de areia e cimento (material seco) durante 1 minuto em velocidade lenta;
- b) Adição de 90% da água de amassamento e mistura durante 1 minuto em velocidade lenta;
- c) Adição de aditivo superplastificante e mistura durante 1 minuto em velocidade lenta;
- d) Adição de aditivo incorporador juntamente com os 10% de água de amassamento restante e mistura em velocidade rápida e tempo de mistura (t_m) variável;

Nos concretos base (sem adição de incorporador de ar), o procedimento de produção encerrava-se na mistura com o aditivo superplastificante (item b), com a diferença em que era adicionado mais 1 minuto no tempo de mistura em velocidade rápida.

Entre cada etapa de adição de materiais à cuba da argamassadeira, esta era desligada, o material adicionado e, então, o equipamento religado novamente. O tempo decorrido neste intervalo era de aproximadamente 30 segundos.

Na Figura 14 é apresentado um resumo esquemático do processo de mistura dos concretos produzidos. Onde “V1” é referente à velocidade de mistura lenta e “V2” a velocidade de mistura rápida da argamassadeira.

Figura 14 – Processo de mistura de concretos celulares e concretos base



Fonte: Autor

3.5. Ensaios Realizados no estado fresco e endurecido

Como já mencionado neste capítulo, foram realizados ensaios ao longo desta pesquisa com o intuito de investigar as características no estado fresco e endurecido em cada concreto celular produzido.

Todos os ensaios foram realizados em cada um dos doze concretos produzidos (3 concretos base e 9 concretos com ar incorporado), onde não houve repetição da produção em nenhum dos casos.

Os ensaios e suas adaptações são explicados nos itens a seguir:

3.5.1. Densidade de massa

Por conta do volume reduzido de concreto necessário para verificação, a densidade de massa aparente no estado fresco nesta fase preliminar foi determinada baseando-se na norma NBR 13278 (ABNT, 2005), a qual estipula um recipiente cilíndrico com volume de apenas 400 cm³ para medição da densidade de massa de argamassas em detrimento do recipiente de volume 2500 cm³ especificado pela NBR 12644 (ABNT, 2014) para concreto celular estrutural. Considera-se aceitável esta substituição devida ao fato de os concretos celulares produzidos não conterem agregados graúdos em sua composição como já mencionado.

Logo depois de finalizada a mistura com o aditivo incorporador de ar, a densidade de massa foi medida moldando-se o cilindro metálico de volume e massa conhecidos (item 3.1.1 f) com o concreto recém produzido. Como a maioria dos concretos produzidos são fluidos e o adensamento deve evitar a eclosão das bolhas de ar, moldava-se o recipiente da seguinte maneira: primeiro preenchia-se até aproximadamente a metade da altura do cilindro, então dava-se suaves batidas (por volta de 5) do fundo do cilindro contra uma base rígida (mesa), depois completava-se a altura do cilindro e novamente dava-se pequenos golpes. Ao fim deste processo o concreto era rasado com auxílio de uma espátula para ser nivelado com a altura do cilindro. Então, o conjunto era pesado e a densidade determinada conforme mostra a Figura 15. Este procedimento durava aproximadamente 30 segundos.

Figura 15 - Medição da densidade de massa no estado fresco



Fonte: Autor

Exclusivamente no concreto base (sem ar incorporado) com areia fina, o adensamento foi feito de forma tradicional, conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005): em 3 camadas e aplicando-se 20 golpes em cada camada com o auxílio de soquete. Este procedimento diferente dos demais foi realizado por conta da falta de fluidez do concreto e dificuldade de preencher o recipiente.

Para a verificação da constância de densidade de massa foram estipuladas duas medições em momentos diferentes: a primeira, designada t_0 , foi medida logo após o término da mistura do concreto celular (item 3.3.2 d). A segunda, t_{30} , foi tomada em 30 minutos após o término da mistura do concreto celular, deixando-se parte do concreto celular que não havia sido moldado ainda em repouso na cuba da argamassadeira. Este procedimento não foi adotado para os concretos que não continham ar incorporado (concretos base).

3.5.2. Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado é calculado conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005), através da Equação 6.

$$A = 100 \left(1 - \frac{d}{d_t} \right) \quad (6)$$

Onde,

A é o teor de ar incorporado;

d é a densidade de massa;

d_t é a densidade de massa teórica;

Porém, a densidade de massa teórica (d_t) adotada foi a densidade de massa no estado fresco do concreto celular base de cada composição, já que a intenção não é verificar o teor de ar aprisionado e sim o teor de ar incorporado pela mistura com o AIA.

3.5.3. Consistência

Depois de determinada a densidade de massa foi realizado o ensaio de consistência através do espalhamento em mesa de consistência. Nesta etapa foram utilizados os mesmos equipamentos para o ensaio conhecido como *flow-table* (mesa de consistência) descrito pela NBR 13276 (ABNT, 2016), porém não foram aplicados os impactos na mesa para abertura do espalhamento devido às características estudadas no item 2.3.1.2. Este processo é semelhante ao ensaio *slump-flow* utilizado para concretos autoadensáveis descrito pela NBR 158231-1 (ABNT, 2017) e é conhecido como *mini slump-flow*. Sobre a mesa foi preenchido o molde troncocônico em 2 camadas de alturas iguais da mesma maneira que o item anterior, porém o adensamento no molde foi feito através de suaves batidas no exterior deste segurando-o firme para impedir a sua movimentação, semelhante ao realizado por Silva (2015) durante as moldagens de corpos de prova. Assim como na medição da densidade de massa, para o concreto base de areia fina a moldagem do tronco de cone foi feita de maneira tradicional como consta na NBR 13276 (ABNT, 2016) em 3 camadas com 15, 10 e 5 golpes em cada camada respectivamente.

Ao fim do processo, o molde foi erguido verticalmente em velocidade uniforme e o concreto fresco liberado abrindo um espalhamento. Para medir o diâmetro de espalhamento esperava-se o concreto parar o movimento e então com um paquímetro grande (600 mm) a abertura foi determinada em 2 medidas ortogonais (Figura 16). Optou-se por realizar a medida com paquímetro em detrimento de régua metálica para não causar deformações entre as medidas pelo deslocamento do concreto celular com

a penetração da régua. O valor que caracteriza o espalhamento equivale à média das duas medidas. Este procedimento levava em torno de 2 minutos para ser completado.

Figura 16 - Medição do espalhamento - mini slump-flow



Fonte: Autor

Para comparação com o parâmetro inicial de espalhamento para concretos autoadensáveis, utilizou-se a Equação 7 de espalhamento relativo dada por Nepomuceno (2014) em que se consegue fazer a equivalência entre o espalhamento medido com os equipamentos do *flow-table* com os valores dados para o espalhamento ensaiado com o teste *slump-flow*.

$$G_c = \left(\frac{D_m}{D_0} \right)^2 - 1 \quad (7)$$

Onde,

G_c é o espalhamento relativo;

D_m é o diâmetro do espalhamento medido no *slump-flow*;

D_0 é o diâmetro inicial do molde tronco cônico.

Os valores utilizados para determinação do espalhamento relativo foram: diâmetro de espalhamento no *slump-flow* (D_m) de 550 mm (equivalente à classe SF

1 de concreto autoadensável) e diâmetro do tronco de cone inicial (D_0) de 200 mm (diâmetro do molde do *slump-flow*). O resultado é de um espalhamento relativo $G_c \geq 6,56$. Com esse valor e com o diâmetro inicial do molde tronco cônico do *flow-table* ($D_0=125\text{ mm}$) calculou-se o espalhamento necessário no mini *slump-flow* para atingir o parâmetro de no mínimo 6,56 do espalhamento relativo, equivalente a 550 mm do *slump-flow*. O resultado foi um espalhamento relativo para o *mini slump-flow* de 343,7 mm. Ou seja, para atingir o parâmetro inicial de classificação de concreto autoadensável, os concretos produzidos precisam apresentar no mínimo um espalhamento de 343,7 mm.

3.5.4. Resistência à Compressão

Como já estudado anteriormente, a resistência a compressão diminui com a incorporação de ar ao concreto. A NBR 12646 (ABNT, 1992) estipula que o controle das características do concreto celular para paredes estruturais deve ser realizado pela densidade de massa e pela sua resistência a compressão aos 28 dias de idade.

Por conta do volume reduzido de concreto celular confeccionado em cada mistura, a resistência à compressão dos compostos estudados foi ensaiada tendo como base os métodos descritos na NBR 7215 (ABNT, 2019). Conforme a referida norma, foram moldados e ensaiados corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

Na moldagem dos corpos de prova cilíndricos para os ensaios de resistência à compressão foram utilizados procedimentos semelhantes às moldagens para determinação da densidade de massa: os moldes foram preenchidos em duas camadas: a primeira até a metade de sua altura e a segunda completando a altura do molde, em cada camada foram aplicadas leves batidas (por volta de 5) sobre uma base para o adensamento. Posteriormente o concreto foi nivelado com a parte superior do molde utilizando-se uma espátula.

Assim como na verificação da densidade de massa, foram moldados corpos de prova para t_0 , e $t_{30'}$, a fim de verificar a variação da resistência à compressão e também da variação da densidade de massa no estado endurecido para os tempos de moldagem logo após a mistura e decorridos 30 minutos após a mistura.

Ao todo foram moldados entre 4 e 6 corpos de prova para t_0 , e entre 2 e 4 corpos de prova para t_{30} . Essa variação de moldagem ocorreu devido ao volume também variável de argamassa resultante para cada concreto. Os concretos produzidos tinham o seu volume final proporcional ao teor de ar incorporado durante a mistura.

A desforma dos corpos de prova de resistência à compressão foi realizada juntamente com a desforma dos corpos de prova para o ensaio de retração, após 48 horas da produção dos concretos. Este tempo de desmoldagem foi adotado para garantir uma resistência suficiente do concreto no processo de desforma, já que se esperava pequenas resistências mecânicas nas primeiras idades, principalmente para os concretos com maior teor de ar incorporado.

Após a desforma, os corpos de prova foram imersos em tanque de cura com água e cal em temperatura controlada até o seu rompimento.

Os corpos de prova moldados para este ensaio também foram utilizados para a verificação da massa específica através da medição de suas características físicas após a desforma. Ao final de 28 dias de idade os corpos de prova foram rompidos em prensa calibrada da marca Shimadzu, com capacidade de 2000 kN e velocidade continua de 0,45 MPa/s, conforme NBR 5739 (ABNT, 2018).

Com os resultados obtidos das resistências à compressão e massa específica, ainda se calculou a eficiência dos concretos celulares produzidos. Spitzner (1994) indica que o fator de eficiência é a relação entre a resistência à compressão do concreto celular com a sua respectiva massa específica. O valor resultante deve ser expresso em MPa.dm³/kg. Quanto maior este valor, maior a sua eficiência, ou seja, maior a sua capacidade de resistir à compressão com uma menor densidade de massa (e por consequência menor peso próprio).

3.5.5. Massa específica

Após a desmoldagem, cada corpo de prova teve sua massa e dimensões (diâmetro e altura) medidas em balança com precisão de 0,1g e paquímetro com precisão de 0,05 mm para o cálculo do seu volume. Com a massa e o volume calculado de cada corpo de prova de concreto endurecido pode-se calcular a massa específica conforme a NBR 9778 (ABNT 2005). Como foram moldados corpos de

prova para t_0 , et_{30} , foi possível a medição da densidade de massa distinta para esses dois tempos de moldagem.

3.5.6. Variação dimensional: massa e retração

Assim como nos outros itens apresentados, devido ao volume reduzido de concreto produzido a cada mistura e a semelhança do concreto celular com argamassas pela ausência de agregados graúdos em ambos, foi utilizada a norma NBR 15261 (ABNT, 2005) em detrimento da NM 131 (ABNT, 1998)

Após o ensaio de consistência, procedia-se à moldagem dos corpos de prova de retração. Os moldes, conforme a NBR 15261 (ABNT, 2005), foram previamente preparados e montados. As formas para o ensaio consistem em um conjunto de peças preparado para moldar 3 corpos de prova prismáticos simultaneamente, cada um com dimensões de 25x25x250 mm. Nas extremidades de cada corpo de prova são deixados pinos aparafusados na forma de modo que, quando desmoldados, os pinos fiquem parcialmente embutidos no concreto, conforme mostra a Figura 17.

Figura 17 - Molde de variação dimensional preparado



Fonte: Autor

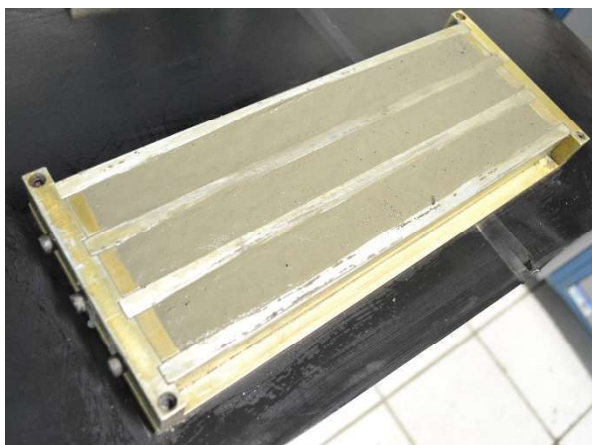
Para a moldagem era distribuídos uma certa quantidade de concreto no interior dos moldes e aplicados suaves golpes (aproximadamente 5) contra a mesa elevando-se cuidadosamente uma lateral do molde. Este procedimento era repetido para a outra lateral e então os concretos eram rasados com uma espátula e nivelados com o molde (Figura 18 a). Após esse procedimento, eram retirados cuidadosamente os parafusos

de fixação das extremidades de cada molde para não restringir a movimentação durante a cura (Figura 18 b). Depois todo o conjunto foi envolto em plástico filme a fim de não permitir a saída de água até o momento da desmoldagem. Este procedimento de moldagem levava aproximadamente 3 minutos.

