



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PIAUI



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DOSAGEM EXPERIMENTAL DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM A ADIÇÃO
DE PÉROLAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO**

MARK ANDERSON MOREIRA E SILVA

Orientador: Prof. Dr. HUDSON CHAGAS DOS SANTOS

TERESINA

2018

MARK ANDERSON MOREIRA E SILVA

**DOSAGEM EXPERIMENTAL DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM A ADIÇÃO
DE PEROLAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO**

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

Área de concentração: Ciências e tecnologia dos materiais.

Orientador: Prof. Dr. HUDSON CHAGAS DOS SANTOS

TERESINA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S581 Silva, Mark Anderson Moreira e
DOSAGEM EXPERIMENTAL DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM A ADIÇÃO
DE PEROLAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO / Mark Anderson Moreira e Silva -
2018.
135 p. : il. color.

Trabalho de conclusão de curso (Mestrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, Mestrado em Engenharia de Materiais, 2018.

Orientador : Prof Dr. Hudson Chagas dos Santos.

1. Concreto autoadensável. 2. Poliestireno expandido (EPS). 3. Concreto Leve. 4. Resistência a compressão. 5. Massa específica. I. Título.

CDD 620.1

MARK ANDERSON MOREIRA E SILVA

**DOSAGEM EXPERIMENTAL DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM A ADIÇÃO DE
PEROLAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO**

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

Aprovada em 12/07/2018.

BANCA EXAMINADORA

assinatura no original

Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI
Orientador

assinatura no original

Prof. Dr. Roberto Arruda Lima Soares
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – IFPI
Avaliador Interno

assinatura no original

Prof^a. Dr^a. Artemária Coelho Andrade
Universidade Estadual do Piauí – UESPI
Avaliadora Externa

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, fonte de força nessa caminhada.

Aos meus pais, Joaquim e Maria do Socorro, pelo incentivo a educação e por todo o apoio nos momentos felizes e também nos difíceis dessa vida.

A minha noiva, Núbia Regina, pelo incentivo e ajuda para terminar esse trabalho, carinho, amor e toda a compreensão e paciência durante esses anos.

Aos meus colegas, Marcelo Martins e Deway Matos, por toda a disposição que tiveram durante os ensaios no laboratório.

Aos meu orientador, professor Dr. Hudson Chagas dos Santos, pela ideia desse trabalho, por sua dedicação, paciência, tempo e conhecimento disponibilizados, foram fundamentais na realização desse trabalho.

A todos os professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, pelos ensinamentos e oportunidade de realizar esse mestrado.

Aos professores da Banca examinadora, Prof. Dr. Roberto Arrua e Prof. Dra. Artemária Andrade, pela disponibilidade de tempo e sugestões para esse trabalho.

Aos colegas da pós-graduação, pelo convívio e aprendizagem.

A todos o meu muito obrigado!

“Necessitamos sempre de ambicionar alguma coisa que, alcançada, não nos torna
sem ambição”

(Carlos Drummond de Andrade)

SILVA, M. A. M. **Dosagem experimental de concreto autoadensável com a adição de perolas de poliestireno expandido**. 2018. 135 f. Dissertação (Mestrado). Engenharia de materiais, Instituto Federal do Piauí, Teresina – PI, 2018.

RESUMO

O concreto autoadensável (CAA) é uma das maiores inovações tecnológicas no mercado da construção civil, por possuir características de fluidez e viscosidade, é capaz de adensar-se apenas pelo peso próprio. Sua aplicação torna-se mais necessária em estruturas com alta taxa de armadura devido à dificuldade de executar o adensamento mecânico, estruturas na qual o peso próprio é a solicitação mais predominante no dimensionamento, nascendo assim a necessidade de adicionar ao CAA um agregado leve para reduzir o seu peso próprio sem diminuir excessivamente sua capacidade resistente. Dentro deste contexto, esse trabalho se propôs a estudar um concreto autoadensável substituindo parcialmente o agregado graúdo por um agregado leve, Poliestireno expandido (EPS), avaliando mudanças na massa específica e resistência a compressão axial do concreto. Frente ao exposto, esse estudo contou com a análise laboratorial das matérias constituintes do concreto, que serviram como fundamentação para a dosagem e produção experimental do concreto autoadensável com a utilização do EPS. Na confecção do CAA foi utilizado o método de dosagem proposto por Tutikian (2007) e para avaliar as propriedades do concreto no estado fresco foram executados os testes, Slump flow test, J-ring test e L-box test descritos pela NBR 15823 (2010). No estado endurecido avaliou-se a característica de resistência a compressão de acordo com a NBR 5739 (2007). Os resultados dos ensaios no estado fresco mostram que é possível a utilização do EPS no concreto autoadensável. Já os resultados no estado endurecido mostram que é possível a substituição parcial do agregado graúdo pelo leve até a proporção utilizada neste estudo, substituição de 40%, também foi possível verificar qual a melhor família de CAA a ser utilizada.

Palavras-chave: Concreto autoadensável, Poliestireno expandido (EPS), Concreto Leve, Resistência a compressão, Massa específica.

SILVA, M. A. M. **Experimental dosing of self-compacting concrete with the addition of expanded polystyrene beads.** 2018. 135 f. Dissertation (Master). Materials Engineering, Federal Institute of Piauí, Teresina – PI, 2018.

ABSTRACT

Self-leveling concrete (CAA) is one of the greatest technological innovations in the civil construction market, because it has characteristics of fluidity and viscosity, it is capable of being densified only by its own weight. Its application becomes more necessary in structures with a high armature rate due to the difficulty of performing the mechanical densification, structures in which the self-weight is the most predominant dimensioning request, thus giving rise to the need to add to the CAA a lightweight aggregate to reduce its own weight without excessively reducing its resistant capacity. In this context, this paper proposes to study a self-compacting concrete partially replacing the aggregate with a light aggregate, expanded polystyrene (EPS), evaluating changes in the specific mass and resistance to axial compression of the concrete. In light of the above, this study had the laboratory analysis of the constituent materials of the concrete, which served as a basis for the dosage and experimental production of self-compacting concrete using EPS. In order to evaluate the properties of the concrete in the fresh state, the tests, Slump flow test, J-ring test and L-box test described by NBR 15823 (2010) were carried out in the preparation of the CAA, using the dosing method proposed by Tutikian (2007). In the hardened state the compressive strength characteristic according to NBR 5739 (2007) was evaluated. The results of the fresh state tests show that it is possible to use the EPS in the self-compacting concrete. However, the results in the hardened state show that it is possible to partially replace the large aggregate by the light to the proportion used in this study, 40% substitution, it was also possible to verify which is the best CAA family to be used.

Keywords: self-compacting concrete, expanded polystyrene (EPS), lightweight concrete, compressive strength, specific gravity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Aplicação do concreto autoadensável.....	23
Figura 2	- Parâmetros reológicos do concreto em função do tipo de aplicação	24
Figura 3	- Tanque de armazenamento de metano liquefeito no Japão.....	27
Figura 4	- Estação de metrô do Amsterdã Arena.....	28
Figura 5	- Parede em CAA Resistente a terremotos.....	29
Figura 6	- Fundação do edifício Infinity Coast.....	29
Figura 7	- Porto Ametista.....	30
Figura 8	- Vigas “T” do Edifício Brookfield Malzoni.....	31
Figura 9	- Sapata central do edifício Infinity Malzoni.....	31
Figura 10	- Funcionamento das adições minerais no CAA.....	33
Figura 11	- Representação dos mecanismos de bloqueio entre armaduras de elevada densidade.....	37
Figura 12	- Aglomeração das partículas de cimento antes (A) e após a adição de PC (B).....	39
Figura 13	- Cone de Abrams.....	41
Figura 14	- Base para ensaio de Slump flow T50cm test.....	42
Figura 15	- Localização do cone de Abrams no ensaio de Slump flow.....	43
Figura 16	- Ensaio para marcação do tempo t500.....	44
Figura 17	- CAA com visível segregação.....	44
Figura 18	- Anel J com dimensões.....	47
Figura 19	- Cone de Abrams execução do Anel J com dimensões.....	48
Figura 20	- L-box sendo utilizado.....	50

Figura 21	- Detalhamento caixa L-box.....	51
Figura 22	- Indicação das alturas H1 e H2 na L caixa.....	52
Figura 23	- Dimensões Funil V.....	54
Figura 24	- Utilização do Funil V.....	54
Figura 25	- Ensaio para medição do T30 seg.....	55
Figura 26	- Ensaio coluna de segregação.....	58
Figura 27	- Equipamento Caixa U.....	60
Figura 28	- Equipamento Fill-box test.....	61
Figura 29	- Equipamentos Orimet test.....	62
Figura 30	- Tipos de concreto leve.....	66
Figura 31	- Panteão de Roma.....	67
Figura 32	- Edifícios de múltiplos pavimento executado com concreto leve.....	68
Figura 33	- Utilização de concreto leve no Brasil.....	68
Figura 34	- Fator de eficiência.....	70
Figura 35	- Poliestireno expandido.....	70
Figura 36	- Concreto Leve com EPS.....	72
Figura 37	- Resistência a compressão X massa específica de concreto estrutural leve.....	73
Figura 38	- Forma de ruptura do concreto convencional e concreto leve.....	74
Figura 39	- MEV da zona de transição de concreto convencionais.....	75
Figura 40	- Cimento CPV – ARI - RS.....	77
Figura 41	- Evolução da resistência à compressão uniaxial dos concretos ao longo do tempo.....	77
Figura 42	- Adição mineral Metacaulim.....	78

Figura 43	- Microscopia eletrônica mostrando a diminuição da porosidade.....	79
Figura 44	- Agregado miúdo utilizado no CAA.....	80
Figura 45	- Agregado graúdo utilizado no ensaio.....	80
Figura 46	- Equipamentos utilizados na determinação da massa específica....	82
Figura 47	- Agitador mecânico para agregados.....	84
Figura 48	- Balança utilizada no ensaio de massa unitária da areia.....	86
Figura 49	- Picnômetro e funil utilizados no ensaio de massa específica areia.	87
Figura 50	- Agregado graúdo seco superficialmente.....	88
Figura 51	- Esquema para a dosagem do CAA.....	91
Figura 52	- Exemplo de diagrama de dosagem.....	97
Figura 53	- Aparelhos utilizados no ensaio de determinação da massa específica do cimento.....	99
Figura 54	- Resultado ensaio granulometria agregado miúdo.....	101
Figura 55	- Ensaio de massa unitária da areia.....	101
Figura 56	- Leitura no Picnômetro.....	102
Figura 57	- Resultado ensaio granulometria agregado graúdo.....	103
Figura 58	- Determinação da massa do recipiente com o agregado graúdo.....	104
Figura 59	- Agregado graúdo: seco superficialmente e submerso.....	105
Figura 60	- Ensaio CAA no estado fresco	110
Figura 61	- Moldagem do CAA.....	111
Figura 62	- Ruptura CAA traço 1:3.....	112
Figura 63	- Ruptura CAA traço 1:2.....	115
Figura 64	- Ruptura CAA traço 1:1.....	118
Figura 65	- Diagrama de dosagem do CAA.....	120

Figura 66	- Ruptura do CAA com EPS traço 1:3.....	122
Figura 67	- Diagrama de dosagem do CAA para resistência de 32MPa.....	123
Figura 68	- Ausência de segregação do EPS no CAA.....	125

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	- Características dos principais tipos de adições minerais.....	34
Quadro 2	- Efeito das adições minerais no CAA.....	34
Quadro 3	- Resumo dos ensaios do CAA no estado fresco.....	40
Quadro 4	- Valores do espalhamento para o CAA.....	45
Quadro 5	- Classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação (t500)	45
Quadro 6	- Valores de referência para o ensaio Slump flow test.....	46
Quadro 7	- Valores de referência para o ensaio Slump flow T50cm test.....	46
Quadro 8	- Resultados do ensaio Anel J.....	49
Quadro 9	- Valores de referência para o ensaio do anel J.....	49
Quadro 10	- Valores do ensaio L-box em função da aplicação.....	52
Quadro 11	- Valores de referência para habilidade passante para o ensaio L-box.....	53
Quadro 12	- Valores de referência para o ensaio V-funil	56
Quadro 13	- Valores de referência para o ensaio V-funil T30seg.....	57
Quadro 14	- Valores de referência para o ensaio V-funil T5min.....	57
Quadro 15	- Valores de referência para o ensaio Coluna de segregação.....	59
Quadro 16	-Valores de referência para o ensaio caixa U.....	61
Quadro 17	- Fator de correção h/d.....	64
Quadro 18	- Tolerância para a idade do ensaio.....	65
Quadro 19	- Valores de referência para a massa específica do concreto leve.....	69
Quadro 20	- Valores de relação entre a resistência a compressão e a massa específica.....	69

Quadro 21	- Características do EPS.....	71
Quadro 22	- Ensaio de compacidade para a determinação do esqueleto granular.....	93
Quadro 23	- Propriedade, parâmetros e ensaios do CAA.....	93
Quadro 24	- Distribuição dos corpos de prova.....	94
Quadro 25	- Análise granulométrica do agregado miúdo.....	100
Quadro 26	- Análise granulométrica do agregado graúdo.....	103
Quadro 27	- Massa específica e unitária dos componentes do CAA.....	106
Quadro 28	- Ensaio de compacidade entre a brita e a areia.....	107
Quadro 29	- Ensaio de compacidade entre a brita mais a areia e Metacaulim....	107
Quadro 30	- Traço unitário do CAA	108
Quadro 31	- Resultado ensaios CAA estado fresco.....	109
Quadro 32	- Resultado ensaios CAA estado endurecido traço 1:3.....	111
Quadro 33	- Massa específica CAA traço 1:3.....	113
Quadro 34	- Fator de eficiência do CAA traço 1:3.....	114
Quadro 35	- Resultado ensaios CAA estado endurecido traço 1:2.....	114
Quadro 36	- Massa específica CAA traço 1:2.....	116
Quadro 37	- Fator de eficiência do CAA traço 1:2.....	117
Quadro 38	- Resultado ensaios CAA estado endurecido traço 1:1.....	107
Quadro 39	- Massa específica CAA traço 1:1.....	119
Quadro 40	- Fator de eficiência do CAA traço 1:1.....	120

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	- Resistência X porcentagem de adição de EPS no CAA traço 1:3.....	112
Gráfico 2	- Massa específica CAA traço 1:3.....	113
Gráfico 3	- Resistência X porcentagem de adição de EPS no CAA traço 1:2.....	115
Gráfico 4	- Massa específica CAA traço 1:2.....	116
Gráfico 5	- Resistência X porcentagem de adição de EPS no CAA traço 1:1.....	118
Gráfico 6	- Massa específica CAA traço 1:1.....	119
Gráfico 7	- Evolução: Resistência X Massa específica.....	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A.C	Antes de Cristo
ARI	Alta Resistência Inicial
CAA	Concreto Autoadensável
CCV	Concreto Convencional
CP	Cimento Portland
D. C	Depois de Cristo
EPS	Poliestireno Expandido
FE	Fator de Eficiência
MEV	Microscópio de Varredura Eletrônico
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PVC	Policloreto de Polivinila
RS	Resistente a Sulfatos
VMA	Aditivos Modificadores de Viscosidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	OBJETIVOS	22
2.1	GERAL	22
2.2	ESPECÍFICOS.....	22
3	CONCRETO AUTOADENSÁVEL	23
3.1	DEFINIÇÃO.	23
3.2	VANTAGENS E DESVANTAGENS	25
3.3	HISTÓRICO	26
3.4	APLICAÇÃO DO CAA	27
3.4.1	Aplicação no mundo.....	27
3.4.1.1	Tanque de armazenamento de metano liquefeito no Japão	25
3.4.1.2	Metrô do Amsterdã	28
3.4.1.3	Paredes resistentes a terremotos (Estados Unidos)	28
3.4.2	Aplicação no Brasil	29
3.4.2.1	Fundação do edifício Infinity Coast	29
3.4.2.2	Porto Ametista, localizado em Canoas, Rio Grande do Sul	30
3.4.2.3	Vigas “T” do edifício Brookfield Malzoni	30
3.4.2.4	Sapata central do edifício Infinity Tower	31
3.5	MATERIAIS UTILIZADOS NO CAA	32
3.5.1	Cimento	32
3.5.2	Adições minerais para o CAA	33
3.5.3	Agregados	36

3.5.3.1	Agregado miúdo	36
3.5.3.2	Agregado Graúdo	37
3.5.4	Água.....	37
3.5.5	Aditivos	38
3.5.5.1	Aditivo Superplastificante	38
3.5.5.2	Aditivos modificadores de viscosidade (VMA)	40
3.6	ENSAIOS DO CAA NO ESTADO FRESCO	40
3.6.1	Slump flow test e Slump flow T50cm test	41
3.6.2	J-ring test	46
3.6.3	L-box test	49
3.6.4	V-funnel test	53
3.6.5	Coluna de segregação	57
3.6.6	Outros ensaios	60
3.6.6.1	U-box test.....	60
3.6.6.2	Fill-box test	61
3.6.6.3	Orimet test	62
3.7	ENSAIOS DO CAA NO ESTADO ENDURECIDO	62
3.7.1	Considerações iniciais	62
3.7.2	Resistência a compressão	63
4	CONCRETO LEVE.....	66
4.1	DEFINIÇÃO.....	66
4.2	HISTÓRICO	67
4.3	CONCRETO ESTRUTURAL LEVE	69
4.4	POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)	70

4.5	CONCRETO LEVE COM EPS	71
4.6	PROPRIEDADES DO CONCRETO ESTRUTURAL LEVE.....	72
5	METODOLOGIA	76
5.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	76
5.1.1	Cimento.....	76
5.1.2	Metacaulim	78
5.1.3	Agregado miúdo	80
5.1.4	Agregado graúdo	80
5.1.5	Água.....	81
5.1.6	Aditivo	81
5.2	MÉTODOS DE ENSAIO PARA DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL	81
5.2.1	Características físicas dos materiais	81
5.2.1.1	Cimento e Metacaulim.....	81
5.2.1.1	<i>Determinação da massa específica.....</i>	<i>82</i>
5.2.1.2	Agregado miúdo	83
5.2.1.2.1	<i>Determinação da composição granulométrica</i>	<i>84</i>
5.2.1.2.2	<i>Ensaio de cálculo da massa unitária</i>	<i>85</i>
5.2.1.2.3	<i>Ensaio de cálculo da massa específica.....</i>	<i>87</i>
5.2.1.3	Agregado graúdo	88
5.2.1.3.1	<i>Determinação da composição granulométrica</i>	<i>88</i>
5.2.1.3.2	<i>Ensaio de cálculo da massa unitária</i>	<i>89</i>
5.2.1.3.3	<i>Ensaio de cálculo da massa específica.....</i>	<i>89</i>
5.2.1.4	Água e aditivo Glenium 51.....	90

5.2.2	Dosagem do Concreto Autoadensável com EPS	90
5.2.2.1	Introdução	90
5.2.2.2	Escolha dos materiais	91
5.2.2.3	Determinação do esqueleto granular.....	91
5.2.2.4	Determinação do fator água/cimento e do percentual do aditivo.....	93
5.2.2.5	Mistura dos traços: Rico, intermediário e fraco	93
5.2.2.6	Determinação da resistência a compressão axial	95
5.2.2.7	Desenho do diagrama de dosagem e desempenho	95
5.3	VERIFICAÇÃO DA SEGREGAÇÃO DO EPS NO CAA.....	97
5.4	CÁLCULO DA MASSA ESPECÍFICA DO CAA	98
5.5	AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE EPS NA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E NA MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO	98
6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	99
6.1	ENSAIOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO CCA.....	99
6.1.1	Cimento e Metacaulim.....	99
6.1.2	Agregado miúdo.....	100
6.1.2.1	Ensaio de composição granulométrica	100
6.1.2.2	Ensaio de determinação da massa unitária.....	101
6.1.2.3	Ensaio de cálculo da massa específica	102
6.1.3	Agregado graúdo.....	102
6.1.3.1	Ensaio de composição granulométrica	102
6.1.3.2	Ensaio de determinação da massa unitária.....	104

6.1.3.3	Ensaio de cálculo da massa específica	105
6.1.4	Poliestireno expandido.....	105
6.2	ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM DO CCA COM EPS	106
6.2.1	Esqueleto granular.....	106
6.3	ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO AS PROPRIEDADE NO ESTADO FRESCO DO CAA	108
6.4	ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADE NO ESTADO ENDURECIDO DO CAA.....	110
6.4.1	Traço de referência 1:3.....	111
6.4.2	Traço de referência 1:2.....	114
6.4.3	Traço de referência 1:1.....	117
6.4.4	Diagrama de dosagem.....	120
6.4.5	Exemplo de utilização do diagrama de dosagem.....	122
6.4.6	Evolução de resistência e massa específica em função da porcentagem de adição de EPS.....	123
6.5	VERIFICAÇÃO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO EPS NO CAA	125
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	126
7.1	CONCLUSÕES.....	126
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	127
	REFERÊNCIAS	129

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material construtivo mais utilizado no mundo, podemos encontrá-lo em edifícios, estradas, pontes, barragens, obras de saneamento, etc. Devido a sua grande utilização, o nível de exigência tecnológica cresce a cada dia que passa. Na busca por melhorar as deficiências do concreto convencional surgiram variações, como o concreto autoadensável e o concreto leve.

O concreto autoadensável (CAA) já é utilizado em vários países e representa um dos maiores avanços tecnológicos na construção civil. Sua utilização começou no ano de 1999 no Japão, devido, principalmente, à necessidade de se vencer os problemas existente em relação ao adensamento nas estruturas de maior porte e de, consequentemente, maior densidade de armadura devido ao elevado peso próprio.

As principais características do CAA são a elevada fluidez e viscosidade moderada, possibilitando o preenchimento nas formas e a passagem pelos obstáculos (barras de aço, tubulações de instalações) por ação exclusiva do peso próprio sem a necessidade de adensamento mecânico, diminuindo ruído, custo, tempo de execução, dentre outras vantagens de sua utilização.

O concreto leve surgiu da necessidade de diminuir o peso próprio de alguns tipos de obras de grande porte (pontes e edifícios verticais com muitos pavimentos) por ser a carga que mais prevalece no dimensionamento de estruturas de concreto armado, possibilitando a redução do custo da obra por inteiro. Entretanto a utilização de agregados leves, principalmente o Poliestireno expandido (EPS) e a argila expandida, com elevado índice de vazios, tende a reduzir a resistência à compressão axial do concreto.

Estruturas de concreto armado de grandes volumes e extensos vãos, como por exemplo pontes, possuem elevado peso próprio e necessitam de grandes taxas de armadura, fato que praticamente inviabiliza o adensamento mecânico e a utilização de concreto muito denso. Surge então a necessidade de estudar um concreto com características de um CAA e ao mesmo tempo que possua massa específica menor que o convencional, sem afetar a resistência a compressão axial de modo a inviabilizar a sua utilização.

Nesse contexto, o presente trabalho se propõe a verificar a influência da substituição parcial do agregado graúdo (brita) por um agregado leve (EPS) em relação à massa específica e à resistência a compressão do concreto autoadensável,

bem como servir de parâmetro para projetistas de estruturas de concreto armado sobre a viabilidade ou não da sua utilização em seus projetos.

Diante do assunto exposto acima, a necessidade de utilização de um concreto autoadensável de menor massa específica em estruturas de grande porte, como por exemplo pontes de concreto armado, adicionado a pequena quantidade de trabalhos técnicos sobre esse assunto, mostram a importância do desenvolvimento desta pesquisa para a área da construção civil.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Verificar, através de dosagem experimental, a influência da adição de pérolas de poliestireno expandido (EPS) nas características do concreto autoadensável (CAA) no estado fresco e endurecido.

2.2 ESPECÍFICOS

- Caracterizar os componentes do CAA com EPS: aglomerante, agregados, adições minerais, EPS, água e aditivo;
- Dosar três traços de CAA utilizando o método de Tutikian (2007) e para cada traço substituir parcialmente em volume o agregado graúdo por poliestireno expandido (EPS);
- Verificar a ocorrência ou não de segregação (flutuação) do EPS utilizado como agregado leve no CAA;
- Avaliar, para cada traço utilizado, as propriedades de fluidez, habilidade passante e coesão do CAA no estado fresco;
- Verificar, para cada traço utilizado, o efeito da substituição parcial do agregado graúdo por EPS em relação à resistência a compressão aos 28 dias;
- Verificar a decorrência da substituição parcial do agregado graúdo por EPS em relação a massa específica e do fator de eficiência do CAA para cada traço utilizado.

3 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Nesse capítulo, serão abordados os principais aspectos na literatura sobre o concreto autoadensável (CAA). Inicialmente será apresentado a definição, vantagens e desvantagens, histórico, materiais utilizados na sua composição. Em seguida será apresentado os principais ensaios para comprovação de sua coesão, trabalhabilidade e estabilidade, bem como a propriedade de resistência a compressão axial do CAA no estado endurecido.

3.1 DEFINIÇÃO

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 15823-1 (2010), para o concreto ser considerado autoadensável (Figura 1) ele deve possuir capacidade de fluidez, ser capaz de se autoadensar pelo seu peso próprio, preencher a forma passando por embutidos (barras de aço, tubulações de instalações) mantendo sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e adensamento.

Segundo Tutikian (2007), o termo concreto autoadensável (CAA) identifica uma categoria de concreto que pode ser moldado nas fôrmas e preencher cada espaço exclusivamente através da ação da força da gravidade, sem necessidade de qualquer forma de adensamento.

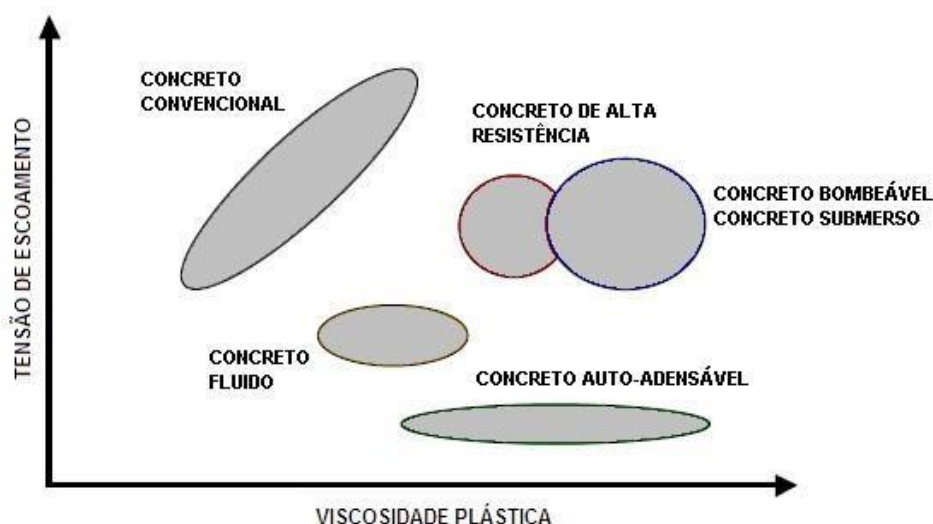
Figura 1 – Aplicação do concreto autoadensável



Fonte: Repette, 2015

De acordo com Nunes (2001), coesão é a capacidade do concreto de se manter coeso ou fluir dentro das formas, passando ou não através de obstáculos, sem haver separação entre a pasta de cimento e os agregados (segregação). O CAA deve apresentar, quando comparado aos demais tipos de concreto, baixa tensão de escoamento e elevada coesão (Figura 2).

Figura 2 – Parâmetros reológicos do concreto em função do tipo de aplicação



Fonte: Nunes, 2001

Segundo Okamura (1997, p.51), “para o concreto fluir uniformemente através de barras de aço, a tensão de cisalhamento da argamassa deve ser pequena. Esta tensão surge na argamassa, devido ao deslocamento das partículas de agregado graúdo”.

Segundo Tutikian (2004), fluidez é a propriedade que caracteriza a capacidade do concreto autoadensável de fluir dentro da fôrma e preencher todos os espaços, somente pelo efeito de seu peso próprio.

Nunes (2001), afirma que a capacidade de passar por espaços estreitos decorre da presença de armaduras e/ou estrangulamentos da seção do elemento a ser concretado, onde o concreto deve fluir sem segregar mesmo na presença destes obstáculos.

“A habilidade de passagem é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de passar por entre obstáculos, como: armaduras, diminuições de seções e aberturas e seções estreitas, sem que haja obstrução do fluxo” (GOMES; BARROS, 2009, pág. 16).

A capacidade de se autoadensar é obtida com o equilíbrio entre alta fluidez e moderada viscosidade. A alta fluidez é alcançada com a utilização de aditivos superplastificantes e a moderada viscosidade e a coesão são conseguidas com o incremento de um percentual adequado de adição mineral com granulometria muito fina e/ou aditivos modificadores de viscosidade. Além disso, são características das misturas de CAA um maior volume de pasta e um menor volume de agregados, em relação as misturas de concreto vibrado. (GOMES; BARROS, 2009, pág. 13).

3.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Tutikian e Dal Molin (2008), além de vários outros autores, citam algumas vantagens do CAA:

- Acelera a construção, pois há uma redução no tempo de concretagem devido ao seu rápido lançamento e ausência de adensamento;
- Reduz a mão-de-obra no canteiro, pois o uso de vibradores é eliminado e as propriedades do CAA facilitam o seu espalhamento e nivelamento;
- Melhora o acabamento final da peça concretada;
- Aumenta a durabilidade da estrutura por ser mais fácil de adensar e evita, assim, que ocorram falhas de concretagem e grandes vazios resultantes da má vibração;
- Permite grande liberdade de formas e dimensões; o CAA pode ser aplicado em fôrmas curvas, esbeltas, com altas taxas de armaduras e de difícil acesso;
- Permite concretagens em peças de seções reduzidas;
- Elimina o barulho de vibração;
- Pode reduzir o custo final do concreto e/ou da estrutura caso sejam computados economicamente todos os ganhos citados acima.

