

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

STIVEN DE OLIVEIRA SCHIMANCKO

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DA LAMA RESIDUAL DE CONCRETO NAS  
PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL ESTRUTURAL**

MARINGÁ

2020

STIVEN DE OLIVEIRA SCHIMANCKO

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DA LAMA RESIDUAL DE CONCRETO NAS  
PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL ESTRUTURAL**

Dissertação apresentada à Universidade  
Estadual de Maringá, como requisito parcial para  
a obtenção do título de mestre.

Aprovado em: 29/06/2020

**BANCA EXAMINADORA**

*Romel Dias Vanderlei*

Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei  
Universidade Estadual de Maringá

*Generoso De Angelis Neto*

Prof. Dr. Generoso De Angelis Neto  
Universidade Estadual de Maringá

*Carlos H. Martins*

Prof. Dr. Carlos Humberto Martins  
Universidade Estadual de Maringá

*Berenice Martins Toralles*

Profa. Dra. Berenice Martins Toralles Carbonari  
Universidade Estadual de Londrina

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

S335e

Schimancko, Stiven de Oliveira

Efeitos da incorporação da lama residual de concreto nas propriedades do concreto autoadensável estrutural / Stiven de Oliveira Schimancko. -- Maringá, PR, 2020.  
126 f.: il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei.

Coorientador: Prof. Dr. Generoso De Angelis Neto.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.

1. Concreto autoadensável. 2. Lama residual de concreto. 3. Resistência à compressão. 4. Resistência à tração. 5. Módulo de elasticidade. I. Vanderlei, Romel Dias, orient. II. De Angelis Neto, Generoso, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 23.ed. 620.136

Dedico este aos pesquisadores e técnicos que integram estudos em concreto com o intuito de torná-lo um material melhor.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Maringá por dispor da estrutura, equipamentos e alguns dos materiais utilizados na pesquisa.

Aos Professores Dr. Romel Dias Vanderlei (Orientador) e ao Dr. Generoso De Angelis Neto (Coorientador) pela cortesia, simpatia, disposição, incentivo, atenção e direção durante a realização desse estudo.

Aos Professores Dr. José Wilson, Dr. Carlos Humberto Martins pela ajuda durante a realização dos experimentos e da pesquisa.

Ao engenheiro Douglas Ávila pela cortesia, gentileza e atendimento.

À minha colega de laboratório Elisabet Gabrieli Gasques pela assistência, simpatia e companheirismo durante a realização da pesquisa.

Ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Considerando que o concreto de cimento Portland é capaz de incorporar com segurança produtos, subprodutos e resíduos industriais, tóxicos ou não, é adequado chamá-lo de Senhor Shiva dos materiais industriais”.

Mehta e Monteiro, 2008

## RESUMO

O concreto autoadensável (CAA) é um tipo de concreto de alto desempenho no estado fresco. Há vantagens no uso em estruturas com altas taxas de armadura, fôrmas complexas, entre outras. O concreto é uma mistura que compreende materiais, classificados como: aglomerantes, agregados, adição, aditivos e incorporações. A dosagem dos materiais determina as características resultantes. Desta maneira, o concreto se configura como um material que pode ser beneficiado com a incorporação de resíduos. A lama residual de concreto (LRC) na indústria de pré-moldados é um material com granulometria fina que não pode ser disposto em aterro sanitário. Quando adicionado ao CAA pode apresentar uma solução ao passivo ambiental e agregar características benéficas à mistura. Neste contexto, o objetivo do trabalho foi verificar o efeito da incorporação da LRC no CAA estrutural. As propriedades verificadas englobaram a caracterização dos materiais constituintes, dosagem, características no estado fresco e no estado endurecido. Foram realizados ensaios laboratoriais conforme as respectivas normas brasileiras para a caracterização dos agregados de origem natural (basalto e areia quartzosa) e da LRC. As características dos demais componentes (cimento e aditivo superplastificante) foram adquiridas a partir dos laudos técnicos fornecidos pelo fabricante. O estudo da dosagem foi fundamentado nos métodos de Ozawa, Maekawa e Okamura (1990), Ouchi, Ozawa e Okamura (1996), Okamura (1997), Gomes, Gettu e Aguiló (2002, 2003), Tutikian e Dal Molin (2007) e EFNARC (2005). Foram realizados na pasta de cimento os ensaios do funil de Marsh, mini-cone. Na argamassa foi realizado o ensaio do espalhamento com tronco de cone e funil V, com a finalidade de determinar o traço piloto e os traços com adição (nos teores de 10, 20 e 30% da massa de cimento) de LRC. Foram determinados e confeccionados 4 traços de CAA (T0, T1, T2 e T3). As propriedades no estado fresco foram determinadas a partir dos ensaios: espalhamento, anel J, caixa L, funil V, segregação (método da coluna e da peneira), massa específica e teor de ar incorporado. No estado endurecido os corpos de prova cilíndricos foram ensaiados à resistência à compressão, resistência à tração (indireta e na flexão) e módulo de elasticidade (dinâmico e estático). A LRC caracterizou-se como um resíduo não perigoso e não inerte que não apresenta atividade pozolânica. Na dosagem do traço a LRC adicionada demandou um aumento na quantidade de água e aditivo nas misturas. Esses incrementos foram no valor de 0,035 na relação água/cimento e de 0,2% da relação aditivo/cimento, respectivamente. Contudo, a adição de LRC nos traços demonstraram um incremento nas propriedades no estado fresco. O traço T1 obteve um incremento de 7,6% no espalhamento comparado ao T0. A viscosidade dos traços foi alterada de modo proporcional ao teor de adição. A presença da LRC nos traços garantiu uma melhor estabilidade visual do CAA. Nos traços T1 e T2 a LRC melhorou a habilidade passante e garantiu uma classificação superior aos demais traços. A segregação e o teor de ar incorporado foram afetados pela adição de LRC. A maior segregação (SR = 28%) ocorreu no traço T2, devido à combinação da dos efeitos de viscosidade e consistência. A resistência à compressão e as demais características do estado endurecido evidenciaram a influência negativa da adição da LRC. O traço T1 apresentou uma redução de 46% na resistência, enquanto que os traços T2 e T3 não atingiram os requisitos mínimos para a classificação de estrutural ( $f_{ck} \geq 20$  MPa). A resistência à tração e o módulo seguiram a tendência da resistência a compressão. Deste modo, a incorporação de LRC no CAA estrutural foi possível no teor máximo de 10% da massa de cimento. As demais adições alteram significativamente as características do concreto ao ponto de desclassificá-lo estruturalmente.

**Palavras chave:** Concreto autoadensável. Lama residual de concreto. Resistência à compressão. Resistência à tração. Módulo de elasticidade.

## ABSTRACT

*Self-compacting concrete (SCC) is a type of fresh high-performance concrete. There are some advantages in structural members with high rate of reinforcement, complex formworks, among others. Concrete is a mixture that comprises materials classified as binders, aggregates, chemical admixtures, additives and other contents. Materials dosage determine the resulting properties. Thus, concrete is a material that benefits from incorporation of waste. Concrete Slurry Waste (CSW) on precast industry is a material with fine particle-size distribution that cannot be disposed of in a landfill. When added to the SCC, it presents a solution to environmental liability and adds beneficial characteristics to the mixture. In this context, the objective of this work was to verify the effects of the adding CSW in structural SCC. The verified properties include materials characteristics, dosage, fresh and hard properties. Laboratory tests, according to Brazilian standards, were carried out to characterize aggregates from natural origin (basalt and quartz sand) and CSW. The other materials (cement and superplasticizer additive) characteristics were acquired from manufacture technical reports. This study was based on mixing design method from Ozawa, Maekawa and Okamura (1990), Ouchi, Ozawa and Okamura (1996), Okamura (1997), Gomes, Gettu e Aguiló (2002,2003), Tutikian e Dal Molin (2007) and EFNARC (2005). The cement paste was evaluated by Marsh funnel and mini-cone tests. SCC mortars were evaluated by spreading with a trunked cone and V funnel tests as criteria for determining reference mixture and those mixtures with addition (10, 20 and 30% of cement mass) of CSW. A total of 4 SCC mixtures were determined and prepared (T0, T1, T2 and T3). Fresh properties were evaluated by spread test, J ring test, L-box, V-funnel, segregation test (column method and sieve stability), specific mass and air content. The hardened properties tested were compressive strength, tensile strength (indirect and flexural) and modulus of elasticity (dynamic and static) with cylinder specimens. The results showed that CSW is non-hazardous and non-inert residue that does not have pozzolanic activity. Adding CSW in the mixture demanded an increase of the amount of water and additive. These increases were 0.035 in the water/cement ratio and 0.2% in the superplasticizer/cement ratio, respectively. However, the addition of CSW in the mixtures demonstrated an increase in the fresh properties. The T1 mixture obtain 7.6% increase in spreading test compare to T0. The viscosity of the mixture was changed in proportion to the content addition. The presence of the CSW in the mixtures ensured a better visual stability of the SCC. In the T1 and T2 mixtures, the CSW improved the passing ability and guaranteed a higher classification than other mixtures. Segregation and air content were affected by the addition of CSW. The highest segregation (SR = 28%) occurred in the T2 mixture, due to the combination of the effects of viscosity and consistency. Compressive strength and other hardened properties showed the negative influence of the CSW addition. The T1 mixture showed 46% strength reduction, while T2 and T3 did not reach the minimum requirements for structural classification ( $f_c \geq 20$  MPa). The tensile strength and modulus of elasticity follow this trend. Thus, adding CSW into structural SCC was possible at maximum content of 10% of the cement mass. Other additions significantly alter concrete properties to the point of structurally declassifying it.*