Após a desforma dos corpos de prova prismáticos para o ensaio de variação dimensional, estes eram identificados inclusive realizando marcações padronizadas nas quatro faces de cada prisma.

Figura 18 - Moldagem corpos de prova de retração

a) Corpos de prova retração moldados



Fonte: Autor

b) Retirada de parafusos para movimentação



Fonte: Autor

Esta norma prevê medições em 48 horas quando da desmoldagem dos corpos de prova e em 7, 14 e 28 dias de idade. Porém, para uma verificação mais detalhada do comportamento desses parâmetros, realizou-se diversas medidas além das estipuladas. Durante o período de medição, os corpos de prova ficaram armazenados ao ar em sala climatizada em temperatura de aproximadamente 23 °C.

3.5.6.1. Variação dimensional: massa

Logo após o desmolde do conjunto de 3 corpos de prova para cada concreto, estes eram pesados em balança com precisão de 0,1g, sendo esta medida a sua massa inicial após a desforma do corpo de prova (m_0). Assim como esta, foram feitas diversas medições ao longo da idade de cada concreto até a idade final de 28 dias em conjunto com as medições de retração.

Para o cálculo da variação dimensional da massa, utilizou-se a Equação 8 presente na referida norma:

$$\Delta m_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} \quad (8)$$

Onde,

Δm_i é a variação da massa, arredondada ao décimo mais próximo, dada em porcentagem;

m_i é a massa na idade final, dada em gramas;

m_0 é a massa após a desforma do corpo-de-prova, em gramas;

O resultado da variação de massa é a média calculada dos 3 corpos de prova ensaiados para cada concreto

Com os valores da variação da massa para cada período medido, é possível verificar a variação da massa do concreto ao longo do tempo e consequentemente a variação da sua massa específica.

3.5.6.2. Variação dimensional: retração

As medidas de retração foram realizadas no mesmo momento das medidas de variação de massa. Estas medições são realizadas através de um relógio comparador fixado em um aparato estático próprio para medições de retração o qual se encaixa os pinos metálicos presentes nas extremidades dos corpos de prova. Antes de cada aferição a medida de referência do relógio comparador é calibrada com uma barra metálica padrão, de acordo com a NBR 15261 (ABNT, 2005). As medidas dos 3 corpos de prova para cada concreto são feitas encaixando-se cuidadosamente o corpo de prova no aparato e tomando-se duas medidas para cada corpo de prova. Cada medida refere-se a uma face específica do corpo de prova. O resultado da medida é considerado a menor medida determinada. A medida de representa o conjunto de corpos de prova é a média do resultado de cada corpo de prova.

Para o cálculo da retração, foi utilizada a Equação 9.

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25} \quad (9)$$

Onde,

ε_i é a medida da variação dimensional, caracterizada como retração (quando negativa) ou expansão (quando positiva), na idade “ i ”, arredonda ao centésimo mais próximo, em mm/m;

L_i é a leitura efetuada na idade final, em mm;

L_0 é a leitura efetua após a desforma, em mm;

i é a idade da leitura.

4. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados verificados na caracterização dos materiais e as propriedades dos concretos produzidos.

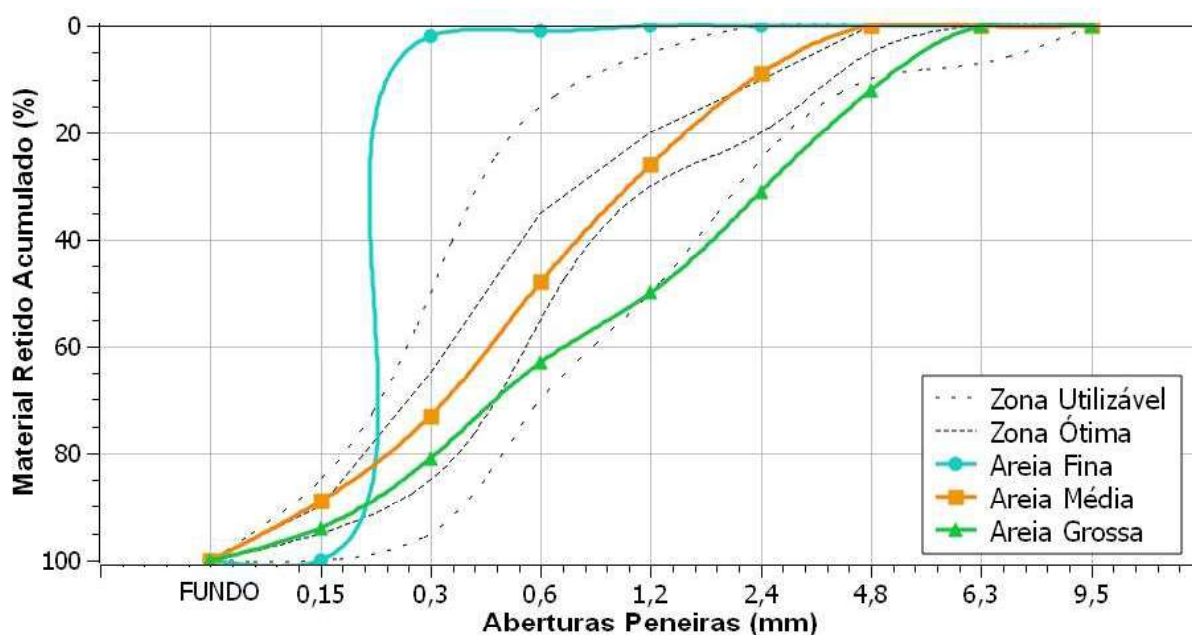
4.1. Caracterização dos agregados miúdos

Os resultados da caracterização dos três agregados miúdos utilizados na pesquisa serão apresentados nesta seção.

4.1.1. Granulometria

As curvas granulométricas dos agregados utilizados são apresentadas na Figura 19.

Figura 19 – Curvas granulométricas areias utilizadas



Fonte: Autor

Observa-se na Figura 19 que a areia média praticamente se enquadra na zona ótima descrita pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Já a areia grossa se mantém próximo à zona utilizável enquanto que a areia fina se distancia bastante das zonas de utilização.

4.1.2. Massa específica, módulo de finura e diâmetro máximo

O Quadro 11 apresenta a massa específica das três areias utilizadas para a fabricação dos concretos. Também são relacionados os módulos de finura e diâmetro máximo para cada uma delas.

Quadro 11 - Características das areias utilizadas

Classificação Granulométrica	Massa específica (g/cm³)	Módulo de Finura	Diâmetro Máximo (mm)
Areia Fina	2,63	0,66	0,30
Areia Média	2,56	2,44	4,80
Areia Grossa	2,62	3,30	6,30

Fonte: Autor

Assim como os resultados do ensaio de granulometria do item anterior, verifica-se que os valores de módulo de finura das areias média e grossa se enquadram respectivamente dentro da faixa da zona ótima (2,20 a 2,90) e zona utilizável superior (2,90 a 3,50), descritas pela NBR 7211 (ABNT, 2009), enquanto o módulo de finura da areia fina não adequa-se a nenhuma faixa.

4.2. Ensaio no estado Fresco

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios realizados nos concretos base e celulares no seu estado fresco.

4.2.1. Densidade de Massa e teor de ar incorporado

O Quadro 12 reúne os valores dos resultados encontrados para densidade de massa e teor de ar incorporado.

Quadro 12 - Resumo de resultados de densidade de massa dos concretos

Concretos	Tipo de Areia Utilizada	Tempo de Mistura com Aditivo Incorporador de Ar	Densidade de Massa no Estado Fresco (t_0')	Teor de Ar Incorporado (por aditivo)	Densidade de Massa no Estado Fresco (t_{30}')	Teor de Ar Incorporado (por aditivo)
			kg/m ³	%	kg/m ³	%
CBAF	Fina	Base	2002,00	-	2002,00	-
CCAF1'		1'	1637,25	18,22%	1699,00	15,13%
CCAF3'		3'	1398,50	30,14%	1573,25	21,42%
CCAF6'		6'	1257,75	37,18%	1471,75	26,49%
CBAM	Média	Base	2170,50	-	2170,50	-
CCAM1'		1'	1675,00	22,83%	1793,75	17,36%
CCAM3'		3'	1597,50	26,40%	1700,50	21,65%
CCAM6'		6'	1383,50	36,26%	1480,00	31,81%
CBAG	Grossa	Base	2190,75	-	2190,80	-
CCAG1'		1'	1829,00	16,51%	1870,75	14,61%
CCAG3'		3'	1629,75	25,61%	1818,75	16,98%
CCAG6'		6'	1378,50	37,08%	1661,30	24,17%

Fonte: Autor

Com os dados do Quadro 12 pode-se verificar a grande variação de resultados nas densidades de massa para os concretos produzidos com as diferentes areias. Estas diferenças são nítidas desde o concreto base (sem a incorporação de ar) até os concretos com maior ar incorporador (tempos de mistura de 6 minutos). Deixando claro que a granulometria afeta a densidade de massa dos concretos celulares.

Pode-se observar ainda, que as densidades de massas resultantes e, conseqüentemente o volume de ar incorporado, variaram conforme o tempo de mistura com o aditivo incorporador de ar em todos os concretos com este aditivo. Também se nota que as densidades de massa dos concretos também variam conforme o tempo de moldagem t_0' e t_{30}' . Nestas medições, todos os concretos tiveram sua densidade de massa acrescida devido à perda do ar incorporado ao longo do tempo.

É importante destacar que nas medições logo depois da confecção dos concretos (t_0'), apenas o concreto CCAF6' não se enquadrava como concreto celular conforme as NBR 12645 (ABNT, 1992) e NBR 12646 (ABNT, 1992), que estipulam densidades de massa no estado fresco entre 1300 e 1900 kg/m³. Porém, quando da medição 30 minutos após a produção do concreto (t_{30}'), este mesmo concreto passou de 1257,75 kg/m³ em t_0' para 1471,75 kg/m³, atendendo assim à classificação.

Estes resultados serão melhor discutidos nas seções seguintes.

Como mencionado na subseção 3.3, como o consumo de cimento fixado foi calculado para um concreto celular de 1400 kg/m^3 e com areia média, os concretos com densidade de massa diferente desta acabam contendo um consumo de cimento por metro cúbico diferente do inicialmente estipulado.

O Quadro 13, apresenta os valores corrigidos dos concretos celulares produzidos conforme a sua densidade de massa apresentada no Quadro 12.

Quadro 13 – Consumo de cimento corrigido concretos celulares produzidos

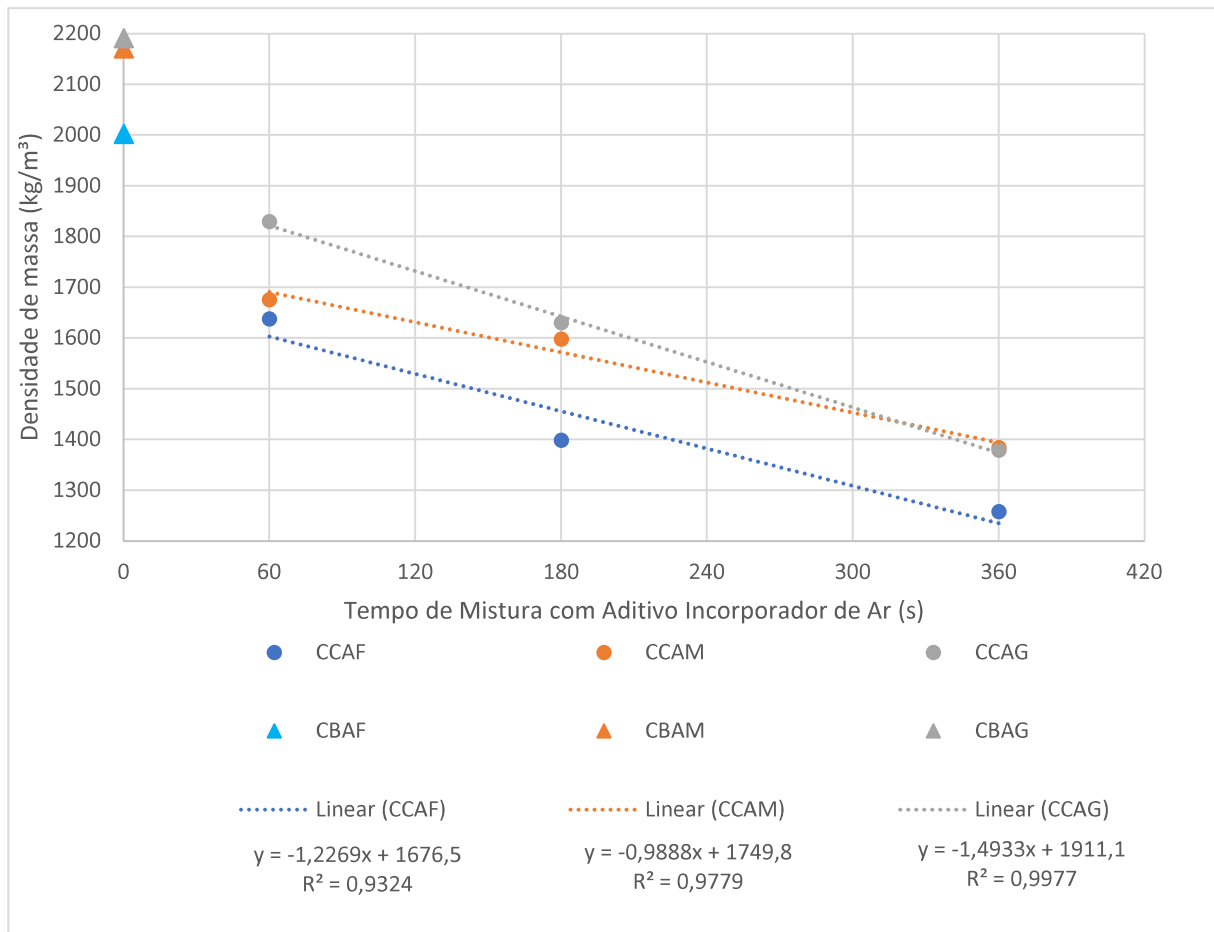
Concretos	Tipo de Areia Utilizada	Tempo de Mistura com Aditivo Incorporador de Ar	Densidade de Massa no Estado Fresco (t_0')	Consumo de Cimento Corrigido (t_0')	Densidade de Massa no Estado Fresco (t_{30}')	Consumo de Cimento Corrigido (t_{30}')
			kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3
CBAF	Fina	Base	2002,00	500,50	2002,00	500,50
CCAF1'		1'	1637,25	409,31	1699,00	424,75
CCAF3'		3'	1398,50	349,63	1573,25	393,31
CCAF6'		6'	1257,75	314,44	1471,75	367,94
CBAM	Média	Base	2170,50	542,63	2170,50	542,63
CCAM1'		1'	1675,00	418,75	1793,75	448,44
CCAM3'		3'	1597,50	399,38	1700,50	425,13
CCAM6'		6'	1383,50	345,88	1480,00	370,00
CBAG	Grossa	Base	2190,75	547,69	2190,80	547,70
CCAG1'		1'	1829,00	457,25	1870,75	467,69
CCAG3'		3'	1629,75	407,44	1818,75	454,69
CCAG6'		6'	1378,50	344,63	1661,30	415,33