De acordo com LISBÔA (2004), o CAA apresenta algumas desvantagens, entretanto, possíveis de serem contornadas: é difícil a dosagem, precisando de mão de obra especializada para sua confecção, controle tecnológico e aplicação; necessita de cuidados especiais com o transporte e lançamento, para evitar a segregação; e apresenta menor tempo disponível para aplicação em relação ao concreto convencional dependendo do tipo de aditivo utilizado.

3.3 HISTÓRICO

O concreto autoadensável, como hoje é conhecido, foi desenvolvido no Japão na década de 1980 devido à necessidade de se obter estruturas com melhor qualidade e um processo construtivo mais seguro, que causasse menor impacto ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores. A indústria da construção japonesa identificou que as principais deficiências das estruturas de concreto eram decorrentes de falhas de concretagem causadas pela dificuldade de adensar o concreto em zonas densamente armadas e pela escassez de mão-de-obra qualificada (NUNES, 2001).

Desta forma, no Japão, os procedimentos habituais de colocação do concreto foram, cada vez mais, considerados difíceis, ineficientes, ultrapassados e inadequados para zonas urbanas com elevada densidade populacional, mostrando uma necessidade por outro material (concreto) que possuísse características que melhorasse essas dificuldades (OKAMURA, 1997).

Com o avanço dos estudos sobre o material idealizado, surge o CAA, cujo protótipo foi desenvolvido inicialmente no Japão, em 1986, pelo Prof. Okamura, da Universidade de Tóquio, e aplicado no ano de 1988 (OKAMURA, 1997).

Em meados da década de 1990, o CAA surge também na Europa, mais precisamente na Suécia, não demorando muito para uma aceitação rápida do mercado europeu. Atualmente, o interesse dos profissionais pelo CAA tem crescido em todo o mundo. Na América do Sul, especificamente no Brasil, as pesquisas vêm crescendo a cada dia e a quantidade de obras que utilizam o CAA aumentam a cada ano (NUNES, 2001).

Muitas aplicações do CAA foram realizadas com sucesso em vários tipos de estruturas como pré-moldados em geral, edifícios convencionais moldados “in loco”, pontes, reservatórios, contenções, pisos, pavimentos, reforço de estruturas, revestimento de túneis, entre outros. Exemplos podem ser consultados em Nunes, (2011), Lisboa (2004), Tutikian e Dal Molin (2008), Gomes; Barros, (2009), Tutikian (2004), Tutikian (2007).

3.4 APLICAÇÃO DO CAA

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008), o CAA pode ser confeccionado nos canteiros de obras, na indústria de pré-moldados ou em centrais fornecedoras de concreto que executam sua mistura, transporte e lançamento. Existem poucas publicações de utilização de CAA em obras de engenharia.

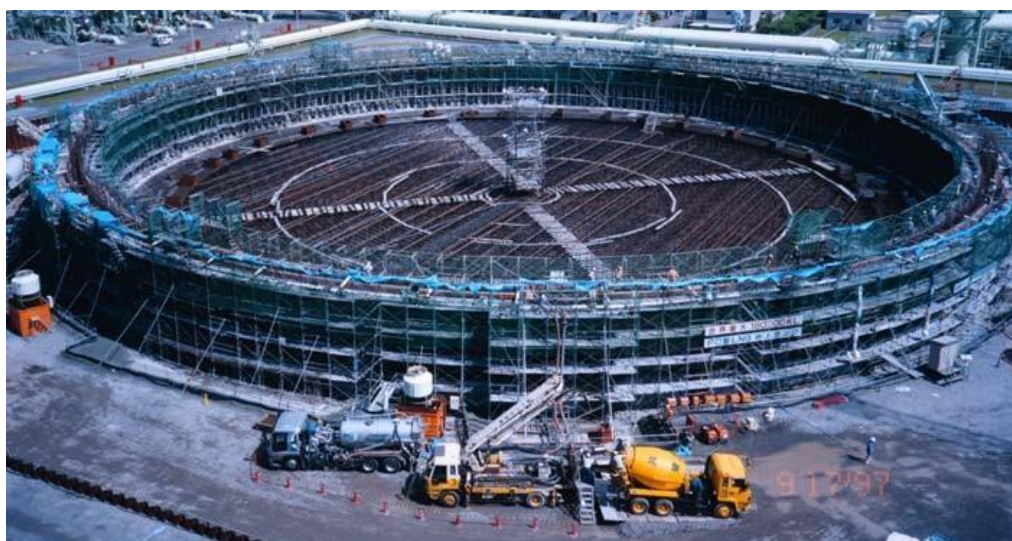
Ao longo do desenvolvimento do CAA, o número de aplicações práticas foi aumentando, no início, mais intensamente no Japão e depois em alguns países da Europa e no restante do mundo. A seguir serão apresentados exemplos de aplicação do CAA no Brasil e no restante do mundo.

3.4.1 Aplicação no mundo

3.4.1.1 Tanque de armazenamento de metano liquefeito no Japão

Segundo Nunes (2001), no tanque exterior pré-esforçado de um depósito destinado ao armazenamento de metano liquefeito (Figura 03) com uma capacidade de 180.000kg, o que faz dele o maior tanque não enterrado do mundo para a época. A estrutura de concreto, correspondente a um volume de com 12.000m³, apresenta 84.2m de diâmetro, 38.4m de altura e 0.8m de espessura, foi construída com CAA para atingir a impermeabilidade e durabilidade exigidas, assim como, reduzir o período de construção e os custos.

Figura 3 – Tanque de armazenamento de metano liquefeito no Japão



Fonte: Nunes, 2001

3.4.1.2 Metrô do Amsterdã

Segundo Tutikian (2007), a estação de metrô do Amsterdã Arena (Figura 4), estádio de futebol do Ajax utilizou CAA devido ao grande número de repetição da forma. Com essa opção aumentou a durabilidade das formas e diminui o custo total da construção. A estação possui quatro pistas de 135 metros de comprimento, totalizando 1,4 quilômetros. Como cada painel possui um comprimento de 23,30 metros, foram executadas 60 unidades, todas com resistência à compressão de 55 Mpa.

Figura 4 – Estação de metrô do Amsterdã Arena



Fonte: Walraven, 2005

3.4.1.3 Paredes resistentes a terremotos (Estados Unidos)

A Universidade da cidade de Illinois nos Estados Unidos, desenvolveu um projeto que consiste em uma parede densamente armada em forma de “L” (Figura 5), que seria resistente a abalos sísmicos com diferentes amplitudes. A mesma era composta por tubos horizontais para futuras medições e os mesmos não poderiam se mover, portanto, o uso da vibração foi descartado. A tecnologia empregada foi o CAA e depois da desforma, onde foi comprovado que a parede não necessitava de reparos e que os tubos não haviam sido danificados (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Figura 5 – Parede em CAA Resistente a terremotos



Tutikian; Dal Molin (2008)

3.4.2 Aplicação no Brasil

3.4.2.1 Fundação do edifício Infinity Coast

O edifício Infinity Coast considerado o maior edifício residencial na América do Sul, localizado no Balneário Camboriú em Santa Catarina, possui bloco de fundação (Figura 6) com volume de 5.300 m³ e utilizou concretos com resistência de 30 MPa e 45 Mpa. Foi utilizado CAA para que o processo de secagem iniciasse junto, devido a rapidez de execução, tornando a execução menos onerosa pois decisão dispensou o uso de vibradores, facilitando a logística (TÉCHNE, 2017).

Figura 6 – Fundação do edifício Infinity Coast



Fonte: <http://techne.pini.com.br> (2017)

3.4.2.2 Porto Ametista, localizado em Canoas, Rio Grande do Sul.

A estrutura do Porto Ametista (Figura 7) possui 13,20 metros de altura e foi executada com parede de concreto moldada in loco. Ao todo, a construtora utilizou 54 m³ de concreto usinado autoadensável por parede e 12 m³ por concretagem de platibanda, totalizando 282 m³ de concreto por torre. A construção contou também com peças pré-moldadas, sendo cerca de 700 peças de alumínio para paredes e 200 peças para a platibanda (TÉCHNE, 2017).

Figura 7 – Porto Ametista



Fonte: <http://techne.pini.com.br> (2017)

3.4.2.3 Vigas “T” do edifício Brookfield Malzoni

No edifício Brookfield Malzoni foi construído blocos a 30 m de altura, com 4 vigas protendidas de 44,4 m de comprimento cada uma e que tinha como objetivo vencer o vão e sustentar 12 andares. As vigas têm 700 m³ de concreto cada, sustentadas por oito pilares com 30 m de altura acima do nível do solo. As vigas são em formato "T" (Figura 8), e possuem 6 m de altura. As duas vigas mais extremas têm 6 m de largura no banzo superior e 2 m na parte inferior e as duas vigas centrais, que recebem 9 cargas, têm 5,5 m de largura no banzo superior e 2,5 m na parte inferior (TÉCHNE, 2017).

Figura 8 – Vigas “T” do Edifício Brookfield Malzoni



Fonte: <http://techne.pini.com.br> (2017)

3.4.2.4 Sapata central do edifício Infinity Tower

A sapata central (Figura 9) é uma composição de dois trapézios, de dimensões médias de 17 m x 40 m. A área total da sapata é de 750 m², com 120 cm de altura numa faixa próxima às extremidades e de 240 cm na área restante. O volume total de CAA foi de 1.500 m³ e consumiu um total de 135 toneladas de aço, dando um consumo de 90 kg/m³ de concreto (PHD ENGENHARIA, 2017).

Figura 9 – Sapata central do edifício Infinity Tower



Fonte: <http://www.concretophd.com.br> (2017)

3.5 MATERIAIS UTILIZADOS NO CAA

De acordo com Borja (2011), todos os materiais comumente utilizados usados na fabricação do concreto convencional podem ser utilizados na produção do CAA. Sua característica singular, no estado fresco (fluidez, viscosidade), é que o diferencia do concreto convencional, muito embora obtido praticamente com os mesmos materiais, porém com maior adição de finos, de aditivos superplastificantes e, eventualmente, moderador de viscosidade.

Os materiais utilizados para fabricar o concreto autoadensável são praticamente os mesmos do concreto convencional, adicionando-se finos minerais e aditivos plastificantes, superplastificantes e/ou modificadores de viscosidade na quantidade correta visando obter características de coesão, fluidez e habilidade de passagem (GOMES; BARROS, 2009).

A seleção dos materiais para a produção do CAA não é simples, pois existem cimentos e agregados com grandes variações na sua composição e propriedades. A situação é agravada pelo fato de que inúmeros aditivos químicos e adições minerais podem ser utilizadas simultaneamente, e não existem regras totalmente objetivas que permitem realizar a escolha dos materiais adequados. Entretanto, existe consenso no meio técnico de que algumas características dos materiais constituintes afetam o comportamento da mistura, permitindo otimizar suas propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade do concreto. (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008, pág. 27).

3.5.1 Cimento

Todos os cimentos do tipo Portland, CPI a CPV, de acordo com as especificações de normas técnicas locais e das características pretendidas, podem ser utilizados na produção do CAA. A escolha correta do tipo de cimento normalmente depende das exigências específicas de cada aplicação (GOMES; BARROS, 2009).

Mendes (2015, pág. 25) descreve que “existem várias propriedades, tanto físicas (finura, superfície específica) quanto químicas (teores de aluminatos e silicatos de cálcio), características de cada cimento que influenciam na resistência do concreto para uma determinada idade”.

Conforme Andrade e Tutikian (2011), o processo de hidratação, que acarreta o ganho de resistência nos concretos, inicia-se pela superfície das partículas, com uma redução progressiva do tamanho da partícula de cimento, formando-se produtos hidratados.

3.5.2 Adições minerais para o CAA

Conforme explica Borja (2011), adições são materiais de origem mineral, compostos principalmente de minerais silicosos ou silico-aluminosos, geralmente em forma pó, com propriedades cimentantes ou pozolânicas dependendo das propriedades desse fino, que são incorporados ao concreto ou argamassas, em quantidades variáveis em relação à massa do cimento, geralmente entre 10% e 100%, com a finalidade de melhorar e/ou alterar algumas características desses materiais cimentícios como por exemplo: fluidez, resistência a compressão, durabilidade.

De acordo com Dal Molin (2005), as adições minerais classificam-se, em três grupos (Figura 10) de acordo com a sua ação físico-química:

- Material pozolânico: definido como um material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas que, quando finamente dividido e em presença de água, é capaz de reagir com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, e formar compostos com propriedades cimentantes.
- Material cimentício: Não necessita do hidróxido de cálcio (presente no cimento Portland) para formar produtos cimentantes como o C-S-H., no entanto, sua auto hidratação é normalmente lenta, e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para aplicação do material para fins estruturais;
- Filler (inerte): adição mineral finamente dividida sem atividade química.

Figura 10 – Funcionamento das adições minerais no CAA



Os Quadros 1 e 2 apresentam as adições minerais quimicamente ativas mais utilizadas em concretos, bem como suas principais características e consequências do seu emprego nas propriedades do CAA.

Quadro 1 – Características dos principais tipos de adições minerais

Adição Mineral	Cinza volante	Escória de alto forno	Sílica ativa	Metaculim	Cinza da casca de arroz
Origem	Calcinação de carvão pulverizado em usinas termoeletricas.	Subproduto não metálico resultante do processo de obtenção do ferro gusa.	Subproduto resultante do processo de obtenção do ferro-silício e do silício metálico.	Calcinação de alguns tipos especiais de argila ou obtido pelo tratamento do resíduo da indústria do papel	Calcinação da casca de arroz
Forma e textura	Esférica e lisa	Prismática e áspera	Esférica e lisa	Prismática e áspera	Alveolar e áspera
Massa específica (kg/dm³)	2,35	xxxx	2,20	2,40	2,20 a 2,60
Superfície específica (m²/kg)	300 a 700	300 a 700	13.000 a 30.000	Variável em função da moagem	50.000 a 100.000

Fonte: Tutikian; Dal Molin, 2008.

Quadro 2 – Efeito das adições minerais no CAA

Adição Mineral	Cinza volante	Escória de alto forno	Sílica ativa	Metaculim	Cinza da casca de arroz
Tamanho médio das partículas	Variável em função da moagem	Variável em função da moagem	0,1 a 0,2 µm	Variável em função da moagem	Variável em função da moagem
Efeito do CAA fresco quando utilizado como substituição ao cimento	Aumenta a coesão, reduz a exsudação e segregação. Melhora a fluidez e diminui o consumo de plastificante	Aumenta a coesão, reduz a exsudação e segregação. Não modifica as características de fluidez e consumo de plastificante	Elevadíssima coesão, redução da exsudação e segregação. Melhora a fluidez e aumenta o consumo de superplastificante	Grande coesão, redução acentuada da exsudação e segregação. Não contribui para a fluidez e aumenta o consumo de superplastificante	Elevadíssimo aumento de coesão, redução acentuada de exsudação e segregação. Diminui a fluidez e aumenta o consumo de superplastificante
Efeito do CAA endurecido quando utilizado como substituição ao cimento	Pequena alteração na compressão e aumento da durabilidade.	Pequena alteração na compressão e aumento da durabilidade.	Melhora notável na compressão e da durabilidade.	Melhora notável na compressão e da durabilidade.	Melhora notável na compressão e da durabilidade.

Fonte: Tutikian; Dal Molin, 2008.

As adições minerais devem ser escolhidas após uma análise técnica e econômica, considerando-se as características de acordo com a necessidade para o CAA, e podem ser diversas, desde que tenham áreas superficiais maiores que as do componente que estão substituindo (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Os CAA podem ser obtidos tanto com as adições pozolânicas como com as cimentantes normalmente utilizadas nos CCV (como cinza volante ou escória de alto-forno). Entretanto, as adições pozolânicas ultrafina, como sílica ativa, Metacaulim e cinza de casca de arroz, mostram-se mais efetivas no aumento da coesão do CAA, bem como no aumento da resistência e da durabilidade. Misturas ternárias, que fazem uso de combinações de duas adições minerais, também tem sido utilizada com sucesso. (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008, pág. 30).

Tutikian e Dal Molin (2008), comentam que quanto mais finas forem às adições, menores serão os teores de substituição, devido ao aumento da frequência de contato entre elas e em determinado volume, o que influencia no aumento da viscosidade e coesão da mistura.

3.5.3 Agregados

Em geral os agregados utilizados no CAA devem atender as mesmas exigências normativas que o concreto convencional, a umidade, absorção de água, a classificação e às variações na quantidade de finos devem ser monitoradas cuidadosamente e constantemente, levando-se em consideração a qualidade do CAA. A forma e distribuição das partículas são de fundamental importância e modificam características de compactação e índice de vazios (GOMES; BARROS, 2009).

3.5.3.1 Agregado miúdo

Tutikian e Dal Molin (2008), afirmam que todas as areias, de origem natural (depósitos eólicos e beira de rios) ou origem artificial (obtidas de processo industrial com por exemplo o pó de pedra produzida do processo de britagem), podem ser utilizadas para a dosagem do CAA. Agregado miúdo de origem natural possui forma arredondada e textura mais lisa enquanto agregado de origem artificial possuem composição granulométrica descontínua, que pode provocar problemas na confecção do CAA devido ao aumento do consumo de água e deve ser corrigido com a mistura de outra areia como a areia média do rio.

Fochs (2011), informa ainda que essas areias artificiais se diferenciam das areias naturais normalmente pela maior quantidade de finos, pela forma mais lamelar dos grãos e pela superfície mais rugosa, características que afetam diretamente a reologia do concreto.

De acordo com Klein (2008) verificou que CAA produzidos com porcentagens de areias artificial superiores a 50%, em relação ao total de areia da mistura, apresentaram exsudação e segregação, em função da distribuição granulométrica deficiente deste agregado que fez com que a viscosidade da argamassa presente no concreto fosse diminuída. Quando a porcentagem dessa substituição for inferior a 30%, apresentaram estabilidade e uma maior viscosidade quando comparados com o CAA produzido com 100% de areia natural.

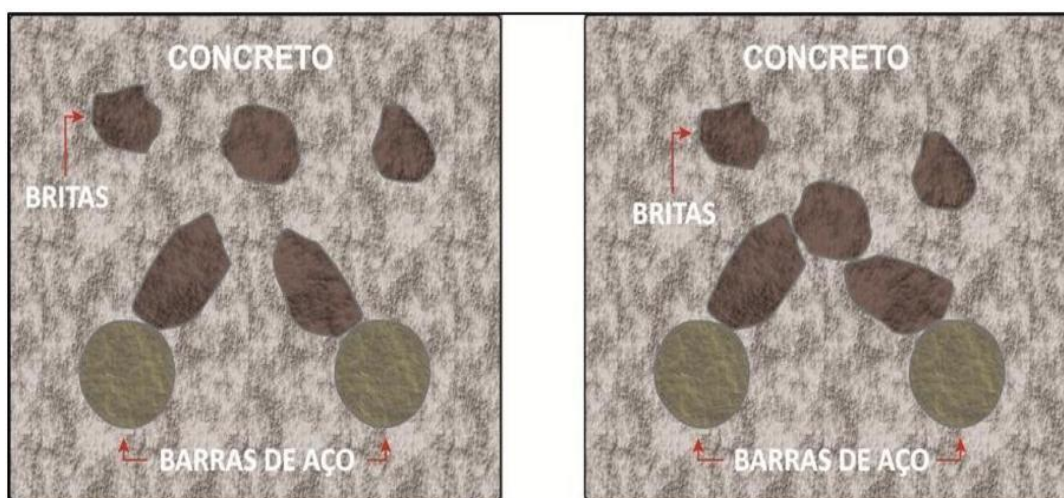
3.5.3.2 Agregado Graúdo

De acordo com Okamura e Ouchi (2003), a influência do agregado graúdo na fluidez do CAA está relacionada ao espaçamento existente entre obstáculos, representados pelas armaduras, tubulações de instalações, e pela distância entre a armadura e a face das fôrmas, sendo fortemente decorrente da sua granulometria.

Fochs (2011), informa que o diâmetro máximo do agregado deve ser limitado de acordo com o espaçamento entre as barras de aço, atendendo ao intervalo entre 12 mm e 20 mm. O tamanho e a forma dos agregados no CAA influenciam diretamente a fluidez e a capacidade de fluir coeso entre os obstáculos.

A Figura 11 descreve o bloqueio que pode acontecer caso o tamanho dos agregados seja relativamente grande em relação às dimensões de espaçamento entre as armaduras e a forma das partículas se afastando da esférica.

Figura 11 – Representação dos mecanismos de bloqueio entre armaduras de elevada densidade



Fonte: Wolenski (2010)

3.5.4 Água

Gomes e Barros (2009), afirmam que a água embora seja o material do concreto que exija pouco controle tecnológico, é certamente o parâmetro mais importante no controle das propriedades do concreto seja no estado fresco ou endurecido. Geralmente o seu uso é expresso em relação ao peso de cimento utilizado na confecção do CAA. A água utilizada na mistura é dividida em quatro

partes: hidratação do cimento, absorção e adsorção dos agregados e materiais finos, preencher a porosidade do esqueleto granular e garantir a fluidez do concreto.

Mendes (2015) descreve que a presença de impurezas na água de mistura do CAA o pode ser responsável por efeitos negativos na resistência mecânica do concreto. Deste modo, a qualidade da água de amassamento utilizada é de fundamental importância para a produção de concretos de adequado desempenho.

3.5.5 Aditivos

Segundo a ABNT NBR 11768 (2011), aditivos químicos são produtos que, adicionados em pequena quantidade a concretos de cimento Portland, modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições.

Gomes e Barros (2009, pág. 52), afirma que “os aditivos utilizados no CAA deverão atender as exigências normativas disponíveis em cada país. Os aditivos superplastificantes e os modificadores de viscosidade são os mais utilizados; outros, como os incorporadores de ar, são menos usados”.

Tutikian e Dal Molin (2008, pág. 35), informam que “os aditivos superplastificantes permitem que se alcance alta fluidez nas misturas, enquanto os aditivos modificadores de viscosidade oferecem um aumento da coesão, prevenindo a exsudação e segregação do concreto”.

3.5.5.1 Aditivo Superplastificante

Segundo Gomes e Barros (2009), a utilização de aditivos superplastificante no concreto é inevitável, pois é responsável pela fluidez que é umas das principais propriedades do CAA. No mercado existem vários tipos e marcas direcionadas diretamente ao CAA, o que tem de alguma forma prejudicado a escolha de um superplastificante.

Os lignossulfonatos (LS) são conhecidos como aditivos plastificantes de primeira geração, utilizados como redutores de água normais e, em alguns casos, como superplastificante. O Naftaleno (NS) e a melamina (MS) são conhecidos comercialmente como aditivos superplastificantes de segunda geração, e permitem a redução em até 25% da quantidade de água na mistura quando usados como redutores de água. Os policarboxilatos (PC) são os aditivos mais aconselhados para a utilização no CAA, pois são aditivos superplastificantes de alta eficiência que dispersam e desfloculam

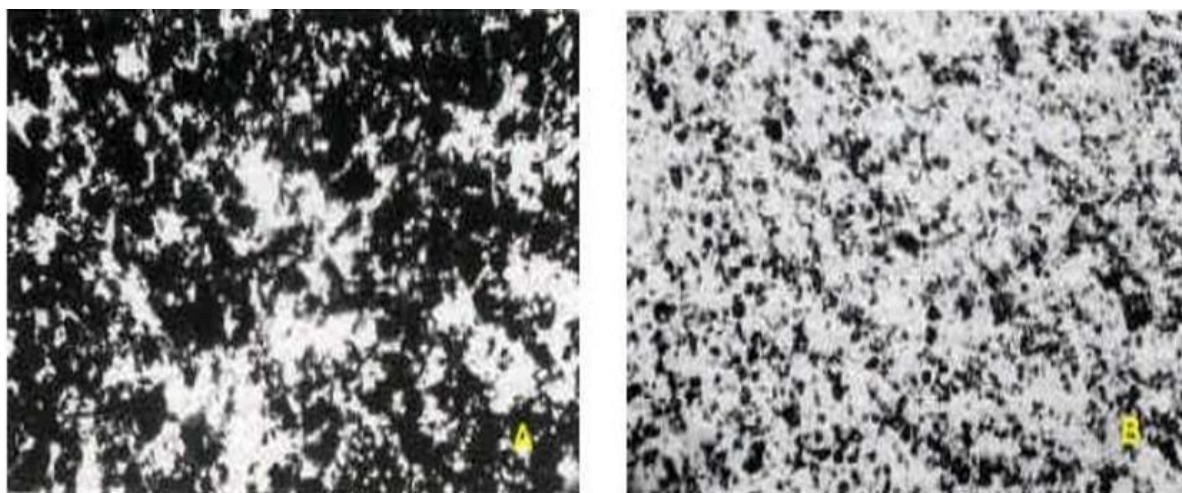
as partículas de cimento. Assim, permitem uma redução de água das misturas em até 40%, mantendo a mesma trabalhabilidade. Também são poliméricos (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008, pág. 36).

Hartmann e Helene (2003) verificaram, através de experimento realizado com dois aditivos à base policarboxilatos (PC), melhores resultados em propriedades do concreto endurecido (resistência à compressão, módulo de elasticidade e penetração de íons de cloreto) quando comparado com concretos com aditivos plastificantes (LS).

Para Collepardi (2001), a adição de Policarboxilatos (PC) em um sistema água e cimento, que anteriormente estava floculada, causa a dispersão das partículas de cimento (Figura 12).

Segundo Eiger (2006), os aditivos do tipo policarboxilatos apresentam um mecanismo duplo de ação dispersante, derivado tanto da ação eletrostática, devido às cargas negativas existentes nos grupos carboxilatos ao longo da cadeia de polimetilmetacrilato, quanto da estabilização estérica, resultante dos grupos hidrofílicos laterais.

Figura 12 – Aglomeração das partículas de cimento antes (A) e após a adição de PC (B)



Fonte: Collepardi, 2001

De acordo com Nunes (2001), para a produção do CAA, os superplastificantes mais recomendados são os de 3ª geração, os policarboxilatos (PC), por permitirem uma maior redução de água, maiores resistências iniciais e manutenção de fluidez por um tempo prolongado, quando comparados aos aditivos superplastificantes de 1ª e 2ª geração.

3.5.5.2 Aditivos modificadores de viscosidade (VMA)

Fochs (2011, pág. 44), apresenta que “os aditivos modificadores de viscosidade agem no concreto de forma a aumentar a coesão da mistura, melhorando a estabilidade e a mobilidade do concreto”.

3.6 ENSAIOS DO CAA NO ESTADO FRESCO

Segundo Gomes e Barros (2009), a alta deformabilidade e a moderada viscosidade são parâmetros que refletem o comportamento reológico do CAA e garantem as principais propriedades que devem ser atendidas. Para avaliação destas propriedades muitos ensaios já foram desenvolvidos, como por exemplo: Slump flow test, Slump flow T50cm test, J-ring test, V-funnel test, L-box test, coluna de segregação, U-box test, Fill-box test e Orimet test.

O Quadro 03 mostra os principais ensaios, locais onde podem ser executados e propriedades avaliadas.

Quadro 03 – Resumo dos ensaios do CAA no estado fresco

Ensaio	Utilização		Propriedades Avaliadas		
	Laboratório	Canteiro	Fluidez	Habilidade pas.	Coesão
Slump flow	XXX	XXX	XXX	N	X
Slump flow T50	XXX	XX	XXX	N	X
V-funil	XX	X	XX	N	X
V-funil 5 min	XX	X	X	N	XXX
L-box	XX	X	N	XXX	XX
U-box	XX	X	N	XXX	XX
Fill-box	X	N	N	XX	XX
U-pipe	X	N	X	N	XXX
Orimet	XX	X	XX	X	X
L-ring	XXX	XXX	X	XXX	XX
XXX= Altamente recomendável, XX = Recomendável, X = Pouco recomendável, N = Não relevante					

Fonte: Tutikian; Dal Molin, 2008.

Desses ensaios cinco são descritos pela NBR 15823 Concreto Autoadensável, que são: Slump flow test, Slump flow T50cm test, J-ring test, V-funnel test, L-box test, coluna de segregação e serão descritos abaixo.

3.6.1 Slump flow test e Slump flow T50cm test

➤ Considerações iniciais

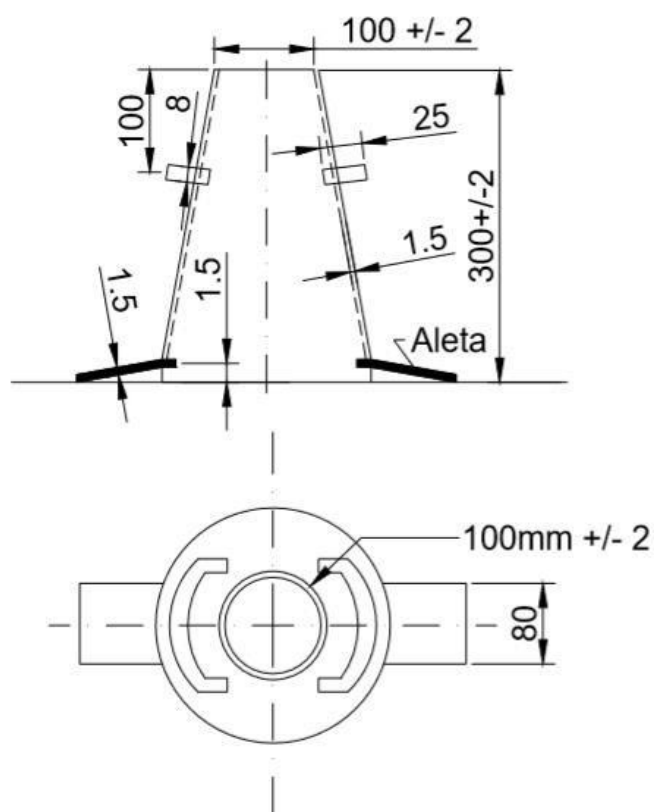
De acordo com a NBR 15823 – Parte 2- (2010, pág. 1), “Slump flow test é um método para determinação da fluidez do concreto autoadensável, em fluxo livre, sob a ação do seu peso próprio, empregando-se o cone de Abrams”.