*Keywords: Self-compacting concrete. Concrete slurry waste. Compressive strength. Tensile strength. Modulus of elasticity.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Imagens da geração da lama residual da lavagem da betoneira em uma central dosadora .....	18
Figura 1.2 – Fluxograma com as principais atividades realizadas .....	21
Figura 2.1 – Hierarquia da gestão de resíduos .....	24
Figura 2.2 – Gestão do processamento de resíduos .....	25
Figura 2.3 – Procedimento de disposição de resíduos .....	26
Figura 2.4 – Tanque de decantação .....	27
Figura 2.5 – Depósito de LRC úmida e parcialmente desidratada .....	27
Figura 2.6 – Esquema de Ozawa, Maekawa e Okamura (1990), Ouchi, Ozawa e Okamura (1996) e Okamura (1997) .....	37
Figura 2.7 – Esquema do método de Ozawa, Maekawa e Okamura (1990), Ouchi, Ozawa e Okamura (1996) e Okamura (1997) .....	38
Figura 2.8 – Tronco de cone para ensaios na argamassa .....	39
Figura 2.9 – Funil V para ensaios na argamassa .....	39
Figura 2.10 – Relação entre a área de espalhamento e o tempo de escoamento conforme a variação de água e superplastificante .....	40
Figura 2.11 – Esquema do método de Gomes, Gettu e Aguiló (2002;2003) .....	41
Figura 2.12 – Aparelhagem e gráfico relacionando areia, volume de vazios e peso unitário ..	42
Figura 2.13 – Funil de Marsh e ponto de saturação .....	43
Figura 2.14 – Minicone para o ensaio do Mini- slump .....	44
Figura 2.15 – Esquema do procedimento de dosagem .....	45
Figura 2.16 – Diagramas de dosagem e desempenho .....	46
Figura 2.17 – Procedimento de dosagem da EFNARC .....	48
Figura 2.18 – Comportamento reológico .....	50
Figura 2.19 – Dimensões do Cone de Abrams .....	55
Figura 2.20 – Dimensões Anel-J .....	57
Figura 2.21 – Caixa L .....	58
Figura 2.22 – Funil V .....	59
Figura 2.23 – Coluna de segregação .....	60
Figura 2.24 – Método da peneira .....	61
Figura 3.1 – Picnômetro e frasco de Chapman .....	67
Figura 3.2 – Curva de Inchamento.....	68
Figura 3.3 – Depósito LRC .....	70
Figura 3.4 – Disposição da LRC.....	70
Figura 3.5 – Secagem da LRC ao ar .....	71
Figura 3.6 – LRC após secagem em estufa .....	71
Figura 3.7 – Armazenamento da LRC .....	72
Figura 3.8– Esquema dos procedimentos da Fase 1 .....	76
Figura 3.9– Esquema dos procedimentos da Fase 2 .....	77
Figura 3.10 – Fluxograma da etapa 1 .....	78
Figura 3.11 – Confecção de pasta de cimento: tempo e velocidade de mistura .....	79
Figura 3.12 – Fluxograma 2ª Etapa .....	80
Figura 3.13 – Confecção da argamassa: tempos e velocidade de mistura .....	81
Figura 3.14 – Fluxograma para o ajuste do traço .....	82
Figura 3.15 – Confecção do CAA .....	83
Figura 3.16 – Fluxograma Fase 3 .....	84
Figura 3.17 –Aparelho eletrônico para medida da deformação .....	85
Figura 3.18 – Captador e pulsador .....	86

Figura 3.19 – Montagem ensaio do módulo de elasticidade indireto .....	86
Figura 3.20 – Fluxograma Fase 4 .....	87
Figura 4.1 – Curva granulométrica agregado miúdo .....	88
Figura 4.2 – Curva granulométrica do agregado graúdo.....	89
Figura 4.3 – Curva granulométrica da LRC .....	90
Figura 4.4 – Resistência à compressão da argamassas de cal e índice de desempenho .....	91
Figura 4.5 – Gráfico de difração de raio X na LRC .....	92
Figura 4.6 – Mini-slump: espalhamento com Sp/c = 1,0 % .....	96
Figura 4.7 – Gráfico fluxo e teor de aditivo .....	97
Figura 4.8 – Gráfico tempo de espalhamento e teor de aditivo .....	98
Figura 4.9 – Acréscimo de água e aditivo superplastificante .....	100
Figura 4.10 – Gráfico do índice de fluidez e consistência .....	100
Figura 4.11 – Curva volume de vazios e massa unitária .....	102
Figura 4.12 – Espalhamento, IEV para T0 e a/f de 0,41 .....	103
Figura 4.13 – Relação a/c e Sp/c .....	104
Figura 4.14 – Teor de argamassa e relação água/materiais secos.....	104
Figura 4.15- Espalhamento (SF) .....	105
Figura 4.16 – Índice de estabilidade visual .....	106
Figura 4.17 – Tempo (T500) e escoamento no funil V .....	107
Figura 4.18 – Acabamento superficial .....	108
Figura 4.19 – Habilidade passante no anel J (PJ) e caixa L (PL) .....	108
Figura 4.20 – Porcentagem de segregação pela coluna e pela peneira .....	109
Figura 4.21 – Gráfico massa específica e teor de ar incorporado .....	110
Figura 4.22 – Consumo de cimento e teor de ar incorporado .....	111
Figura 4.23 – Separação dos corpos de prova .....	113
Figura 4.24 – Evolução e resistência à compressão uniaxial .....	113
Figura 4.25 – Gráfico de resistência à tração diametral e flexão .....	114
Figura 4.26 – Módulo de elasticidade .....	115
Figura 4.27 – Gráfico tensão, deformação e deslocamento .....	116
Figura 4.28 – Superfície de ruptura .....	117
Quadro 2.1 – Referências normativas da EFNARC .....	47
Quadro 2.2 – Características, ensaios e unidades de medida .....	51
Quadro 2.3 – Requisitos e classificação do CAA no estado fresco .....	52
Quadro 2.4 – Classes do CAA e suas aplicações.....	54
Quadro 3.1 – Características principais do cimento .....	64
Quadro 3.2 – Composição granulométrica dos agregados .....	66
Quadro 3.3 – Teor de material fino .....	66
Quadro 3.4 – Propriedades físicas dos agregados .....	68
Quadro 3.5– Principais características dos aditivos químicos.....	69
Quadro 3.6 – Composição granulométrica e teor de material fino .....	73
Quadro 3.7 – Dosagem, característica e resistência das argamassas de cal .....	74
Quadro 3.8 – Dosagem, característica e resistência das argamassas de cimento .....	75
Quadro 3.9– Análise da água em Maringá – Paraná .....	76
Quadro 3.10 – Velocidade da pá do misturador .....	78
Quadro 3.11 – Relação de autores, incorporação e teores .....	80
Quadro 3.12 – Traços de CAA e ensaios no estado fresco .....	83
Quadro 4.1 – Concentrações de compostos químicos nos extratos lixiviado e solubilizado ...	93
Quadro 4.2 – Traço de argamassa de CAA .....	101
Quadro 4.3 – Traço de CAA.....	102
Quadro 4.4 – Resultados estado fresco para T0 .....	103

Quadro 4.5 – Traços de CAA .....	103
Quadro 4.6 – Classificação e aplicabilidade conforme NBR 15.823-1 (ABNT, 2017).....	112
Quadro 4.7 – Resultados experimentais e estimativas da a NBR 6.118 (ABNT, 2014) .....	116
Quadro 4.8 – Uso do concreto com LRC .....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química da LRC .....	27
Tabela 4.1 – Composição e temperatura da pasta.....	95
Tabela 4.2 – Tempos de escoamento e espalhamento .....	95
Tabela 4.3 – Índice de fluidez e consistência .....	99
Tabela 4.4 – Esqueleto granular .....	101