Fonte: Autor

Com os valores do Quadro 13, percebe-se a grande diferença dos consumos de cimento em relação aos 350 kg/m^3 estipulados inicialmente para um concreto celular de 1400 kg/m^3 . Verifica-se inclusive que por conta da variação da densidade de massa entre t_0 , e t_{30} , há uma grande mudança no consumo de cimento. Tais mudanças podem acarretar num equivoco ao se estipular um consumo de cimento para um concreto celular que pode ter sua densidade de massa diferente do especificado em projeto.

Para facilitar a análise dos resultados encontrados no Quadro 12, a Figura 20 mostra o gráfico com os resultados comparativos entre os valores de densidade de massa dos concretos celulares e concretos base.

Figura 20 – Densidade de massa t_0 , x Tempo de mistura aditivo incorporador de ar (t_m) em t_0



Fonte: Autor

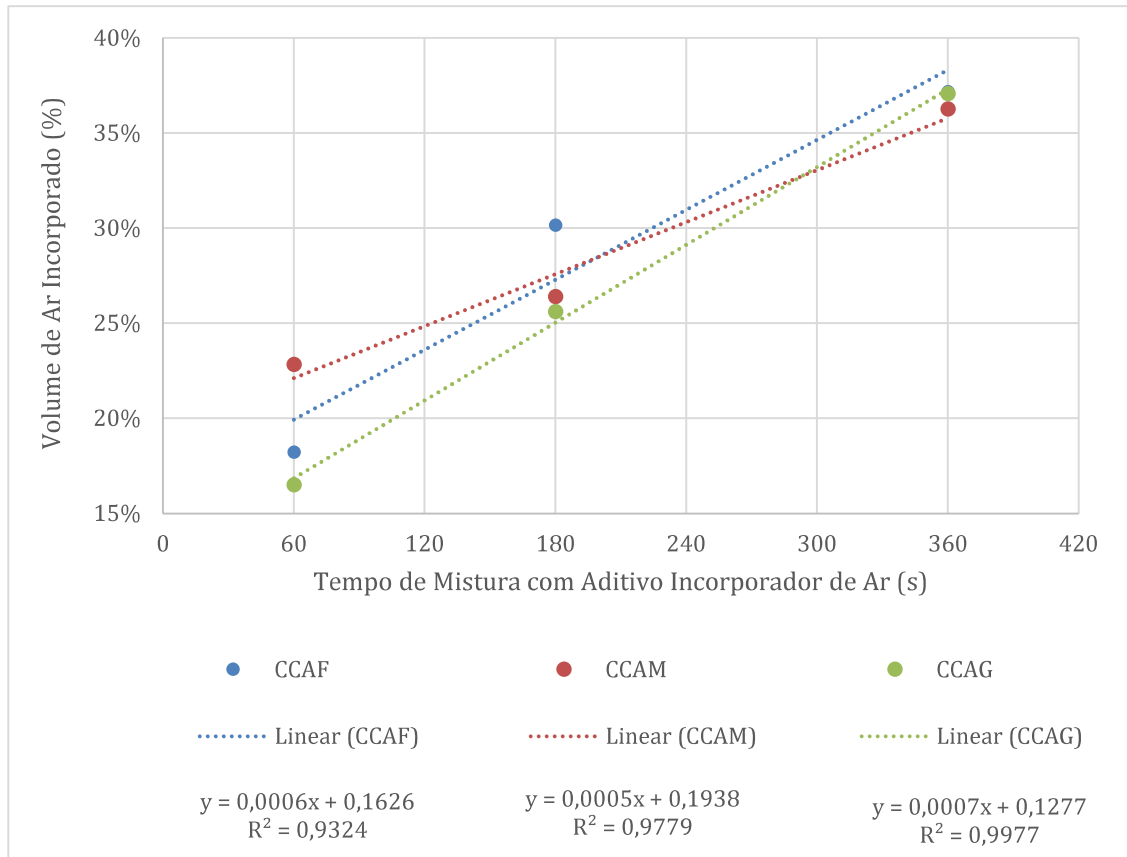
Observa-se na Figura 20 que o CCAF foi o concreto celular que chegou às menores densidades de massa com os mesmos tempos de mistura, seguido pelo concreto de areia média e do concreto com areia grossa. Ferreira (1987), já afirmava que areias mais finas eram mais indicadas para produção de concretos com densidades menores, enquanto que areias mais grossas para concretos de densidade de massa maiores. Percebe-se que este efeito é influenciado pela baixa densidade de massa do concreto base, a qual contribui para densidades menores quando incorporado ar no concreto.

Com isso, uma outra análise mais possível é da comparação entre as velocidades de incorporação de ar como sendo a inclinação das curvas de tendência linear resultantes. Fazendo esta análise, percebe-se que o concreto que apresentou uma tendência a incorporar ar mais rapidamente foi o CCAG (-1,4933), seguido do CCAF (-1,2269) e CCAM (-0,9888).

Destaca-se que, nesta moldagem em t_0 , os concretos CCAM e CCAG se aproximaram da densidade de massa almejada (1400kg/m^3) com tempos de mistura de 6 minutos, enquanto que o CCAF se aproximou desta densidade em 3 minutos.

A Figura 21 mostra as curvas de teor de ar incorporado para cada concreto.

Figura 21 - Teor de ar incorporado x Tempo de mistura (t_m) em t_0



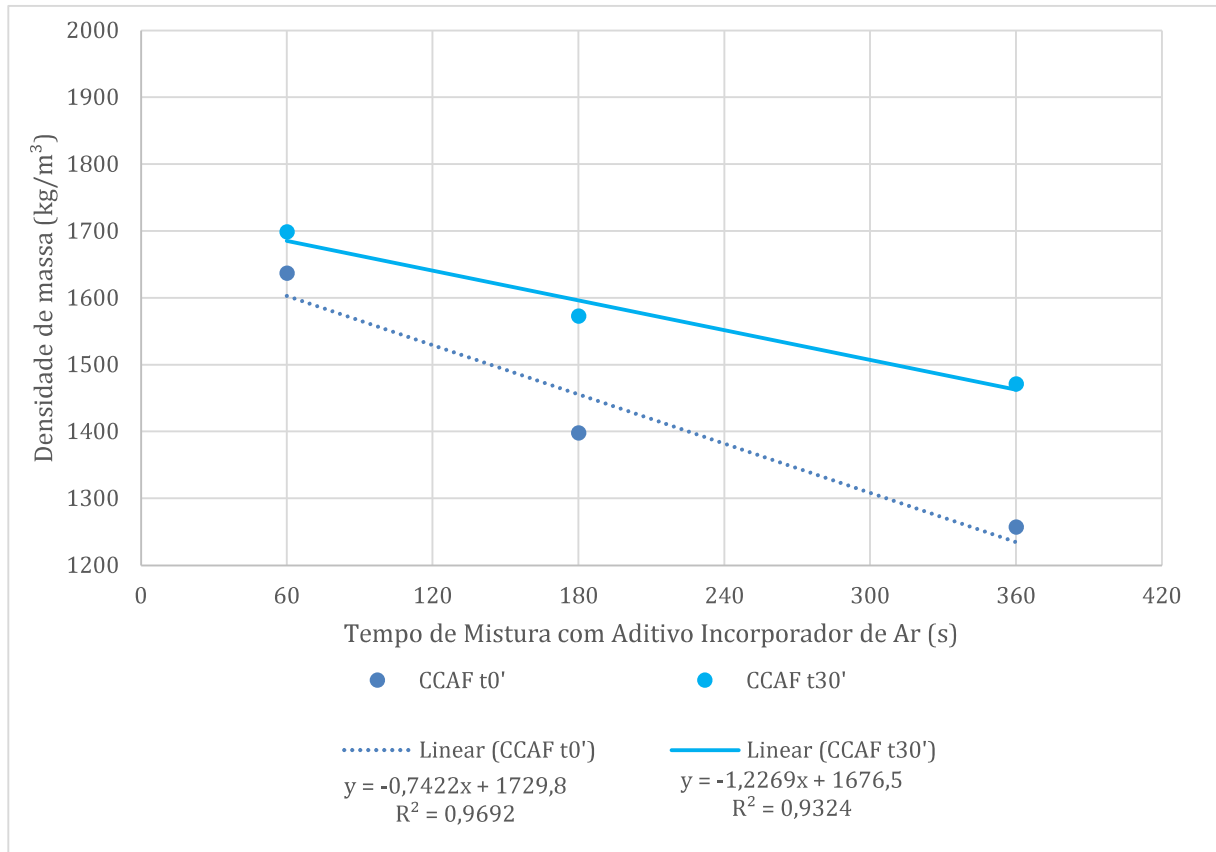
Fonte: Autor

A Figura 21 confirma os dados expostos na Figura 20 já que a densidade de massa tem uma tendência de redução proporcional ao aumento de volume de ar incorporado.

Ainda com base neste gráfico, verifica-se que os teores de ar de todos os concretos tenderam a convergir conforme o tempo de mistura. Nota-se que com um tempo de mistura de 6 minutos todos os concretos apresentaram um volume de ar incorporado numa faixa entre 35 e 40%. Somente os valores deste tempo de mistura se aproximaram no que apresenta a ABCP (2002): entre 35 a 45% de volume de vazios indicados para a construção de paredes. Portanto, o tempo de mistura influencia significativamente no valor de densidade de massa e a granulometria parece ter uma menor influência nesta propriedade.

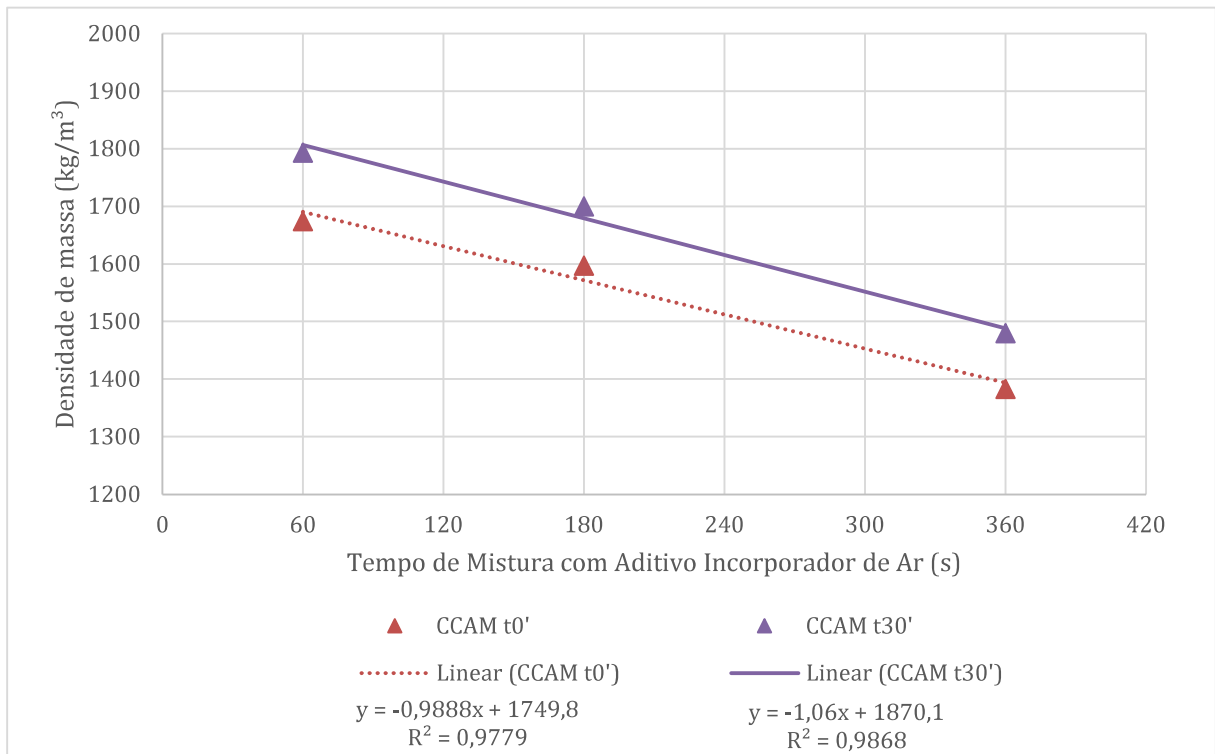
Os resultados das densidades de massa medidas em t_0 , e em t_{30} , para cada concreto celular ao longo do tempo de mistura são representados nas Figuras 22, 23 e 24.