➤ Equipamentos utilizados

De acordo com a NBR 15823 – Parte 2 (2010), os equipamentos utilizados no ensaio são os seguintes:

- **Molde (Cone de Abrams):** confeccionado em chapa metálica de 1,5 mm de espessura, com forma de tronco de cone com 300 mm de altura e bases abertas, sendo a inferior com 200 mm e a superior com 100 mm de diâmetro interno. Deve ser provido ainda de aletas e alças (Figura 13).

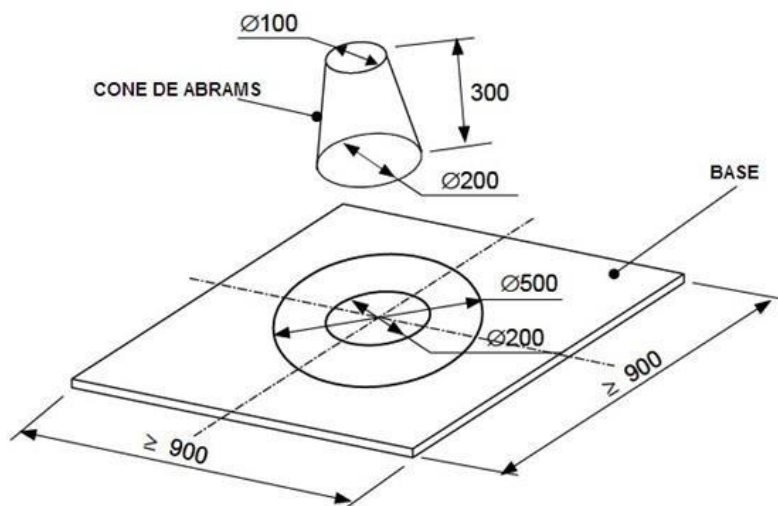
Figura 13 – Cone de Abrams



Fonte: NBR 15823-Parte 2, 2010

- **Base:** Utilizada para apoio do molde, deve ser confeccionada em chapa metálica quadrada de no mínimo 900 mm de lado, com espessura de pelo menos 1,5 mm. Esta chapa deve ser provida de três marcações circulares centradas com diâmetros de 100 mm, 200 mm e 500 mm, respectivamente, conforme mostra Figura 14;

Figura 14 – Base para ensaio de Slump flow T50cm test



Fonte: Pereira, 2010

- **Régua metálica:** de no mínimo 1000 mm de comprimento e graduada;
- **Recipiente:** capacidade de pelo menos 10L e feito de material que não absorva água e nem provoque atrito com o concreto. Deve permitir verter o concreto no molde de uma só vez;
- **Complemento tronco-cônico:** metálico e adaptável à base superior do molde;
- **Colher de pedreiro:** para retirada do excesso de concreto da superfície desmolde;
- **Cronômetro:** Com resolução mínima de 0,1 s.

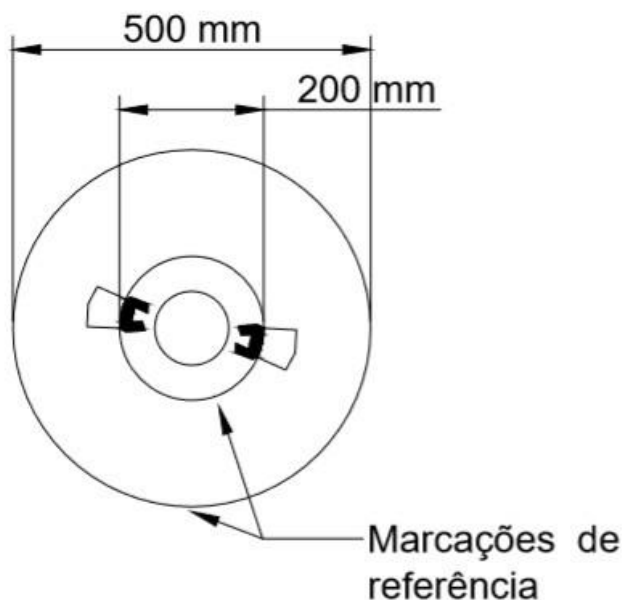
➤ Execução do ensaio

A NBR 15823 – Parte 2 (2010), descreve os seguintes procedimentos para a execução do ensaio:

- Umedecer a base e internamente o molde para que não absorvam água do concreto durante o ensaio e colocar a base sobre uma superfície nivelada e

posicionar o molde sobre a base, centrando-o na marcação circular de diâmetro 200 mm, conforme Figura 15;

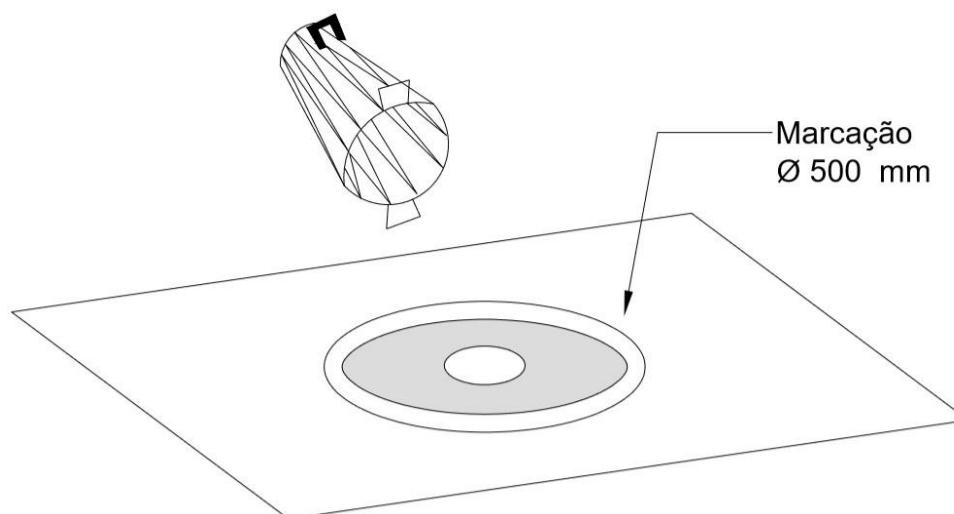
Figura 15– Localização do cone de Abrams no ensaio de Slump flow test



Fonte: NBR 15823-Parte 2, 2010

- Com uma amostra representativa de concreto, entre 6 e 7 litros, e em tempo não superior a 2 min após sua coleta, preencher o molde (cone de Abrams), que deve ser fixado através de suas aletas, pelos pés do operador, afim de evitar qualquer vazamento de concreto.
- Ao fim da operação de preenchimento, retirar o complemento tronco-cônico e remover o excesso de concreto da superfície com o auxílio da colher de pedreiro, que deve regularizar a superfície do concreto de sua superfície;
- A desmoldagem é efetuada levantando-se cuidadosamente o molde pelas alças, na direção vertical, com velocidade constante e uniforme, em tempo não superior a 5s, sem submeter o concreto a movimentos de torção lateral.
- No momento da desmoldagem o cronômetro deve ser acionado no momento em que o operador inicia o levantamento do molde e parado quando a massa de concreto cobrir totalmente a marca circular de diâmetro 500 mm da base (Figura 16), registrando-se este intervalo de tempo (t_{500}), em segundos.

Figura 16 – Ensaio para marcação do tempo t_{500}



Fonte: NBR 15823-Parte 2, 2010

➤ Resultados

Segundo Diniz (2010), embora o teste do espalhamento afira principalmente a capacidade de preenchimento, deve ser observado se há segregação, distribuição irregular dos agregados graúdos e/ou separação entre a pasta e os agregados (Figura 17) e/ou exsudação, existência de uma fina camada de pasta ou água de exsudação nas bordas e na parte superior do concreto.

Figura 17 – CAA com visível segregação



Fonte: Tutikian; Dal Molin, 2008.

A NBR 15823 – Parte 2 (2010), descreve os seguintes procedimentos para calcular o resultado do ensaio:

- O espalhamento (SF) da massa de concreto: média aritmética de duas medidas perpendiculares do diâmetro realizadas em milímetros. O Quadro 04 mostra os valores do espalhamento em função da utilização do CAA;

Quadro 4 – Valores do espalhamento para o CAA

Classe de espalhamento	Espalhamento (mm)	Aplicação	Exemplo
SF 1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto com deslocamento livre, Concreto auto-adensável bombeado, Estruturas que exigem uma curta distância de espalhamento horizontal do concreto auto-adensável	Lajes, Revestimento de túneis, Estacas e certas fundações
SF 2	660 a 750	Estruturas que exigem uma curta distância de espalhamento horizontal do concreto auto-adensável	Paredes, vigas, pilares e outras
SF 3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm)	Pilares-parede Paredes-diafragma Pilares

Fonte: NBR 15823-Parte 2, 2010

- O tempo de escoamento (t500): intervalo de tempo, em segundos, entre o início e o final do escoamento do concreto, a partir do diâmetro do molde (200 mm) até a marca circular de diâmetro 500 mm da base. O Quadro 05 resume os valores do t500 em função da aplicação do CAA.

Quadro 5 – Classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação (t500)

Classe de viscosidade plástica aparente	T500 (s)	Aplicação	Exemplo
VS 1	≤ 2	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle de exsudação e da segregação; Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.	Lajes; Paredes-diafragma; Pilares-paredes; Indústria de pré-moldados; Concreto aparente.
VS 2	> 2	Adequado para a maioria das aplicações correntes.	Vigas, pilares e outros.

Fonte: NBR 15823-Parte 2, 2010

Diniz (2010), descreve os valores, máximos e mínimos, de diversos pesquisadores para o ensaio do Slump flow test (Quadro 6), e Slump flow T50cm test (Quadro 7).

Quadro 6 – Valores de referência para o ensaio Slump flow test

Teste do Espalhamento			
Referência	Valor mínimo (cm)	Valor máximo (cm)	Propriedades avaliadas
EFNARC (2002)	65	80	Capacidade de preenchimento (fluidez). Resistência à segregação (coesão). Presença de exsudação
Gomes (2002)	60	70	
Araujo (2003)	65	80	
Gomes et al. (2003)	60	75	
Lisboa (2004)	60	75	
Tutikian (2007)	60	75	
Gomes e Barros (2009)	60	80	

Fonte: Diniz, 2010

Quadro 7 – Valores de referência para o ensaio Slump flow T50cm test

Teste do Espalhamento T50cm			
Referência	Valor mínimo (segundo)	Valor máximo (segundo)	Propriedades avaliadas
EFNARC (2002)	2	5	Capacidade de preenchimento (fluidez). Resistência à segregação (coesão). Viscosidade.
Gomes (2002)	4	10	
Araujo (2003)	2	5	
Gomes et al. (2003)	3	7	
Lisboa (2004)	3	7	
Tutikian (2007)	3	7	
Gomes e Barros (2009)	2	7	

Fonte: Diniz, 2010

3.6.2 J-ring test

➤ Considerações iniciais

Utilizar apenas os resultados obtidos no ensaio de espalhamento não é suficiente para avaliar a habilidade de o CAA passar entre as armaduras, por isso foi desenvolvido o ensaio do Anel J (J-ring test), que é um complemento dos ensaios de espalhamento. Ele consiste em verificar se o concreto sob força provocada pelo seu

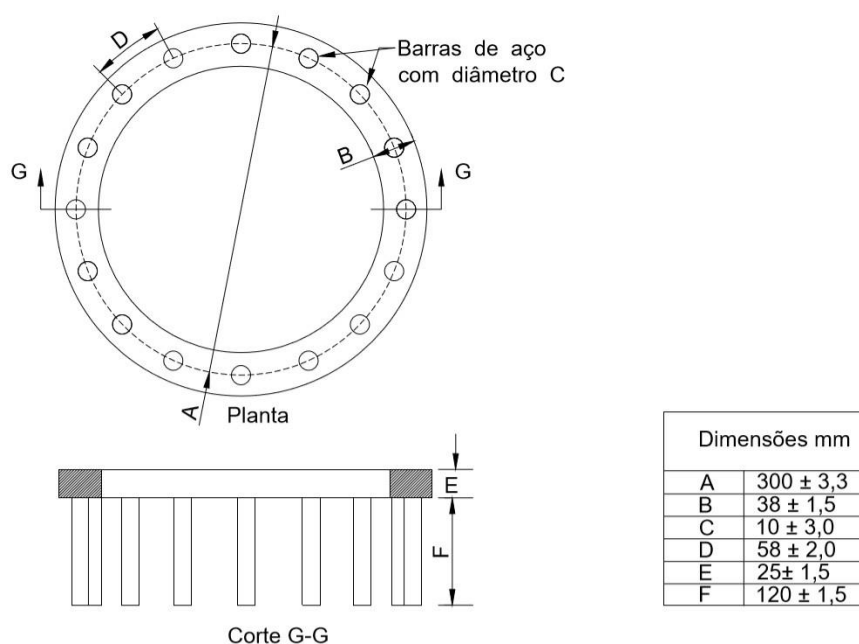
peso próprio é capaz de passar por obstáculos (barras de aço, passagens para tubulações) até atingir uma determinada dimensão. Sua principal função é medir a capacidade de fluidez do CAA e sua habilidade de passar por obstáculos. Também é possível visualizar a segregação da mistura pois, uma vez que, ao passar pelo anel, não deve acontecer segregação (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

➤ Equipamentos utilizados

De acordo com a NBR 15823 – Parte 3 (2010), além dos equipamentos utilizados no ensaio Slump flow test (Molde, placa da base, régua metálica, recipiente, complemento tronco-cônico e colher de pedreiro) também deve ser utilizado o seguinte equipamento:

- **Anel J:** metálico, com 300 mm de diâmetro e 120 mm de altura, constituído verticalmente por barras de aço de 100 mm de diâmetro a cada (58 ± 2) mm, conforme Figura 18.

Figura 18 – Anel J com dimensões



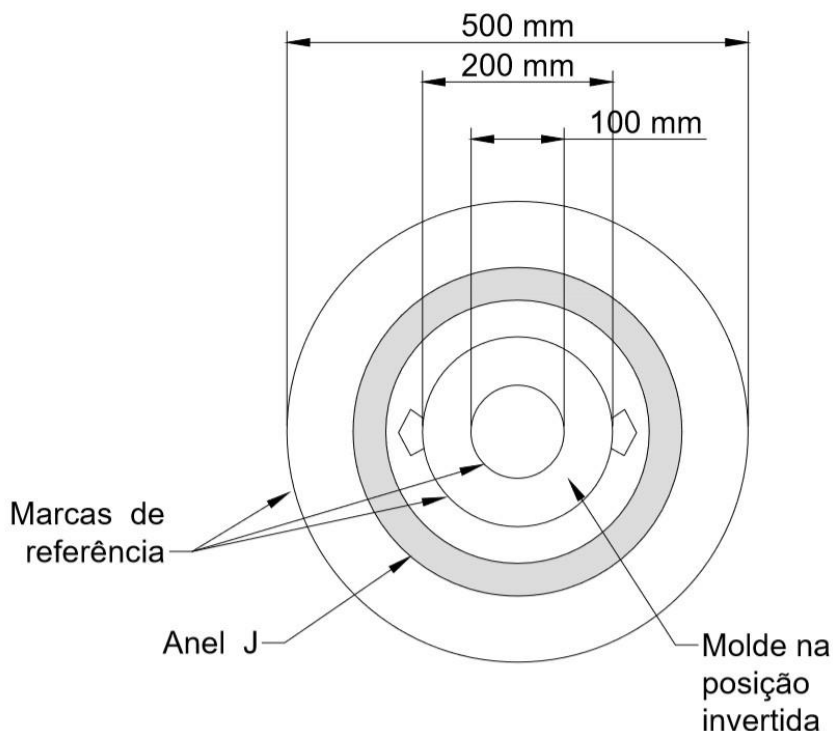
Fonte: NBR 15823-Parte 3, 2010

➤ Execução do ensaio

A NBR 15823 – Parte 3 (2010), descreve que o procedimento para a execução do ensaio do ensaio Anel J é praticamente o mesmo do ensaio de

espalhamento. A diferença consiste em posicionar o anel J sobre a base, centrando-o com relação às marcas de referência e posicionar o molde na posição invertida sobre a base, centrando-o na marcação circular de diâmetro 100 mm (Figura 19).

Figura 19 – Cone de Abrams execução do Anel J com dimensões



Fonte: NBR 15823-Parte 3, 2010

➤ Resultados

A NBR 15823 – Parte 3 (2010), descreve os seguintes procedimentos para calcular o resultado do ensaio:

- **O diâmetro final (df)**, atingido pela massa de concreto, por meio da média aritmética de duas medidas (em milímetros) realizadas em direções perpendiculares;
- A diferença entre o diâmetro médio da massa de concreto obtido no ensaio de espalhamento (sem o anel J) e neste ensaio (com o anel J) é o parâmetro utilizado. O Quadro 8 mostra os valores do ensaio em função da aplicação do CAA;
- Obstrução observada à passagem do concreto pelas barras do anel J.

Quadro 8 – Resultados do ensaio Anel J

Classe de habilidade passante	ANEL J (mm)	Aplicação	Exemplo
PJ 1	25mm a 50mm com 16 barras de aço	Adequado para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80mm a 100mm	Lajes; Paineis; Elementos de fundação
PJ 2	0 a 25mm com 16 barras de aço	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60mm a 80mm	Vigas; Pilares; Tirantes; Indústria de pré-moldados

Fonte: NBR 15823-Parte 1, 2010

Diniz (2010), descreve os valores, máximos e mínimos, de diversos pesquisadores para o ensaio do anel J (Quadro 9) da diferença de altura entre o concreto imediatamente interior e imediatamente exterior ao anel após o ensaio.

Quadro 9 – Valores de referência para o ensaio do anel J

Teste do anel J			
Referência	Valor mínimo (mm)	Valor máximo (mm)	Propriedades avaliadas
EFNARC (2002)	0	10	Capacidade de escoamento (habilidade de passagem). Resistência à segregação (coesão).
Gomes (2002)	0	10	
Araújo (2003)	0	10	
Gomes et al. (2003)	0	10	
Tutikian (2007)	0	10	
Gomes e Barros (2009)	0	10	

Fonte: Diniz, 2010

3.6.3 L-box test

➤ Considerações iniciais

O ensaio L-box é utilizado para verificar simultaneamente a fluidez e a habilidade passante, permanecendo coeso. O equipamento (Figura 20) é basicamente uma caixa em formato de “L” com um portal móvel que dá a opção de o concreto passar da posição vertical para a posição horizontal. Junto a essa porta

móvel existem barras de aço que simulam a armação do concreto armado, criando um obstáculo a passagem do CAA. (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Figura 20 – L-box sendo utilizado



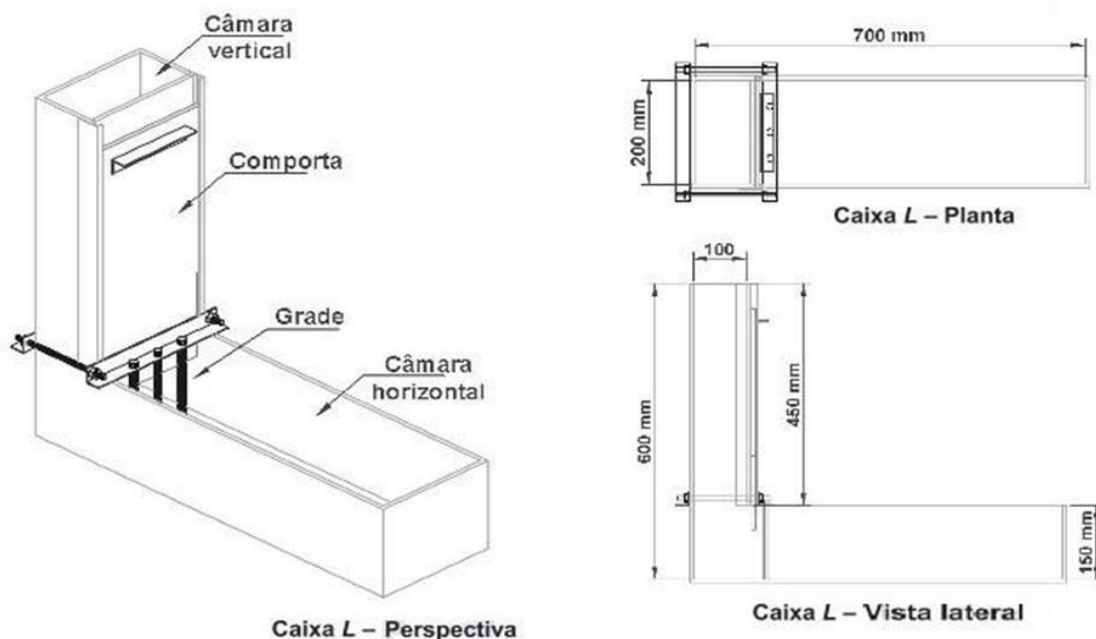
Fonte: Tutikian; Dal Molin, 2008.

➤ Equipamentos utilizados

De acordo com a NBR 15823 – Parte 4 (2010), além dos equipamentos utilizados no ensaio Slump flow test (Cronometro, régua metálica, recipiente, e colher de pedreiro) também deve ser utilizado o seguinte equipamento:

- **Caixa L:** caixa em seção retangular com perfil em forma de L, constituída por um compartimento vertical e outro horizontal (Figura 21). A caixa deve ser confeccionada preferencialmente em chapa metálica com espessura mínima de 1,5 mm.

Figura 21 – Detalhamento caixa L-box



Fonte: NBR 15823-Parte 4, 2010

➤ Execução do ensaio

A NBR 15823 – Parte 4 (2010), descreve que o procedimento para a execução do ensaio que consiste nas seguintes etapas:

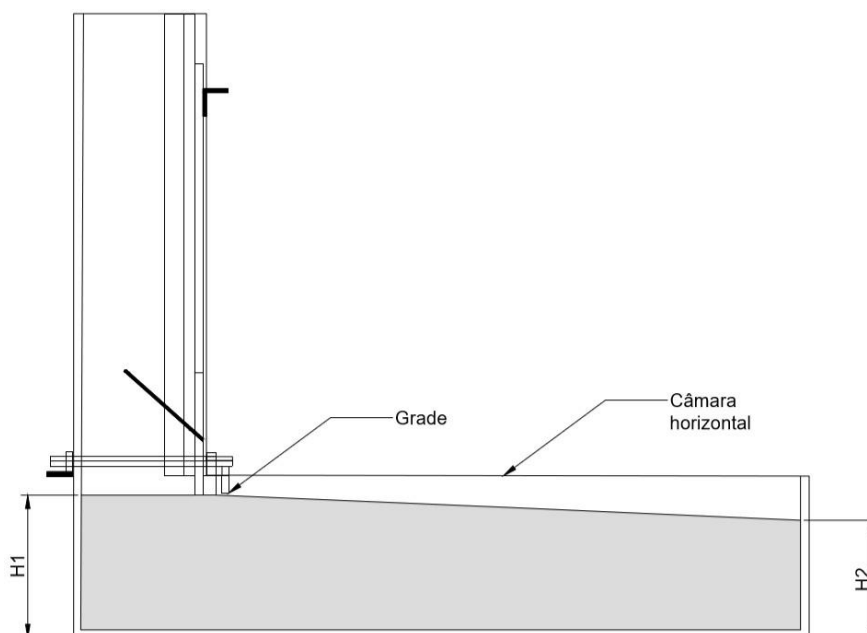
- Sempre que o ensaio for realizado em laboratório devem ser mantidas as condições de temperatura (23 ± 2) °C e no mínimo 50% de umidade;
- Realizar a limpeza da caixa L com água. A seguir umedecer as superfícies internas com água ou aplicar desmoldante em uma camada fina e homogênea. Fechar a comporta e nivelar a caixa L sobre uma superfície plana;
- Com uma amostra representativa de concreto de aproximadamente 15 L e em tempo não superior a 2 min após sua coleta, a câmara vertical da caixa L deve ser preenchida totalmente de forma uniforme e sem adensamento;

➤ Resultados

A NBR 15823 – Parte 4 (2010), descreve os seguintes procedimentos para calcular o resultado do ensaio:

- Cessado o escoamento, medir as alturas H1 e H2, conforme Figura 22, e calcular a habilidade passante (HP), isso é, a razão entre as alturas da superfície do concreto nas extremidades da câmara horizontal usando a Equação 1. O Quadro 10 mostra dos valores do ensaio em função da aplicação do CAA;

Figura 22 – Indicação das alturas H1 e H2 na L caixa



Fonte: NBR 15823-Parte 4, 2010

$$HP = \frac{H2}{H1}$$

Equação 01

Quadro 10 – Valores do ensaio L-box em função da aplicação

Classe de habilidade passante	ANEL J (mm)	Aplicação	Exemplo
PL 1	>= 0,80, com duas barras de aço	Adequado para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80mm a 100mm	Lajes; Paineis; Elementos de fundação
PL 2	>= 0,80, com três barras de aço	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60mm a 80mm	Vigas; Pilares; Tirantes; Indústria de pré-moldados

Fonte: NBR 15823-Parte 1, 2010

Diniz (2010), descreve os valores, máximos e mínimos, de diversos pesquisadores para o valor da habilidade passante (Quadro 11).

Quadro 11 – Valores de referência para habilidade passante para o ensaio L-box

Teste da caixa L			
Referência	Valor mínimo (H2/H1)	Valor máximo (H2/H1)	Propriedades avaliadas
EFNARC (2002)	0,8	1	Capacidade de escoamento (habilidade de passagem).
Gomes (2002)	0,8	1	
Araujo (2003)	0,8	1	
Gomes et al. (2003)	0,8	1	
Lisboa (2004)	0,8	1	
Tutikian (2007)	0,8	1	
Gomes e Barros (2009)	0,8	1	

Fonte: Diniz, 2010

3.6.4 V-funnel test

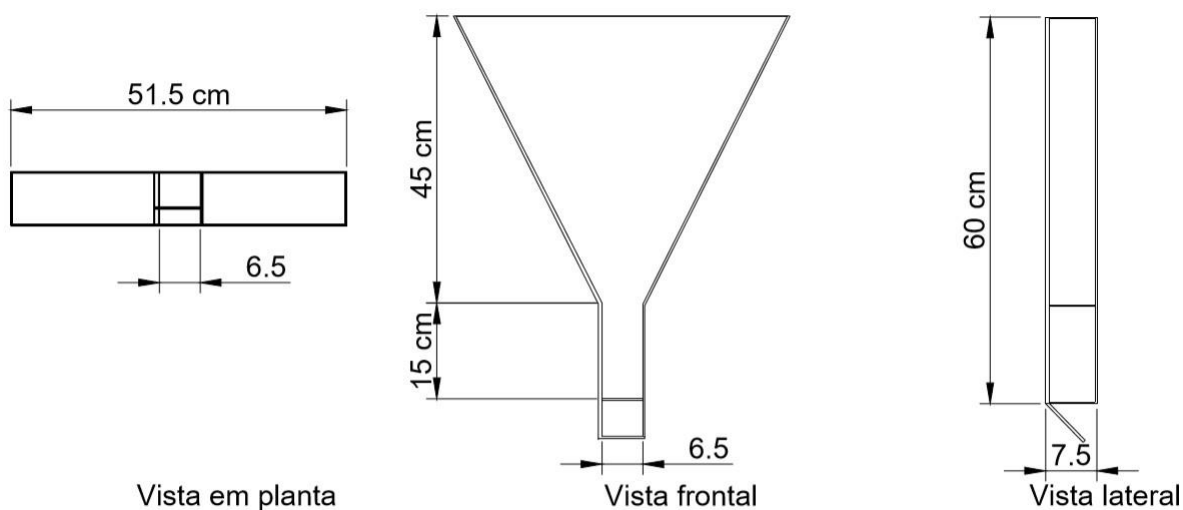
➤ Considerações iniciais

O ensaio V-funnel test foi criado no Japão por Ozawa e mede a fluidez do CAA, podendo ser utilizado para agregados graúdos de no máximo 20mm. O resultado do ensaio é o tempo que o material leva para escoar o funil que é parâmetro para medir a viscosidade do concreto auto-adensável (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

➤ Equipamentos utilizados

De acordo com a NBR 15823 – Parte 5 (2010), além dos equipamentos utilizados no ensaio Slump flow test (Cronometro, concha metálica, recipiente, e colher de pedreiro) também deve ser utilizado o seguinte equipamento:

- Funil V: deve ser confeccionado em chapa acrílica com espessura de 5 mm ou em chapa metálica de pelo menos 1,5 mm de espessura, em forma de funil de bases retangulares, conforme detalhamento apresentado na Figura 23.