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ASTM – *American Society for Testing and Materials*  
AMV – Aditivo Modificador de Viscosidade  
CAA – Concreto Autoadensável  
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente  
CP – Cimento Portland  
CP V ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial  
EFNARC - *European Federation of National Associations Representing producers and applications of specialist building products for Concrete*  
EN – *European Standards*  
G<sub>m</sub> – espalhamento relativo  
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis  
LRC – Lama Residual de Concreto  
Min. – Minuto(s)  
MMA – Ministério do Meio Ambiente  
MPa – Megapascal  
NBR – Norma brasileira  
NM – Norma Mercosul  
PF – Perda ao fogo  
RCC – Resíduo da Construção Civil  
RI – Resíduo Insolúvel  
R<sub>m</sub> – tempo de escoamento relativo  
SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente  
T0 – Traço piloto  
T1 – Traço com 10% de LRC  
T2 – Traço com 20% de LRC  
T3 – Traço com 30% de LRC

## LISTA DE SÍMBOLOS

Al – Alumínio

a – água

a/c – água/cimento

a/f – água/materiais finos

c - cimento

Cl – Cloro

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

F – Fluor

f – materiais finos

Fe – Ferro

g – Grama

l – Litro

mg - Miligrama

MgO – Óxido de Magnésio

NTU – Unidade Nefelométrica de Turbidez

pH – Potencial Hidrogeniônico

SO<sub>3</sub> – Anidrido Sulfúrico

Sp – Superplastificante

Sp/c – Superplastificante/cimento

uH – Unidade de cor

ug - Micrograma

# - Abertura da malha de peneiras

$\tau$  – Tensão de cisalhamento

$d\gamma/dt = \dot{\gamma}$  – Taxa de cisalhamento

$\mu_{pl}$  – Viscosidade plástica

$\tau_0$  – Cisalhamento mínimo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	19
1.2	OBJETIVOS .....	20
<b>1.2.1</b>	<b>Geral .....</b>	<b>20</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Específicos.....</b>	<b>20</b>
1.3	DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	20
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	22
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>23</b>
2.1	RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	23
2.1.1	Lama Residual de Concreto (LRC) .....	26
2.1.2	Legislação e Classificação da Lama Residual de Concreto (LRC).....	28
2.2	CONCRETO AUTOADENSÁVEL (CAA) .....	29
<b>2.2.1</b>	<b>Materiais Constituintes .....</b>	<b>30</b>
2.2.1.1	Aglomerante .....	31
2.2.1.2	Agregado graúdo .....	32
2.2.1.3	Agregado miúdo .....	33
2.2.1.4	Aditivo .....	34
2.2.1.5	Adições e incorporações químicas .....	36
<b>2.2.2</b>	<b>Dosagem do Concreto Autoadensável .....</b>	<b>37</b>
2.2.2.1	Método de Ozawa, Maekawa e Okamura (1990), Ouchi, Ozawa e Okamura (1996) e Okamura (1997) .....	37
2.2.2.2	Método de Gomes, Gettu e Aguiló (2002;2003).....	40
2.2.2.3	Método de Tutikian; Dal Molin (2007) .....	44
2.2.2.4	Método da EFNARC (2005) .....	47
2.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....	49
<b>2.3.1</b>	<b>Propriedades no estado fresco .....</b>	<b>49</b>
2.3.1.1	Método do cone de Abrams: Espalhamento e viscosidade aparente ( <i>Slump Flow</i> )... 55	
2.3.1.2	Método do Anel J .....	56
2.3.1.3	Método da Caixa L .....	58
2.3.1.4	Ensaio de Funil V .....	59
2.3.1.5	Método da Coluna de segregação .....	60
<b>2.3.2</b>	<b>Propriedades no estado endurecido .....</b>	<b>62</b>

<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>64</b>
3.1	FASE 1 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	64
3.1.1	<b>Cimento .....</b>	<b>64</b>
3.1.2	<b>Agregados .....</b>	<b>65</b>
3.1.3	<b>Aditivo químico .....</b>	<b>69</b>
3.1.4	<b>Lama residual de concreto (LRC) .....</b>	<b>69</b>
3.1.5	<b>Água de amassamento .....</b>	<b>76</b>
3.2	FASE 2 – DOSAGEM.....	77
3.2.1	<b>1ª Etapa – Estuda da pasta de cimento .....</b>	<b>77</b>
3.2.2	<b>2ª Etapa – Estudo da argamassa de concreto .....</b>	<b>79</b>
3.2.3	<b>3ª Etapa – Esqueleto granular .....</b>	<b>81</b>
3.2.4	<b>4ª Etapa – Confecção do concreto autoadensável.....</b>	<b>82</b>
3.3	FASE 3 – ENSAIOS NO ESTADO FRESCO .....	83
3.4	FASE 4 – ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	85
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>88</b>
4.1	F1 – MATERIAIS CONSTITUINTES .....	88
4.2	F2 – DOSAGEM .....	94
4.2.1	<b>1ª Etapa – Estudo da pasta de cimento .....</b>	<b>94</b>
4.2.2	<b>2ª Etapa – Estudo da argamassa de concreto .....</b>	<b>98</b>
4.2.3	<b>3ª Etapa – Esqueleto granular .....</b>	<b>101</b>
4.2.4	<b>4ª Etapa – Confecção do concreto autoadensável.....</b>	<b>102</b>
4.3	F3 – ESTADO FRESCO .....	105
4.4	F4 – ESTADO ENDURECIDO .....	112
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>119</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>121</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O emprego de misturas de cimento é bastante antiga. A aplicação desse material está atrelada ao uso de aglomerantes, agregados e incorporações (adições e aditivos químicos) que procuram melhorar o desempenho do material quando submetido às condições de construção. O concreto é um material amplamente disseminado, composto geralmente por cimento Portland, agregados e água e é o mais importante material estrutural e de construção civil. A mistura é a mais consumida pela humanidade depois da água (NEVILLE, 2016; HELENE; ANDRADE, 2017; ASADOLLAHFARDI *et al.*, 2015).

Dois propriedades destacam o concreto como material construtivo: suas propriedades mecânicas, durabilidade e sua plasticidade. Devido à resistência à água o concreto pode ser empregado em ambientes fortemente agressivos. Já a plasticidade verificada no estado fresco do concreto permite a construção de obras com dimensões e formatos inusitados (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Nas estruturas de concreto a durabilidade também está diretamente relacionada ao total preenchimento das dimensões da peça. As falhas de concretagem são vícios construtivos que restringem a vida útil e a capacidade estrutural. Neste contexto:

A partir de 1983 e por vários anos desde então, o problema da durabilidade das estruturas de concreto foi um dos principais tópicos de interesse no Japão. Há a necessidade por trabalhadores qualificado para suficiente compactação com intuito de confeccionar estruturas de concreto duráveis [...]. Uma solução para a obtenção de estruturas duráveis de concreto independente da qualidade da mão de obra é o emprego de concreto autoadensável, que pode ser compactado em cada canto de uma fôrma, puramente por meio de seu próprio peso e sem a necessidade de compactação vibratória [...](OKAMURA; OZAWA, 1996, p. 1 tradução nossa).

O concreto autoadensável (CAA) representa uma solução dentro dos concretos especiais, capaz de benefícios econômicos, tecnológicos e ambientais. As principais características envolvem contornar obstáculos, resistência à segregação e sua capacidade de adensamento, sem a necessidade de equipamentos e procedimentos específicos. A força que promove o adensamento é o peso próprio. Desta maneira, há um preenchimento de todos os espaços das fôrmas sem necessidade de vibração mecânica ou manual. Portanto, ideal para elementos com grande densidade de armadura, difícil acesso, fôrmas complexas e fôrmas esbeltas (ANGELIN; LINTZ; BARBOSA, 2018; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; GOMES; BARROS, 2009; ASHTIANI; DHAKAL; SCOTT, 2014).

A capacidade de adensamento está diretamente ligada à habilidade de passagem por obstáculos. Já a estabilidade ou resistência à segregação é a propriedade que descreve a

separação do agregado graúdo dos demais componentes. O mecanismo que descreve essas propriedades é uma função de três variáveis inter-relacionadas: fluidez, viscosidade e coesão. Quando esse mecanismo está sujeito apenas ao efeito da gravidade e as propriedades supracitadas são alcançadas, o concreto é denominado como concreto autoadensável (CAA) (GOMES; BARROS, 2009).