Figura 22 - CCAF: Densidade de massa em t_0 , e t_{30} , x Tempo de mistura (t_m)



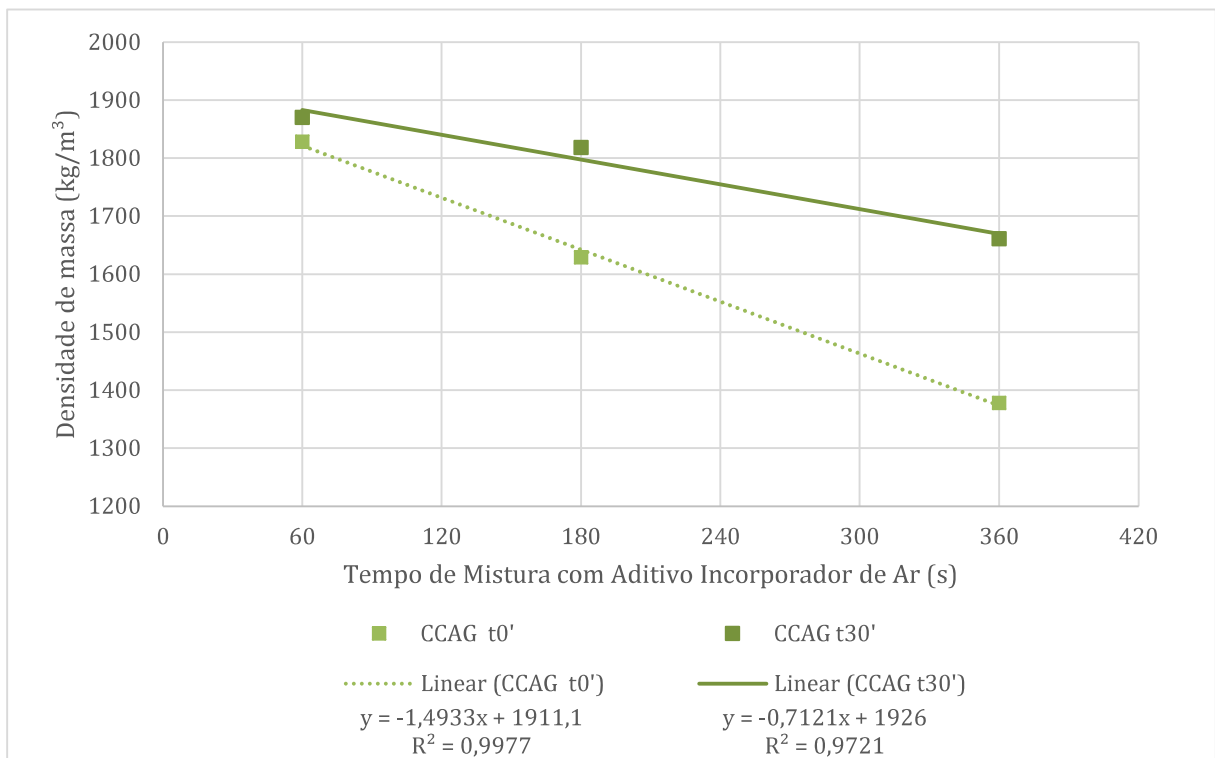
Fonte: Autor

Figura 23 - CCAM: Densidade de massa em t_0 e $t_{30'}$, x Tempo de mistura (t_m)



Fonte: Autor

Figura 24 – CCAG: Densidade de massa em t_0 , e $t_{30'}$, x Tempo de mistura (t_m)



Fonte: Autor

Nas Figuras 22, 23 e 24 percebe-se um aumento da densidade de massa entre em t_0 e t_{30} , que para CCAF e CCAG e é realizada nos concretos com densidade de massa menores (tempo de mistura maiores).

Já nos concretos CCAM, a diferença de densidade de massa tem uma variação muito menor entre os três tempos de mistura, a qual fica mais evidente analisando-se no gráfico da Figura 23.

Observou-se que nos concretos com areia grossa a variação na densidade de massa do t_0 para o t_{30} ocorreu devido à segregação de material pesado e eliminação das bolhas de ar da mistura ao longo do tempo de moldagem e pode ser observado nas fotos da Figura 25.

Figura 25 – Separação das bolhas de ar e segregação de material pesado

a) Ascensão de bolhas CCAG3'



b) Segregação do material pesado CCAG6'



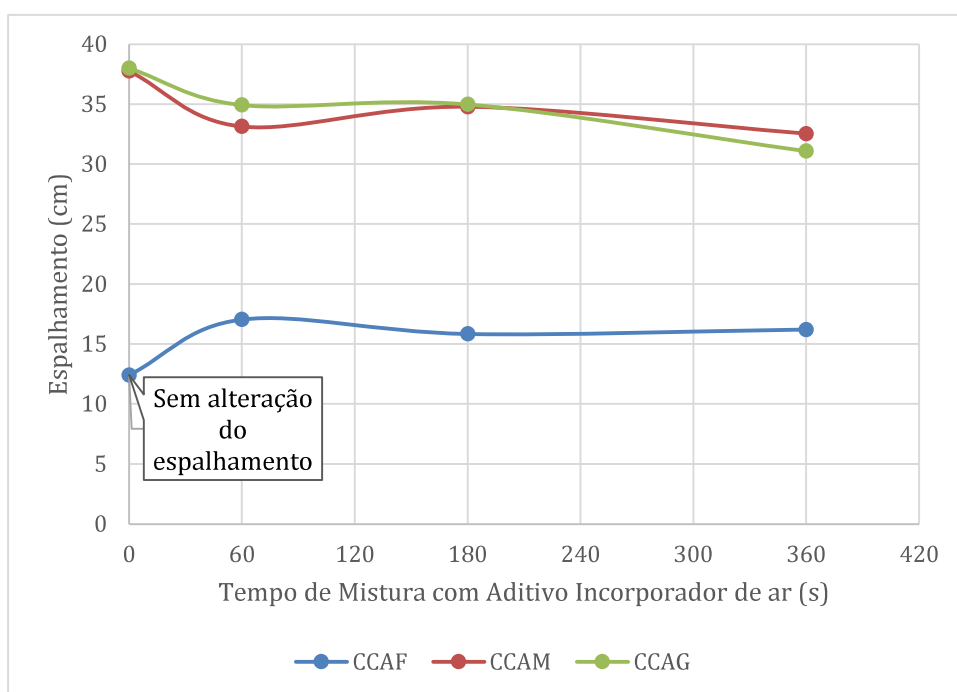
Fonte: Autor

Já para os concretos CCAM, o aumento de densidade de massa se manteve mais estável em todos os concretos confeccionados (em relação aos demais concretos). Este fato indica que os concretos produzidos com a areia média conseguiram reter melhor as bolhas de ar e evitaram uma segregação excessiva. Para este caso, pode-se afirmar que a areia média seria a mais indicada para a produção dos concretos celulares em relação às demais.

4.2.2. Consistência

Os resultados dos ensaios de consistência pelo espalhamento em mesa de consistência para cada concreto produzido encontram-se na Figura 26. Os pontos iniciais (0 segundos) indicam o espalhamento dos concretos base (sem aditivo incorporador de ar). Os demais pontos plotados, equivalem ao espalhamento para concretos com tempos de mistura de aditivo incorporador (t_m) de 60, 180 e 360 segundos.

Figura 26 - Espalhamento dos concretos x Tempo de mistura ($t_{30'}$)



Fonte: Autor

Analizando a Figura 26, percebe-se uma tendência de redução no espalhamento para os concretos CCAM e CCAG no primeiro minuto em relação ao concreto base. Já no concreto CCAF, observou-se uma melhora da consistência também no primeiro minuto, saindo de um estado completamente compacto (sem alteração do espalhamento) para um espalhamento um pouco melhor. Ainda assim, os espalhamentos dos concretos com areia média e areia grossa apresentaram resultados superiores aos produzidos com areia fina. A Figura 27 ilustra a diferença entre os espalhamentos dos concretos CCAF6' e CCAM3'. Todos os concretos com ar incorporado mantiveram uma certa constância do espalhamento.

Figura 27 - Espalhamentos de alguns concretos celulares

a) Espalhamento CCAF6'



b) Espalhamento CCAM3'



Fonte: Autor

Durante a confecção dos concretos, percebeu-se uma aparência semelhante entre os concretos secos e os CCAF mesmo após a adição de superplastificante. Tal efeito foi atribuído ao tipo de areia extremamente fina utilizada na mistura a qual “consome” mais água de amassamento demandada por sua grande área superficial específica, assim como afirmado por Neville e Brooks (2010). Esta característica foi reduzida após a introdução do aditivo incorporador que contribuiu para um aumento da fluidez do concreto conforme previsto por Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2008).

Os concretos CCAM e CCAG apresentaram praticamente o mesmo comportamento ao longo dos tempos de mistura, provavelmente por terem composições granulométricas mais similares. Sendo os concretos, CCAM1', CCAM3'

e CCAG3' os que tiveram o melhor desempenho e classificados como potenciais autoadensáveis segundo os valores de espalhamento relativos obtidos no item 3.3.3 ($G_c \geq 34,37\text{cm}$), característica bastante aplicável a este tipo de concreto já que este não pode ser vibrado no seu adensamento.

Os concretos celulares produzidos com areia fina apresentaram basicamente uma redução de 50% do espalhamento em relação aos demais concretos. Esta característica deve ser levada em conta na aplicação de concretos celulares, podendo inclusive, ser um fator de impedimento para execução de paredes moldadas no local.

4.3. Ensaios no estado Endurecido

4.3.1. Massa específica

O Quadro 14 traz um resumo dos resultados obtidos que serão discutidos ao longo deste item. Os valores de densidade de massa são os mesmos presentes no Quadro 12. Os valores das massas específicas representam a média das medidas determinadas conforme o item 3.5.1.

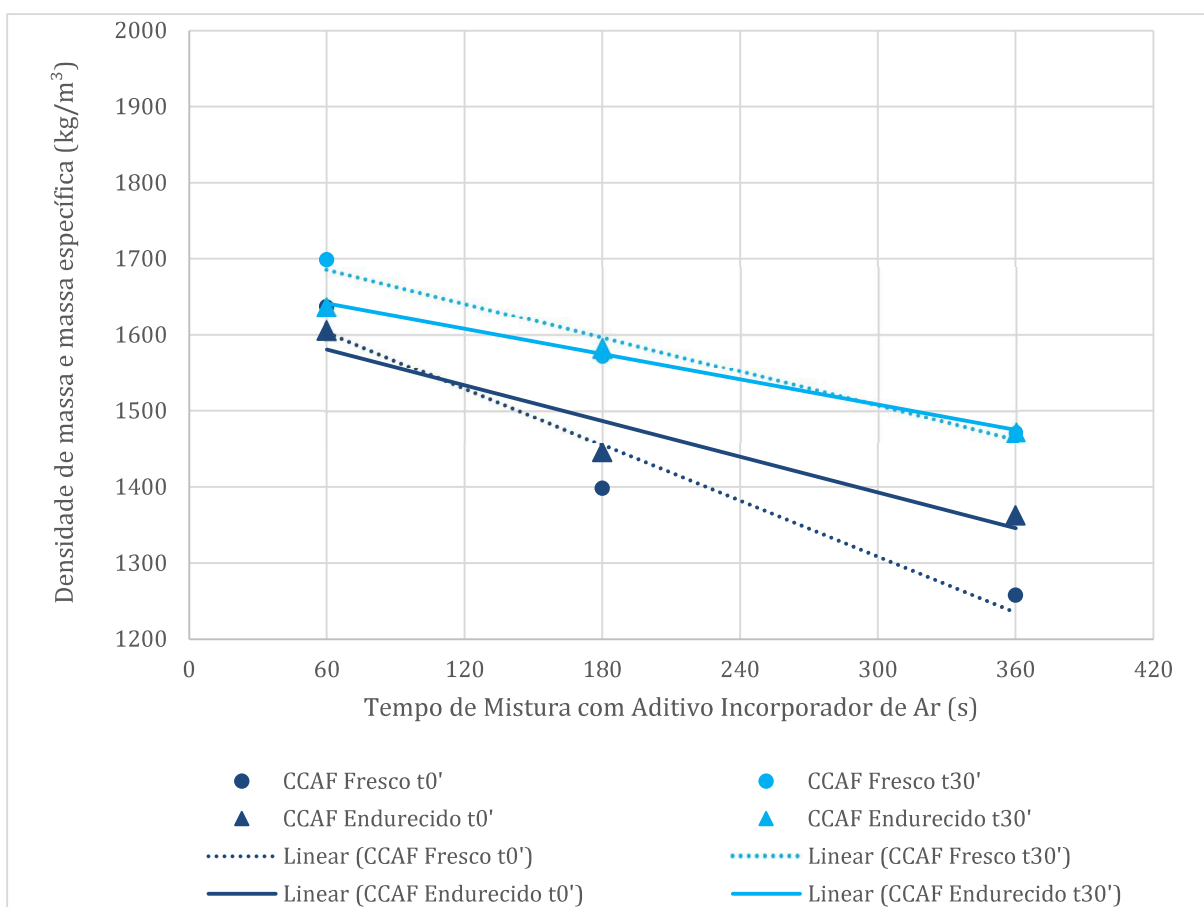
Quadro 14 - Resumo de resultados de densidade de massa e massa específicas dos concretos celulares

Concretos	Tipo de Areia	Tempo de Mistura com Aditivo Incorporador de Ar	Densidade de Massa (t0')	Massa Específica (t0')	Densidade de Massa (t30')	Massa Específica (t30')
			kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³
CBAF	Fina	Base	2002,00	2012,23	2002,00	-
CCAF1'		1'	1637,25	1605,59	1699,00	1636,5
CCAF3'		3'	1398,50	1445,99	1573,25	1582,9
CCAF6'		6'	1257,75	1362,51	1471,75	1471,9
CBAM	Média	Base	2170,50	2161,37	2170,50	-
CCAM1'		1'	1675,00	1676,22	1793,75	1737,1
CCAM3'		3'	1597,50	1604,95	1700,50	1648,8
CCAM6'		6'	1383,50	1377,29	1480,00	1414,1
CBAG	Grossa	Base	2190,75	2157,96	2190,80	-
CCAG1'		1'	1829,00	1868,36	1870,75	1922,3
CCAG3'		3'	1629,75	1618,34	1818,75	1831,8
CCAG6'		6'	1378,50	1445,61	1661,30	1728,4

Fonte: Autor

Os resultados da verificação das massas específicas para t_0' e t_{30}' foram comparados aos resultados das densidades de massa nestes mesmos tempos de moldagem. Esta comparação permite a análise da variação do concreto fresco em relação ao endurecido. Também se faz necessária esta comparação para verificar se esta relação varia para concretos com diferentes densidades de massa. As Figuras 28, 29 e 30 apresentam os gráficos desta comparação e por isso também reúnem os mesmos dados das Figuras 22, 23 e 24.