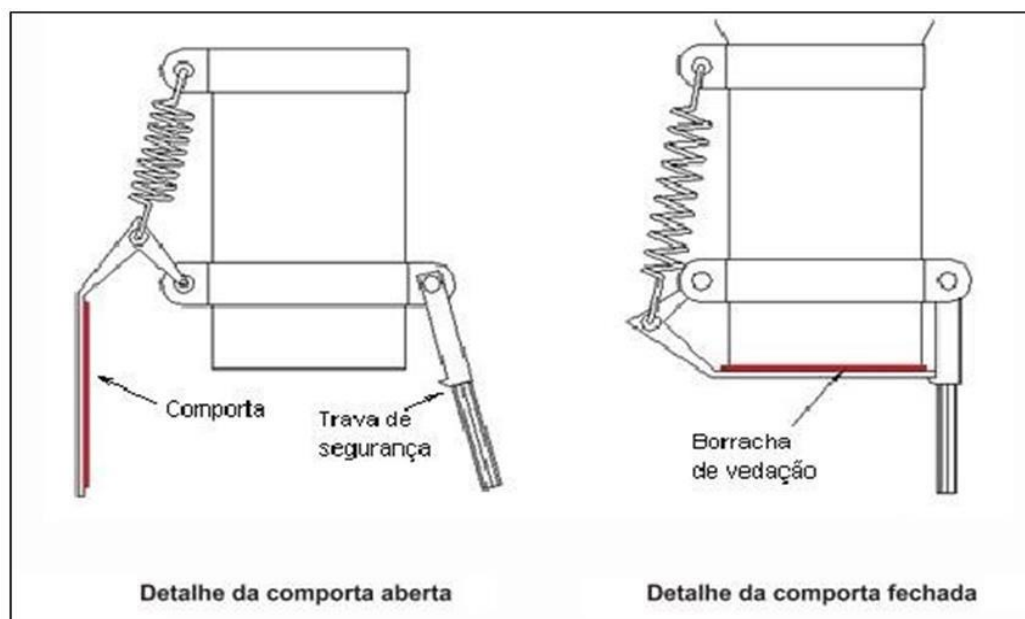
Figura 23 – Dimensões Funil V

Fonte: NBR 15823-Parte 5, 2010

➤ Execução do ensaio

A NBR 15823 – Parte 5 (2010), descreve que o procedimento para a execução do ensaio do ensaio consiste nas seguintes etapas:

- Realizar a limpeza e o umedecimento interno do funil com água. Fechar a comporta do funil e apoiá-lo em superfície rígida, plana e horizontal (Figura 24);

Figura 24 – Utilização do Funil V

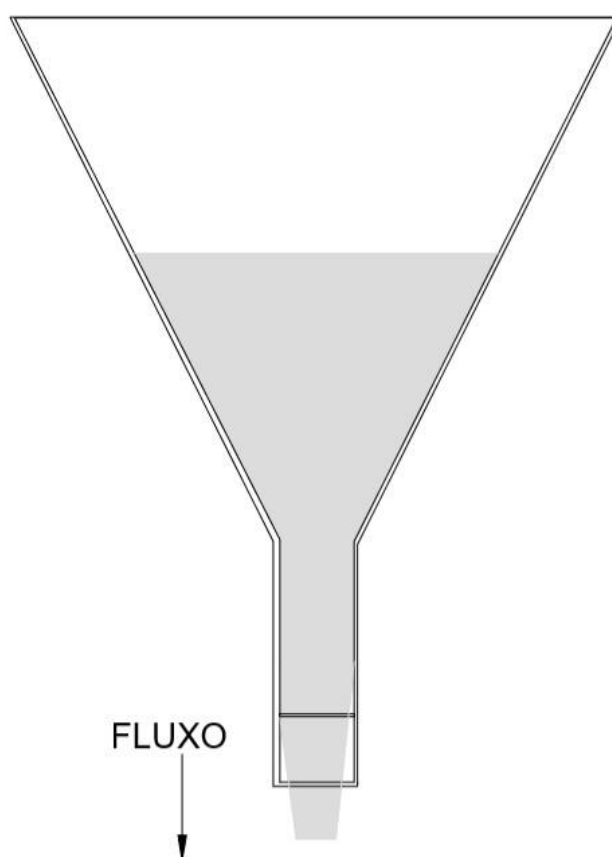
Fonte: NBR 15823-Parte 5, 2010

- Com uma amostra representativa de concreto de aproximadamente 12 L e em

tempo não superior a 5 min após sua coleta, o funil V deve ser preenchido totalmente, de forma uniforme, sem adensamento e sem interrupção;

- O recipiente deve ser posicionado sob o funil V para coleta do concreto. O excesso de concreto da superfície do funil V deve ser retirado com o auxílio da colher de pedreiro, que deve regularizar a superfície do concreto. A abertura da comporta deve ser efetuada em um tempo não superior a 30 s após o final de seu preenchimento (Figura 25);
- Em casos especiais, com solicitação expressa, pode ser efetuada a medida do tempo de escoamento do concreto após 5 min do preenchimento do funil V (T5min);
- Imediatamente após a primeira medida do tempo de escoamento, T30seg, a comporta deve ser fechada e o funil deve ser novamente preenchido com o concreto coletado, com auxílio do recipiente.

Figura 25 – Ensaio para medição do T30 seg



Fonte: NBR 15823-Parte 5, 2010

- O preenchimento deve ser efetuado sem adensamento, de forma uniforme e

sem interrupção, e devem ser seguidos os passos descritos anteriormente;

- A comporta deve ser aberta 5 min após o preenchimento, sendo registrado o intervalo de tempo para o escoamento total da massa de concreto (T5min).

➤ Resultados

A NBR 15823 – Parte 5 (2010), descreve os seguintes procedimentos para calcular o resultado do ensaio:

- Tempo de escoamento T30seg: primeira determinação do intervalo de tempo para escoamento completo da massa do concreto no funil V;
- Tempo de escoamento T5min: segunda determinação do intervalo de tempo para escoamento completo da massa do concreto no funil V, realizada após 5 min que o concreto utilizado no primeiro escoamento preencheu novamente o funil V. Esse tempo de escoamento T5min serve como parâmetro para que se teste a resistência à segregação, pois se o CAA estiver segregando, o tempo de escoamento aumentará significativamente.

O Quadro 12 resume o valor do tempo de escoamento em função da aplicação do concreto autoadensável.

Quadro 12 – Valores de referência para o ensaio V-funil

Classe de viscosidade	Funil V (s)	Aplicação	Exemplo
plástica aparente			
VS 1	≤8	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos.	Lajes; Paredes-Diafragma; Pilares-parede; Indústria de pré-moldados; Concreto aparente.
VS 2	9 a 25	Adequado para a maioria das aplicações correntes.	Vigas, pilares e outras.

Fonte: NBR 15823-Parte 1, 2010

Diniz (2010), descreve os valores, máximos e mínimos, de diversos pesquisadores para o valor do T30seg (Quadro 13) e T5min (Quadro 14).

Quadro 13 – Valores de referência para o ensaio V-funil T30seg

Teste do Funil V			
Referência	Valor mínimo (segundo)	Valor máximo (segundo)	Propriedades avaliadas
EFNARC (2002)	6	12	Capacidade de preenchimento (fluidez). Capacidade de escoamento (habilidade de passagem). Viscosidade.
Gomes (2002)	10	15	
Araujo (2003)	6	12	
Gomes et al. (2003)	7	13	
Lisboa (2004)	7	13	
Tutikian (2007)	6	12	
Gomes e Barros (2009)	6	15	

Fonte: Diniz, 2010

Quadro 14 – Valores de referência para o ensaio V-funil T5min

Teste do Funil V 5min (acréscimo de tempo em relação ao primeiro teste)			
Referência	Valor mínimo (segundo)	Valor máximo (segundo)	Propriedades avaliadas
EFNARC (2002)	0	3	Resistência à segregação.
Gomes (2002)	0	3	
Araujo (2003)	0	3	
Gomes et al. (2003)	0	3	
Lisboa (2004)	0	3	
Tutikian (2007)	0	3	
Gomes e Barros (2009)	0	3	

Fonte: Diniz, 2010

3.6.5 Coluna de segregação

➤ Considerações iniciais

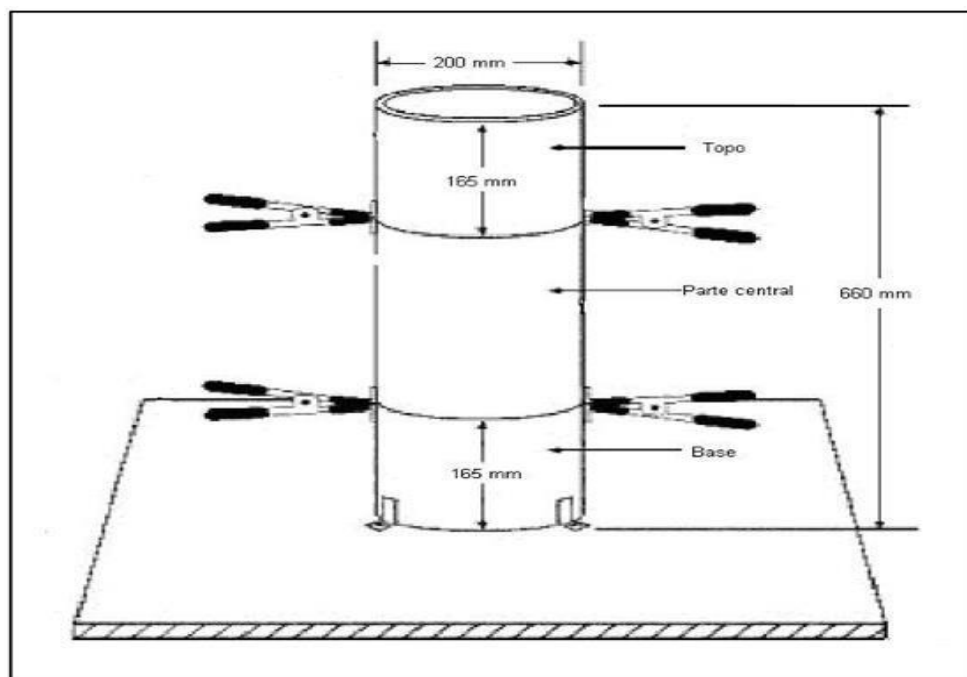
De acordo com a NBR 15823 – Parte 6 (2010), esse ensaio consiste em determinar a resistência à segregação do concreto autoadensável, pela diferença das massas de agregado gráudo existentes no topo e na base da coluna de segregação. Esse método de ensaio não é aplicável ao concreto autoadensável contendo agregado leve ou fibras.

➤ Equipamentos utilizados

De acordo com a NBR 15823 – Parte 6 (2010), além dos equipamentos utilizados no ensaio Slump flow test (Cronometro, concha metálica, e colher de pedreiro) também deve ser utilizado o seguinte equipamento:

- **Coluna de segregação:** constitui-se de um tubo de PVC, de diâmetro nominal de 200 mm de diâmetro e 660 mm de altura total, seccionado em três partes (Figura 26).

Figura 26 – Ensaio coluna de segregação.



Fonte: NBR 15823-Parte 6, 2010

➤ Execução do ensaio

A NBR 15823 – Parte 6 (2010), descreve que o procedimento para a execução do ensaio do ensaio consiste nas seguintes etapas:

- Realizar uma adequada limpeza e o umedecimento interno da coluna de segregação com água, esta deve ser apoiada em superfície rígida e plana, de forma a permitir a colocação do concreto;
- Com uma amostra representativa de concreto de aproximadamente 20 L e em tempo não superior a 5 min após sua coleta;
- Aproximadamente 20 min após a moldagem devem ser retiradas porções de concreto do topo e da base da coluna;
- Cada amostra deve ser lavada individualmente sobre uma peneira com abertura de malha de 5 mm, de forma a remover totalmente a argamassa, limpando os agregados graúdos.

➤ Resultados

A NBR 15823 – Parte 6 (2010), descreve os seguintes procedimentos para calcular o resultado do ensaio:

- A resistência à segregação do concreto é determinada em função da diferença percentual entre a quantidade de agregado graúdo da porção de concreto retirada da base e do topo da coluna de segregação pela Equação 2:

$$SR = \frac{2(mb - mt)100}{mb + mt}$$

Equação 02

Onde:

- **SR:** Porcentagem de segregação (%);
- **mb:** é a massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retirada da base da coluna, expressa em gramas (g);
- **mt:** é a massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retirada do topo da coluna, expressa em gramas (g);

Caso mt seja maior ou igual a mb, a segregação é nula.

O Quadro 15 resume o valor do tempo de escoamento em função da aplicação do concreto autoadensável. A classe de resistência à segregação SR2 ou um valor limite mais rigoroso pode ser especificado se a resistência ou a qualidade da superfície for particularmente crítica.

Quadro 15 – Valores de referência para o ensaio Coluna de segregação

Classe de resistência a segregação	Porcentagem de segregação (%)	Distância a ser percorrida (m)	Espaçamento entre as armaduras (mm)	Exemplos
SR 1	≤ 20	<5	>80	Lajes de pequena espessura; Estruturas convencionais de pouca complexidade
SR2	≤ 15	>5	>80	Elementos de fundação profunda
		<5	<80	Pilares, paredes e elementos pré-moldados

Fonte: NBR 15823-Parte 1, 2010

3.6.6 Outros ensaios

Diversos autores descrevem ensaios para avaliar as características do CAA que não são descritas pela NBR 15823 (2010). Os principais ensaios são citados abaixo:

3.6.6.1 U-box test

Ensaio desenvolvido no Japão, mede a fluidez e a capacidade do CAA passar por obstáculos sem sofrer segregação. O equipamento (Figura 27) possui dois compartimentos separados por uma porta móvel e barras de aço com diâmetros de 12,5mm espaçadas entre si por 40mm (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Figura 27 – Equipamento Caixa U.



Fonte: Tutikian; Dal Molin, 2008.

Diniz (2010), descreve os valores, máximos e mínimos, de diversos pesquisadores para o ensaio da caixa U (Quadro 16).

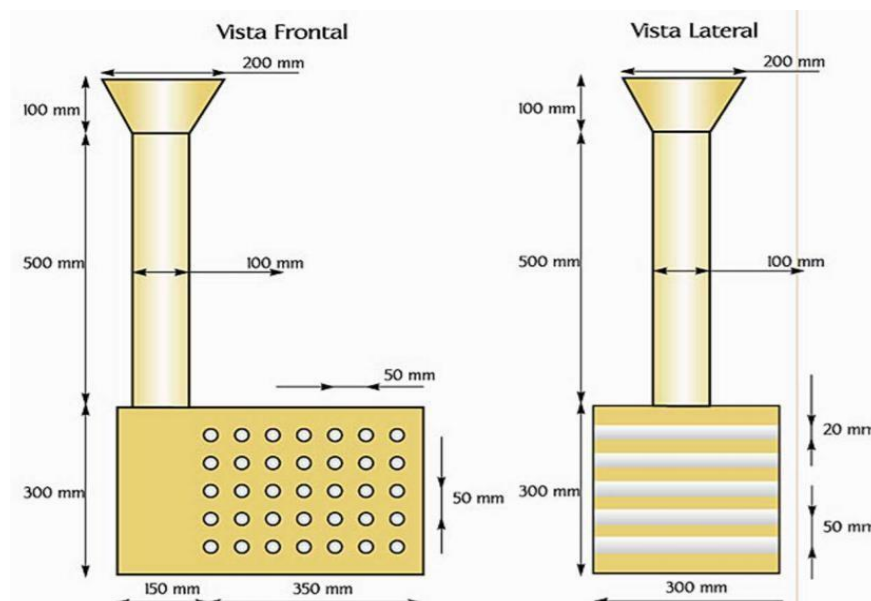
Quadro 16 – Valores de referência para o ensaio caixa U

Teste da caixa U (R1 – R2)			
Referência	Valor mínimo (mm)	Valor máximo (mm)	Propriedades avaliadas
EFNARC (2002)	0	30	Capacidade de escoamento (habilidade de passagem).
Gomes (2002)	0	80	
Araujo (2003)	0	30	
Tutikian (2007)	0	30	
Gomes e Barros (2009)	0	30	

Fonte: Diniz, 2010

3.6.6.2 Fill-box test

Equipamento (Figura 28) que mede a capacidade do CAA passar sem segregar (coeso) por obstáculos com barras de aços e tubos de instalações. O aparato consiste em uma caixa transparente, de 50cm por 30cm, com 35 barras de PVC de 20mm espaçadas de 5cm de eixo a eixo, distribuídas ao longo da caixa. Se a capacidade da mistura for menor que 90%, significa que o CAA deve ser ajustado para o alcance de tal exigência e fluidificado. O ensaio permite também observar a existência ou não de segregação. (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

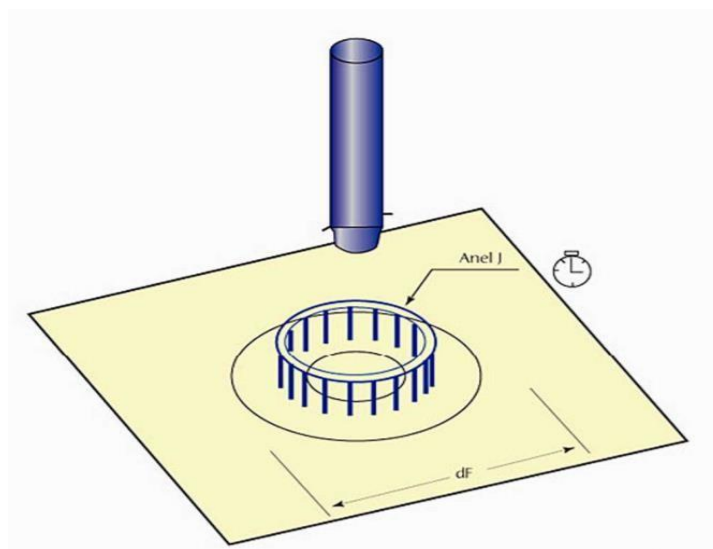
Figura 28 – Equipamento Fill-box test

Fonte: Tutikian; Dal Molin, 2008

3.6.6.3 Orimet test

Equipamento (Figura 29) desenvolvido para CAA, consiste em um tubo de 100mm com redução para 75mm e uma porta inferior que serve para liberar o concreto autoadensável durante o ensaio. Ensaio utilizado para verificar a fluidez e habilidade passante do CCA (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Figura 29 – Equipamentos Orimet test



Fonte: Tutikian; Dal Molin, 2008

3.7 ENSAIOS DO CAA NO ESTADO ENDURECIDO

3.7.1 Considerações iniciais

Assim como as propriedades do CAA no estado fresco devem ser verificadas, para garantir a sua correta utilização no canteiro de obras, as propriedades no estado endurecido também devem ser analisadas afim de atender os requisitos de resistência especificados nesse projeto.

Desde a compreensão do uso do CAA na construção civil, suas propriedades e características no estado fresco são estudadas por pesquisadores em todo o mundo. Entretanto, quando o objetivo é a utilização estrutural do concreto, são as propriedades do material no estado endurecido que ganham maior destaque, devendo, portanto, serem analisadas de maneira cuidadosa, assegurando, desta forma, a sua eficaz utilização na construção civil (DOMONE, 2006).

O concreto autoadensável e o concreto convencional de equivalentes resistências à compressão têm propriedades comparáveis no estado endurecido, se existirem diferenças, essas são geralmente cobertas pela adoção de coeficientes de segurança nos quais as normas de projeto são baseadas (EFNARC, 2005).

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008, pág. 68), “com materiais e relações de água/cimento (a/c) similares, a resistência do CAA é, pelo menos, igual à do concreto convencional e apresenta a mesma evolução ao longo do tempo para uma mesma classe de resistência”.

A propriedade do CAA utilizada nesse estudo será a compressão axial aos 28 (vinte e oito) dias, que será descrita abaixo.

3.7.2 Resistência a compressão

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a resistência à compressão é a propriedade mais relevante do concreto no estado endurecido, sendo aceita universalmente, na idade de 28 dias, como um índice geral da resistência do concreto.

A relação água/cimento de um concreto é a principal responsável pela porosidade da matriz de cimento e da zona de transição entre matriz e agregado graúdo, que, por sua vez, exerce influência direta na resistência mecânica do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Klug e Holchmacher (2003) afirmam que para um mesmo consumo de cimento e relação água/cimento, os valores encontrados de resistência à compressão são significativamente maiores para o CAA, quando comparados ao concreto convencional.

O ensaio de moldagem e cura de corpos de prova é normatizado pela NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpo de prova (2015) que apresenta as seguintes recomendações:

- Os moldes podem ser cilíndricos ou prismáticos, caso utilize cilíndrico, devem ter altura igual ao dobro do diâmetro. O diâmetro deve ser de 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm ou 45 cm;
- As laterais e a base do molde devem ser de aço ou outro material não absorvente, que não reaja com o cimento Portland;

- Introduzir o concreto no molde em camadas de volume aproximadamente igual e adensar cada camada utilizando a haste, que deve penetrar no concreto com seu extremo em forma de semiesfera;
- A primeira camada deve ser atravessada em toda a sua espessura quando adensada com a haste, evitando-se golpear a base do molde. Os golpes devem ser distribuídos uniformemente em toda a seção transversal do molde;
- Deve-se bater levemente na face externa do molde, até o fechamento de eventuais vazios;
- A última camada deve ser moldada com quantidade em excesso de concreto, de forma que, ao ser adensada, complete todo o volume do molde e seja possível proceder ao seu rasamento, eliminando o material em excesso.
- Sempre que possível, os corpos de prova devem ser moldados no local onde devem ser armazenados. Evitar manusear e transportar os corpos de prova recém-moldados;
- Após endurecimento do concreto, os corpos de prova devem ser transportados dentro das respectivas fôrmas;
- Após cumprido o período de cura inicial, os corpos de prova devem ser submetidos ao tipo de cura correspondente.

O ensaio de resistência a compressão do concreto é normatizado pela NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpo de prova cilíndrico, 2007, que apresenta as seguintes recomendações:

- Os corpos de prova a serem ensaiados devem atender a relação altura/diâmetro (h/d) nunca maior do que 2,02. Caso esta relação seja menor que 1,94, deve-se multiplicar a força F (força de compressão obtida através da prensa hidráulica) pelas seguintes correções descritas no Quadro 17;

Quadro 17 – Fator de correção h/d

Relação h/d	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87

Fonte: NBR 5739, 2007

- Até a idade de ensaio, os corpos-de-prova devem ser mantidos em processo de cura úmida ou saturada;

- Os corpos-de-prova devem ser rompidos a compressão em uma idade especificada, com as tolerâncias de tempo descritas no Quadro 18;

Quadro 18 – Tolerância para a idade do ensaio

Idade do ensaio	Tolerância permitida (h)
24h	0,5
3d	2
7d	6
28d	24
63d	36
91d	48

Fonte: NBR 5739, 2007

- Antes de iniciar o ensaio, as faces dos pratos e do corpo-de-prova devem ser limpas e secas antes do corpo-de-prova ser colocado em posição de ensaio;
- A escala de força escolhida para o ensaio deve ser tal que a força de ruptura do corpo-de-prova ocorra no intervalo em que a máquina foi calibrada;
- A resistência a compressão é calculada pela equação 03:

$$f_c = \frac{4F}{\pi * D^2}$$

Equação 03

Onde:

f_c = resistência à compressão, em MPa;

F = força máxima alavancada, em Newtons;

D = Diâmetro do corpo de prova, em metros.

4 CONCRETO LEVE

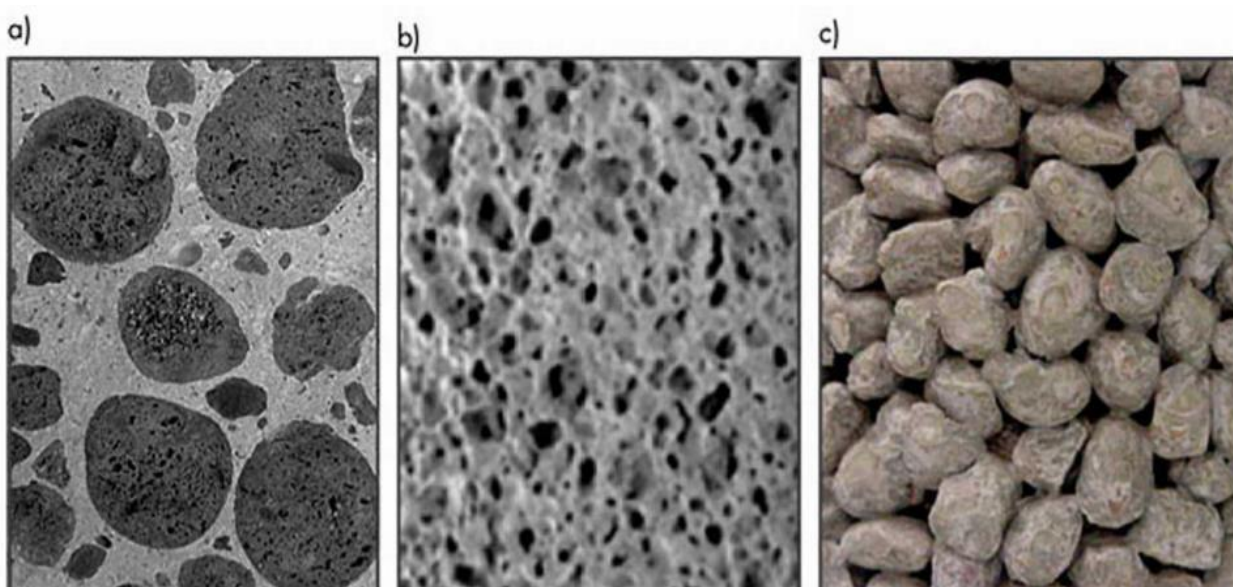
Nesse capítulo, serão abordados os principais aspectos na literatura sobre o concreto leve. Inicialmente serão apresentados a definição, histórico e o EPS com suas principais características. Em seguida, serão descritas as propriedades mais importantes do concreto leve: resistência a compressão, massa unitária, trabalhabilidade do concreto com agregado leve e por último a microestrutura do concreto estrutural leve.

4.1 DEFINIÇÃO

De acordo com Rossignolo (2009), o concreto leve possui como característica principal a redução da massa específica em relação aos concretos convencionais.

Segundo Catoia (2012), o concreto leve pode ser classificado em três tipos: Concreto com agregado leve, que apresentam mais utilização estrutural; concreto celular, que se baseiam na introdução de vazios no interior da massa de concreto e concreto sem finos que consistem em omitir o agregado miúdo do concreto (Figura 30).

Figura 30 – Tipos de concreto leve



Concreto leve: a) com agregados leves; b) celular; e c) sem finos.

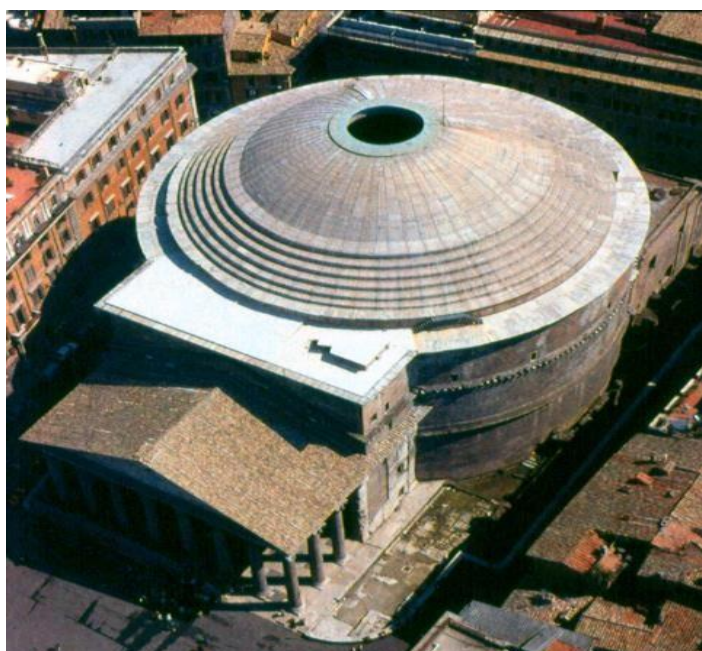
Fonte: Rossignolo, 2009

4.2 HISTÓRICO

De acordo com Rossignolo e Agnesini (2005), as primeiras utilizações da aplicação dos concretos com agregados leves datam de aproximadamente 1100 a.C., na atual cidade de El Tajin (México), utilizaram uma mistura de pedra polmes com um ligante à base de cinzas vulcânicas e cal, para a construção de elementos estruturais.

Os Romanos também utilizaram concreto leve, sendo uma das principais construções com concreto leve da época romana data de aproximadamente 120 d.C., quando o Panteão de Roma (Figura 31), foi reconstruído utilizando pedra polmes, após ter sido destruído por um incêndio (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2005).

Figura 31 – Panteão de Roma

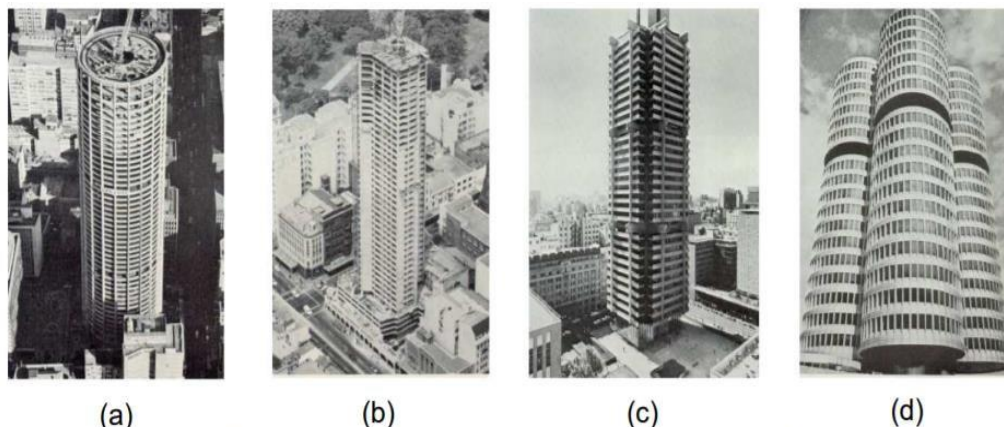


Fonte: Rossignolo; Agnesini, 2005

O concreto leve surgiu como um produto desenvolvido pela tecnologia do concreto e tem sido utilizado a pelo menos 70 anos para fins estruturais e redução do peso próprio da estrutura (ROSSIGNOLO, 2003).

Os Edifícios Austrália Square Tower (Austrália), Park Regis (Austrália), Standart Bank (África do Sul) e o BMW Bullying (Alemanha) são exemplos de edifícios de edificações verticais de múltiplos pavimentos (Figura 32) construídos a partir da década de 50 que utilizaram concreto leve (ROSSIGNOLO, 2003).

Figura 32 – Edifícios de múltiplos pavimento executados com concreto leve



Edifícios executados com concreto leve: Square Tower – 1967 (a), Park Regis – 1968 (b), Standart Bank – 1970 (c), BMW Building – 1972 (d)

Fonte: Rossignolo, 2003

No Brasil a aplicação do concreto estrutural leve ainda é modesta e voltada para elementos construtivos pré-fabricados. Entre as principais edificações que utilizaram concreto leve se destacam a ampliação do Rio Centro, no Rio de Janeiro, o pavilhão de exposição do Anhembi, em São Paulo, o edifício da Faculdade de Economia e Administração da USP, e o Hotel Grand Hyatt, nos painéis da fachada, apontados na Figura 33 (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2005).