Os pesquisadores Ashtiani, Dhakal e Scott (2014) evidenciaram que devido às propriedades mecânicas e no estado fresco, o concreto autoadensável (CAA) tem sido considerado como um dos avanços mais importantes na tecnologia do concreto após seu advento, há mais de duas décadas. Colocar e consolidar o concreto convencional em áreas com grandes taxas de armaduras muitas vezes impõem dificuldades que resultam em compactação ou segregação imperfeita do concreto. A capacidade de fluxo e enchimento do CAA torna-o ideal para ser usado em elementos com densa armadura, como juntas de pilares e vigas de edifícios altos.

Por outro lado, com o objetivo de aprimorar as propriedades no estado fresco e endurecido do concreto, quantidades pequenas de aditivos químicos são adicionadas. Outros materiais de natureza inorgânica também são introduzidos com o intuito de tornar a mistura de concreto mais econômica (NEVILLE, 2016). Este intuito estimula a economia de recursos ambientais e promove a otimização da indústria de concreto. Técnicas inovadoras de reciclagem e reutilização de resíduos de cimento e concreto neste contexto são de suma importância (XUAN *et al.*, 2016a).

A geração de resíduos é um dos principais problemas do processo industrial. A geração de resíduos da construção civil (RCC's) está diretamente relacionada com a economia do processo construtivo. De fato, os resíduos endurecidos de cimento e concreto, têm sido promovidos como recursos em novos produtos de construção. No entanto, segundo Xuan *et al.* (2016a), o desenvolvimento de métodos de reutilização para processar resíduos gerados a partir da produção de concreto fresco é relativamente novo. Na prática, as centrais dosadoras de concreto pronto geram diferentes tipos de resíduos, incluindo resíduos de concreto fresco, agregados recuperados, águas residuais e lamas residuais de concreto (LRC). No processo de produção da LRC, os sólidos suspensos nas águas residuais da lavagem de recuperação dos agregados são depositados em tanques de sedimentação, após a formação de uma camada de resíduo, sendo este submetido ao procedimento de secagem.

A Figura 1.1 ilustra o processo de obtenção da LRC. O resíduo de concreto ou da lavagem do caminhão betoneira é disposto em uma trincheira e levado até mecanismo de lavagem e recuperação do agregado (Figura 1.1-a). O líquido residual do processo de lavagem

é disposto em tanques de sedimentação, para a decantação das partículas mais pesadas em seus respectivos compartimento (Figura 1.1-b). A LRC gerada a partir desse processo de decantação é submetida ao processo de desidratação. A Figura 1.1-c ilustra a saída da LRC do filtro prensa. Após a retirada da água no filtro prensa a LRC é disposta em locais para a secagem ao ar (Figura 1.1-d).

Figura 1.1 – Imagens da geração da lama residual da lavagem da betoneira em uma central dosadora



(a) Disposição da LRC na trincheira de transporte



(b) Tanque de sedimentação



(c) LRC na saída do filtro prensa



(d) LRC disposta para secagem

Fonte: Xuan, Poon e Zheng (2018); Xuan *et al.*(2016a).

Produto da fabricação de concreto a LRC é resíduo altamente básico que não pode ser depositado em aterros sanitários, devido ao seu pH elevado (acima de 11) e grandes quantidades de metais pesados. Desta maneira, a incorporação desse resíduo no concreto autoadensável

representa uma alternativa para a reciclagem e aperfeiçoamento do processo fabril (XUAN; POON; ZHENG, 2018).

De maneira análoga, o uso desse concreto em peças estruturais retrata a iniciativa de utilizar concretos sustentáveis no âmbito das estruturas. Essa substituição ou adição de agregados e aglomerantes do processo produtivo do concreto convencional por materiais complementares, tais como cinzas de casca de arroz e bagaço de cana de açúcar, areia de britagem (pó de pedra) e agregados reciclados de sua própria indústria, simboliza uma busca por concretos sustentáveis, econômicos e altamente qualificados.

### 1.1. JUSTIFICATIVA

A utilização de resíduo da construção civil como material constituinte compõe uma resposta ao aprimoramento da gestão ambiental de atividades industriais. No Brasil, cerca de 9,0% do concreto fresco retornam para a indústria (XUAN; POON; ZHENG, 2018). O uso de resíduos do processo fabril no concreto acrescenta performance nos estados fresco e endurecido. Assim, o avanço das técnicas de incorporação desses materiais tornam a indústria do concreto mais ecológica e econômica (XUAN *et al.*, 2016a). Neste contexto, a LRC é um material promissor na incorporação e substituição parcial do agregado miúdo na mistura de CAA. Isto se deve às suas características granulométricas e químicas da LRC.

O concreto é uma mistura que envolve muitas possibilidades, a proporção dos materiais constituintes e suas características determinam as propriedades deste material nos estados fresco e endurecido. O CAA, apesar de exigir mais cuidados em sua dosagem, em comparação com o concreto convencional, possui a capacidade de incorporar materiais de natureza inorgânica e agregar benefícios (VAN DER VURST *et al.*, 2017). Isso é evidenciado nos estudos de Uygunoğlu, Topçu e Çelik (2014) que atestam que o uso de resíduo de mármore promove um aumento das propriedades no estado fresco do CAA quando comparado com agregado de calcário. Assim, as características dos materiais constituintes, sua proporção e propriedades mecânicas são fatores importantes para a otimização da mistura e utilização nas estruturas (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; ASHTIANI; DHAKAL; SCOTT, 2014).

Esta pesquisa pretende contribuir com o entendimento das características reológicas de concretos autoadensáveis com fins estruturais, produzidos com a adição de lama residual de concreto (LRC) proveniente do processo de fabricação de concreto. Para tal, pretende-se avaliar a influência do teor de lama residual de concreto nos parâmetros de dosagem (consumo de cimento, teor de argamassa, dentre outros), nas características físicas (consistência e viscosidade) e mecânicas (resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade) do CAA.

De posse dessas características, pode-se determinar a viabilidade da aplicação em peças estruturais na indústria de pré-fabricados.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1 Geral

Verificar os efeitos da adição de lama residual de concreto (LRC) nas propriedades do CAA estrutural no estado fresco e no estado endurecido.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Investigar as características dos materiais constituintes utilizados na confecção do CAA, conforme as respectivas normas brasileiras.
- b) Dosar e confeccionar quatro traços de CAA sem e com a adição da lama residual de concreto (LRC) nos teores de 10, 20 e 30% da massa do cimento.
- c) Verificar as propriedades no estado fresco do CAA com e sem incorporação de resíduo.
- d) Verificar as propriedades no estado endurecido do CAA e compará-los com o concreto piloto (sem adição de LRC).

## 1.3 DELINEAMENTO DA PESQUISA

A incorporação da LRC interfere nas propriedades físicas e mecânicas do CAA em ambas as fases. O uso desse concreto em peças estruturais pré-fabricadas exige que as características reológicas e mecânicas sejam determinadas afim de atenderem aos critérios construtivos.

O estudo desenvolveu-se no sentido experimental, no qual os resultados possuem um caráter quantitativo. A pesquisa foi pautada na produção de concretos autoadensáveis (CAA) com adição de lama residual de concreto (LRC).