Figura 28 – CCAF: densidade de massa t_0' e t_{30}' e massa específica x Tempo de mistura (t_m)



Fonte: Autor

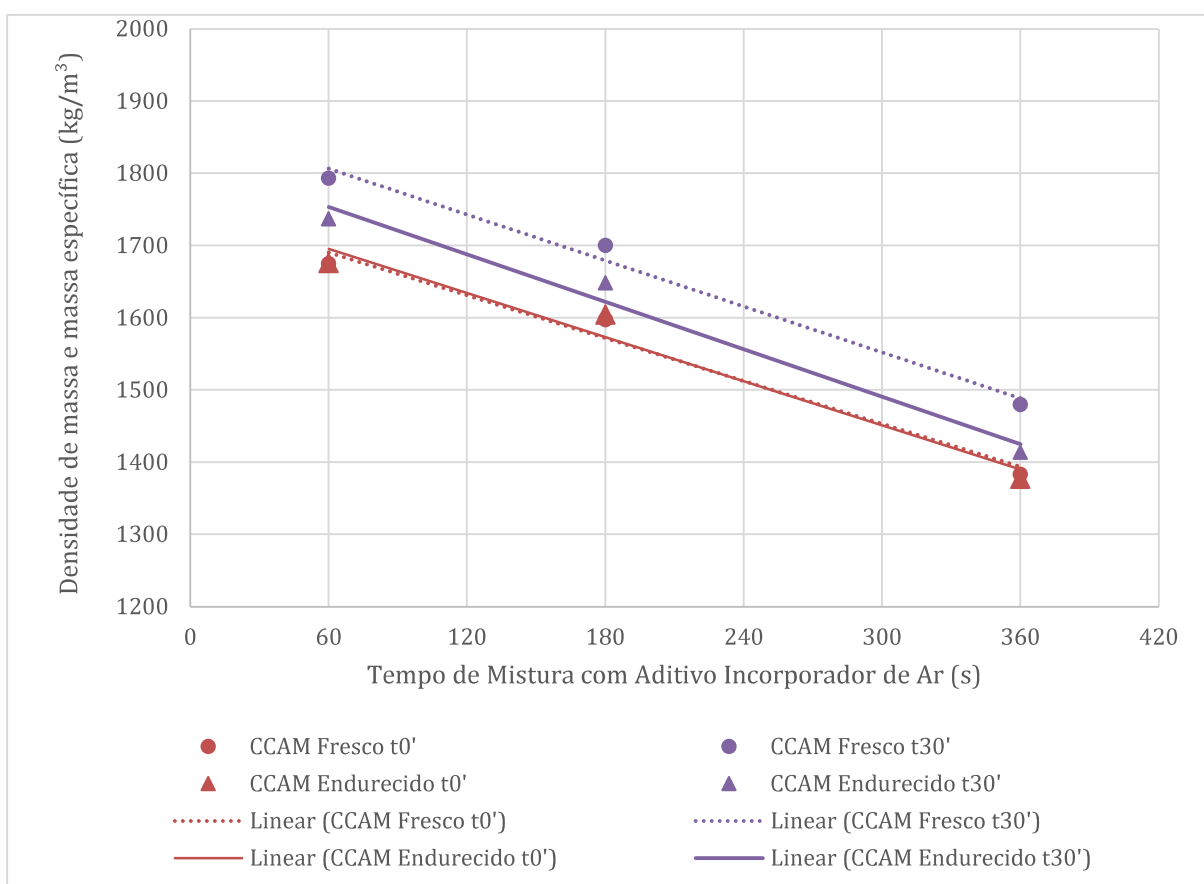
Para os valores de densidade medidos em t_0' , verifica-se na Figura 28 que houve um aumento considerável da massa específica do concreto em relação ao seu estado fresco nos tempos de mistura 3 e 6 minutos, os quais apresentam menores densidades e, portanto, maior teor de ar incorporado. Esse aumento foi causado pela perda de bolhas de ar após a moldagem dos corpos de prova enquanto o concreto não havia endurecido. Tanto é que para os concretos medidos em t_{30}' , este efeito não

ocorreu, pois, parte do ar incorporado já havia sido perdido antes da sua moldagem em t_{30} .

É importante destacar que assim como no estado fresco, a massa específica tendeu a ter uma elevada variação entre os concretos moldados em t_0 e os moldados em t_{30} . Este tipo de efeito pode causar sérios prejuízos quanto às divergências no peso próprio calculado em projeto e no executado *in-loco*.

Para os concretos com maiores densidades de massa (tempo de mistura de 1 minuto) percebe-se uma pequena diminuição da densidade quando no estado endurecido. Isso mostra que este concreto reteve melhor o ar incorporado. O efeito de variação de massa ao longo da idade do concreto será melhor abordado posteriormente na sessão de variação dimensional.

Figura 29 - CCAM: densidade de massa e massa específica em t_0 , e t_{30} , no estado fresco e endurecido x Tempo de mistura (t_m)



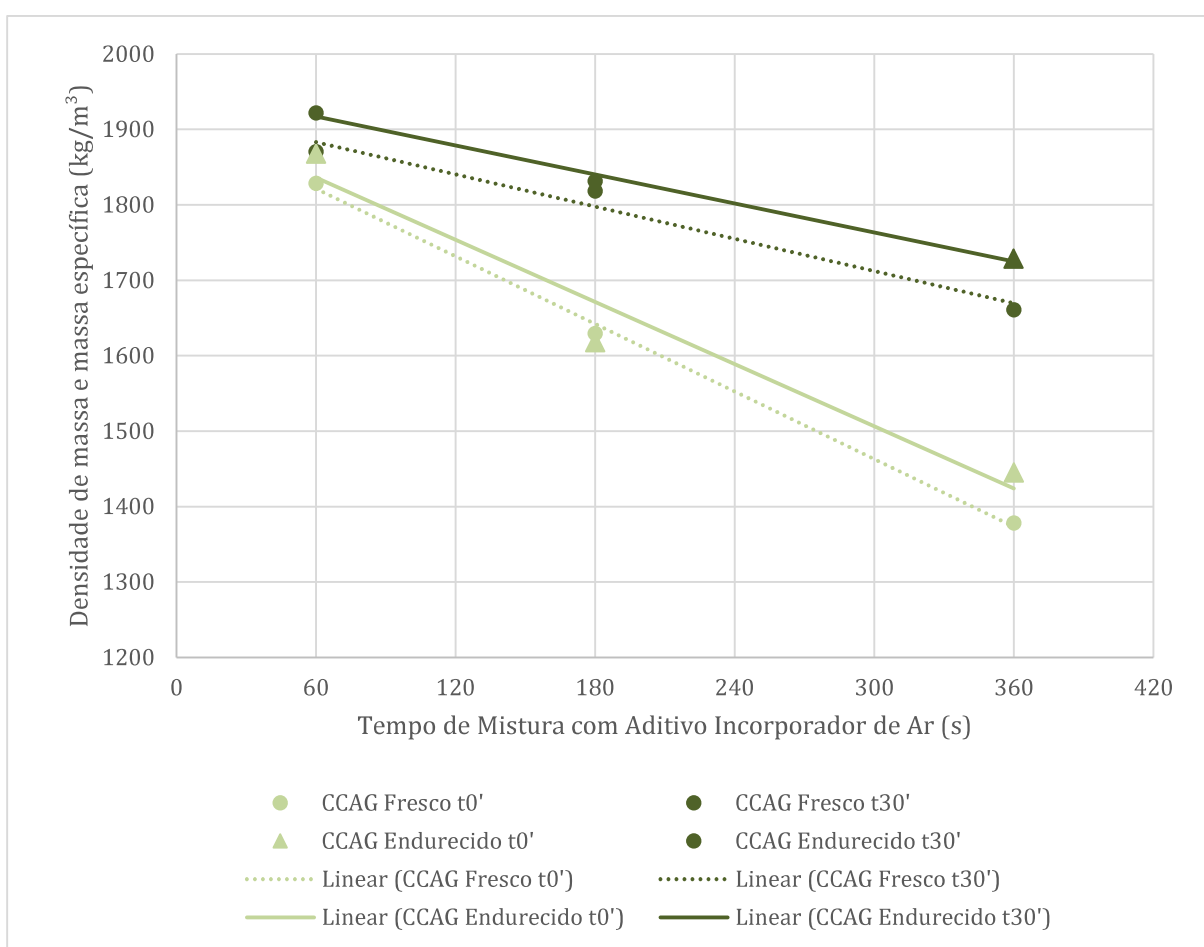
Fonte: Autor

Já para o CCAM (Figura 29) conforme há a incorporação de ar, o composto se torna menos propenso à segregação do material pesado. O paralelismo entre as

curvas demonstra uma disposição para estabilidade da composição em não perder grandes quantidades de ar ou de haver segregação com a variação do tempo de mistura. A variação total de densidade de massa foi a menor entre os três tipos de concreto analisados.

A sobreposição da curva do estado fresco e endurecido em t_0' mostra uma constância da densidade de massa provavelmente por conta do CCAM dificultar a saída de ar da mistura.

Figura 30 - CCAG: densidade de massa e massa específica t_0' e t_{30}' , x Tempo de mistura (t_m)



Fonte: Autor

Consoante ao apresentado para os concretos com areia fina, a Figura 30 mostra uma tendência de variação de densidade de massa entre os tempos de moldagem t_0' e t_{30}' , principalmente nos concretos com mais ar incorporado. Porém, no caso do CCAG, as diferenças entre os concretos nos estados fresco e endurecido foram menores para cada tempo de mistura.

Assim como mencionado no item 4.2.1 e evidenciado pela Figura 30, houve uma tendência de aumento da densidade entre os tempos de moldagem realizados, o que refletiu também na massa específica do concreto. Na Figura 31 ficou evidenciada a segregação do material nos corpos de prova desmoldados.

Figura 31 - Exsudação em corpos de prova CCAG

a) Corpo de prova CCAG3'



b) Corpo de prova CCAG6'



Fonte: Autor

Pode-se verificar que no estado endurecido as diferenças entre tempos de moldagem t_0' e t_{30}' foram reduzidas em relação às densidades de massa no estado fresco. Isto indica que mesmo com a moldagem dos corpos de prova em t_0' , os concretos celulares continuaram perdendo certa quantidade de ar incorporado até endurecerem e, assim, se aproximam da densidade de massa nos tempos de moldagem t_{30}' .

Por conta da excessiva separação do material pesado presentes nos concretos CCAG3' e CCAG6', estes foram considerados inapropriados para o objeto desta pesquisa, motivo pelo qual este concreto não será avaliado nos próximos ensaios a serem apresentados.

4.4. Resistência à compressão

Conforme estudado por Silva (2014), a resistência à compressão diminui com a incorporação de ar ao concreto. A NBR 12646 (ABNT, 1992) estipula que o controle das características do concreto deve ser realizado pela densidade de massa aparente

e pela resistência à compressão do concreto celular. Porém, como foram moldados corpos de prova para os tempos de moldagem t_0' e t_{30}' , as diferentes densidades de massa entre estes tempos de moldagem faz com que se altere a resistência à compressão dos concretos. A variação da densidade de massa é um indicativo direto da presença de ar, portanto esperou-se também uma variação dessa resistência como apresentado por Ferreira (1987), Neville e Brooks (2010) e Silva (2014). A Figura 32 apresenta o ensaio de compressão e a ruptura de dois corpos de prova.