Figura 33 – Utilização de concreto leve no Brasil



Fonte: Rossignolo; Agnesini, 2005

4.3 CONCRETO ESTRUTURAL LEVE

De acordo com Rossignolo (2009), os concretos leves estruturais são obtidos pela substituição, total ou parcial, dos agregados convencionais por materiais de baixa massa específica. Geralmente são classificados por possuírem massa específica abaixo de 2.000 kg/m³.

O Quadro 19 mostras as principais referências de classificação para um concreto ser considerado estrutural leve.

Quadro 19 – Valores de referência para a massa específica concreto leve

Referência	Massa específica aparente (kg/m ³)
NM 35	1680 < γ < 1840
ACI 213-R03	1120 < γ < 1920
EUROCODE 2	900 < γ < 2000
NS 3473 E	1200 < γ < 2200
CEB-FIP	γ < 2000
RILEM	γ < 2000

Fonte: Rossignolo, 2009

De acordo com a NBR NM 35 (ABNT, 1995), os agregados miúdos leves quando empregados na confecção de concreto leves, não podem apresentar massa específica no estado solto maior que 1120 kg/m³ e 880kg/m³ para agregado graúdos, estabelecendo relação entre a resistência de compressão mínima e a massa específica para concretos estruturais leves (Quadro 20).

Quadro 20 – Valores de relação entre a resistência a compressão e massa específica.

Resistência à compressão aos 28 dias (MPa) (Valores mínimos)	Massa específica aparente (kg/m ³) (Valores mínimos)
28	1840
21	1760
17	1680

Fonte: NBR NM 35, 1995

De acordo com Rossignolo (2009), outros parâmetros podem ser utilizados

para classificar o concreto estrutural leve, como o fator de eficiência (FE), que faz a relação entre a resistência de compressão e a massa específica do concreto conforme mostrado na Figura 34.

Figura 34 – Fator de eficiência

$$\text{Fator de eficiência} = \frac{f_c}{\gamma} \quad \text{Em que :}$$

f_c = resistência a compressão(MPa) e

γ = massa específica aparente ($\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$)

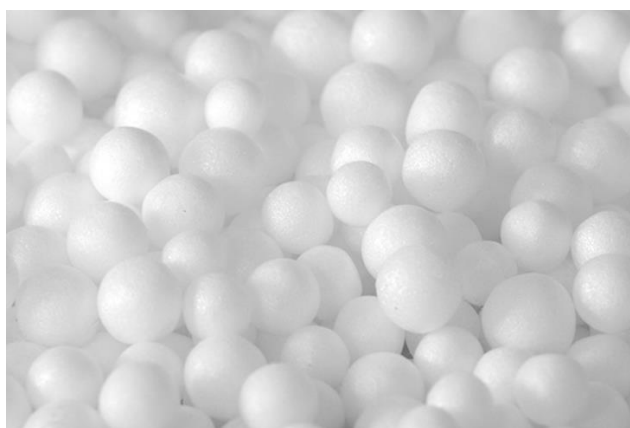
Fonte: Rossignolo, 2009

De acordo com SPITZNER (1994), é considerado como concreto leve de alto desempenho um concreto com fator de eficiência acima de 25 MPa.dm³/kg.

4.4 POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

EPS é a sigla internacional do Poliestireno Expandido. No Brasil, é mais conhecido como "Isopor", descoberto em 1949 nos laboratórios da BASF na Alemanha. O EPS (Figura 35) é um plástico celular rígido, resultante da polimerização do estireno em água. O EPS consiste em até 98% de ar e apenas 2% de poliestireno. Em 1m³ de EPS expandido, por exemplo, existem de 3 a 6 bilhões de células fechadas e cheias de ar. O Quadro 21 mostra as principais características do EPS (ACEPE, 2017).

Figura 35 – Poliestireno expandido



Fonte: Rossignolo; Agnesini, 2005

Esse material ganhou nos últimos 35 anos uma posição estável na construção de edifícios, não apenas por suas características isolantes, mas também por sua leveza, resistência, facilidade de trabalhar e baixo custo (ACEPE, 2017).

Quadro 21 – Características do EPS

Característica	Descrição
Baixa condutibilidade térmica	A estrutura de células fechadas, cheias de ar, dificulta a passagem do calor o que confere ao EPS um grande poder isolante
Massa específica	As massas específicas do EPS variam entre os 10-30 kg/m ³ , permitindo uma redução substancial do peso das aplicações que o utilizam.
Resistência mecânica	Apesar de muito leve, o EPS tem uma resistência mecânica elevada, que permite o seu emprego onde esta característica é
Absorção de água	O EPS não é higroscópico. Mesmo quando imerso em água o EPS absorve apenas pequenas quantidades de água. Tal garante que o EPS mantém as suas características térmicas e mecânicas mesmo sob a ação da umidade.
Trabalhabilidade	O EPS é um material que se trabalha com as ferramentas habitualmente disponíveis, garantindo a sua adaptação perfeita à obra. O baixo peso do EPS facilita o manuseamento do mesmo em obra. Todas as operações de movimentação e colocação resultam significativamente encurtadas.
Versatilidade	O EPS pode apresentar-se numa multitude de tamanhos e formas, que se ajustam sempre às dimensões da aplicação requerida.
Durabilidade	Todas as propriedades do EPS mantêm-se inalteradas ao longo da vida do material, que é pelo menos tão longa quanto a vida da construção de que faz parte. O EPS não apodrece nem ganha bolor, não é solúvel em água nem liberta substâncias para o ambiente. O EPS não constitui substrato ou alimento para o desenvolvimento de animais ou microrganismos.

Fonte: Rossignolo; Agnesini, 2005

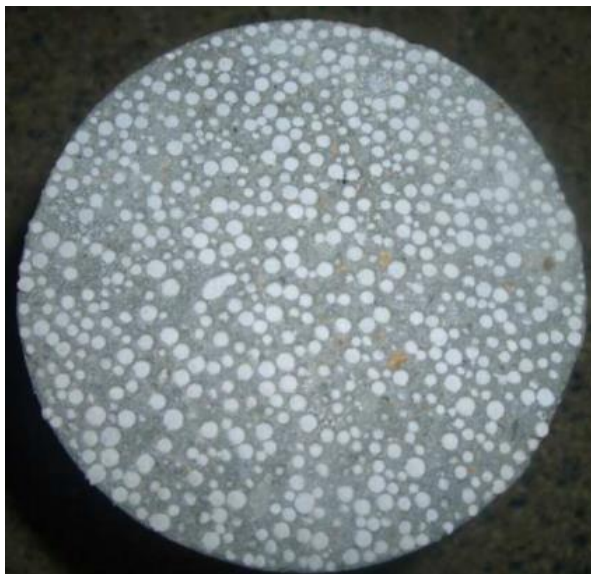
4.5 CONCRETO LEVE COM EPS

De acordo com Kerbaux (2010), o Concreto Leve com EPS é denominado Concreto Ultraleve é um concreto que contém Poliestireno Expandido (EPS). O EPS é empregado como agregado leve e incorporador de ar, destinados ou não para fins estruturais com massa específica variando entre 400 kg/m³ e 1300 kg/m³, inferior à massa específica usualmente apresentada pelo Concreto Leve Estrutural.

Segundo Catoia (2012), o concreto leve com EPS embora seja inovador, é formado basicamente pelos mesmos materiais do concreto leve com a adição do Poliestireno Expandido que pode substituir o agregado graúdo ou miúdo.

A Figura 36 mostra o concreto estrutura leve com a utilização de EPS.

Figura 36 – Concreto Leve com EPS



Fonte: Catoia, 2012

De acordo com Kerbaudy (2010), o Concreto Leve Estrutural com EPS melhora os aspectos técnicos e de produtividade dos elementos de concreto, industrializados, pré-moldados ou moldados no local, considerando suas principais características, tais como:

- Baixa massa específica;
- Reduzido tempo de cura;
- Facilidade de manuseio, transporte e armazenamento;
- Redução de mão de obra e do uso de equipamentos especiais para peças maiores;
- Elevado isolamento térmico e acústico;
- Altos valores iniciais de resistência mecânica, e finais satisfatórios para emprego estrutural.

4.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO ESTRUTURAL LEVE

Segundo com Rossignolo (2009), propriedades dos concretos estão diretamente relacionadas com o desempenho de suas fases constituintes assim como da ligação entre elas, característica intrínseca aos materiais heterogêneos. Como os agregados usualmente representam mais de 50% do volume dos concretos convencionais, sua substituição por agregados de massa específica bem menor

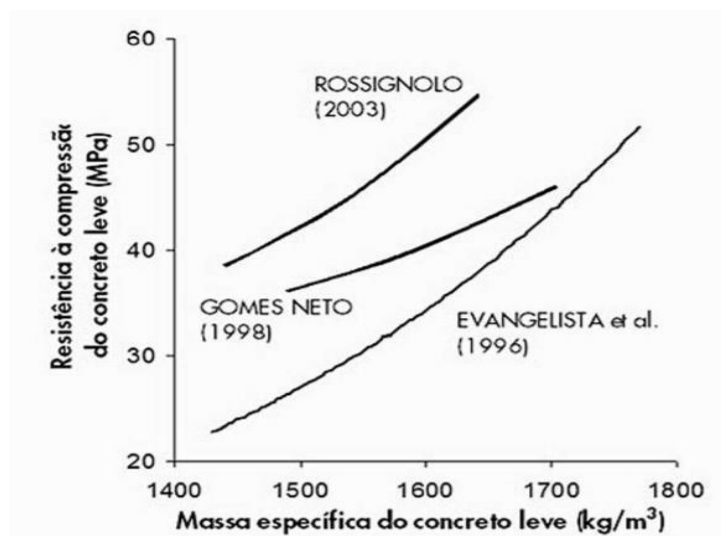
promove alterações consideráveis nas propriedades dos concretos, que dependem diretamente das características desses novos agregados.

As propriedades mais importantes utilizadas na caracterização dos concretos estruturais leves são a resistência à compressão e a massa específica, que estão diretamente relacionadas com o tipo e a granulometria do agregado leve utilizado. A massa específica dos agregados possui mais influência na massa específica e na resistência mecânica dos concretos leves do que nos concretos tradicionais, uma vez que o valor da massa específica dos agregados leves (ROSSIGNOLO,2003).

Os três parâmetros mais utilizados na caracterização do concreto estrutural leve são: massa específica, resistência a compressão e o fator de eficiência, que estão diretamente relacionados com o tipo e a granulometria do agregado leve utilizado (ROSSIGNOLO,2009).

A Figura 37 a relação entre a resistência de compressão e a massa específica de concretos estruturais leves produzidos por diversos autores.

Figura 37 – Resistência a compressão X massa específica de concreto estrutural leve



Fonte: Rossignolo, 2009

A forma de ruptura do concreto estrutural leve geralmente é diferente do concreto convencional. Nesse tipo de concreto a ruptura ocorre devido a diferenças de deformação dos agregados e a pasta do cimento e no caso do concreto estrutural leve a ruptura se dá devido ao colapso da argamassa, muitas vezes originadas por microfissuras nos agregados e a linha de fratura atravessa os agregados (Figura 38) como ocorre no concreto de alta resistência com agregados convencionais (ROSSIGNOLO,2009).

Figura 38 – Forma de ruptura do concreto convencional e concreto leve

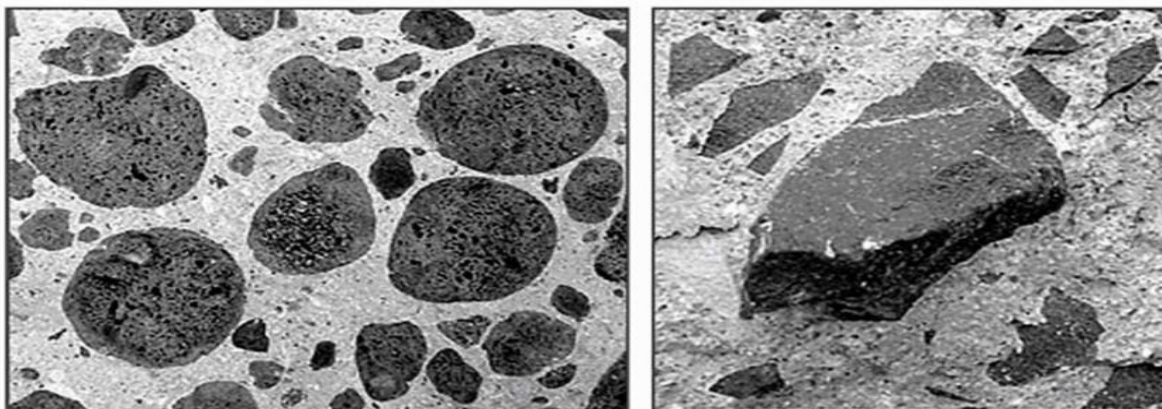


Ilustração da forma de ruptura dos concretos com agregados leves (à esquerda) e com agregados convencionais – basalto (à direita).

Fonte: Rossignolo; Agnesini, 2005

Considerando a massa específica dos agregados leves e sua textura em geral áspera e porosa, o abatimento do tronco de cone dos concretos leves apresenta valores menores do que os obtidos para os concretos convencionais, para uma mesma condição de trabalhabilidade (ROSSIGNOLO, 2009).

Segundo Rossignolo (2009), a absorção de água dos agregados leves tem grande influência na manutenção da trabalhabilidade do concreto após a mistura. Esse problema pode ser amenizado com o controle de umidade dos agregados, antes da mistura. É importante o concreto apresentar boa trabalhabilidade pois assim minimiza a possibilidade de ocorrer segregação (separação e/ou flutuação dos agregados, em geral o leve) no concreto leve o que pode resultar em decréscimo da resistência a compressão axial.

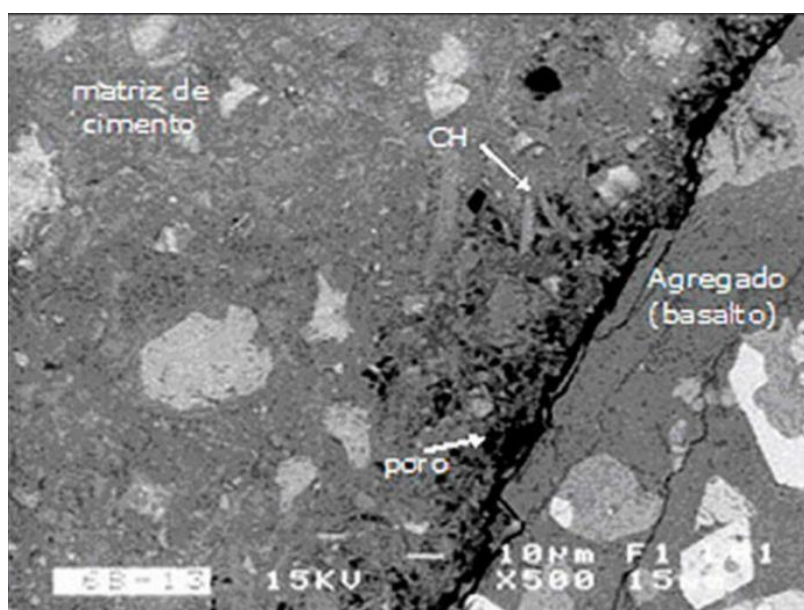
Existe uma forte relação entre a espessura e a qualidade da zona de transição e as propriedades mecânicas e a durabilidade dos concretos. A zona de transição influencia fortemente as propriedades relacionadas à resistência mecânica, o módulo de deformação, o mecanismo de propagação de fissuras e a permeabilidade de agentes agressivos nos concretos, demonstrando assim, a grande importância do estudo da zona de transição (ROSSIGNOLO, 2009).

Segundo Rossignolo (2009), a resistência mecânica da pasta de cimento será maior quanto mais compacta for a pasta e quanto menos cristalinos forem os produtos de hidratação. Dessa forma, a zona de transição apresenta resistência mecânica mais baixa do que a da pasta de cimento, sendo, assim, a região do concreto mais vulnerável à micro fissuração, que influencia negativamente algumas

propriedades desse material, como a permeabilidade e a resistência mecânica.

A vulnerabilidade da zona de transição à micro fissuração existe tanto quando o concreto é submetido a tensões de tração induzidas pela retração por secagem e por variações térmicas quanto pela ação das solicitações externas, devido a deformações diferenciais entre a pasta de cimento e o agregado, que facilmente excedem a resistência limite da zona de transição, causando, assim, as microfissuras. Dessa forma, pode-se resumir que os fatores que mais influenciam na baixa resistência mecânica da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento são os grandes cristais de hidróxido de cálcio orientados preferencialmente, o elevado volume de poros e a presença de microfissuras (Figura 39) dos concretos (ROSSIGNOLO,2009).

Figura 39 – MEV da zona de transição de concreto convencionais



Fonte: Rossignolo; Agnesini, 2005

5 METODOLOGIA

Neste capítulo, serão apresentados os materiais utilizados neste trabalho, bem como os procedimentos utilizados para a produção do CAA, tais como: os métodos de caracterização de aglomerante, adições minerais, agregados, aditivos; a dosagem do Concreto Autoadensável com EPS. Serão também descritos os ensaios para determinação e análise das propriedades do CAA no estado fresco, métodos para cálculo da massa específica, assim como o ensaio de caracterização mecânica de resistência compressão axial.

5.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados para a produção do CAA são: cimento, adição mineral (Metacaulim), areia, brita água e aditivo superplastificante (Glenium 51). Os materiais escolhidos para desenvolver esse estudo são os mais utilizados na indústria da construção civil na cidade de Teresina – PI, pelos seguintes fatores:

- Fatores de logística;
- Fatores econômicos;
- Materiais já utilizados para outros fins na região.

As principais características dos materiais utilizados nesse estudo passam a ser descritas nos próximos tópicos.

5.1.1 Cimento

O cimento utilizado nessa pesquisa foi o CPV ARI – RS (Figura 40), cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos, que possui as seguintes características: resistência final e inicial mais elevada em relação aos demais tipo de cimento, menor relação água/cimento, melhor desempenho, menor permeabilidade.

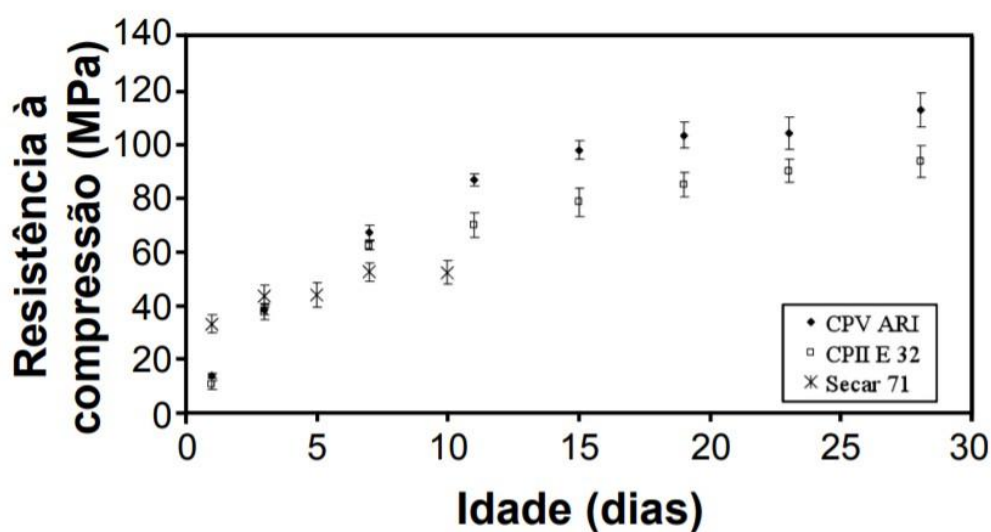
Figura 40 – Cimento CPV – ARI - RS



Fonte: Próprio autor, 2018

Sua escolha se justifica quando esse trabalho busca dosar um concreto autoadensável com alta resistência pois segundo Castro (2011), o concreto produzido com CPV ARI apresentou maiores resistências do que o concreto produzido com CII E 32, devido ao seu maior teor de C3 S e superior área superficial, sendo que esta diferença se manteve até os 28 dias de idade conforme Figura 41.

Figura 41 - Evolução da resistência à compressão uniaxial dos concretos ao longo do tempo



Fonte: Castro, 2011

5.1.2 Metacaulim

➤ Considerações iniciais

A adição mineral utilizada nesse estudo foi o Metacaulim (Figura 42), que é uma adição mineral de alta eficácia para concretos e produtos à base de cimento Portland, destinado a inúmeras aplicações na construção civil em geral, largamente utilizado na Europa, Estados Unidos e Ásia, conferindo inúmeras vantagens.

O Metacaulim é um produto procedente de matérias-primas criteriosamente selecionadas (silicato de alumínio), que passam por um rigoroso processo de fabricação totalmente controlado, ao contrário de outras adições minerais que normalmente são rejeitos industriais secundários e que não possuem controle de produção específico (FARIAS, 2012).

De acordo com Farias (2012), as substituições parciais do cimento por Metacaulim em teores de 10%, 15% e 20% são mais viáveis do que o traço apenas com cimento sem adição mineral, traço este que se denominou como traço padrão, pois além de melhorar as características do concreto autoadensável, diminui o consumo de cimento. Fatos estes relacionados com a diminuição da exsudação e segregação.

Figura 42 - Adição mineral Metacaulim



Fonte: Farias, 2012

➤ Benefícios

De acordo com Farias (2012), a utilização do Metacaulim promove os seguintes benefícios no concreto:

- Aumento das resistências mecânicas à compressão, tração e abrasão, em todas as idades, em até 40%;
- Redução e controle das reatividades álcali-agregado em até 95%;
- Aumento da resistência ao ataque por sulfato, ácidos e outros agentes químicos;
- Redução da penetração de cloretos em até 75%;
- Redução da corrosão de armaduras;
- Diminuição do calor de hidratação e da fissuração de origem térmica;
- Diminuição da porosidade (Figura 43) e permeabilidade em até 90%;
- Melhoria estética da superfície, controle da eflorescência, fissuração e desgaste;

Figura 43 - Microscopia eletrônica mostrando a diminuição da porosidade



Pasta de Cimento SEM Metacaulim



Pasta de Cimento COM Metacaulim

Fonte: <http://www.metacaulim.com.br> (2017)

5.1.3 Agregado miúdo

Como agregado miúdo utilizou-se areia fina lavada de origem sedimentar, extraída do leito do rio Poty, proveniente da cidade de Teresina – PI a qual é largamente utilizada na região (Figura 44).

Figura 44 - Agregado miúdo utilizado no CAA



Fonte: Próprio autor,2018

5.1.4 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado nessa pesquisa foi a brita, de origem basáltica, proveniente de uma pedreira localizada na cidade de Monsenhor Gil – PI a qual é largamente utilizada na região (Figura 45).

Figura 45 - Agregado graúdo utilizado no ensaio



Fonte: Próprio autor,2018

5.1.5 Água

Na produção dos concretos foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento de água da Cidade de Teresina - PI.

5.1.6 Aditivo

Foi utilizado um aditivo superplastificante de terceira geração, Glenium 51, que possui composição com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado, para a produção do CAA.

O Glenium 51 é um aditivo para concreto, líquido, pronto para o uso e livre de cloretos que é baseado em uma cadeia de éter poli carboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, propiciando superplastificação e alta redução do consumo de água, tornado o concreto com maior trabalhabilidade sem alteração do tempo de pega (AEWEB, 2017).

O aditivo deve ser adicionado após o final da mistura dos componentes do concreto, (cimento Portland, água e agregados, etc.), ou junto a segunda parte da água de amassamento que será utilizada na mistura. Deve ser utilizado nas dosagens de 0,2 a 1,0% sobre a massa do cimento. Estas dosagens são orientativas, sendo imprescindível a realização de testes laboratoriais e/ou de campo (AEWEB, 2017).

5.2 MÉTODOS DE ENSAIO PARA DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Neste tópico são apresentados os métodos de ensaios utilizados para determinação das características físicas dos materiais citados na seção anterior, procedimentos para a dosagem do Concreto Autoadensável com EPS e determinação das propriedades no estado fresco e endurecido.

5.2.1 Características físicas dos materiais

5.2.1.1 Cimento e Metacaulim

A característica física necessária para elaboração desse trabalho é a massa

específica, que foi calculada seguindo instruções da norma técnica NBR NM 23 (ABNT, 2003), citadas abaixo:

5.2.1.1.1 Determinação da massa específica

➤ Equipamentos utilizados (Figura 46):

- Frasco volumétrico de Le Chalelier;
- Balança com resolução de 0,01 g;
- Líquido que não reaja com o material (Utilizado Querosene);
- Termômetro;
- Banho termorregulador;

Figura 46 - Equipamentos utilizados na determinação da massa específica



Fonte: Próprio autor, 2018

➤ Procedimentos:

- Encher o frasco com auxílio de funil de haste longa com o líquido não reagente até o nível compreendido entre as marcas 0 e 1 cm³;
- Secar o interior do frasco acima do nível do líquido;
- Colocar o frasco em banho de água em posição vertical e mantê-lo submerso durante no mínimo 30 minutos;
- Registrar a primeira leitura (V1) com aproximação de 0,1 cm³;

- Pesar uma quantidade do material a ser ensaiado, no caso de cimento Portland a massa (m) é de aproximadamente 60 g.
- Introduzir o material em pequenas porções no frasco, com auxílio de funil de haste curta, atentando para que não ocorra aderência de material nas paredes internas do frasco, acima do nível do líquido;
- Retornar o frasco para o banho termorregulador por mais 30 minutos;
- Registrar a leitura final (V2) com aproximação de 0,1 cm³.

➤ Resultado:

A massa específica foi calculada com a seguinte equação:

$$\rho = \frac{m}{(V2 - V1)}$$

Equação 04

Onde:

ρ = massa específica do material, em g/cm³;

m = massa do material ensaiado, em g;

V2 - V1 = volume deslocado pela massa do material ensaiado em cm³.

5.2.1.2 Agregado miúdo

As características físicas do agregado miúdo foram feitas seguindo as seguintes normas técnicas:

- Determinação da composição granulométrica- NBR NM 248 (ABNT, 2003);
- Determinação da massa unitária - NBR NM 45 (ABNT, 2006);
- Determinação da massa específica - NBR NM 52 (ABNT, 2009).

5.2.1.2.1 Determinação da composição granulométrica

O ensaio de composição granulométrica foi executado seguindo instruções da norma técnica NBR NM 248 (ABNT, 2003), citadas abaixo:

➤ Equipamentos utilizados

- Balança;
- Estufa capaz de manter a temperatura no intervalo de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- Peneiras das séries normal e intermediárias, fundo e tampa;
- Agitador mecânico de peneiras (Figura 47);
- Escovas ou pincéis de cerdas de náilon e de cerdas de latão;
- Bandejas plásticas ou metálicas para a determinação de massa.

Figura 47 - Agitador mecânico para agregados



Fonte: Próprio autor, 2018

➤ Procedimentos

- Secar as amostras em estufa (100°C a 110°C), esfriar à temperatura ambiente;
- Encaixar as peneiras limpas, formando um conjunto, com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo, encaixando o fundo na base;
- Promover a agitação mecânica do conjunto por 10 a 15 minutos;
- Colocar o material retido em bandeja identificada. Escovar a peneira dos dois lados, colocando o resíduo interno na bandeja e o externo no fundo.
- Determinar a dimensão máxima característica ($D_{m\acute{a}x}$), em mm, como sendo a abertura da malha da peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5%;
- Determinar o módulo de finura (MF), com aproximação de 0,01, que é a soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal, dividida por 100.

➤ Resultados

Os resultados obtidos no ensaio de composição granulométrica do agregado miúdo: porcentagens retidas e acumuladas, módulo de finura e dimensão máxima.

5.2.1.2.2 Ensaio de cálculo da massa unitária

O ensaio de determinação da massa unitária da areia foi executado seguindo instruções da norma técnica NBR NM 45 (ABNT, 2006), citadas abaixo:

➤ Equipamentos utilizados

- Balança (Figura 48);
- Concha de agregados, de fundo plano;

- Estufa para 105 (± 5) °C.
- Régua metálica com comprimento mínimo de 50 cm.
- Recipiente metálico.

Figura 48 - Balança utilizada no ensaio de massa unitária da areia



Fonte: Próprio autor, 2017

➤ Procedimentos

- Determinar a massa do recipiente vazio, em kg;
- Enchê-lo até transbordar, usando concha de agregados;
- Nivelar a camada superior com a régua metálica
- Determinar a massa do recipiente cheio, em Kg.

➤ Resultado

Os valores do ensaio foram inseridos na seguinte equação:

$$P_{ap} = \frac{(M_{ar} - M_r)}{V}$$

Equação 05

Onde:

ρ_{ap} = massa unitária da areia, em kg/m³;

m_{ar} = massa do recipiente com a areia, em kg;

m_r = massa do recipiente vazio, em kg;

V = volume do recipiente, em dm³.

5.2.1.2.3 Ensaio de cálculo da massa específica.

O ensaio de determinação da massa unitária da areia foi executado seguindo instruções da norma técnica NBR NM 52 (ABNT, 2009), citadas abaixo:

➤ Equipamentos utilizados

- Balança;
- Molde tronco-cônico;
- Picnômetro com capacidade de 500 ml (Figura 49);
- Estufa;
- Bandeja metálica;
- Espátula;
- Funil;

Figura 49 - Picnômetro e funil utilizados no ensaio de massa específica areia



Fonte: Próprio autor, 2018

➤ Procedimentos

- A amostra para ensaio deve ser constituída por 0,50 Kg de agregado miúdo;
- Secar a areia utilizando a estufa;
- Colocar água no frasco de Chapman até a marca de 200 cm³ e em seguida introduzir a areia;
- Colocar o frasco em um banho termorregulador durante 1h;
- Efetuar a leitura do frasco.