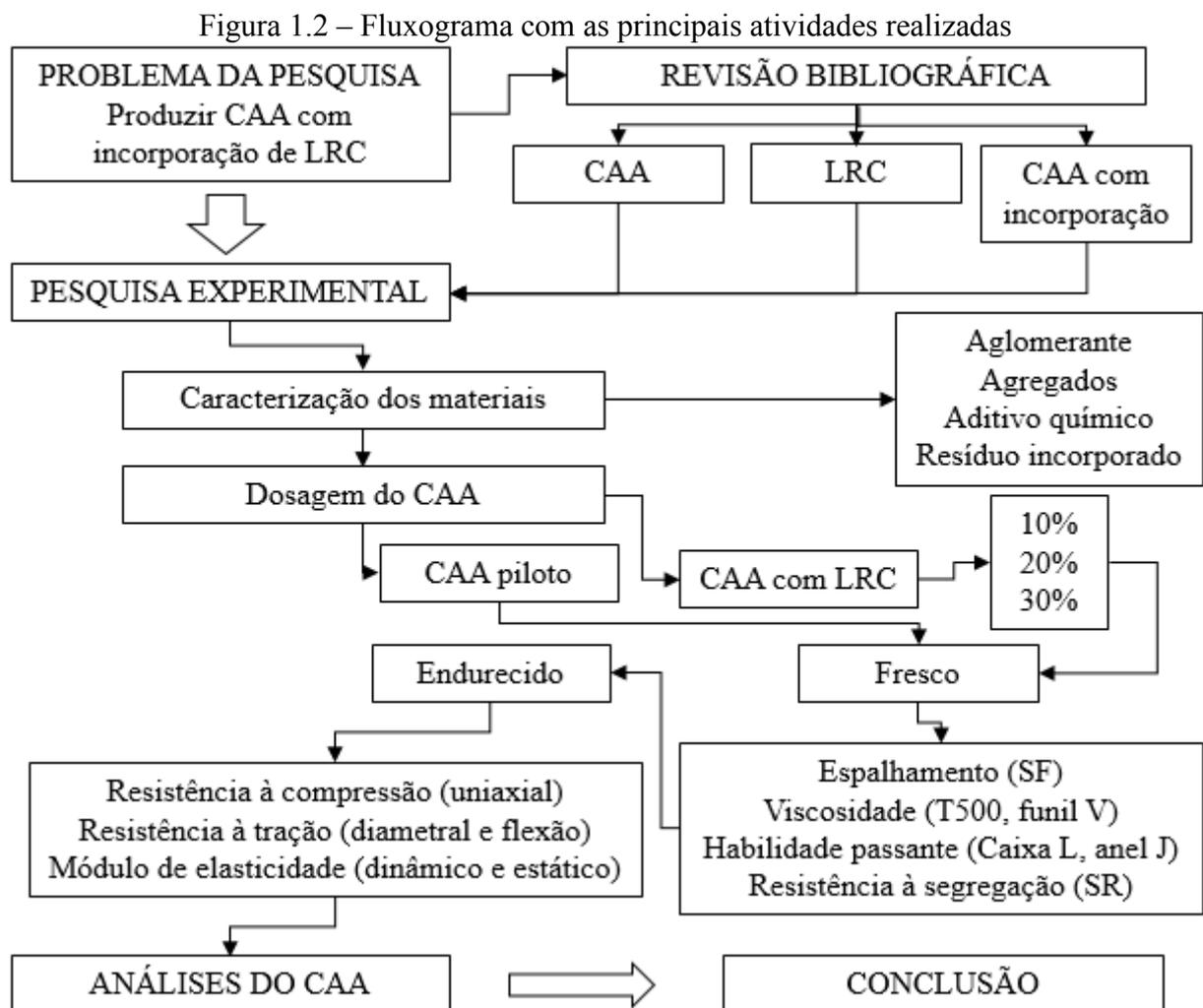
O aglomerante indicado para este estudo foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI). O tipo de cimento segue o processo de desforma precoce da produção de peças pré-moldadas na indústria de pré-fabricados, cuja resistência à compressão em idades iniciais determinam o momento da desforma. Além disso, este cimento não apresenta adições químicas ou pozolânicas.

Os agregados naturais utilizados na pesquisa, areia e brita basáltica, foram provenientes da cidade de Maringá – Paraná. A brita usada na dosagem é típica da região norte do estado do

Paraná, oriunda do processo de extração e britagem de basalto. O aditivo químico que promove a plasticidade da mistura foi pertencente à classe dos superplastificantes. Essa categoria de aditivo é ideal para a confecção e dosagem de concretos autoadensáveis, uma vez que a fluidez é alcançada com baixo teor de dosagem.

Este trabalho foi focado na obtenção de CAA com LRC no teor que atenda os parâmetros autoadensáveis (concreto fresco) da NBR 15.823 (ABNT, 2017). As taxas de adição estudadas em massa de cimento foram de 10%, 20% e 30%. A verificação da resistência à compressão axial, da resistência à tração indireta, tração na flexão, módulo de elasticidade estático indireto e módulo de elasticidade inicial são realizados aos 28 dias para comprovação dos efeitos da LRC nas características do concreto endurecido.

Produzidos os concretos autoadensáveis piloto e com adição de LRC, avaliar-se-ão os resultados obtidos para os estados fresco e endurecido com ensaios normativos brasileiros. A Figura 1.2 ilustra o esquema do programa experimental com suas principais etapas.



Fonte: Autor (2019)

#### 1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em 6 capítulos. No primeiro capítulo apresenta-se o tema CAA e LRC, a justificativa, os objetivos, o delineamento da pesquisa e a organização do trabalho.

No capítulo 2 são apresentadas a lama de residual de concreto (LRC), seu processo de obtenção e sua classificação conforme legislação brasileira, assim como, os materiais constituintes da mistura de concreto, quatro métodos de dosagem de CAA: o método de Ozawa, Maekawa e Okamura (1990), Ouchi, Ozawa e Okamura (1996) e Okamura (1997); o método de Gomes, Gettu e Aguiló (2002;2003); o método de Tutikian; Dal Molin (2007) e o método da EFNARC (2005) e as propriedades mecânicas nos estados fresco e endurecido do CAA.

No capítulo 3 são apresentados os procedimentos metodológicos e os materiais utilizados na confecção do programa experimental.

No capítulo 4 são apresentadas os resultados e discussões gerados a partir da hipótese da pesquisa, delineamento, objetivos e programa experimental.

No capítulo 5 é apresentada a conclusão.

No capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no fundamento teórico e experimental da pesquisa.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo apresenta-se o embasamento teórico utilizado para a pesquisa.

### 2.1 RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) a indústria da construção civil precisa de uma abordagem holística para atender às necessidades socioeconômicas sem efeito deletério ao meio ambiente. O fornecimento de material de construção com baixo custo está atrelado à ideia de conservação dos recursos ambientais, e ao descarte dos resíduos poluentes inerentes do processo industrial.

A geração de resíduos sólidos da construção civil é um dos principais problemas nas áreas urbanas. Isto é devido ao descarte inadequado que pode ocasionar em impactos ambientais, sociais, econômicos e de saúde pública. Para evitar a grande geração de resíduos, as empresas buscam aprimorar as técnicas e procedimentos de gestão ambiental, com o intuito de reduzir o consumo de recursos e aprimorar o descarte de resíduo (BIDONE, 2001).

O gerenciamento de resíduos da construção civil (RCC) tem como objetivo assegurar a correta manipulação desse material durante as atividades correntes de execução de obra e de serviços de engenharia. Este gerenciamento é fundamentado nas estratégias de não geração, minimização, reutilização, reciclagem e descarte adequado dos resíduos sólidos, primando pelas táticas de redução da geração de resíduo na fonte (NAGALLI, 2014). Um exemplo desta tática consiste em incorporar materiais reciclados no concreto dosado em centrais, incrementando a mistura e reduzindo os recursos, energia e emissão de gases no ambiente (LONG; GAO; XIE, 2015). A Figura 2.1 ilustra a hierarquia do sistema de gerenciamento de resíduos que atua como um conjunto de ações operacionais, com o objetivo de mitigar a geração de resíduos em uma atividade.

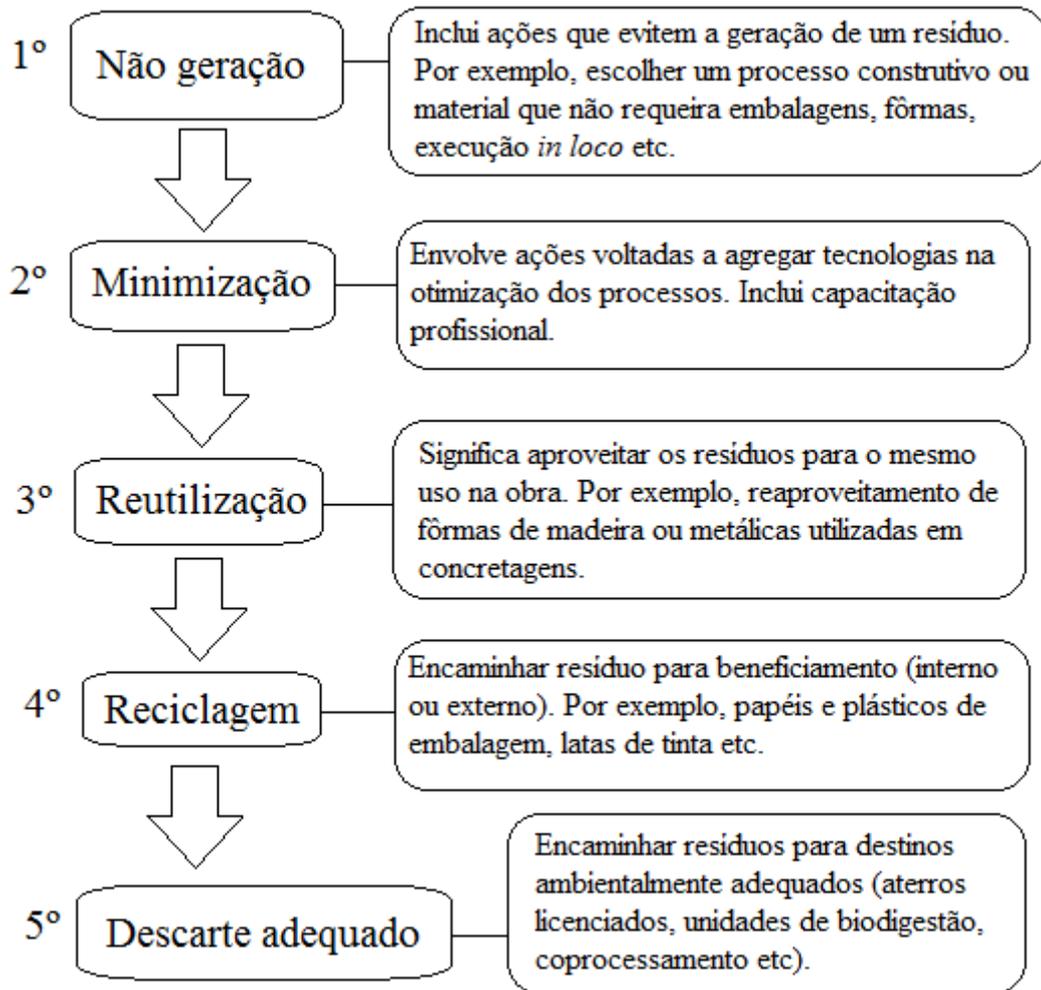
A NBR 10.004 (ABNT, 2004) define resíduo sólido como qualquer forma de matéria ou substância no estado sólido ou semissólido que resulte de atividades: industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços, de varrição e de outras atividades da comunidade capazes de causar poluição ambiental.