Figura 32 - Ensaio de resistência à compressão

a) Rompimento de corpo de prova



b) Ruptura de corpo de prova ensaiado

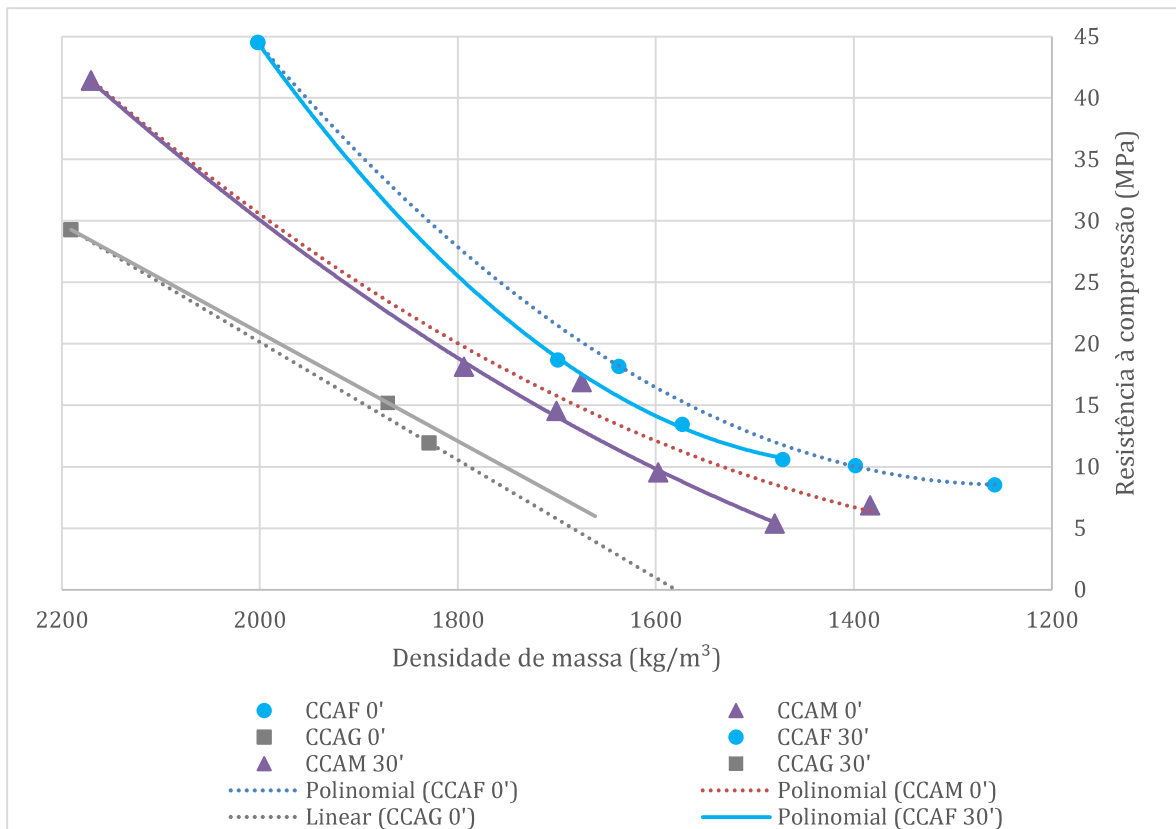


Fonte: Autor

Os gráficos das Figuras 33 e 34 mostram as curvas de resistência à compressão aos 28 dias pelas densidades de massa e massas específicas dos concretos base e concretos com ar incorporado. Os dados de resistência plotados nestes gráficos são referentes às médias dos corpos de prova ensaiados.

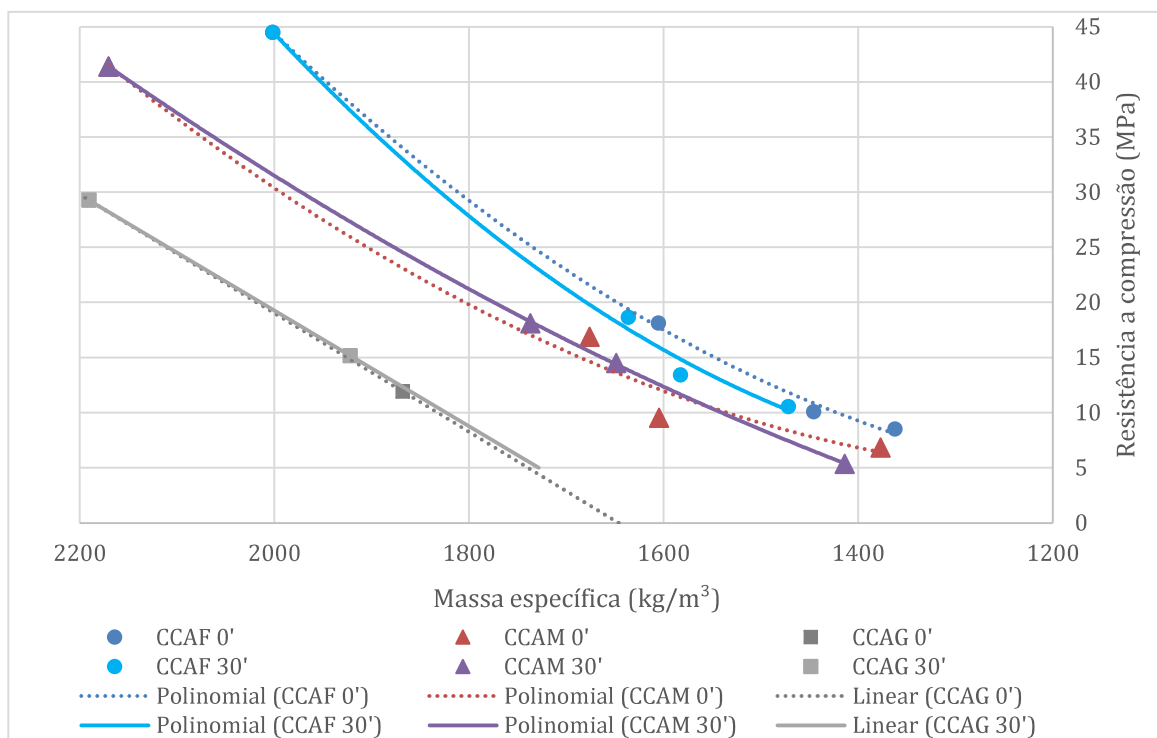
Os valores de compressão do concreto CCAG somente foram possíveis para o concreto base e para o tempo de mistura t_{m1}' , os concretos com t_{m3}' e t_{m6}' não foram ensaiados devido à excessiva segregação já mencionada.

Figura 33 – Resistência à compressão x densidade de massa em t_0 , et t_{30}



Fonte: Autor

Figura 34 - Resistência à compressão x massa específica em t_0 , et t_{30}



Fonte: Autor

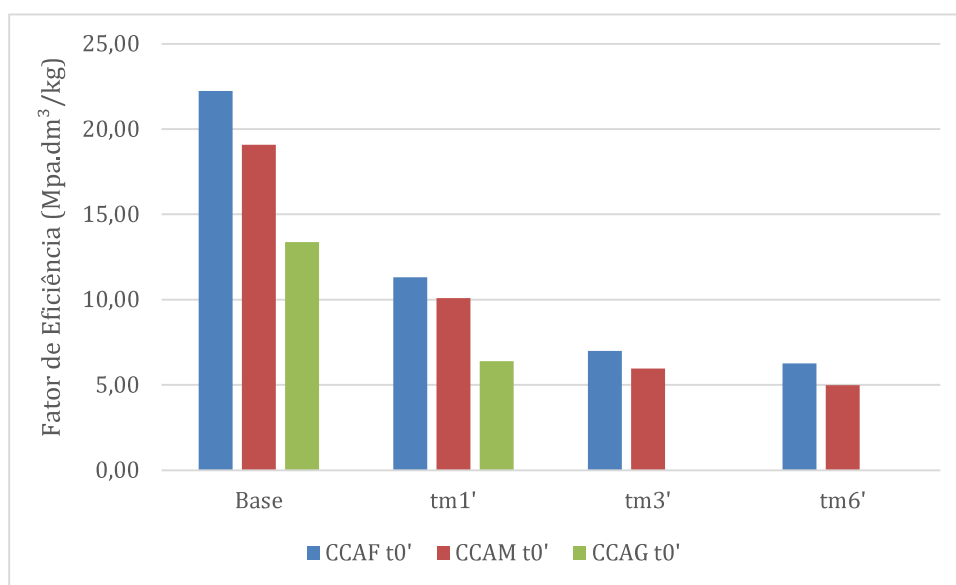
Assim como previsto, com a redução da densidade de massa, houve também a diminuição da resistência à compressão para todos os concretos. Em comparando-se as massas específicas em t_0' e t_{30}' , é notável uma pequena decaída da curva de resistência dos concretos CCAF e CCAM para os corpos de prova moldados em t_{30}' em relação aos t_0' .

Verifica-se que para concretos com densidade de massa similares, os concretos produzidos com areia fina tenderam a maiores resistências à compressão, seguido dos concretos com areia média e grossa.

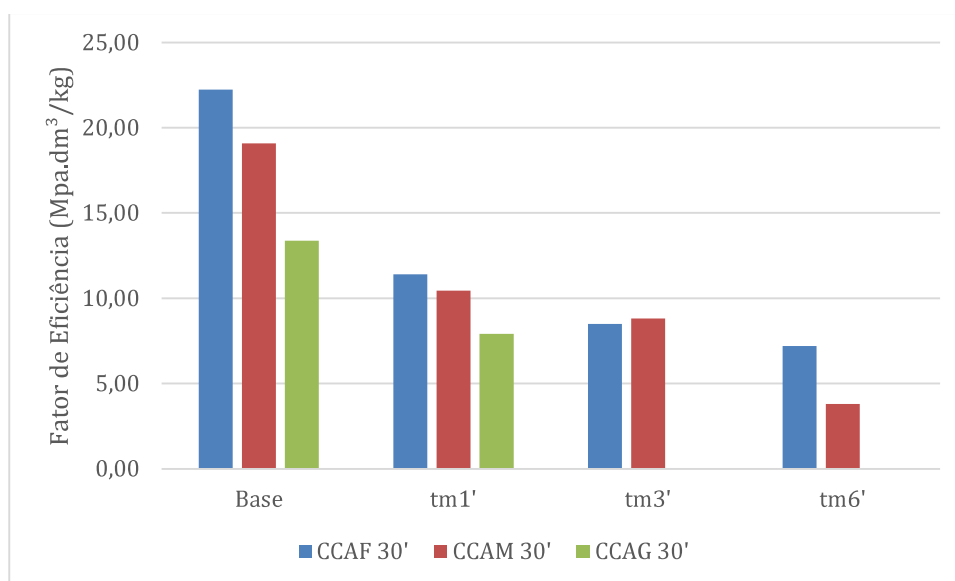
Pode-se observar ainda, que houve diferenças entre as curvas de densidade de massa e massa específica devido a variação densidade entre concreto fresco e endurecido.

Conforme indicado por Spitzner (1994), pode ser aplicado aos concretos leves um fator de eficiência que relaciona a resistência à compressão com a sua densidade de massa dado em $\text{MPa.dm}^3/\text{kg}$. Fazendo uma breve comparação, o fator de eficiência de cada concreto em t_0 e t_{30} estão resumidos nas Figuras 35 e 36.

Figura 35 - Fator de eficiência concretos celulares em t_0'



Fonte: Autor

Figura 36 - Fator de eficiência Concretos em t_{30}' 

Fonte: Autor

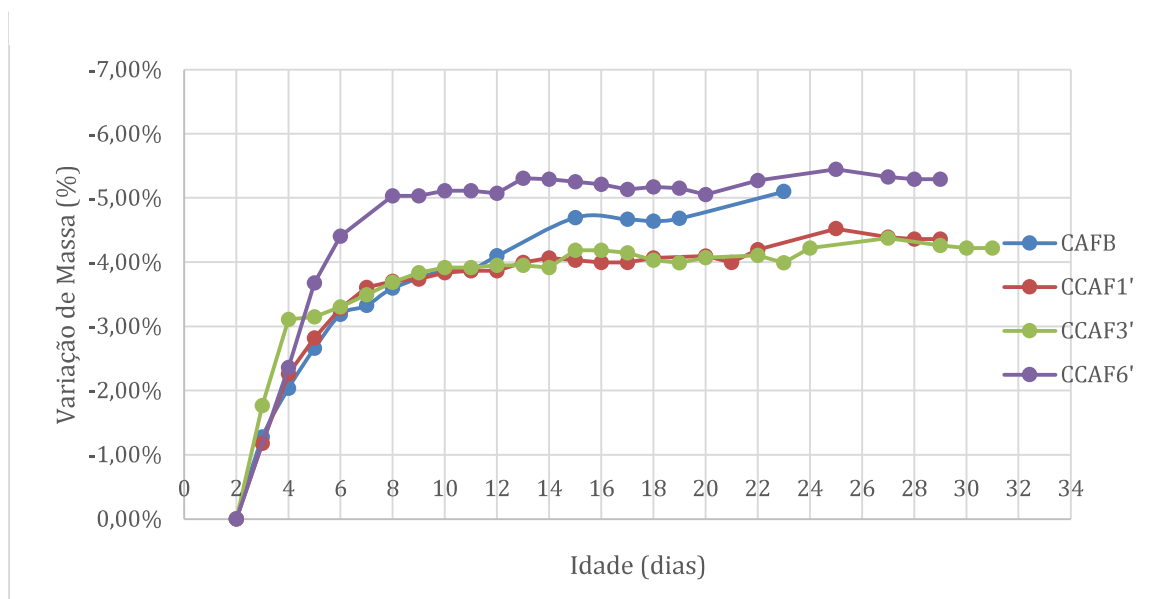
Comparando-se os dois gráficos consegue-se verificar que o fator de eficiência aumenta levemente para aqueles concretos que tiveram sua densidade de massa aumentada em t_{30}' .