➤ Resultado

O resultado foi inserido na seguinte equação:

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

Equação 06

Onde:

γ = massa específica da areia, em g/cm³;

L = leitura do nível atingido pela água no frasco após a adição da areia, em cm³.

5.2.1.3 Agregado graúdo

As características físicas do agregado graúdo foram feitas seguindo as seguintes normas técnicas:

- Agregados determinação da composição granulométrica- NBR NM 248 (ABNT, 2003);
- Determinação da massa unitária - NBR NM 45 (ABNT, 2006);
- Agregado graúdo- Determinação da massa específica - NBR NM 53 (ABNT, 2009);

5.2.1.3.1 Determinação da composição granulométrica

O ensaio de composição granulométrica foi executado de acordo com as recomendações da NBR NM 248, já mencionado na parte de agregado miúdo.

5.2.1.3.2 Ensaio de cálculo da massa unitária

A massa unitária solta da brita 0 foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 45:2006, já mencionado na parte de agregado miúdo.

5.2.1.3.3 Ensaio de cálculo da massa específica

A massa específica da brita foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 53:2009, citados abaixo:

➤ Aparelhos utilizados

- Balança; Estufa; Recipiente para colocar a amostra e tanque de água;
- Peneiras de ensaio; Pano.

➤ Procedimentos

- Colocar a amostra submersa em água por 24 horas;
- Após 24 horas retirar a mostra da água e secar superficialmente com um pano (Figura 50), e após medir a massa saturada com superfície seca;

Figura 50 - Agregado graúdo seco superficialmente



Fonte: Próprio autor, 2018

➤ Resultado

Os valores do ensaio foram inseridos na seguinte equação:

$$\gamma = \frac{A}{(C - B)}$$

Equação 07

Onde:

γ = massa específica do agregado gráúdo, em g/cm³;

A = massa do agregado gráúdo seco, em g;

B = massa do agregado gráúdo submerso, em g.

C = massa do agregado gráúdo saturado com superfície seca, em g.

5.2.1.4 Água e aditivo Glenium 51

Não foi realizado ensaios para a água pois a mesma foi considerada ideal para utilização em concreto visto que foi fornecida pela concessionária Água de Teresina. As informações técnicas necessárias do aditivo foram retiradas do site do fabricante e já foram mencionadas anteriormente.

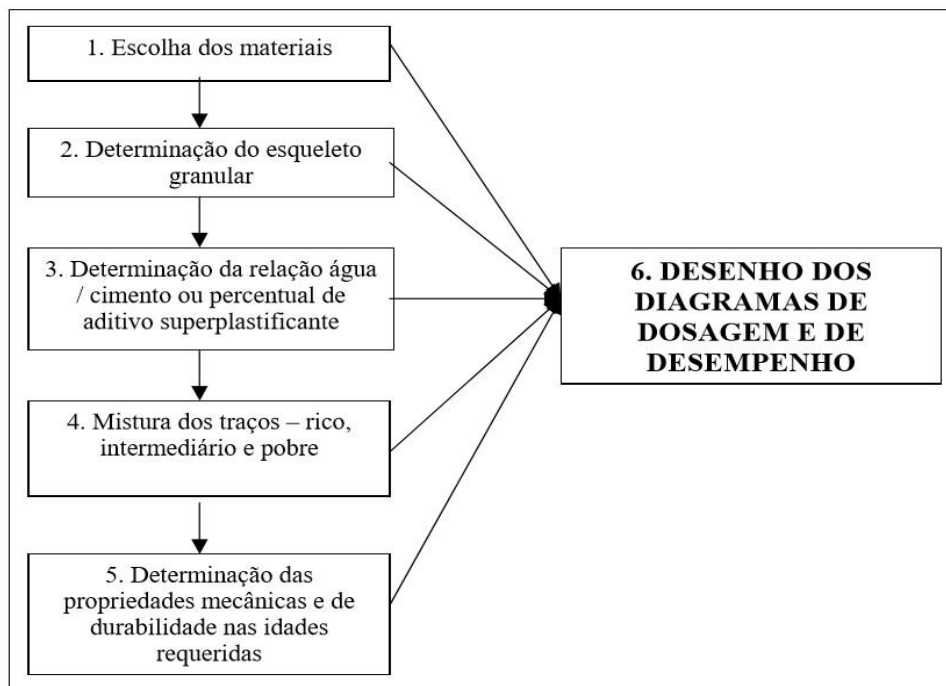
5.2.2 Dosagem do Concreto Autoadensável com EPS

5.2.2.1 Introdução

A dosagem experimental desse estudo foi baseada no método de Tutikian (2007), cujo esquema está mostrado na Figura 51, que segundo Tutikian (2007) é um método de dosagem para CAA experimental e permite a utilização de quaisquer materiais utilizados no concreto convencional, adições minerais e aditivos. Utiliza os conceitos de O'Reilly para determinar o empacotamento granular máximo e os conceitos de De Larrard para a escolha dos materiais. Utiliza o IPT/EPUSP como diagrama de dosagem para permitir os cálculos de qualquer CAA dentro da faixa avaliada da mesma família estudada, o percentual de aditivo superplastificante, relação água/cimento. Com a junção de todas essas teorias é possível a inclusão da

curva de custo no diagrama de dosagem, resistência de compressão axial e o diagrama de desempenho.

Figura 51 - Esquema para a dosagem do CAA



Fonte: Tutikian,2007

5.2.2.2 Escolha dos materiais

De acordo com Tutikian (2007), os materiais utilizados na confecção do CAA são os praticamente os mesmos do CCV (agregado graúdo, agregado miúdo, cimento, água) com o acréscimo de um material com granulometria inferior ao agregado miúdo (adição mineral), aditivo superplastificante e, opcionalmente, aditivo modificador de viscosidade (VMA).

Os materiais utilizados nesse estudo já foram descritos no item anterior.

5.2.2.3 Determinação do esqueleto granular

Este método se utiliza de uma sequência de testes de compacidade entre os materiais, primeiramente os de maior granulometria, são misturados, alterando-se a proporção entre eles. Então se verifica qual a proporção obteve maior massa unitária (equação 8) e menor índice de vazios (equação 9) dos

dois materiais de maior granulometria. Posteriormente, repete-se o teste adotando a proporção de menor índice de vazios e com o material de maior granulometria seguinte aos já testados, até se obter a melhor proporção entre todos os materiais, excetuando-se o cimento (TUTIKIAN, 2007).

$$\text{Mesp AB} = \frac{(\text{MespA} * \%A) + (\text{MespB} * \%B)}{100}$$

Equação 08

Onde:

MespAB = massa específica da mistura, em Kg/dm³;

MespA = massa específica da mistura do material A, em Kg/dm³;

MespB = massa específica da mistura do material B, em Kg/dm³;

%A = porcentagem do material A, em %;

%B = porcentagem do material B, em %.

$$V = \frac{(\text{MespAB} - \text{MunitAB}) * 100}{\text{MespAB}}$$

Equação 09

Onde:

V = índice de vazios, em %;

MespAB = massa específica da mistura, em Kg/dm³;

MunitAB = massa unitária da mistura, em Kg/dm³;

O Quadro 22 mostra um exemplo da determinação da porcentagem com o menor índice de vazios entre o agregado graúdo e o agregado miúdo, através do ensaio de compactação, onde observa-se que a proporção de 60% de brita zero e 40% de areia fina é a que possui o menor índice de vazios, sendo o ideal para a dosagem do CAA.

Nesse trabalho foram realizados dois ensaios de determinação do esqueleto granular: primeiro entre o agregado graúdo e o miúdo, depois entre a proporção dos dois agregados e a adição mineral (Metacaulim).

Quadro 22- Ensaio de compacidade para a determinação do esqueleto granular

Brita 0 (%)	Areia fina (%)	Massa da mistura (kg)	Volume do recipiente (dm ³)	Massa unitária mistura (kg/dm ³)	Massa específica brita 0 (kg/dm ³)	Massa específica areia fina (kg/dm ³)	Massa específica mistura (kg/dm ³)	Índice de vazios (%)
100	0	12,042	7,61	1,58	2,85	2,7	2,85	44,48
90	10	13,222	7,61	1,74	2,85	2,7	2,835	38,72
80	20	14,322	7,61	1,88	2,85	2,7	2,82	33,27
70	30	15,292	7,61	2,01	2,85	2,7	2,805	28,37
60	40	15,692	7,61	2,06	2,85	2,7	2,79	26,10
50	50	15,092	7,61	1,98	2,85	2,7	2,775	28,54
40	60	14,757	7,61	1,94	2,85	2,7	2,76	29,75
30	70	13,807	7,61	1,81	2,85	2,7	2,745	33,91
20	80	13,407	7,61	1,76	2,85	2,7	2,73	35,48
10	90	13,352	7,61	1,75	2,85	2,7	2,715	35,38
0	100	12,732	7,61	1,67	2,85	2,7	2,7	38,04

Fonte: Próprio autor, 2018

5.2.2.4 Determinação do fator água/cimento e do percentual do aditivo

O percentual do aditivo utilizado foi de 0,5% sobre a massa do cimento, seguindo recomendações do fabricante. A determinação do fator água cimento foi realizada experimentalmente até que o CAA obteve características de fluidez, coesão e habilidade passante, utilizando critérios da NBR 15823.

O Quadro 23 mostra os ensaios utilizados, propriedade avaliada e parâmetros de referência utilizados no estudo.

Quadro 23 - Propriedades, ensaios e parâmetros do CAA

PROPRIEDADE	ENSAIO UTILIZADO	PARÂMETRO DE VERIFICAÇÃO
Fluidez	Slump flow test	SF > 550mm
Coesão	L-box test	PL > 0,80
Habilidade passante	J-ring test	25mm < PJ1 < 50mm

Fonte: Próprio autor, 2018

5.2.2.5 Mistura dos traços: Rico, intermediário e fraco.

Nesta etapa da dosagem são confeccionados no mínimo três traços (um rico, um intermediário e um pobre) para a determinação das equações de comportamento e coeficientes de correlação para devida montagem do gráfico de dosagem e de desempenho. Para que todos os traços sejam inseridos em um mesmo gráfico e

sejam considerados de uma mesma família, o que se mantém fixo é o valor de aditivo superplastificante e as proporções entre os agregados, já que o teor de argamassa seca não será constante para todos os pontos (TUTIKIAN, 2007).

Foram dosados, seguindo os critérios da NBR 5738, os seguintes traços de referência:

- Rico: Teor de argamassa de 1:1;
- Intermediário: Teor de argamassa de 1:2;
- Pobre: Teor de argamassa de 1:3;

Após a dosagem de referência foi executado a substituição parcial em volume do agregado graúdo (brita 0) pelo agregado leve (EPS), nas proporções de 5,10,15,20,25,30,35 e 40%. Para cada traço, de referência ou com substituição parcial, foram moldados 7 copos de prova cilíndricos de 10cm de diâmetro e 20cm de comprimento. Totalizando 189 corpos de prova conforme Quadro 24.

Quadro 24 - Distribuição dos corpos de prova

TRAÇO DE REFERÊNCIA	ADIÇÃO DE EPS (%)	CORPOS DE PROVA
1 : 1	0	7
1 : 1	5	7
1 : 1	10	7
1 : 1	15	7
1 : 1	20	7
1 : 1	25	7
1 : 1	30	7
1 : 1	35	7
1 : 1	40	7
1 : 2	0	7
1 : 2	5	7
1 : 2	10	7
1 : 2	15	7
1 : 2	20	7
1 : 2	25	7
1 : 2	30	7
1 : 2	35	7
1 : 2	40	7
1 : 3	0	7
1 : 3	5	7
1 : 3	10	7
1 : 3	15	7
1 : 3	20	7
1 : 3	25	7
1 : 3	30	7
1 : 3	35	7
1 : 3	40	7

Fonte: Próprio autor, 2018

5.2.2.6 Determinação da resistência a compressão axial.

Para o ensaio de ruptura por compressão axial foram considerados os seguintes critérios:

- A cura foi executada por imersão em tanque de água durante um período de 28 dias;
- Foram utilizados os critérios da NBR 5739 para a execução da ruptura dos corpos de prova;
- A idade de ruptura foi 28 dias, pois é a referência na resistência a compressão do concreto;
- Foi utilizado a prensa hidráulica para a execução do ensaio.

5.2.2.7 Desenho do diagrama de dosagem e desempenho.

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008), o diagrama de dosagem consiste em relacionar:

- A resistência à compressão nas várias idades ensaiadas com a relação a/c no primeiro quadrante;
- A relação a/c com a proporção 1:m no segundo quadrante, onde m representa a soma de agregado miúdo, gráudo e adição mineral;
- No terceiro, a proporção 1:m com o custo e com o consumo de cimento por metro cúbico de concreto.
- No quarto é relacionado o teor de argamassa seca com o consumo de cimento.

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008), o consumo de cimento do traço será determinado pela equação 10.

$$MC = \frac{1000 - ar}{\left(\left(\frac{c}{\gamma c} \right) + \left(\frac{fp}{\gamma fp} \right) + \left(\frac{a}{\gamma a} \right) + \left(\frac{p}{\gamma p} \right) + \left(\frac{a}{agl} \right) \right)}$$

Equação 10

Onde:

MC = Consumo de cimento;

ar = teor de ar incorporado;

c = relação de cimento/aglomerante em massa;
 f_p = relação de fino pozolânico/aglomerante em massa; a
 = relação de agregado miúdo/aglomerante em massa; p
 = relação de agregado graúdo/aglomerante em massa;
 a/agl = relação de água/aglomerante em massa;
 γ_c = massa específica do cimento;
 γ_{fp} = massa específica do fino pozolânico;
 γ_a = massa específica do agregado miúdo;
 γ_p = massa específica do agregado graúdo.

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008), o teor de argamassa será calculado pela equação 11.

$$\alpha = \frac{(1 + a)}{(1 + a + p)}$$

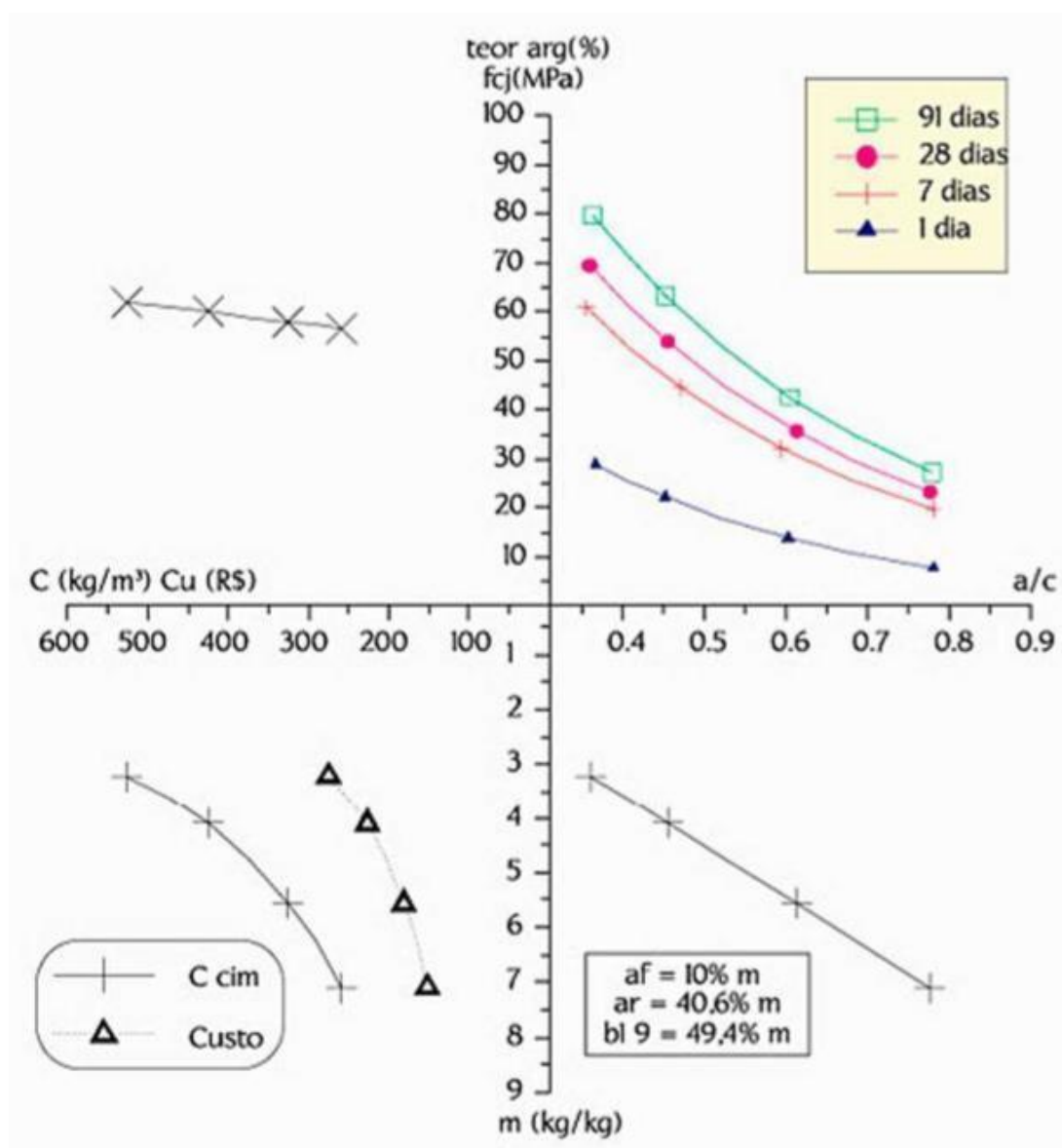
Equação 11

Onde:

α = teor de argamassa seca;
 a = relação de agregado miúdo/aglomerante em massa;
 p = relação de agregado graúdo/aglomerante em massa.

A Figura 52 ilustra um exemplo do diagrama de dosagem, que deve ser usado no sentido horário a partir da resistência à compressão até o teor de argamassa. Ou no sentido anti-horário do consumo de cimento até a resistência à compressão nas diversas idades. A curva de custo não pode ser relacionada com outra propriedade (não deve ser utilizada, por exemplo, para determinar o teor de argamassa) servindo, apenas, para sua própria determinação. No diagrama é informado ainda a porcentagem de cada agregado e adição mineral, item constante para todos os pontos da família. (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Figura 52- Exemplo de diagrama de dosagem



Fonte: Tutikian; Dal Molin, 2008

5.3 VERIFICAÇÃO DA SEGREGAÇÃO DO EPS NO CAA

A avaliação da segregação do EPS no CAA foi feita em duas etapas: Primeiro no concreto no estado fresco, durante a dosagem e ensaios de fluidez, coesão e habilidade passante, através de aferição visual para identificar possível segregação e num segundo momento no estado endurecido após a ruptura dos corpos de provas possibilitando assim a visualização da distribuição das pérolas de EPS. Todos os resultados dessa seção foram apresentados por meio de registro fotográfico.

5.4 CÁLCULO DA MASSA ESPECÍFICA DO CAA

A massa específica com CAA com EPS foi calculada de acordo com critérios da NBR 9833 - Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar (2008) com o acréscimo do agregado leve de acordo com a equação 12.

$$\gamma_{ca} = \frac{M_c + M_m + M_g + M_l + M_{fp} + M_a}{\left(\frac{M_c}{\gamma_c}\right) + \left(\frac{M_m}{\gamma_m}\right) + \left(\frac{M_l}{\gamma_l}\right) + \left(\frac{M_g}{\gamma_g}\right) + \left(\frac{M_{fp}}{\gamma_{fp}}\right) + m_a}$$

Equação 12

Onde:

γ_{ca} = massa específica do concreto;

M_c = massa do aglomerante;

M_m = massa do agregado miúdo seco;

M_g = massa do agregado graúdo seco;

M_l = massa do agregado leve seco;

M_{fp} = massa do fino pozolânico seco;

M_a = massa de água;

γ_c = massa específica do cimento;

γ_m = massa específica do agregado miúdo;

γ_l = massa específica do agregado leve;

γ_g = massa específica do agregado graúdo;

γ_{fp} = massa específica do fino pozolânico;

5.5 AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE EPS NA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E NA MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO.

Foram desenvolvidos dois gráficos para verificar a influência da adição do EPS no CAA, em relação a resistência a compressão axial e em relação a massa específica. No eixo das abcissas foram apresentadas as porcentagens de adição de EPS e na ordenadas a resistência a compressão e a massa específica. Um Quadro mostra o fator de eficiência para cada traço utilizado: rico, intermediário e forte, em função da porcentagem de adição de EPS no CAA. Foram utilizados os softwares Autocad e Excel para representação dos diversos gráficos do trabalho.

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os seguintes resultados: caracterização dos componentes do CAA, dosagem do Concreto Autoadensável com EPS, verificação da viabilidade do uso do Poliestireno como agregado leve no concreto autoadensável, resultados dos ensaios no estado fresco para a confirmação que o concreto é autoadensável. Apresenta ainda resultados dos ensaios do CAA no estado endurecido apresentado os gráficos que mostraram qual a influência da substituição parcial do agregado graúdo por pérolas de Poliestireno expandido na resistência a compressão axial e na massa específica do concreto.

6.1 ENSAIOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO CAA

6.1.1 Cimento e Metacaulim

A massa específica do cimento foi calculada seguindo instruções da norma técnica NBR NM 23 (ABNT, 2003). A Figura 53 mostra o equipamento utilizados no ensaio. O valor calculado da massa específica do cimento é de 3,03 g/cm³ (kg/dm³), conforme descrito na expressão abaixo:

$$\rho = 60 \text{ g} / (20,0 - 0,20) \text{ cm}^3 = 3,03 \text{ g/cm}^3.$$

Figura 53 - Aparelhos utilizados no ensaio de determinação da massa específica do cimento



Fonte: Próprio autor, 2018

O valor calculado da massa específica da adição mineral Metacaulim é de

2,52 g/cm³ (kg/dm³), conforme descrito na expressão abaixo:

$$\rho = 60 \text{ g} / (24,0 - 0,22) \text{ cm}^3 = 2,52 \text{ g/cm}^3.$$

6.1.2 Agregado miúdo

6.1.2.1 Ensaio de composição granulométrica

O ensaio de composição granulométrica foi executado seguindo instruções da norma técnica NBR NM 248 (ABNT, 2003). Os resultados obtidos no ensaio de composição granulométrica do agregado miúdo: porcentagens retidas e acumuladas, módulo de finura e dimensão máxima são apontados no Quadro 25 e na Figura 54.

Quadro 25 – Análise granulométrica do agregado miúdo

Abertura das peneiras (mm)	Areia utilizada: Quantidade retida acumulada (%)
#4,75	0
#2,36	1
#1,18	2
#0,60	5
#0,30	83
#0,15	98
Fundo	99
Módulo de finura	2,88
Dimensão máxima	0,60

Fonte: Próprio autor, 2018

O ensaio mostra uma pequena variação na granulometria do agregado miúdo utilizado, sendo ideal para o CAA pois vai diminuir a demanda por água melhorando na trabalhabilidade do concreto. O valor de 2,88 para o módulo de finura está dentro do recomendado pois a NBR NM 248 (ABNT, 2003) cita que valores entre 2,50 e 3,00 são normais para o agregado miúdo. Por ser um valor de módulo de finura próximo do limite, o agregado influenciara positivamente de forma a incrementar a resistência a compressão axial.

Figura 54 - Resultado ensaio granulometria agregado miúdo



Fonte: Próprio autor, 2018

6.1.2.2 Ensaio de determinação da massa unitária

O ensaio de determinação da massa unitária da areia foi executado seguindo instruções da norma técnica NBR NM 45 (ABNT, 2006). A Figura 55 mostra a realização do ensaio.

Figura 55 - Ensaio de massa unitária da areia



Fonte: Próprio autor, 2018

O valor calculado da massa unitária foi de 1,58 kg/dm³, conforme descrito na

expressão abaixo:

$$\rho_{ap} = (25,100 - 3,194) / 13,89 \text{ dm}^3 = 1,58 \text{ kg/dm}^3.$$

6.1.2.3 Ensaio de cálculo da massa específica.

O ensaio de determinação da massa unitária da areia foi executado seguindo instruções da norma técnica NBR NM 52 (ABNT, 2009). A Figura 56 mostra uma das etapas da realização do ensaio.

Figura 56- Leitura no Picnômetro



Fonte: Próprio autor, 2018

O valor calculado da massa específica foi de 2,63 kg/dm³, conforme descrito na expressão abaixo:

$$\gamma = 500 / (390 - 200) = 2,63 \text{ g/cm}^3 \text{ (kg/dm}^3\text{)}.$$

6.1.3 Agregado graúdo

6.1.3.1 Ensaio de composição granulométrica

O ensaio de composição granulométrica foi executado de acordo com as recomendações da NBR NM 248. Os resultados obtidos no ensaio de composição

granulométrica são mostrados no Quadro 26 e na Figura 57.

Quadro 26 – Análise granulométrica do agregado graúdo

Abertura das peneiras (mm)	brita utilizada: Quantidade retida acumulada (%)
#19	0
#12,5	1
#9,5	10
#6,3	67
#4,75	83
#2,36	99
Fundo	100
Módulo de finura	3,60
Dimensão máxima	9,5

Fonte: Próprio autor, 2018

Figura 57 - Resultado ensaio granulometria agregado graúdo



Fonte: Próprio autor, 2018

O resultado do ensaio de granulometria, apresentando diâmetro máximo de

9,5mm, mostra que a brita utilizado no ensaio está de acordo com Gomes; Barros (2009), pois segundo eles a brita utilizada no CAA deve possuir diâmetro máximo de 12,5mm e a dimensão máxima característica do agregado graúdo seja inferior a 2/3 do espaçamento entre barras ou grupos de barras e a 3/4 do cobrimento mínimo de concreto às armaduras. Na prática, isso implica em não utilizar tamanhos máximos superiores a 19 mm, sendo habituais os tamanhos compreendidos entre 9,5 e 19 mm.

6.1.3.2 Ensaio de cálculo da massa unitária

A massa unitária solta da brita foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 45:2006. A Figura 58 mostra a realização do ensaio. O valor calculado da massa unitária foi de 1,45 kg/dm³, conforme descrito na expressão abaixo:

$$\rho_{ap} = (23,300 - 3,194) / 13,89 \text{ dm}^3 = 1,45 \text{ kg/dm}^3.$$

Figura 58 - Determinação da massa do recipiente com o agregado graúdo



Fonte: Próprio autor, 2018

6.1.3.3 Ensaio de cálculo da massa específica

A massa específica da brita 0 foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 53:2009. O valor calculado da massa específica foi de 2,75 g/cm³ (kg/dm³), conforme descrito na expressão abaixo: Figura 59 mostra as etapas da realização do ensaio.

$$\gamma = (1.000) / (1.016,76 - 652,55) \text{ dm}^3 = 2,75 \text{ g/cm}^3 \text{ (kg/dm}^3\text{)}.$$

Figura 59 - Agregado graúdo: seco superficialmente e submerso



Fonte: Próprio autor, 2018

6.1.4 Poliestireno expandido

A massa específica do Poliestireno expandido foi determinada utilizando dados fornecidos pelo fabricante do mesmo. O valor é de 0,016 g/cm³ (kg/dm³).

6.2 ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM DO CCA COM EPS

6.2.1 Esqueleto granular

Essa parte do estudo é de fundamental importância, pois é quando a proporção entre os agregado e adição mineral é determinada afim de minimizar problemas de coesão do concreto autoadensável de acordo com o estudo proposto por Tutikian (2007).

O Quadro 27 mostra o resumo dos ensaios do aglomerante, agregado e da adição mineral que foram utilizados nesse estudo na determinação do esqueleto granular.

Quadro 27 – Massa específica e unitária dos componentes do CAA

	Cimento	Adição mineral: Metacaulim	Agregado miúdo	Agregado Graúdo	EPS
Massa específica (kg/dm ³)	3,03	2,52	2,63	2,75	0,016
Massa unitária (kg/dm ³)	-	-	1,58	1,45	

Fonte: Próprio autor, 2018

O ensaio de compacidade foi realizado de dois em dois materiais (da maior granulometria para a menor), primeiro foi executado entre a brita zero e a areia fina, em seguida entre a proporção encontrada para a mistura entre brita e areia e a adição mineral Metacaulim.

No ensaio de compacidade entre a brita e a areia, apresentado no Quadro 28, iniciou-se de substituições percentuais com variação decimal, sendo possível observar que a composição ótima foi de 60% de brita e 40% de areia, resultando em um índice de vazio de 8,19% que é o menor de todas as proporções estudadas e de acordo com Tutikian (2007) é ideal para a utilização a fim de evitar problemas por falta de coesão.

Quadro 28 – Ensaio de compacidade entre a brita e a areia

Brita (%)	Areia (%)	Massa da mistura (kg)	Volume do recipiente (dm ³)	Massa unitária mistura (kg/dm ³)	Massa específica (kg/dm ³)	Massa específica areia (kg/dm ³)	Massa específica mistura (kg/dm ³)	Índice de vazios (%)
100	0	16,95	7,61	2,23	2,75	2,63	2,75	19,02
90	10	17,43	7,61	2,29	2,75	2,63	2,738	16,36
80	20	18,48	7,61	2,43	2,75	2,63	2,726	10,93
70	30	18,62	7,61	2,45	2,75	2,63	2,714	9,86
60	40	18,88	7,61	2,48	2,75	2,63	2,702	8,19
50	50	18,72	7,61	2,46	2,75	2,63	2,69	8,57
40	60	18,44	7,61	2,42	2,75	2,63	2,678	9,53
30	70	18,07	7,61	2,37	2,75	2,63	2,666	10,95
20	80	17,76	7,61	2,33	2,75	2,63	2,654	12,08
10	90	17,48	7,61	2,30	2,75	2,63	2,642	13,07
0	100	17,24	7,61	2,27	2,75	2,63	2,63	13,87

Fonte: Próprio autor, 2018

No ensaio de compacidade entre a brita mais a areia e o Metacaulim, apresentado no Quadro 29, iniciou-se com substituições percentuais com variação decimal, onde é possível observar que a composição ótima foi de 90% de brita mais a areia e 10% de Metacaulim, resultando em um índice de vazio de 4,78% que é o menor de todas as proporções estudadas ideal para a utilização a fim de evitar problemas por falta de coesão.