Para a resolução nº 307 (BRASIL, 2002) e sucessoras o RCC é proveniente de construções, reformas, reparos, demolições, preparação do solo e escavação do terreno. Segundo esta Resolução o RCC possui quatro classificações:

- a) Classe A – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados;
- b) Classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações;

- c) Classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação; e
- d) Classe D – são resíduos perigosos oriundos do processo de construção que contenham produtos nocivos à saúde.

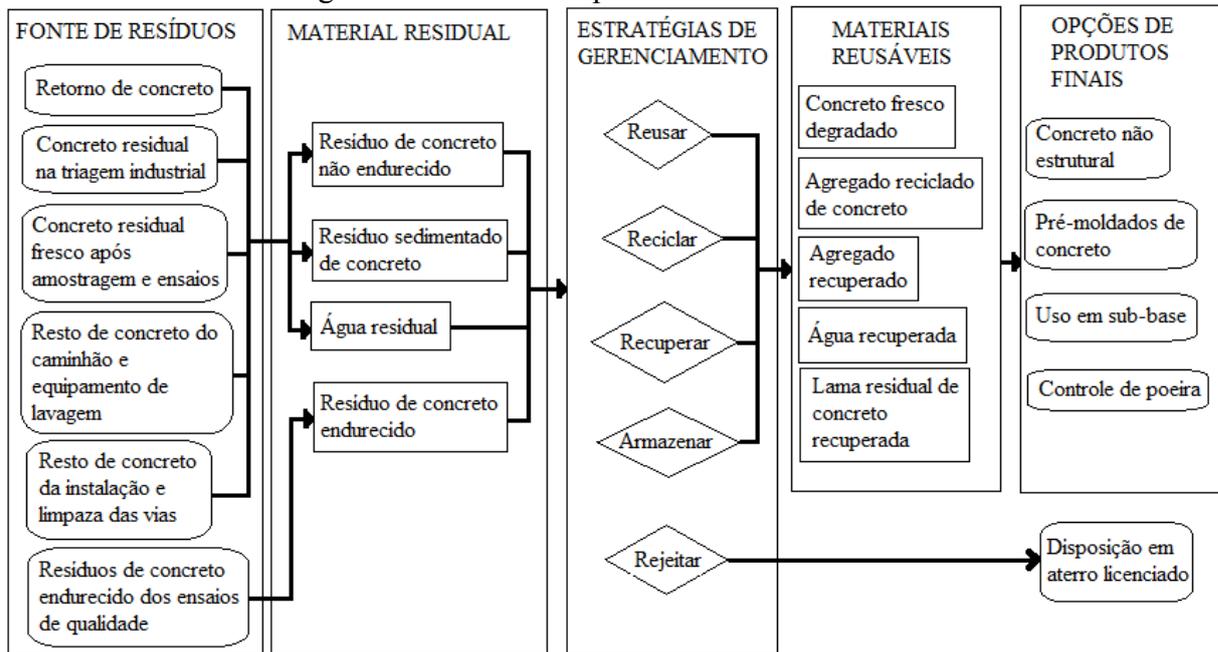
Figura 2.1 – Hierarquia da gestão de resíduos



Fonte: Nagalli (2014).

A fabricação de concreto nas centrais de dosagem produzem resíduos oriundos do processo fabril, de maneira análoga à qualquer outro. De acordo com Xuan, Poon e Zheng (2018) todos os tipos de resíduos produzidos nas centrais dosadoras estão atrelados a uma estratégia de gerenciamento, como: reciclar para produtos de baixa categoria, reusar em uma nova mistura, reciclar após endurecimentos do concreto residual ou recuperar agregados com o processo de lavagem. A Figura 2.2 ilustra um esquema com as fontes de resíduo nas centrais dosadoras, materiais residuais, táticas de gestão, materiais reutilizáveis e produtos finais.

Figura 2.2 – Gestão do processamento de resíduos



Fonte: adaptado de Xuan, Poon e Zheng (2018).

Segundo Uygunoğlu, Topçu e Çelik (2014) é possível incorporar agregado reciclável e resíduo de mármore em misturas de CAA. De acordo com estes autores, a incorporação dos agregados reciclados de concreto e resíduo de mármore proporcionaram um incremento na sustentabilidade e na economia de recursos. Os ensaios no estado fresco demonstraram que a incorporação de mármore aumentou a trabalhabilidade da mistura. No estado endurecido não houve diferença suficiente nos resultados envolvendo incorporação e misturas controle convencionais. Logo, a incorporação de resíduo de mármore e agregados recicláveis é possível e apresenta uma tática para a gestão de resíduos em centrais dosadoras.

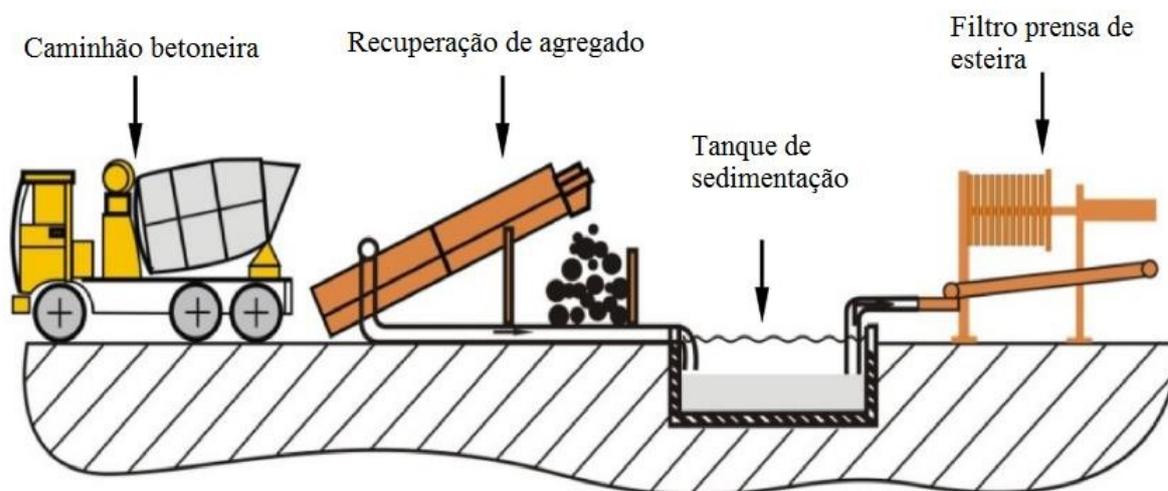
A água residual do processo de lavagem dos equipamentos nas centrais dosadoras podem ser reutilizadas para a produção de concreto. De acordo com Asadollahfardi *et al.* (2015), não houve significativa alteração na resistência à compressão de 54 misturas de concreto confeccionadas com água residual de lavagem. O estudo estatístico e experimental levantado para estas misturas indicaram que a água residual pode ser utilizada na produção de concreto fresco. Segundo Paula e Ilha (2014) para o reuso da água residual na própria indústria há a necessidade de acrescentar ao sistema de tratamento dois processos: coagulação e correção. Estes processos tem a finalidade de corrigir o pH, cor aparente e turbidez.