Os concretos celulares com fatores de eficiência maiores apresentam um melhor aproveitamento do material pois conseguem com uma resistência maior diminuir o peso próprio da estrutura quando utilizado, otimizando assim o emprego do material.

4.5. Variação Dimensional: Massa

Os resultados das variações de massa em cada concreto celular produzidos são apresentados nas Figuras 37, 38 e 39.

Figura 37 – CCAF: variação dimensional: massa



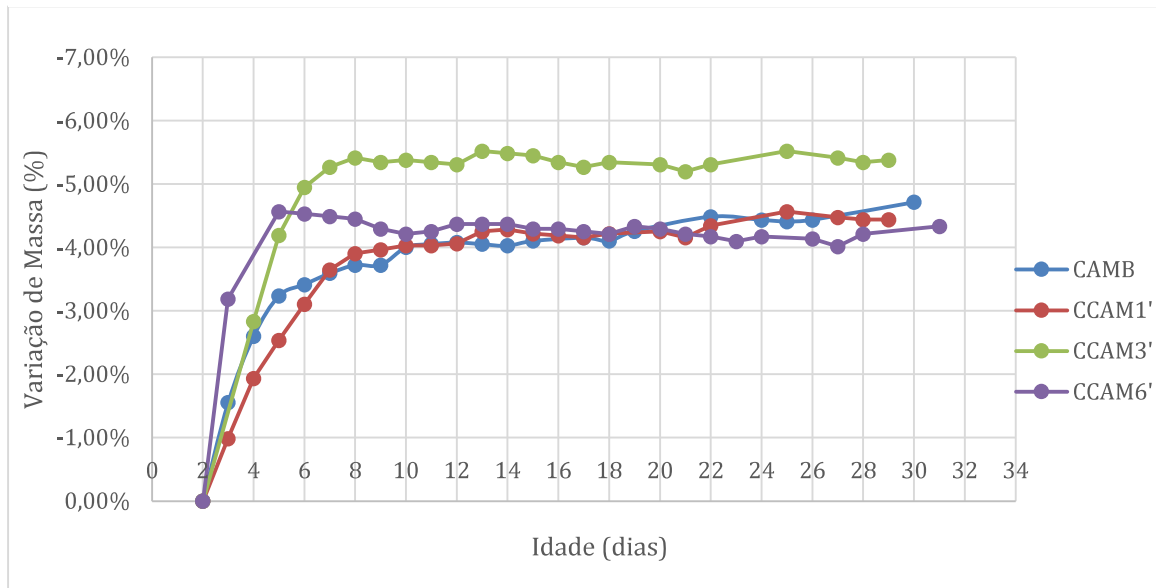
Fonte: Autor

Analisando a Figura 37, verifica-se que no concreto CCAF1' e CCAF3' há uma semelhança nas curvas tanto nas idades iniciais quanto nas demais idades sendo estas as que menos sofreram a perda de massa exceto pelas idades iniciais em que o CCAF3' projetou uma maior velocidade de perda de massa que entrou no patamar do CCAFB, CCAF1' e CCAF3' por volta dos 5 dias de idade.

Já o concreto base desta série teve um comportamento muito parecido com as mencionadas, porém com uma perda maior de massa a partir dos 12 dias de idade.

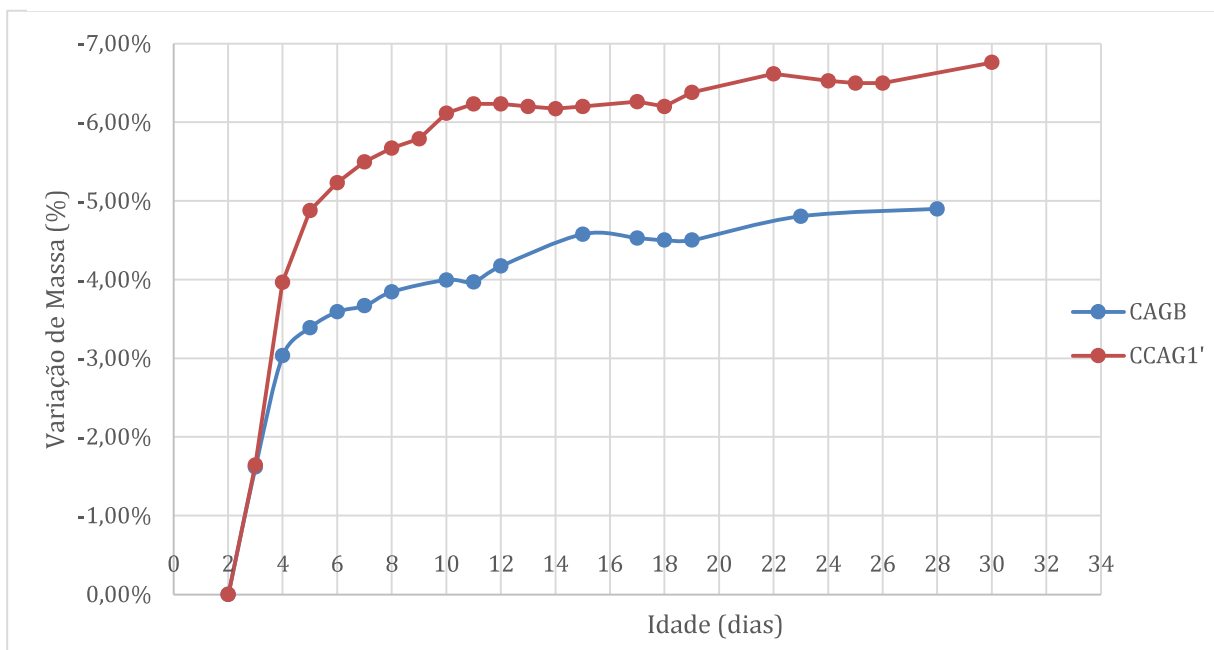
O concreto CCAF6', o de menor densidade de massa e por sua vez de maior ar incorporado, foi o que mais perdeu massa ao longo da idade, significando uma maior diminuição na massa específica ao longo do tempo de cura

Os concretos CCAMB e CCAM1' tem uma maior variação de massa entre as idades 5 e 29 dias. Porém, no início da retração até a idade 4 dias o CCAM1' parece ter uma perda de massa menos acentuada em comparação com o concreto base.

Figura 38 – CCAM: variação dimensional: massa

Fonte: Autor

O CCAM3' teve a maior variação de massa entre os concretos diferente do previsto conforme mostra a Figura 38, já que o concreto com menor densidade de massa desta série é o CCAM6'. Este último teve a maior evolução de perda de massa nas primeiras idades (até o 5 dia) e posteriormente tendendo a um ganho de massa nas idades seguintes, chegando inclusive a ultrapassar o patamar dos CCAMB e CCAM1'.

Figura 39 – CCAG: variação dimensional: massa

Fonte: Autor

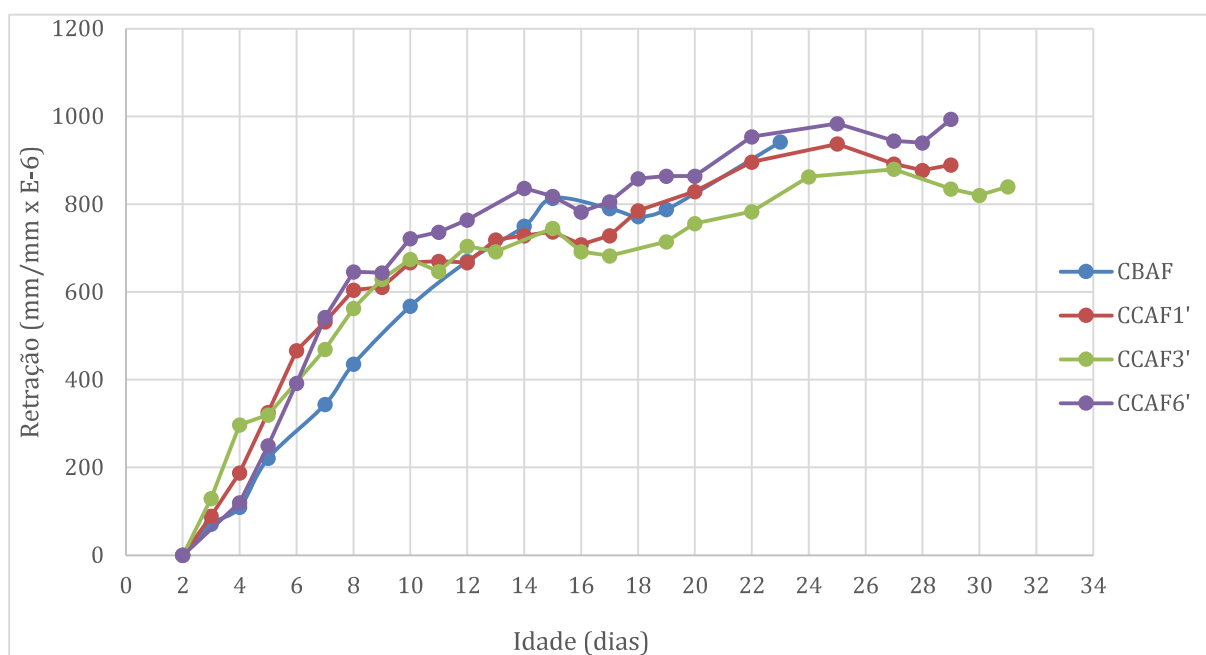
Com as curvas apresentadas na Figura 39, verifica-se uma certa diferença entre o concreto base e o CCAG1'. Esta diferença mostra uma redução na variação de massa do material em que há ar incorporado.

Comparando-se os resultados de variação de massa entre os concretos de diferentes areias, observa-se que os concretos com areia fina e média, mantiveram uma variação e massa entre 4 e 6% enquanto que os concretos com areia grossa apresentaram variação nessa propriedade entre 5 e 7%

4.6. Variação Dimensional: Retração

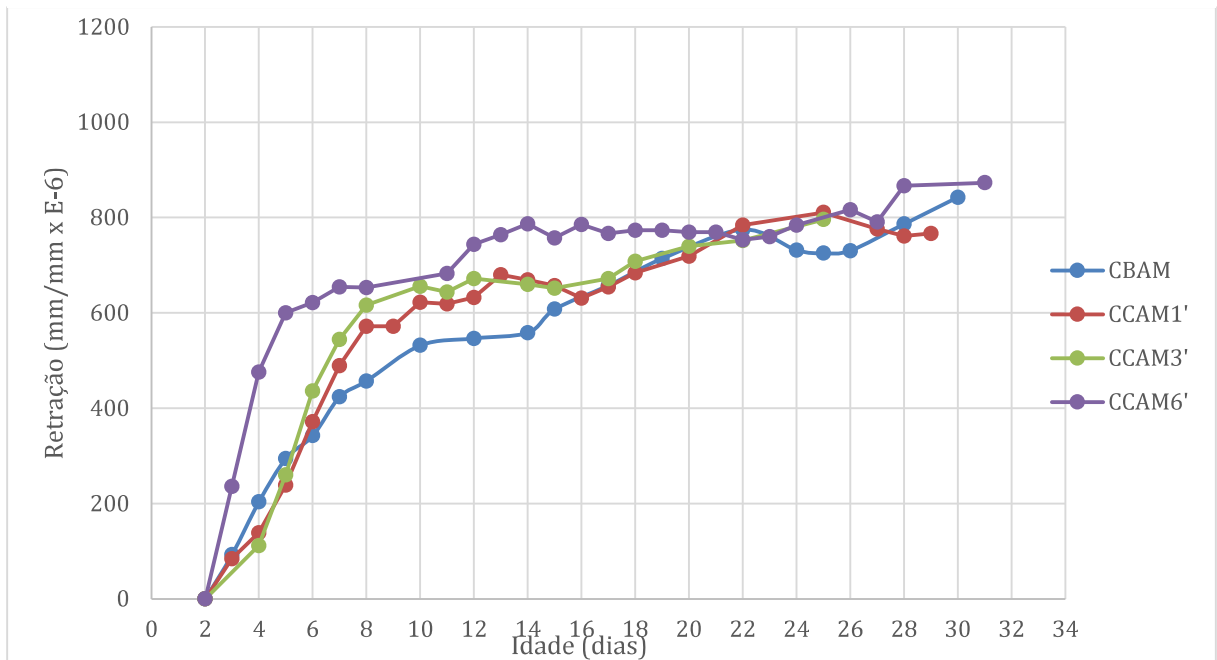
Os resultados do ensaio de retração para cada concreto encontram-se nas Figuras 40, 41 e 42.