Quadro 29 – Ensaio de compacidade entre a brita mais a areia e Metacaulim

Brita + areia (%)	meta cauli m (%)	Massa da mistura (kg)	Volume do recipiente (dm ³)	Massa unitária mistura (kg/dm ³)	Massa específica brita + areia (kg/dm ³)	Massa específica metacaulim (kg/dm ³)	Massa específica mistura (kg/m ³)	Índice de vazios (%)
100	0	19,27	7,61	2,53	2,702	2,52	2,702	6,30
90	10	19,45	7,61	2,56	2,702	2,52	2,6838	4,78
80	20	19,15	7,61	2,52	2,702	2,52	2,6656	5,61
70	30	18,99	7,61	2,50	2,702	2,52	2,6474	5,75
60	40	18,49	7,61	2,43	2,702	2,52	2,6292	7,60
50	50	18,27	7,61	2,40	2,702	2,52	2,611	8,06
40	60	18,01	7,61	2,37	2,702	2,52	2,5928	8,74
30	70	17,79	7,61	2,34	2,702	2,52	2,5746	9,21
20	80	17,48	7,61	2,30	2,702	2,52	2,5564	10,16
10	90	17,03	7,61	2,24	2,702	2,52	2,5382	11,84
0	100	15,58	7,61	2,05	2,702	2,52	2,52	18,77

Fonte: Próprio autor, 2018

Os traços unitários do CAA estão representados no Quadro 30, no qual o fator

de água/cimento e o teor de argamassa estão representados para os três traços: 1:1, 1:2 e 1:3. De acordo com Tutikian (2007), podemos considerar que os três traços pertencem à mesma família pois embora o teor de argamassa seja diferente observa-se que a porcentagem de aditivo permanece o mesmo.

Quadro 30 – Traço unitário do CAA

Família	Traço em massa				a/c	adt (%)	α (%)
	c	m	a	b			
1	1	0,10	0,41	0,50	0,63	0,50	73,95%
2	1	0,20	0,81	0,99	0,58	0,50	64,64%
3	1	0,30	1,08	1,62	0,54	0,50	56,22%

Legenda : c - cimento; m - metacaulim; a - areia; b - brita; a/c - relação de água/cimento, adt (%) - aditivo; α - teor de argamassa

Fonte: Próprio autor, 2018

6.3 ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO AS PROPRIEDADE NO ESTADO FRESCO DO CAA

O teor de água/cimento foi determinado experientemente através dos ensaios do CAA estado fresco: Slump flow test; l-box test; j-ring test. O Quadro 31 mostra os resultados dos ensaios e a Figura 60 mostra a execução desses ensaios em laboratório.

Os resultados para o ensaio, Slump flow test, dos três traços de referência apresentaram resultados entre 652 mm e 716 mm, e de acordo com a NBR 15823-2 o valor mínimo para o ensaio é 550mm, podendo, portanto, ser considerados autoadensáveis com diversas aplicações, como por exemplo em: Revestimento de túneis, Paredes, Vigas, Pilares e outras estruturas.

Os ensaios do J-ring test mostram redução de valores em relação ao ensaio de Slump flow test, o que já era esperando pois nessa etapa são acrescentadas as dezesseis barras de aço, os resultados obtidos mostram que o concreto pode ser considerado autoadensável, de acordo com a NBR 15823-3 o ensaio deve possuir valores entre 250mm a 500mm, podendo ser utilizado em vigas, pilares e lajes.

No ensaio L-box os resultados foram coerentes com os demais ensaios do CAA no estado fresco, todos os valores foram superiores ao valor de referência que é 0,80. O concreto com o traço 1:1 e a adição de 40% de EPS obteve o maior valor

0,89, pois a quantidade de agregado leve é maior e o traço considerado é o que possui a menor quantidade de agregado graúdo. Esses resultados mostram que o concreto pode ser considerado CAA, de acordo com a NBR 15823-4, sendo aplicado, de acordo com o Quadro 10 deste trabalho, para a maioria das aplicações corrente: Vigas, Pilares e pré-moldados.

Quadro 31 – Resultado ensaios CAA estado fresco

TRAÇO DE REFERÊNCIA	ADIÇÃO DE EPS (%)	Slump flow test (mm)	L-box test	J-ring test (mm)
1 : 3	0	652	0,82	402
1 : 3	5	660	0,82	405
1 : 3	10	668	0,83	406
1 : 3	15	657	0,83	408
1 : 3	20	672	0,83	411
1 : 3	25	667	0,85	418
1 : 3	30	688	0,86	418
1 : 3	35	691	0,87	422
1 : 3	40	708	0,87	427
1 : 2	0	655	0,83	405
1 : 2	5	663	0,83	408
1 : 2	10	671	0,84	409
1 : 2	15	660	0,84	411
1 : 2	20	675	0,84	414
1 : 2	25	670	0,86	421
1 : 2	30	691	0,86	421
1 : 2	35	694	0,88	425
1 : 2	40	711	0,89	430
1 : 1	0	660	0,83	407
1 : 1	5	668	0,83	410
1 : 1	10	676	0,84	411
1 : 1	15	665	0,84	413
1 : 1	20	680	0,85	416
1 : 1	25	675	0,86	423
1 : 1	30	696	0,87	423
1 : 1	35	699	0,87	427
1 : 1	40	716	0,89	432

Fonte: Próprio autor, 2018

De acordo com os resultados apresentados acima é possível perceber que a adição de EPS em todos os três traços de referência provocou um incremento nas características de fluidez e habilidade passante, o que se explica pela redução da massa específica do concreto autoadensável devido a substituição do agregado graúdo pelo agregado leve. Todos os valores dos ensaios estão dentro dos valores estabelecidos na NBR 15823 para que o concreto possa ser considerado autoadensável, podendo, portanto, ser utilizado em aplicações correntes.

Figura 60 - Ensaio CAA no estado fresco

Fonte: Próprio autor, 2018

6.4 ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADE NO ESTADO ENDURECIDO DO CAA

Após a realização dos ensaios do CAA no estado fresco foram moldados os corpos de prova (Figura 61) e levados a cura submersa por vinte e oito dias para então promover o ensaio de ruptura de compressão axial. Durante a moldagem foi possível observar que o agregado leve (EPS) apresentou boa trabalhabilidade frente ao CAA, fato que pode ser explicado pela viscosidade presente em concretos deste tipo e assim não existiu problemas com segregação. Os resultados dos três traços de referência são apresentados a seguir.

Figura 61 - Moldagem do CAA

Fonte: Próprio autor, 2018

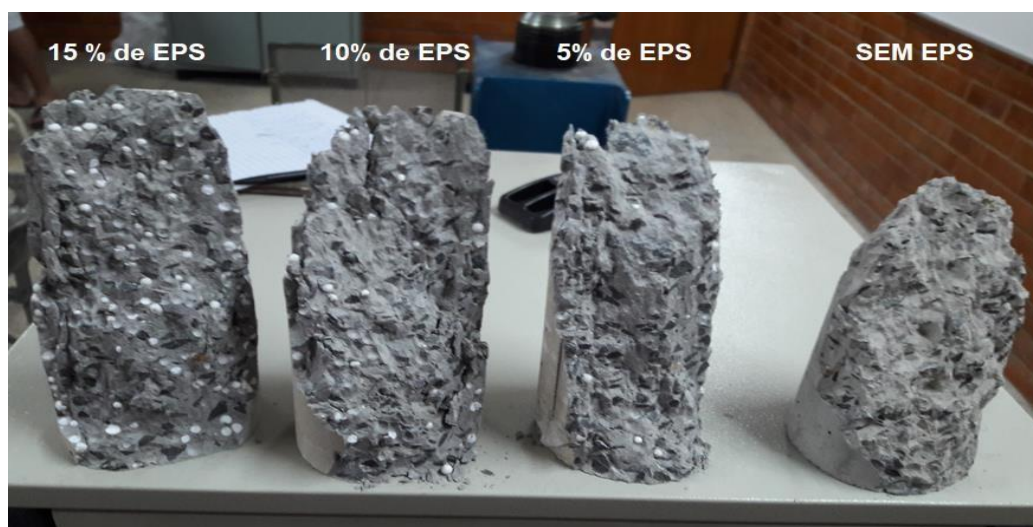
6.4.1 Traço de referência 1:3

O Quadro 32 e a Figura 62 mostram os resultados do ensaio de compressão para o traço 1:3 com as porcentagens de adição de EPS utilizadas neste trabalho.

Quadro 32 – Resultado ensaios CAA estado endurecido traço 1:3

TRAÇO DE REFERÊNCIA EM PESO 1:3									
ADIÇÃO DE EPS (%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Amostra 01 (Mpa)	47,18	31,88	38,03	36,27	27,58	25,14	22,75	31,20	21,41
Amostra 02 (Mpa)	39,07	43,23	31,89	38,37	34,14	22,76	31,94	24,11	30,85
Amostra 03 (Mpa)	38,65	32,36	26,03	35,54	26,19	29,20	33,00	28,28	32,95
Amostra 04 (Mpa)	37,18	33,91	40,76	34,04	24,79	30,51	28,04	28,27	21,77
Amostra 05 (Mpa)	41,29	37,35	38,02	28,74	41,73	36,17	37,63	25,29	23,71
Amostra 06 (Mpa)	35,69	35,75	34,00	31,79	25,03	36,68	24,69	23,41	21,71
Amostra 07 (Mpa)	46,29	33,56	31,38	30,91	42,43	39,00	22,97	22,47	22,17
Média (Mpa)	40,76	35,43	34,30	33,67	31,70	31,35	28,72	26,15	24,94

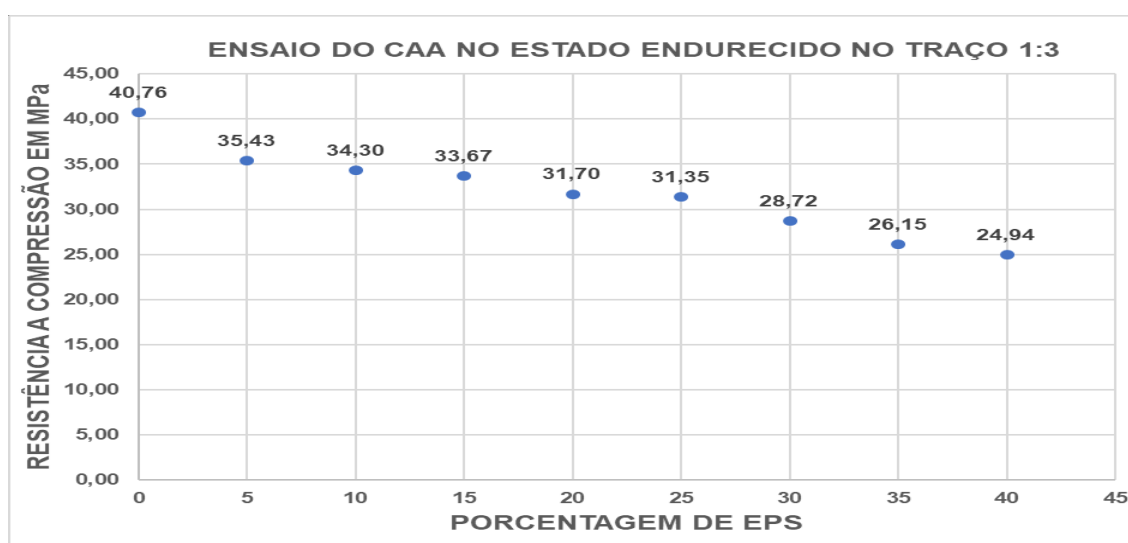
Fonte: Próprio autor, 2018

Figura 62 - Ruptura CAA traço 1:3

Fonte: Próprio autor, 2018

É possível observar no Quadro acima que todas as porcentagens de adição de EPS, para o traço 1:3, nas condições estabelecidas neste trabalho, podem ser utilizadas como concreto estrutural, pois de acordo com a NBR 6118 (2014) o concreto para ser considerado estrutural deve apresentar resistência característica a compressão axial de pelo menos 20 MPa.

O gráfico 1 mostra a mudança na resistência a compressão axial do CAA em função da adição de EPS.

Gráfico 01 – Resistência X porcentagem de adição de EPS no CAA traço 1:3

Fonte: Próprio autor, 2018

De acordo com o gráfico é possível observar que a resistência tem uma queda

mais acentuada quando se acrescenta 5% de EPS e que com a adição de 40% o concreto consegue atingir 61,18% da resistência inicial, quando não é utilizado o agregado leve.

O Quadro 33 e o gráfico 2 mostram a variação da massa específica do concreto autoadensável em função da adição de Poliestireno. É possível observar uma queda praticamente linear na massa específica e que com a adição de 40% de EPS o concreto diminui 17,43% da massa específica inicial, quando não é utilizado o agregado leve.

Quadro 33 – Massa específica CAA traço 1:3

TRAÇO DE REFERÊNCIA EM PESO 1:3								
ADIÇÃO DE EPS (%)	Massa Específica (kg/m³)	Cimento (kg/m³)	Metacaulim (kg/m³)	Areia (kg/m³)	brita (kg/m³)	Água (kg/m³)	Aditivo (kg/m³)	EPS (kg/m³)
0	2.276,99	492,20	147,66	598,02	730,92	265,79	2,46	0
5	2.225,32	492,20	147,66	598,02	694,37	265,53	2,46	0,40
10	2.174,02	492,20	147,66	598,02	657,83	265,53	2,46	0,80
15	2.123,40	492,20	147,66	598,02	621,28	265,53	2,46	1,20
20	2.073,46	492,20	147,66	598,02	584,73	265,53	2,46	1,60
25	2.024,17	492,20	147,66	598,02	548,19	265,53	2,46	2,00
30	1.975,54	492,20	147,66	598,02	511,64	265,53	2,46	2,40
35	1.927,53	492,20	147,66	598,02	475,10	265,53	2,46	2,80
40	1.880,15	492,20	147,66	598,02	438,55	265,53	2,46	3,20

Fonte: Próprio autor, 2018

Gráfico 02 – Massa específica CAA traço 1:3



Fonte: Próprio autor, 2018

O Quadro 34 mostra a variação do fator de eficiência do concreto

autoadensável em função da adição de Poliestireno. É possível observar que com a adição de 40% de EPS o valor do fator de eficiência é 13,26 MPa.dm³/Kg, que equivale a 53,44% do valor referência para o concreto ser considerado leve e de alto desempenho (25 MPa.dm³/Kg). Essa porcentagem se justifica, pois, o concreto desenvolvido neste trabalho não é um leve, apenas substitui parcialmente (de 0 a 40%) o agregado graúdo pelo EPS.

Quadro 34 – Fator de eficiência do CAA traço 1:3

TRAÇO DE REFERÊNCIA EM PESO 1:3									
ADIÇÃO DE EPS (%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
FATOR DE EFICIÊNCIA (MPA .dm ³ /Kg)	17,90	15,92	15,78	15,85	15,29	15,49	14,54	13,56	13,26

Fonte: Próprio autor,2018

6.4.2 Traço de referência 1:2

O Quadro 35 e Figura 63 mostram os resultados do ensaio de compressão para o traço 1:2 com as porcentagens de adição de EPS utilizadas neste trabalho.

Quadro 35 – Resultado ensaios CAA estado endurecido traço 1:2

TRAÇO DE REFERÊNCIA EM PESO 1:2									
ADIÇÃO DE	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Amostra 01 (Mpa)	37,21	28,13	28,56	25,81	26,33	18,99	18,44	20,62	12,33
Amostra 02 (Mpa)	36,12	26,32	32,79	21,33	19,28	16,45	18,92	18,43	18,45
Amostra 03 (Mpa)	35,98	31,39	25,12	30,45	19,57	25,37	22,68	15,66	16,27
Amostra 04 (Mpa)	30,15	35,66	25,99	28,84	28,95	22,22	15,71	14,19	16,88
Amostra 05 (Mpa)	34,58	26,42	23,88	20,19	20,73	15,78	16,82	16,89	15,14
Amostra 06 (Mpa)	35,44	26,15	23,98	20,35	21,89	19,45	17,53	14,55	15,19
Amostra 07 (Mpa)	36,89	33,56	26,00	21,19	19,64	17,48	15,49	15,85	12,47
Média (Mpa)	35,20	29,66	26,62	24,02	22,34	19,39	17,94	16,60	15,25

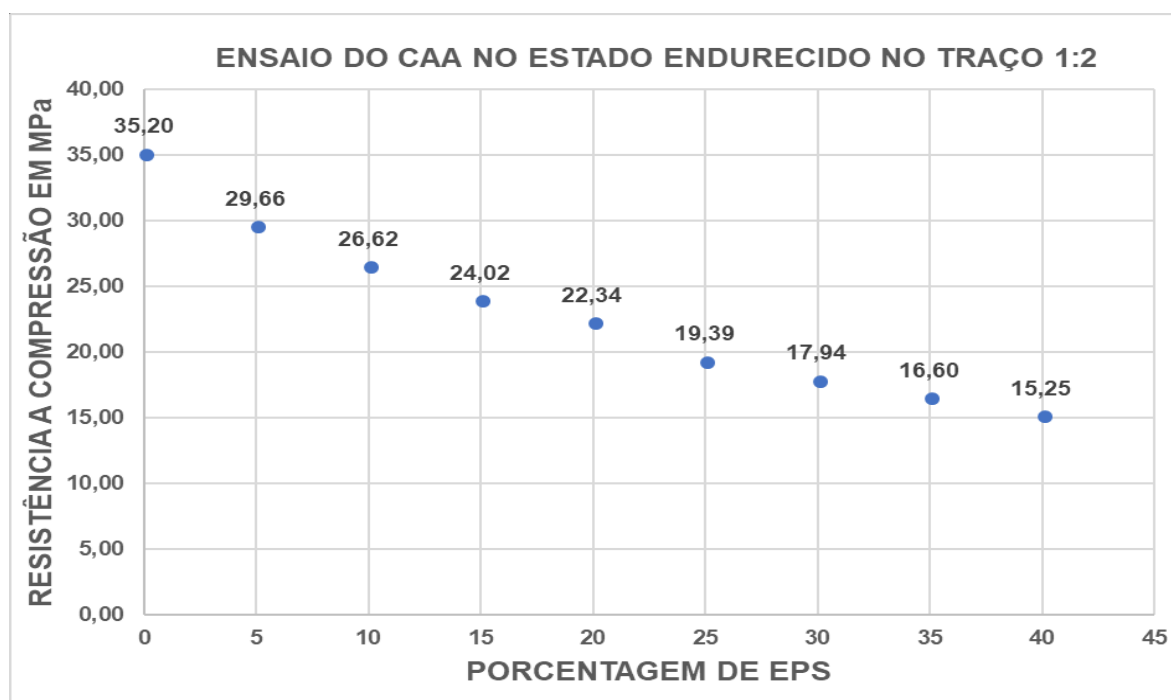
Fonte: Próprio autor,2018

Figura 63 – Ruptura CAA traço 1:2

Fonte: Próprio autor,2018

De acordo com o Quadro 30 os concretos com adição superior a 20% não podem ser considerados estrutural pois possuem característica a compressão axial de inferior a 20 MPa.

O gráfico 3 mostra a mudança na resistência a compressão axial do CAA em função da adição de EPS.

Gráfico 03 – Resistência X porcentagem de adição de EPS no CAA traço 1:2

Fonte: Próprio autor,2018

Similar ao gráfico de traço 1:3, é possível observar que a resistência tem uma

queda mais acentuada quando se acrescenta 5% de EPS. Com a adição de 40% o concreto consegue atingir 43,32% da resistência inicial, mostrando uma queda mais acentuada para esse traço.

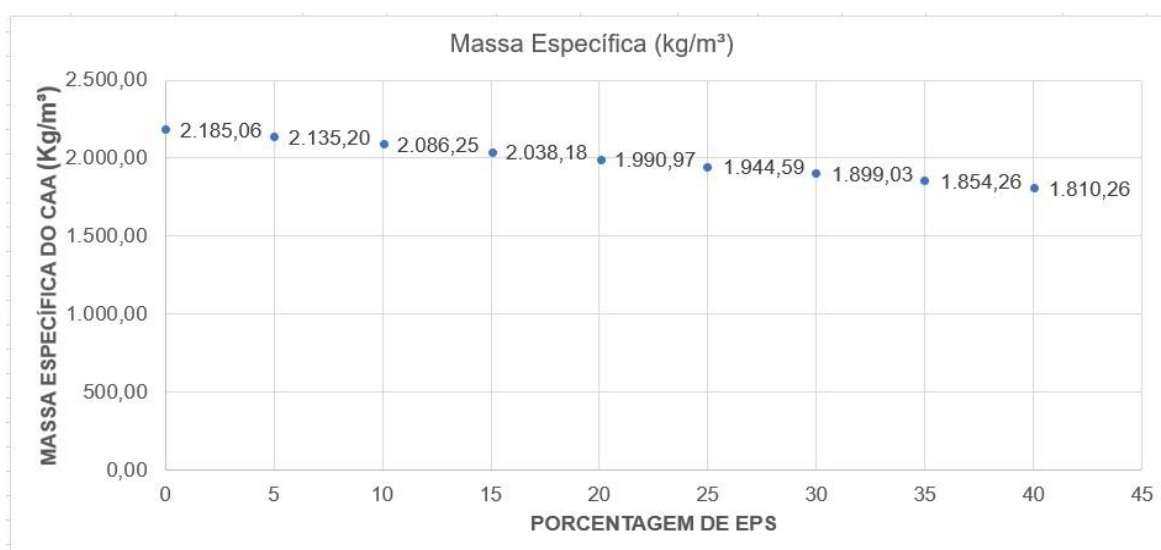
O Quadro 36 e o gráfico 4 mostram a variação da massa específica do concreto autoadensável em função da adição de Poliestireno. É possível observar uma queda praticamente linear na massa específica e que com a adição de 40% de EPS o concreto diminui 17,45% da massa específica inicial, quando não é utilizado o agregado leve.

Quadro 36 – Massa específica CAA traço 1:2

TRAÇO DE REFERÊNCIA EM PESO 1:2								
ADIÇÃO DE EPS (%)	Massa Específica (kg/m³)	Cimento (kg/m³)	Metacaulim (kg/m³)	Areia (kg/m³)	brita (kg/m³)	Água (kg/m³)	Aditivo (kg/m³)	EPS (kg/m³)
0	2.185,06	605,92	121,18	490,79	599,86	327,20	3,03	0
5	2.135,20	605,92	121,18	490,79	569,87	327,20	3,03	0,40
10	2.086,25	605,92	121,18	490,79	539,87	327,20	3,03	0,80
15	2.038,18	605,92	121,18	490,79	509,88	327,20	3,03	1,20
20	1.990,97	605,92	121,18	490,79	479,89	327,20	3,03	1,60
25	1.944,59	605,92	121,18	490,79	449,89	327,20	3,03	2,00
30	1.899,03	605,92	121,18	490,79	419,90	327,20	3,03	2,40
35	1.854,26	605,92	121,18	490,79	389,91	327,20	3,03	2,80
40	1.810,26	605,92	121,18	490,79	359,91	327,20	3,03	3,20

Fonte: Próprio autor,2018

Gráfico 04 – Massa específica CAA traço 1:2



Fonte: Próprio autor,2018

O Quadro 37 mostra a variação do fator de eficiência do concreto

autoadensável em função da adição de Poliestireno. É possível observar que com a adição de 40% de EPS o valor do fator de eficiência é 8,42 MPa.dm³/Kg, que equivale a 55,55% do valor referência para o concreto ser considerado leve e de alto desempenho (25 MPa.dm³/Kg).

Quadro 37 – Fator de eficiência do CAA traço 1:2

TRAÇO DE REFERÊNCIA EM PESO 1:2									
ADIÇÃO DE EPS (%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
FATOR DE EFICIÊNCIA (MPa .dm ³ /Kg)	16,11	13,89	12,76	11,79	11,22	9,97	9,45	8,95	8,42

Fonte: Próprio autor,2018

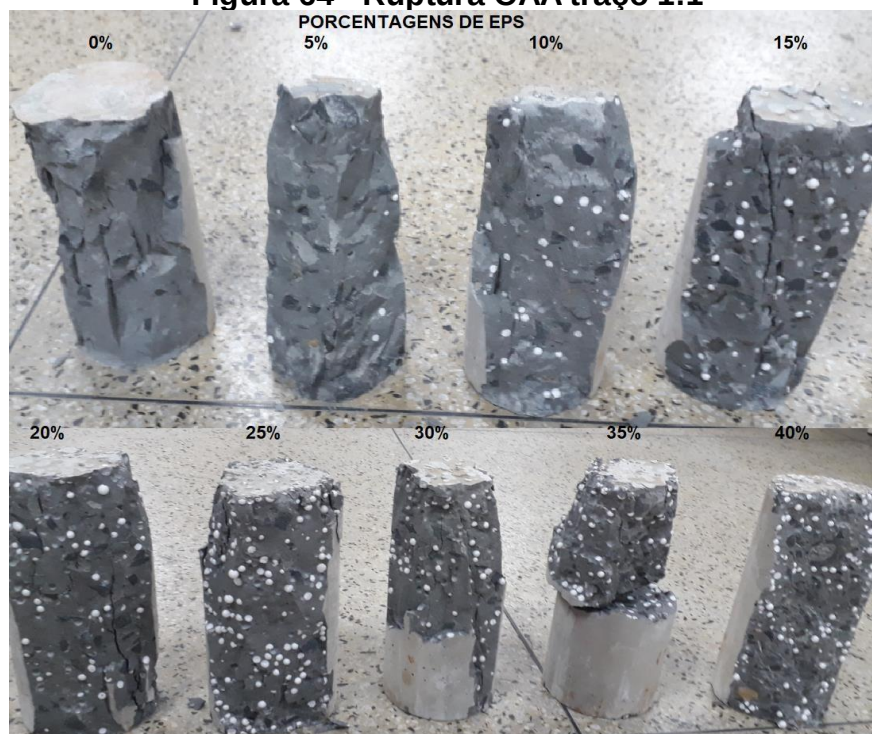
6.4.3 Traço de referência 1:1

O Quadro 38 e a Figura 64 mostram os resultados do ensaio de compressão para o traço 1:1 com todas as porcentagens de adição de EPS utilizadas neste trabalho.

Quadro 38 – Resultado ensaios CAA estado endurecido traço 1:1

TRAÇO DE REFERÊNCIA EM PESO 1:1									
ADIÇÃO DE	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Amostra 01 (Mpa)	30,15	25,19	29,55	21,22	25,64	15,66	17,96	16,60	15,25
Amostra 02 (Mpa)	28,49	24,67	20,15	21,89	18,65	18,45	12,55	17,45	15,66
Amostra 03 (Mpa)	27,52	32,05	20,88	21,45	17,59	19,32	16,96	15,88	15,27
Amostra 04 (Mpa)	32,55	21,68	18,66	20,19	20,08	13,84	16,15	15,92	14,13
Amostra 05 (Mpa)	29,56	21,54	24,24	26,77	20,88	17,14	16,21	14,55	19,54
Amostra 06 (Mpa)	27,36	26,15	19,62	22,66	22,44	19,88	20,54	14,62	15,28
Amostra 07 (Mpa)	34,82	25,19	28,82	18,45	19,19	22,64	16,55	15,84	14,37
Média (Mpa)	30,06	25,21	23,13	21,80	20,64	18,13	16,70	15,84	15,64

Fonte: Próprio autor,2018

Figura 64 - Ruptura CAA traço 1:1

Fonte: Próprio autor, 2018

De acordo com o Quadro 33 os concretos com adição superior a 20% não podem ser considerados estrutural pois possuem característica a compressão axial inferior a 20 MPa.

O gráfico 5 mostra a mudança na resistência a compressão axial do CAA em função da adição de EPS.

Gráfico 05 – Resistência X porcentagem de adição de EPS no CAA traço 1:1

Fonte: Próprio autor, 2018

Similar aos gráficos de traço 1:3 e 1:2, é possível observar que para o traço 1:1 a resistência tem uma queda mais acentuada quando se acrescenta 5% de EPS.

Com a adição de 40% o concreto consegue atingir 52,03% da resistência inicial, mostrando uma queda mais acentuada para esse traço.

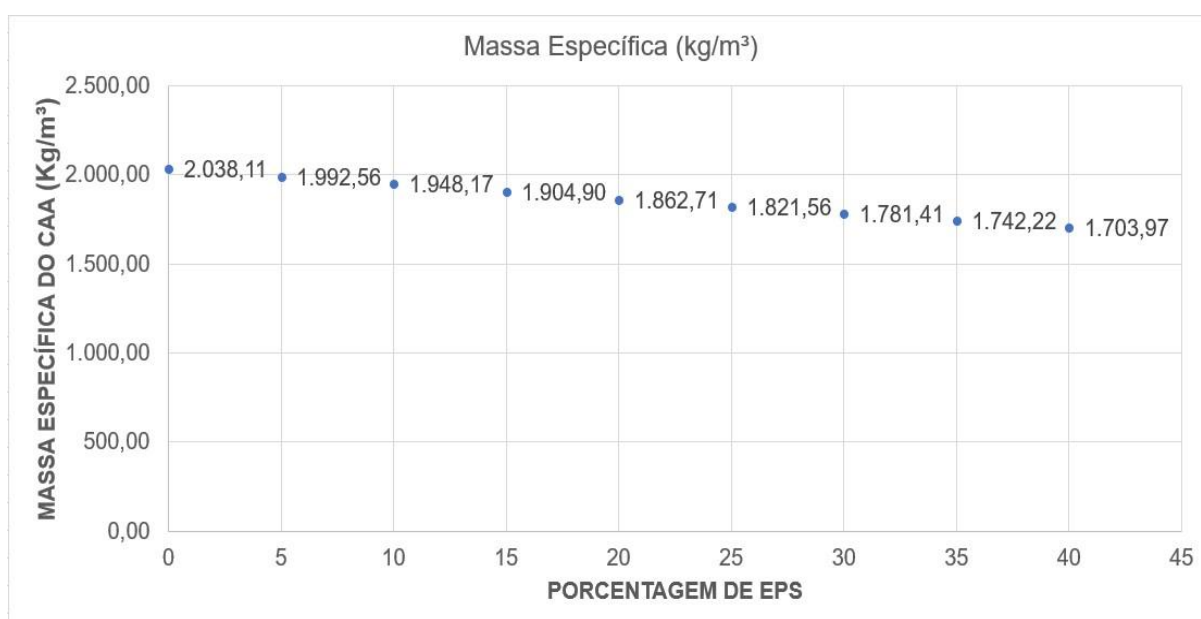
O Quadro 39 e o gráfico 6 mostram a variação da massa específica do concreto autoadensável em função da adição de Poliestireno. É possível observar uma queda praticamente linear na massa específica e que com a adição de 40% de EPS o concreto diminui 16,40% da massa específica inicial, quando não é utilizado o agregado leve.