Outro subproduto do gerenciamento de resíduos em uma central dosadora é a lama residual de concreto (LRC). Essa lama tem origem em alguns procedimentos de lavagem dos equipamentos, betoneira e agregados.

### 2.1.2 Lama Residual de Concreto (LRC)

A lama residual de concreto (LRC) é o sólido ou semissólido residual que é depositado por meio de sedimentação no tanque de separação. O tanque é preenchido com água residual da lavagem de misturadores, caminhões betoneira e rejeito de concreto fresco nas centrais dosadoras (HOSSAIN; XUAN; POON, 2017). A Figura 2.3 ilustra o procedimento para a disposição de resíduo de concreto fresco ou da lavagem do caminhão betoneira.

Figura 2.3 – Procedimento de disposição de resíduos

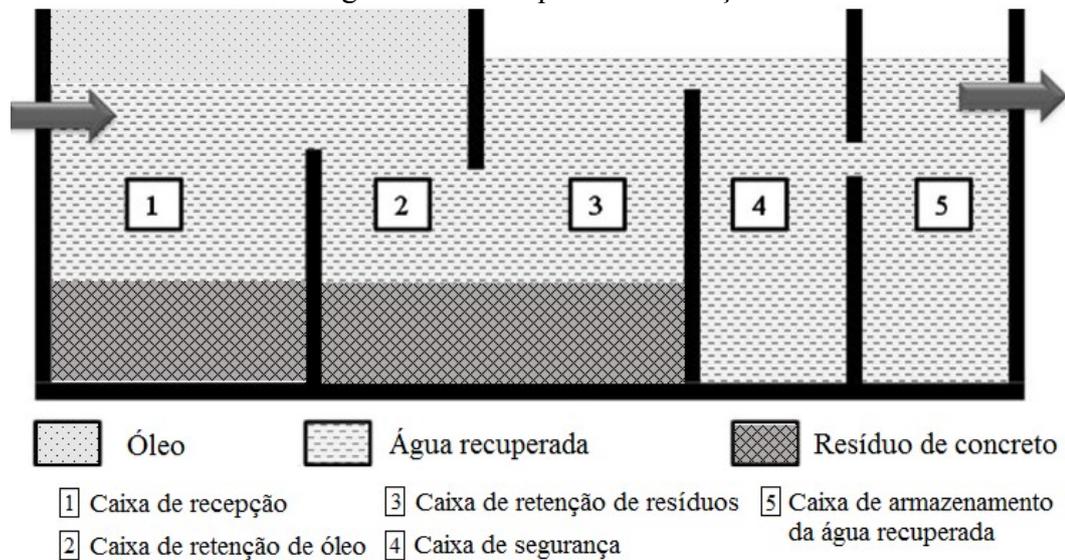


Fonte: adaptado de Xuan *et al.* (2016b).

O tanque para decantação possui cinco compartimentos que são conectados e dispostos conforme cada função que desempenham (Figura 2.4). O primeiro (1) é a caixa de recepção, regula o fluxo e recebe água do sistema de gerenciamento. Toda a pasta de concreto proveniente dos recicladores também é descarregada nesta caixa. O segundo compartimento (2) é a caixa de retenção de óleo. O terceiro compartimento (3) é a caixa de retenção de resíduos, na qual a água e os resíduos sólidos são separados por decantação e os sólidos são retidos. O quarto compartimento (4) é chamado de caixa de segurança, este compartimento retém qualquer material que tenha atravessado as três primeiras caixas, garantindo que apenas a água atinja o último compartimento (5), que armazena a água recuperada (VIEIRA; FIGUEIREDO, 2016).

Na Figura 2.5-a é apresentado um depósito semissólido de LRC em uma central dosadora, localizada em Poitou-Charentes, na França. A LRC foi depositada ao ar livre ao lado de outros materiais brutos. O teor de umidade médio observado nas amostras foi de 155,2%; nesse caso não houve processo de secagem através da desidratação no filtro prensa (AUDO; MAHIEUX; TURCRY, 2016). O formato de placa é adquirido quando a LRC é processada no filtro prensa (Figura 2.5-b).

Figura 2.4 – Tanque de decantação



Fonte: adaptado de Vieira e Figueiredo (2016).

Figura 2.5 – Depósito de LRC úmida e parcialmente desidratada



(a) Depósito LRC



(b) LRC após drenagem

Fonte: (a) Audo, Mahieux e Turcry (2016) e (b) Kou, Zhan e Poon (2012).

A Tabela 2.1 relaciona a composição química da LRC no estudo de Xuan *et al.* (2016b) determinada através do ensaio de fluorescência de raio-X em quatro amostras de LRC.

Tabela 2.1 – Composição química da LRC

Composto	Amostra (%)			
	1	2	3	4
MgO	1,22	1,07	1,88	1,69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,34	7,95	8,21	8,66
SiO <sub>2</sub>	32,47	31,24	32,84	33,63
SO <sub>3</sub>	3,12	2,92	2,71	2,99
K <sub>2</sub> O	1,55	1,55	1,53	1,60
CaO	35,54	35,78	36,92	35,27
TiO <sub>2</sub>	0,52	0,51	0,54	0,52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,75	6,44	6,72	6,89

Fonte: Xuan *et al.* (2016b)

Nos estudos de Kou, Zhan e Poon (2012) a lama residual de concreto (LRC) apresentou algumas propriedades como: um módulo de finura de 3,73; densidade de 1,83 g/cm<sup>3</sup> (saturada superfície seca) e absorção de 38% de água. Nos estudos de Audo, Mahieux e Turcry (2016) a LRC foi incorporada no concreto como substituição do filler. Os resultados demonstraram um consumo maior de aditivo e uma variabilidade na resistência à compressão.

Nos estudos Xuan *et al.* (2016a) a LRC foi incorporado nas misturas de concreto como substituto parcial do agregado miúdo, e como aglomerante na produção de blocos de concreto. Neste estudo a LRC foi considerada um material potencialmente cimentante e com a característica de reagir capturando dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

### **2.1.2 Legislação e Classificação da Lama Residual de Concreto (LRC)**

O amparo legal para gestão de resíduos no Brasil avançou com a Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981 (BRASIL, 1981). Esta lei estabeleceu o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), responsável pela proteção e melhoria da qualidade ambiental.

A Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010) instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Com isso, os resíduos da construção civil seguem as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão da Resolução nº 307 do CONAMA (BRASIL, 2002) e sucessoras. O incentivo à reciclagem, sustentabilidade e reponsabilidade compartilhada compões a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Neste contexto a LRC quando no estado seco pode ser classificada como Classe A, alínea c; de acordo com a Resolução nº 307 do CONAMA (BRASIL, 2002).

Com a Resolução nº 448 do CONAMA (BRASIL, 2012) os geradores de resíduos deverão ter como objetivo prioritário mitigar a geração de resíduos. Complementarmente a redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos e disposição final adequado dos rejeitos. De acordo com a Lei 9.605 (BRASIL, 1998) a disposição final de LRC sem a devida Licença de Operação junto aos órgãos ambientais configura-se como crime ambiental, cabendo multa ou detenção do responsável.

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica a LRC de acordo com as propriedades apresentadas. Uma vez que a LRC possui a composição originária do processo fabril (concreto fresco, lavagem dos equipamentos, lavagem dos agregados, entre outros) e a presença de uma substância tóxica (metais pesados, cloretos, e outros) pode classificá-la como perigosa (Classe I). De outro modo, caso a LRC não apresente periculosidade, mas elevadas concentrações de poluentes ao meio ambiente ou atividade química, esse resíduo pode ser reclassificado como:

não perigoso e não inerte (Classe II – A). Se o resíduos não apresentar atividade química a norma o classifica como: não perigoso e inerte (Classe II – B).

## 2.2 CONCRETO AUTOADENSÁVEL (CAA)

O concreto é uma mistura antiga, os antigos Egípcios utilizavam misturas primitivas com gesso. Os Gregos e Romanos misturam pedras, telhas e areias ao calcário e água. Esses foram os primórdios da mistura de concreto. Inicialmente era produzido com a mistura de somente três materiais principais: cimento, agregados e água. O advento do cimento Portland tornou-se o principal aglomerante nas misturas de concreto. Com o intuito de aprimorar as propriedades nos estados fresco e endurecido, pequenas quantidades de aditivos químicos foram adicionadas. De modo análogo outros materiais inorgânicos foram incorporados, compondo o concreto contemporâneo (NEVILLE, 2016).