Figura 40 - CCAF: variação dimensional: retração



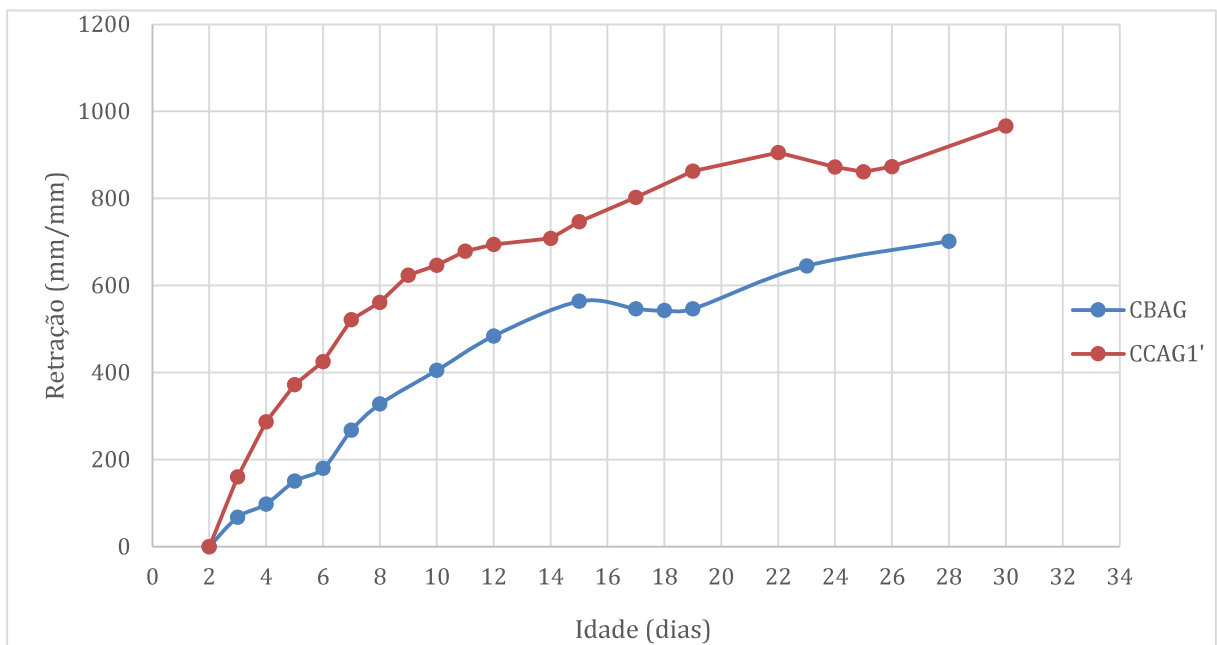
Fonte: Autor

Figura 41 - CCAM: variação dimensional: retração



Fonte: Autor

Figura 42 - CCAG: variação dimensional: retração



Fonte: Autor

As retrações encontradas ficaram entre 800 e 1000 $\times 10^{-6}$ mm/mm para os concretos celulares.

Os concretos celulares com areia fina apresentaram retração entre 800 e 1000 $\times 10^{-6}$ mm/mm. Já os produzidos com areia média, ficaram entre 800 e 900 $\times 10^{-6}$ mm/mm, enquanto que o produzido com areia grossa (CCAG1') apresentou aproximadamente 1000 $\times 10^{-6}$ mm/mm.

Os concretos que tiveram maiores retrações foram os CCAF6' e CCAG1', que atingiram patamares de 1000 $\times 10^{-6}$ mm/mm. Já os concretos celulares que apresentaram uma menor retração foram os CCAM1' e CCAF3' (em torno de 800 $\times 10^{-6}$ mm/mm).

Os valores de retração para concretos convencionais trazidos pela literatura (Neville e Brooks, 2010) variam de acordo com diversos fatores, mas estão entre aproximadamente 400 a 1600 $\times 10^{-6}$ mm/mm. Portanto, os valores encontrados para o concreto celular estão dentro desta faixa. Além disso percebe-se uma tendência da areia média em restringir mais a movimentação por retração em relação às demais areias utilizadas.

5. CONCLUSÃO

Com os concretos produzidos foi possível perceber a influência da granulometria da areia na fabricação dos concretos celulares, visto que dependendo da necessidade, o tipo de areia pode até inviabilizar a produção de um concreto celular, assim como ocorreu com alguns concretos com areia grossa. Por outro lado, a areia média teve bom desempenho mantendo a densidade de massa mais estável, permitindo assim, um maior controle do concreto produzido e assim sendo a melhor opção para os concretos celulares produzidos.

Com exceção dos concretos CCAG3' e CCAG6', foi possível alcançar a densidade de massa da norma NBR 12645 (ABNT, 1992) (entre 1300 e 1900 kg/m³) para concretos utilizados na execução de parede de concreto celular espumoso moldadas no local.

Conforme a mesma norma, todos os concretos ensaiados à compressão obtiveram a resistência à compressão mínima especificada de 2,5 MPa. Porém, a resistência à compressão deve atender também aos requisitos calculados em projeto estrutural.

Apesar de não estipular uma consistência específica, a referida norma indica que o adensamento não pode ser feito através de vibradores, portanto os concretos CCAM1', CCAM3' e CCAG1' têm consistências potencialmente suficientes para se enquadrar inclusive como concretos autoadensáveis.

Os concretos celulares CCAF3', CCAF6', CCAG3' e CCAG6' tiveram grande variação nas massas específicas em diferentes tempos de moldagem ($t_{0'}$ e $t_{30'}$) indicando perda de ar e segregações excessivas nesses concretos. Contudo, somente os concretos CCAG3' e CCAG6' demonstraram uma segregação que inviabiliza a sua aplicação como concreto celular.

Os concretos CCAF3' e CCAF6', apesar da sua diferença de densidade de massa entre os tempos de moldagem, podem ser aplicados se este efeito for considerado, já que por ter sua densidade de massa aumentada acaba tendo uma resistência mecânica também aumentada (a favor da segurança). Porém, esses parâmetros devem ser levados em conta no projeto estrutural já que o aumento de densidade de massa leva a um acréscimo no peso próprio da estrutura. Além disso, a perda de massa também deve ser estudada por também influenciar nas massas específicas em idades avançadas.

A NBR 12645 (ABNT, 1992) também estipula que elementos de controle de retração devem ser empregados (fibras, telas metálicas, etc.), porém não estipula os limites de retração para este tipo de concreto.

As retrações encontradas ficaram entre 800 e 1000 $\times 10^{-6}$ mm/mm para os concretos celulares, valores coerentes com a literatura. Porém, o concreto produzido com areia média foi o que apresentou menor tendência a retração (entre 800 e 900 $\times 10^{-6}$ mm/mm).

O método de dosagem utilizado precisou de ajustes para poder se adequar à consistência necessária, portanto mais estudos devem ser feitos para se estabelecer relações entre densidade de massa, teor de ar incorporado, consumo de cimento, água de amassamento, teores de agregados, consistência e resistência à compressão.

Como resultado foi verificado que as areias fina e grossa prejudicaram a estabilidade das bolhas de ar nos concretos celulares enquanto que os concretos com areia média tiveram resultados mais satisfatórios. Além disso, os concretos com areia média apresentaram melhores resultados de consistência e retração, tendendo assim a ser a melhor escolha para a produção de concretos celulares, sendo o concreto celular CCAM1' o que apresentou maior eficiência levando-se em conta a densidade de massa e resistência à compressão.

Por fim, para os trabalhos futuros são feitas as seguintes sugestões:

- a) Avaliação de outras propriedades mecânicas dos concretos produzidos, tais como módulo de elasticidade e resistência à tração;
- b) Verificar a variação de incorporação de ar para outras dosagens de aditivo incorporador de ar e aditivo superplastificante;
- c) Verificar as características no estado fresco e endurecido de concretos celulares com mesmo consumo de cimento com diferentes densidades de massa;
- d) Avaliar as características de concretos celulares com mesclas de diferentes areias em diferentes proporções;
- e) Fazer estudo com fibras poliméricas com diferentes teores.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP) (Brazil). Manual técnico para Implementação - Habitação 1.0: Bairro Sustentável. População Saudável. São Paulo: Publicações Abcp, 2002. 88 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2 ed. Rio de Janeiro, 2015. 13 p.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 3 ed. Rio de Janeiro, 2018. 13 p.

_____. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016. 16 p.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. 3 ed. Rio de Janeiro, 2009. 15 p.

_____. **NBR 7215**: Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. 2 ed. Rio de Janeiro, 2019. 18 p.

_____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação à compressão. 3 ed. Rio de Janeiro, 2017. 26 p.

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela densidade de massa, por grupos de resistência e consistência. 3 ed. Rio de Janeiro, 2015. 7 p.

_____. **NBR 9479**: Argamassa e Concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. 2 ed. Rio de Janeiro, 2006. 6 p.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e densidade de massa. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005. 8 p.

_____. **NBR 12644**: Concreto leve celular estrutural - Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco. 2 ed. Rio de Janeiro, 2014. 6 p.

_____. **NBR 12645**: Execução de paredes de concreto celular espumoso moldadas no local. 1 ed. Rio de Janeiro, 1992. 3 p.

_____. **NBR 12646**: Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local. 1 ed. Rio de Janeiro, 1992. 2 p.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. 3 ed. Rio de Janeiro, 2016. 6 p.

_____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação de massa e do teor de ar incorporado. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005. 8 p.

_____. **NBR15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). 1 ed. Rio de Janeiro, 2005. 10 p.

_____. **NBR15823-1**: Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. 2 ed. Rio de Janeiro, 2017. 20 p.

_____. **NBR 15823-2**: Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. 2 ed. Rio de Janeiro, 2017. 9 p.

_____. **NBR 15823-5**: Concreto autoadensável - Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V. 2 ed. Rio de Janeiro, 2017. 8 p.

_____. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para realização de ensaios. 1 ed. Rio de Janeiro, 2016. 6 p.

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 26**: Agregados - Amostragem. 2 ed. Rio de Janeiro, 2009. 13 p.

_____. **NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. 1 ed. Rio de Janeiro, 2001. 13 p.

_____. **NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de densidade de massa e densidade de massa aparente. 1 ed. Rio de Janeiro, 2009. 14 p.

_____. **NM 56**: Concreto fresco - Determinação da densidade de massa, do rendimento e do teor de ar, pelo método gravimétrico. 1 ed. Rio de Janeiro, 1996. 14 p.

_____. **NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

_____. **NM 131**: Concreto endurecido - Determinação da retração hidráulica ou higrométrica do concreto. 1 ed. Rio de Janeiro, 1997. 17 p.

_____. **NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. 1 ed. Rio de Janeiro, 2003. 12 p.

BENT O. MIKKELSEN (Junction City). Concrete Decor (Org.). **Concrete admixtures Truckrear min**. 2019. Disponível em: <https://www.concretedecor.net/CD/assets/Image/archives/CD202/cd202_Concrete_admixtures_Truck_rear-min.JPG>. Acesso em: 10 jun. 2019.

BUTTIGNOL, T. E. T.; SOUSA, J. L. A.; BITTENCOURT, T. N.. Concreto de Ultra Alto Desempenho Reforçado com Fibras (CUADRF): Análise das propriedades do material e especificações de projeto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO

CONCRETO, 58., 2016, Belo Horizonte. **REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS**. São Paulo: Ibracon, 2017. v. 10, p. 957 - 971. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952017000400011>>. Acesso em: 15 jun. 2019. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 60., 2018, Foz do Iguaçu. **Avaliação da Eficiência de Concretos Leves com Pérolas de Poliestireno Expandido e Escória de Alto Forno Adicionadas à Matriz de Concreto de Pós Reativos**. São Paulo: IBRACON, 2018. 16 p.

DOSAGEM de concreto. 2019. Disponível em: <<https://i.ytimg.com/vi/FVmocvrJaCY/sddefault.jpg>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

DU, Lianxiang; FOLLIARD, Kevin J.. Mechanisms of air entrainment in concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 35, n. 8, p.1463-1471, ago. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.026>.

KOSMATKA, Steven H.; KERKHOFF, Beatrix; PANARESE, William C.. Design and Control of Concrete Mixtures. 14. ed. Skokie: Pca, 2002. 358 p.

LAWRENCE, Katia; LORDSLEEM JÚNIOR, Alberto Casado; BARROS, Mércia Maria Bottura de. 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 DE TECNOLOGIA E GESTÃO NA PRODUÇÃO DE EDIFÍCIOS - SOLUÇÕES PARA O TERCEIRO MILÊNIO, 1., 1998, São Paulo. Anais.. São Paulo: Epusp/pcc, 1998. p. 143 - 150.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.

MELO NETO, Antônio Acácio de. **Estudo da Retração em Argamassa com Cimento de Escória Ativada**. 2002. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.. Concrete Technology. 2. ed. London: Pearson, 2010. 442 p.

_____. Tecnologia do Concreto. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p. Tradução de Ruy Alberto Cremonini.

Neponuceno MCS, Pereira-de-Oliveira LA, Lopes SMR. Methodology for the mix design of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. *Construction and Building Materials*, v. 64, p.82-94, 2014.

PETRUCCI, Eládio G. R.. **Concreto Armado de Cimento Portland**. 10. ed. Porto Alegre e Rio de Janeiro: Globo, 1983. 307 p.

ROSSIGNOLO, João Adriano. Concreto Leve Estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações. São Paulo: Pini, 2009. 144 p.

ROSSIGNOLO, João A.; ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto Leve Estrutural. In: GERALDO C. ISAIA (São Paulo). Ibracon (Ed.). Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Arte Interativa, 2011. Cap. 42. p. 1531-1534.

SACHT, Helenice Maria. Painéis de Vedação de Concreto Moldados in loco: avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos. 2008. 286 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SILVA, Cledson André de Oliveira. **Estudo de Dosagem e Avaliação de Concreto Celular com Fins Estruturais**. 2015. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

SILVA, Cledson André de Oliveira et al. Influência do aditivo espumígeno na dosagem e nas propriedades do concreto celular aerado. **Revista Matéria**, São Paulo, v. 1, n. 23. 2018.

SPITZNER, J. High-Strength LWA Concrete. High-Strength Concrete. RILEM Cap. II – Aggregates. 1994.

TEIXEIRA FILHO, Fernando José; TEZUKA, Yasuko. **Considerações sobre algumas Propriedades dos Concretos Celulares Espumosos**. São Paulo: Epusp/pcc, 1992. 31 p. (Versão abreviada de Dissertação de Mestrado).

ZHANG, Min-hong; GJORV, Odd E.. Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete. ACI Materials Journal, Farmington Hills, v. 88, n. 3, p.240-247, 1991.