Quadro 39 – Massa específica CAA traço 1:1

TRAÇO DE REFERÊNCIA EM PESO 1:1								
ADIÇÃO DE EPS (%)	Massa Específica (kg/m³)	Cimento (kg/m³)	Metacaulim (kg/m³)	Areia (kg/m³)	brita (kg/m³)	Água (kg/m³)	Aditivo (kg/m³)	EPS (kg/m³)
0	2.038,11	787,97	78,80	319,13	390,04	425,50	3,94	0
5	1.992,56	787,97	78,80	319,13	370,54	425,50	3,94	0,40
10	1.948,17	787,97	78,80	319,13	351,04	425,50	3,94	0,80
15	1.904,90	787,97	78,80	319,13	331,54	425,50	3,94	1,20
20	1.862,71	787,97	78,80	319,13	312,03	425,50	3,94	1,60
25	1.821,56	787,97	78,80	319,13	292,53	425,50	3,94	2,00
30	1.781,41	787,97	78,80	319,13	273,03	425,50	3,94	2,40
35	1.742,22	787,97	78,80	319,13	253,53	425,50	3,94	2,80
40	1.703,97	787,97	78,80	319,13	234,03	425,50	3,94	3,20

Fonte: Próprio autor,2018

Gráfico 06 – Massa específica CAA traço 1:1



Fonte: Próprio autor,2018

O Quadro 40 mostra a variação do fator de eficiência do concreto autoadensável em função da adição de Poliestireno. É possível observar que com a

adição de 40% de EPS o valor do fator de eficiência é 8,42 MPa.dm³/Kg, que equivale a 62,24% do valor referência para o concreto ser considerado leve e de alto desempenho (25 MPa.dm³/Kg).

Quadro 40 – Fator de eficiência do CAA traço 1:1

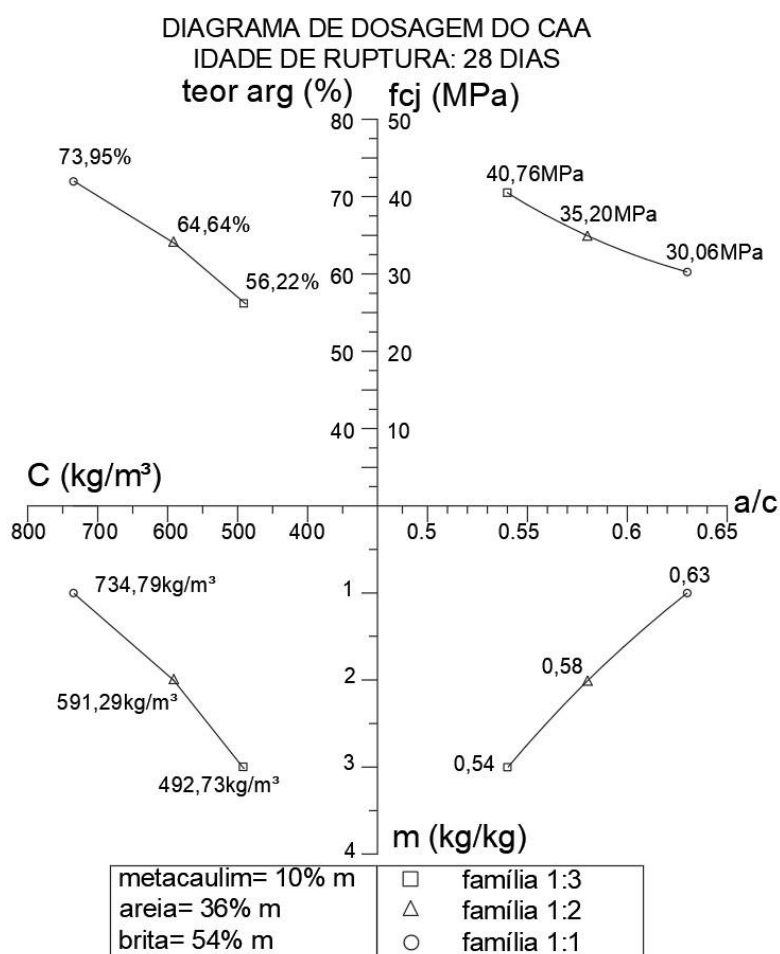
TRAÇO DE REFERÊNCIA EM PESO 1:1									
ADIÇÃO DE EPS (%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
FATOR DE EFICIÊNCIA (MPa .dm ³ /Kg)	14,75	12,65	11,87	11,45	11,08	9,95	9,38	9,09	9,18

Fonte: Próprio autor,2018

6.4.4 Diagrama de dosagem

A Figura 65 mostra o diagrama de dosagem para a família do CAA com os traços 1:3, 1:2 e 1:1 sem a utilização de EPS.

Figura 65 - Diagrama de dosagem do CAA



Fonte: Próprio autor,2018

O diagrama é dividido em 4 quadrantes, o primeiro representa a resistência a

compressão aos 28 dias versus o fator de água cimento. Para qualquer resistência entre 40,76MPa e 30,06MPa é possível obter os demais parâmetros necessários para a dosagem seguindo os procedimentos citados a seguir.

Utilizando o diagrama no sentido horário é perceber que o fator de água cimento sofreu um incremento na variação de 0,54 até 0,63, esse pequeno aumento é em decorrência do acréscimo de aglomerante que necessita de uma maior quantidade de água para as reações químicas serem produzidas.

É importante observar que o fator água/cimento pode aumentar ou diminuir em função da porcentagem do aditivo Glenium 51 utilizada, que nesse trabalho foi de 0,50%, sendo suficiente para deixar o concreto fluido. No terceiro quadrante é possível determinar o traço utilizado, que possui variação de 1:1 até 1:3, como também o consumo de cimento por metro cúbico.

Outro fator importante a ser abordado é que a medida que foi diminuindo a quantidade de cimento, passando do traço 1:1 até o traço 1:3, a resistência a compressão aumentou, tal fato pode ser justificado devido a dois fatores: primeiro por que de acordo com Farias (2012) a porcentagem ideal de Metacaulim é de 15% e o traço que possui a porcentagem de aditivo mais próximo a esse valor, 7,5%, é a mistura 1:3.

O segundo fator que provocou esse acréscimo de resistência é que o traço 1:3 possui a maior quantidade de agregado graúdo em sua composição, aumentando assim a resistência a compressão, fato que é possível observar pois sua ruptura se deu na zona de transição (Figura 66), região de interface da argamassa e o agregado graúdo, característica de concreto estrutural. Já nos traços 1:2 e 1:1, devido a maior quantidade de agregado leve em relação ao graúdo, a ruptura desenvolveu-se no agregado leve, EPS, como é característica de ruptura de concreto leve, provocando, provavelmente, a redução na sua resistência a compressão.

O último quadrante mostra o teor de argamassa em função do consumo de cimento e da resistência a compressão. O aumento da quantidade de cimento é inversamente proporcional a resistência a compressão, mostrando que é importante o estudo de todos os componentes do concreto para alcançar a melhor dosagem, pois conforme foi descrito anteriormente, a porcentagem de adição mineral foi responsável pelo acréscimo de resistência.

Figura 66 - Ruptura do CAA com EPS traço 1:3



Fonte: Próprio autor, 2018

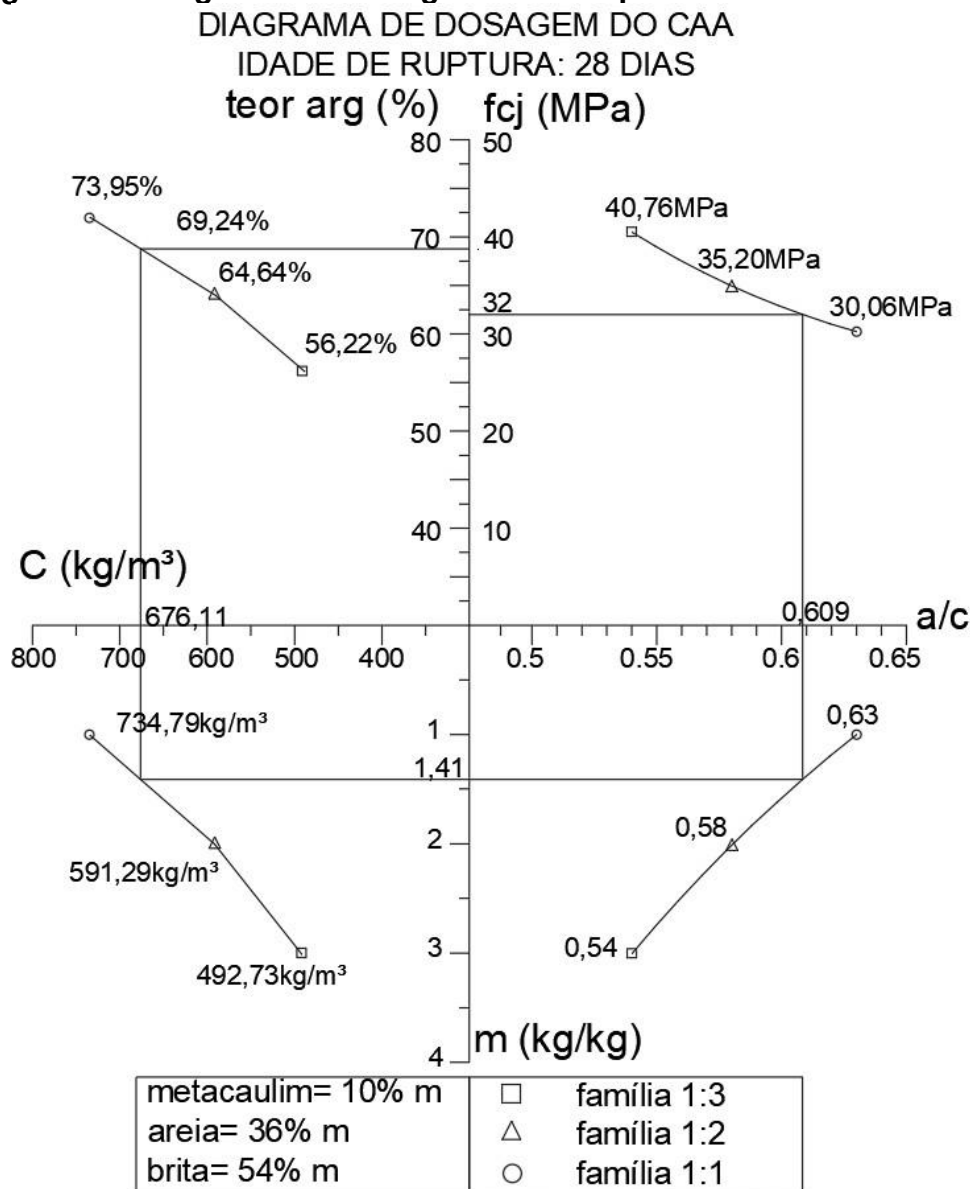
6.4.5 Exemplo de utilização do diagrama de dosagem

A fim de uma melhor explicação a respeito do diagrama de dosagem, a resistência de 32MPa (Figura 67) foi utilizada para a determinação dos parâmetros para esse concreto. A utilização do diagrama iniciou-se no primeiro quadrante onde marcou-se a resistência e obteve-se o fator de água cimento no valor de 0,609.

No segundo quadrante foi possível determinar a família utilizada que é de 1:1,41, está representa 1kg do aglomerante (cimento) para 1,41kg dos demais componentes (adição mineral e agregado miúdo e graúdo), possibilitando encontrar as seguintes relações entre os componentes descrito abaixo:

- Cimento Portland: 1kg;
- Aditivo: 5ml;
- Água: 609ml;
- Metacaulim: 0,141kg;
- Agregado miúdo: 0,571kg;
- Agregado graúdo: 0,698kg.

No terceiro quadrante é expresso a quantidade de cimento por metro cúbico de concreto, 676,11kg/m³, o quarto quadrante mostra o valor do teor de argamassa que é 69,24%.

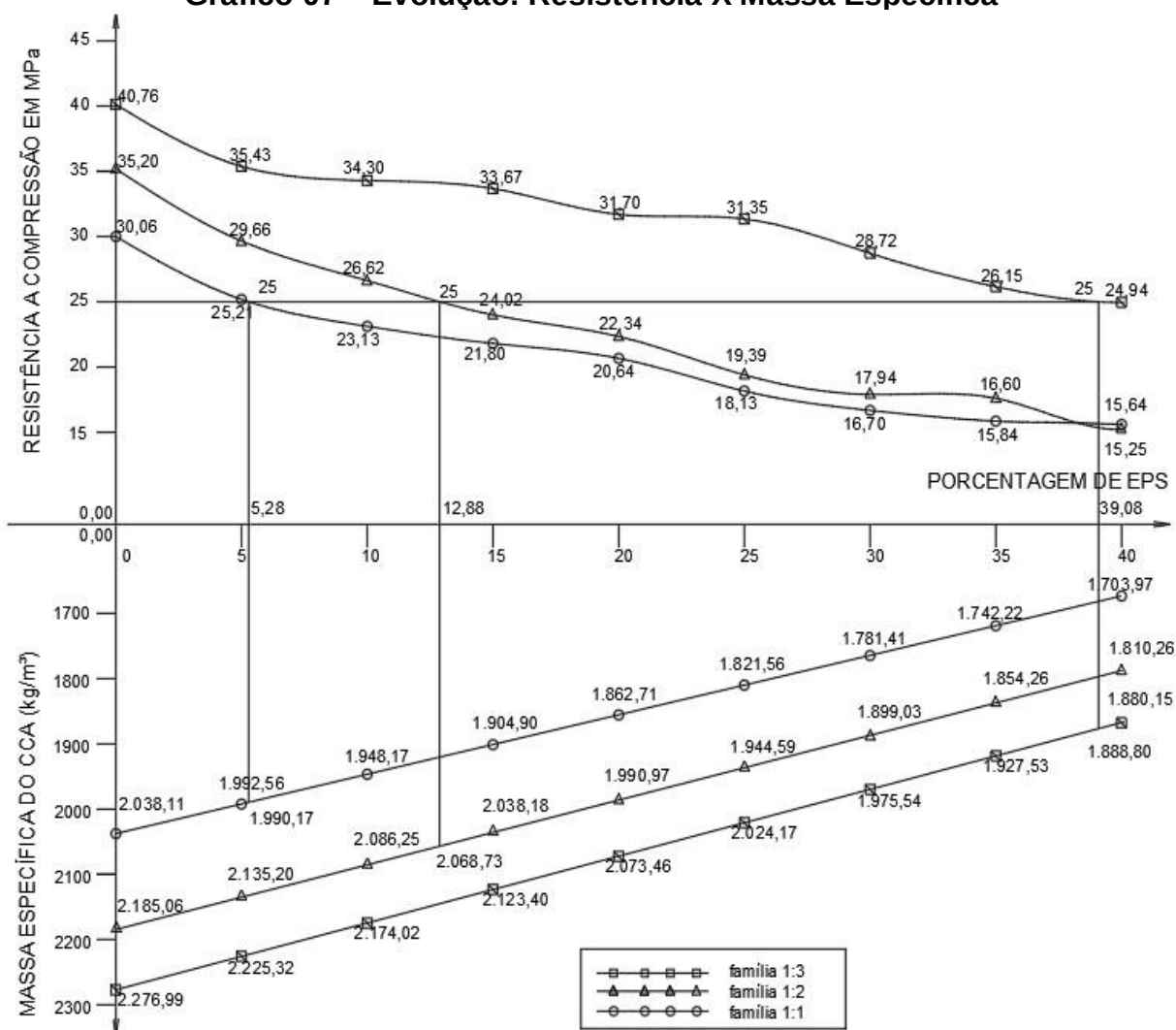
Figura 67 - Diagrama de dosagem do CAA para resistência de 32MPa

Fonte: Próprio autor, 2018

6.4.6 Evolução de resistência e massa específica em função da porcentagem de adição de EPS

No intuito de aglutinar de forma única os dados deste trabalho, os resultados da resistência a compressão axial e massa específica do concreto autoadensável foram inseridos no gráfico 07, para um melhor entendimento da influência da adição de EPS em todas as famílias utilizadas nesse trabalho, considerando esses dois parâmetros estudados.

Gráfico 07 – Evolução: Resistência X Massa Específica



Fonte: Próprio autor, 2018

Se consideramos uma resistência para estudo, como por exemplo no gráfico acima, que foi utilizado o valor de 25MPa, podemos observar a seguintes variações nos parâmetros estudados:

- Para a família 1:3, a massa específica é 1.880,80kg/m³ e a porcentagem de EPS é 39,08%;
- Para a família 1:2, a massa específica é 2.068,63kg/m³ e a porcentagem de EPS é 12,88%;
- Para a família 1:1, a massa específica é 1.990,17kg/m³ e a porcentagem de EPS é 5,28%;

A família que apresentou a menor massa específica é a 1:3, 1.880,80kgf/m³,

porem a porcentagem de EPS adicionada é alta, 39,08%, se mostrando uma desvantagem, pois, provavelmente, diminuirá as características de durabilidade deste concreto. Dentro do escopo deste trabalho, o traço 1:3, foi o que apresentou melhor relação entre a massa específica e a resistência de 25MPa, mas ensaios de durabilidade do concreto devem ser feitos para assim poder ser utilizado nos diversos canteiros de obras que necessitem desta tecnologia.

6.5 VERIFICAÇÃO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO EPS NO CAA

Com a execução dos ensaios do concreto autoadensável no estado fresco e endurecido foi possível perceber que a possibilidade de segregação do agregado leve de Poliestireno é mínima. Tal fato se justifica pela característica de coesão (viscosidade), devido a utilização do aditivo Glenium 51, do CAA que impede a flutuação das pérolas de EPS para a superfície. Caso a quantidade de aditivo ou o fator água/cimento forem incrementadas em excesso existe a possibilidade de segregação, pois o concreto se tornará excessivamente fluido. A Figura 68 mostra a inexistência de segregação no CAA com EPS obtido nos ensaios do concreto no estado fresco e endurecido deste trabalho.

Figura 68 - Ausência de segregação do EPS no CAA



Fonte: Próprio autor, 2018

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÕES

A utilização do CAA no mundo aumentou consideravelmente nos últimos anos, devido suas inúmeras vantagens em relação ao concreto convencional. Para estruturas de grande porte é fundamental sua utilização pois a taxa de segregação nesse tipo de estruturas é bem elevada.

Outra dificuldade encontrada para profissionais que utilizam esse tipo de concreto é a necessidade da redução na sua massa específica, a fim de obter estruturas mais leves e conseqüentemente soluções mais econômicas. No intuito de solucionar esse problema, este trabalho desenvolveu uma dosagem experimental de concreto autoadensável com a adição de perolas de Poliestireno expandido, utilizando um método de dosagem proposto pela literatura.

Após a caracterização de todos os componentes do CAA, aglomerante, agregado miúdo e graúdo, adição mineral, aditivo superplastificante; água e EPS, foi possível afirmar que todos possuem características que atenderam aos requisitos para a produção do concreto proposto.

O aglomerante possui características que incrementam a resistência a compressão do concreto. O Metacaulim e o Glenium 51 foram produtos industrializados que possibilitaram ao CAA características de coesão e fluidez, respectivamente. Os agregados apresentaram granulometria ideais para a pesquisa, pois a areia possui módulo de finura elevado, aumentando a resistência a compressão e o agregado graúdo apresentou diâmetro máximo inferior ao limite normativo estabelecido para o CAA, melhorando seu desempenho ao passar por possíveis obstáculos existentes nas formas de concreto (barras de aço, tubulações de instalações, espaçadores de armadura).

Também pode-se concluir que o método de dosagem utilizado nessa dissertação, proposto por Tutikian em 2007, mostrou-se bastante eficaz, pois dinamizou diretamente as metodologias utilizados na escolha da proporção ideal entre os componentes do CAA e também por que foi bastante preciso nos ensaios do estado fresco, por que todas as proporções utilizadas apresentaram valores normatizados satisfatórios para a confecção do concreto proposto. Após a adição do EPS, foi possível concluir que a sua utilização não apresentou problemas de segregação e que ainda aumentou as características de fluidez, habilidade passante,

que são fundamentais para a obtenção do concreto autoadensável.

Através do trabalho experimental, representado no diagrama de dosagem de concreto CAA, foi possível concluir também que a resistência a compressão apresentou comportamento inversamente proporcional a quantidade de cimento utilizada, fato explicado devido a porcentagem de Metacaulim utilizada e ao modo de ruptura do concreto proporcionado pela quantidade de agregado graúdo para cada traço estudado. Mostrando, portanto, a importância do experimento deste trabalho a fim de estabelecer quais fatores influenciaram positivamente para obter resistências mais elevadas. O diagrama de dosagem também pode ser utilizado para se obter outras proporções entre os elementos do CAA, dentro dos limites do mesmo.

Esse trabalho apresentou ainda gráficos que podem ser utilizados para a escolha da melhor relação entre a resistência a compressão e a massa específica do CAA. Assim foi possível apresentar concretos com a mesma resistência compressão, mas com massa específica diferentes, proporcionado aos profissionais de engenharia de estruturas, dentro das limitações desse trabalho, a escolha do traço mais adequando em função da sua necessidade. Foi possível observar, por exemplo, que para a mesma resistência a compressão de 25MPa, encontrou-se concretos com massa específica entre 1.880,80kg/m³ e 2.068,63kg/m³.

Com a aplicação de todos os ensaios proposto por esse trabalho, foi possível concluir que a adição do Poliestireno expandido no concreto autoadensável é viável, devido aos seguintes fatores: melhorou as características do concreto no estado fresco, não apresentou problemas de segregação, reduziu sua massa específica com o aumento da adição de EPS e apresentou valores de resistência a compressão de modo que o concreto, em várias das proporções estudadas, foi considerado estrutural.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É importante salientar que os resultados encontrados se transcrevem nos limites adotados pela metodologia desse trabalho e que para o mesmo poder ser utilizado, diversas outras pesquisas devem ser implementadas. Assim descrevo como sugestões para trabalhos futuros, afim de viabilizar a utilização desta tecnologia, os seguintes tópicos:

- Utilizar como resistência mínima o valor de 50MPa, para o mesmo ser

considerado de alta resistência, e posteriormente acrescentar o EPS e consequentemente encontrar uma curva de resistência mais abrangente;

- Verificar a viabilidade do concreto desta pesquisa em relação a vida útil, utilizando metodologias que analisem a durabilidade do CAA com EPS, como por exemplo: Análise da resistência a ataque de cloretos, carbonatação, ataque por sulfatos, desgaste superficial;
- Produzir concreto autoadensável com EPS com uma maior resistência a sulfatos, cloretos, reação álcali-agregado;
- Analisar a viabilidade financeira em situações práticas do CAA proposto nesse estudo.

REFERÊNCIAS

ACEPE. Disponível em: <<http://www.acepe.pt>> Acesso em: 11 setembro de 2017.

AEWEB. Disponível em
<<https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/basf/GLENIUM%2051.pdf>> Acesso em: 20 setembro de 2017.

ANDRADE, J. J. O; TUTIKIAN, B. F. **Resistência Mecânica do Concreto. Concreto: Ciência e Tecnologia**. Edição G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2011. V1, pp. 615-651.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável. Parte 1: Classificação, controle e aceitação no concreto fresco. 1. ed. Rio de Janeiro, 2010. 11 p.

_____. **NBR 15823-2**: Concreto autoadensável. Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método de cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010. 4 p.

_____. **NBR 15823-3**: Concreto autoadensável. Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro, 2010. 4 p.

_____. **NBR 15823-4**: Concreto autoadensável. Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. Rio de Janeiro, 2010. 4 p.

_____. **NBR 15823-5**: Concreto autoadensável. Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V L. Rio de Janeiro, 2010. 3 p.

_____. **NBR 15823-6**: Concreto autoadensável. Parte 6: Determinação da resistência a segregação – Método da coluna de segregação. Rio de Janeiro, 2010. 3 p.

_____. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011. 19 p.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar. Rio de Janeiro, 2008. 7 p.

_____. **NBR NM 35**: Agregados leves para concreto estrutural - Especificação. Rio

de Janeiro, 1995. 8 p.

_____. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em Pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2003. 5 p.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 13 p.

_____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 18 p.

_____. **NBR NM 52:** Agregados miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6p.

_____. **NBR NM 53:** Agregados Graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8p.

BORJA, E. V. de . **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis.** 2011. 231 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termo ciências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

CASTRO, A.L.; LIBÓRIO, J.B.L.; PANDOLFELLI, V.C. **A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formados a partir do método de dosagem computacional.** 2011. 12pág. (Cerâmica 57).

CATOIA, T. **Concreto ultraleve® estrutural com pérolas de EPS: caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes.** 2012. 157p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Escola de engenharia de São Carlos da universidade de São Paulo.

COLLEPARDI, Mario. **A very close precursor of self-compacting concrete (SCC).** In: **Supplementary volume of the Proceedings of Three-day International Symposium of Sustainable Development of Concrete Technology:** 2001.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural.** In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** ed. G. C. ISAIA. 1ª edição. São Paulo: IBRACON, 2005.

DINIZ, M. A. . **Concreto auto adensável com resíduo do Caulim.** 2010. 124p.

Dissertação de mestrado – Área de conhecimento em Engenharia Urbana e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, Paraíba.

DOMONE, P. L. **A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete.** *Cement and Concrete Composites*, 29. 2006. pp. 1-12.

EFNARC. (2005) **Specificacion and Guidelines for Self-Compacting Concrete.** **European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems** – EFNARC.

EIGER, L. R. **A química a serviço da indústria de concretos pré-fabricados.** *Revista Concreto e Construções*, Ed. IBRACON, v. 43. p. 55-58, 2006.

FARIAS, E. C. **Influência da adição de Metacaulim no comportamento reológico de concretos auto adensáveis.** VII CONNEPI, 2012.

FOCHS, R. G. **Estudo comparativo entre métodos de dosagem de concreto autoadensável.** 2011. 180p. Dissertação de mestrado – Área de conhecimento ciências dos materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. B. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável.** Ed. Pini, 2009.

GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete.** 2002. 139 p. Tese - Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.

HARTMANN, C. T. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concreto de cimento Portland.** São Paulo. 2002. 234p. Dissertação (mestrado). Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

HARTMANN, C. T.; HELENE, P. R. L. **Avaliação de aditivos superplastificantes**

base policarboxilatos destinados a concretos de cimento portland. São Paulo: EPUSP, 2003. 22p. (Boletim Técnico, BT/PCC 330).

KLEIN, Nayara Soares. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável.** Londrina, 2008. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento). Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Brasil.

KERBAUY, M. J. **Concreto estrutural ultraleve com desmoldagem rápida destinado à fabricação de placas, painéis e lajes.** BR n. PI 1004268-7, 2010.

KLUG, Y.; HOLCHMACHER, K. **Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete. Rheological measurements on self-compacting fibre reinforced concrete.** In: **Thirid International Symposium on Self- compacting concrete.** 2003, Reykjavik, pp. 596-605.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando o resíduo de serragem de mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** 2004. 115p. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 1.ed. São Paulo: PINI, 1994, p. 573.

MENDES, C. J. **Concreto auto adensável utilizando cinza da casca de arroz: estudo das propriedades mecânicas.** 2015. 95p. Dissertação de mestrado – Área de conhecimento estruturas, Universidade Estadual Paulista, Minas gerais.

METACAU LIM. Disponível em <<http://www.metacaulim.com.br/>> Acesso em: 18 setembro de 2017.

NUNES, S. C. B. **Betão auto-compactável: tecnologia e propriedades.** Dissertação (Mestrado). Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2001.

OKAMURA, H. **Self-compacting high performance concrete.** Concrete International, v. 19, n. 7, p. 50-54, July 1997.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-compacting concrete.** In: **Journal of Advanced Concrete Technology**, Vol. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.

PEREIRA, T. A. C. **Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida.** 2010. 281f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Estruturas, EESC. Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2010.

PHD ENGENHARIA. Disponível em: <<http://www.concretophd.com.br/projetos.asp>>
Acesso em: 16 agosto de 2017.

TÉCHNE. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/obras/concluida-concretagem-da-fundacao-do-maior-edificio-residencial-da-america-307673-1.aspx>>. Acesso em: 13 agosto de 2017.

TÉCHNE. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/obras/mrv-engenharia-constroi-estrutura-de-edificio-em-10-dias-no-382509-1.aspx>> .
Acesso em: 14 agosto de 2017.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis.** 2004.149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2004.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis** , 2007. 162p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

TUTIKIAN, B. F. DAL MOLIN, D.C. **Concreto auto-adensável**, São Paulo, PINI, 2008.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. 2003. 220p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo.

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

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. **Concreto estrutural leve**. In: **ISAIA, G.C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap.43, v.2, p.1333-1362

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

WALRAVEN, J. **Structural aspects of SCC**. In: **Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete**. Chicago, EUA, 2005.