O concreto feito com cimento Portland é o mais importante material estrutural e de construção civil. É o mais recente dos materiais de construção de estruturas, e pode ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida (HELENE; ANDRADE, 2010).

Segundo Mehta e Monteiro (2014) há três razões principais para o uso em larga escala do concreto em estruturas. A primeira é a resistência do concreto à água, devido a sua natureza, o material não sofre graves deteriorações perante a exposição à umidade, o que permite seu uso em fundações, estruturas, muros de arrimo, barragens, tubos, plataformas marítimas entre outros elementos estruturais. A segunda razão do uso do concreto é sua plasticidade durante o estado fresco. A facilidade com que os elementos estruturais de concreto podem ser obtidos através de uma variedade de formas e tamanhos é determinada pela fluidez que o material escoava para o interior das fôrmas pré-moldadas e pré-fabricadas. E a terceira razão é referente ao custo e disponibilidade do material para as obras correntes. Isto devido aos materiais constituintes serem relativamente baratos e facilmente encontrados.

As principais características do CAA estão ligadas à sua plasticidade. Envolver, contornar obstáculos, permanecer com a mistura estável e sua capacidade de adensamento próprio, sem a necessidade de equipamentos e procedimentos específicos. A força que promove o adensamento é unicamente o peso próprio da mistura (ANGELIN; LINTZ; BARBOSA, 2018; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; GOMES; BARROS, 2009; ASHTIANI; DHAKAL; SCOTT, 2014).

Um concreto é considerado autoadensável se três propriedades forem alcançadas simultaneamente: fluidez, coesão necessária para que a mistura escoe intacta entre barras de aço (ou habilidade passante) e resistência à segregação (EFNARC, 2005).

De acordo com Neville (2016) as proporções especiais dos componentes de alto desempenho como: elevado consumo de cimento, de aditivo superplastificantes e relação água/cimento reduzidas, influenciam as propriedades do concreto fresco de modo diferente dos concretos convencionais.

O CAA possui muitas vantagens em comparação com o concreto convencional. Entretanto, uma desvantagem é a elevada sensibilidade no estado fresco. O CAA é mais sensível a pequenas mudanças na dosagem, propriedades dos materiais e métodos de produção. A sensibilidade é um requisito importante na produção de concreto em grande quantidade. O equilíbrio entre a fluidez, habilidade passante e segregação é resultado do uso de superplastificante e grande quantidade de materiais finos na mistura. Em alguns casos utiliza-se aditivo modificador de viscosidade (AMV) para garantir a estabilidade (VAN DER VURST et al., 2017).

Gomes e Barros (2009) reforçam que para alcançar a combinação de propriedades exigida nas misturas de CAA a fluidez e a viscosidade da pasta devem ser ajustadas e balanceadas por seleção e proporção cuidadosas de cimento e adições. A limitação da relação água/cimento pela adição de um superplastificantes e, opcionalmente, um AMV são a chave para obter boa capacidade de preenchimento, habilidade de passagem por obstáculos e resistência à segregação.

Neste sentido, o volume de pasta deve ser maior que o volume de vazios no agregado, de modo que todas as partículas individuais do agregado sejam recobertas e lubrificadas por uma camada de pasta. A relação agregado miúdo/agregado graúdo da mistura é reduzida, de modo que as partículas individuais de agregado graúdo sejam completamente revestidas por uma camada de argamassa (GOMES; BARROS, 2009).

### **2.2.1 Materiais Constituintes**

De acordo com Helene e Andrade (2010) o concreto de Cimento Portland deve conter cimento, água e agregados, além da possibilidade de contar com aditivos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições minerais. A proporção entre os diversos constituintes é buscada pela tecnologia do concreto, para atender simultaneamente as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade requeridas para o concreto.

### 2.2.1.1 Aglomerante

O cimento Portland é definido como um material pulverulento, aglomerante hidráulico, composto por silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio que em contato com a água hidrata-se. Após o endurecimento não se degradam na presença de água (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), na confecção de concretos autoadensáveis não há um cimento específico a ser utilizado. Para a confecção de CAA podem ser utilizados os mesmos cimentos já adotados para a produção de concretos estruturais convencionais. Contudo, as prescrições referentes à durabilidade e usos adequados precisam ser idênticas. A escolha correta do tipo de cimento normalmente depende das exigências específicas (GOMES; BARROS, 2009; EFNARC, 2005).

O CAA apresenta em sua composição um elevado consumo de cimento e diminuição do agregado graúdo, gerando dessa maneira um consumo maior de pasta de cimento, em comparação ao concreto convencional. Isto ocasiona um aumento no calor de hidratação. Nesse sentido a substituição de partes do cimento por fillers, materiais pozolânicos e outras incorporações trazem contribuições positivas (GOMES, 2002).

Os pesquisadores Mohammed, Dawson e Thom (2013) focaram sua pesquisa na substituição de altos níveis de cimento por fillers (em torno de 70%) em CAA. Os concretos com a pó de calcário obtiveram uma hidratação diferente dos concretos com cinza volante. Neste estudo os concretos confeccionados com cinza volante demonstraram resultados mais adequados para a produção de CAA.

Ainda neste contexto de substituição, Pelisser, Vieira e Bernardin (2018) demonstraram que é possível confeccionar CAA com baixo teor de cimento. Os resultados mostraram que é viável a produção de CAA de baixa resistência (25 MPa), com a fluidez necessária e reduzido consumo de aglomerante. Isto quando são utilizadas adições minerais de metacaulim e cinzas volantes. Isso torna o CAA mais eficiente, com importantes reduções de custos de cimento e impacto ambiental.

A incorporação de resíduos químicos oriundos de processos fabris também é benéfica para algumas misturas de CAA. A incorporação de resíduos da serragem de mármore (material fino) em concretos com fibras de polipropileno e cinza volante, incrementam a durabilidade do CAA. A resistência ao ataque de ácidos e sulfatos é aumentada com essa adição. As características de absorção e porosidade para teores de até 10% de incorporação na mistura são também melhoradas (AARTHI; ARUNACHALAM, 2018).

No sentido de reduzir o impacto ambiental de misturas com cimento Portland, Schoon *et al.* (2015) conduziram pesquisas com o aproveitamento do lodo residual do processo de lavagem do caminhão betoneira como subproduto na produção de clínquer do cimento Portland. Contudo, segundo os pesquisadores as características do lodo residual variam conforme a região, devido aos materiais constituintes da mistura e o processo de separação. Os resultados demonstraram que o uso desse material como matéria prima alternativa na produção do clínquer do cimento Portland não é adequada.

#### 2.2.1.2 Agregado graúdo

O agregado é um material granular adicionado à um meio cimentício para produzir concreto ou argamassa (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A princípio os agregados eram tidos como materiais inertes, dispersos na pasta de cimento, e eram utilizados principalmente por razões econômicas. Contudo, pode-se interpretá-lo como um material de construção coeso por meio da pasta de cimento, idêntico à alvenaria. Algumas vezes na mistura os agregados influenciam no desempenho, devido às suas propriedades térmicas, químicas e físicas. Desta maneira não são totalmente inertes (NEVILLE, 2016).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), em CAA alguns critérios para escolha dos agregados precisam ser estabelecidos: a necessidade dos agregados miúdos e graúdos terem procedência petrográfica conhecidas, apresentarem menor granulometria, curvas granulométricas contínuas e serem inertes. Na composição do concreto, a aderência agregado-pasta de cimento exerce um papel importante para a interação entre os dois componentes. Assim, a forma e a textura superficial do agregado são fatores relevantes no comportamento mecânico. Embora agregados angulares com superfícies ásperas apresentem melhor aderência com a pasta de cimento que agregados lisos e arredondados, podem surgir efeitos opostos no aumento do consumo de água e redução da trabalhabilidade se a angulosidade for muito acentuada. Por isso, indica-se para CAA agregados que possuam índice de forma o mais próximo possível de 1 (um) e diâmetro máximos não superiores à 19 mm.

A distribuição granulométrica do agregado influencia no volume de vazios e por conseguinte no empacotamento dos grãos. Como resultado, pode alterar a fração volumétrica das britas que serão incorporadas em uma mistura de concreto, influenciando no módulo de elasticidade e retração por secagem (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De uma maneira geral as especificações para agregados são as mesmas exigidas para o concreto convencional. Gomes e Barros (2009) recomendam que partículas com diâmetros inferiores a 0,125 mm devam ser consideradas materiais finos. Nesse contexto a EFNARC

(2005) cita a importância dos componentes finos na propriedade de coesão do CAA. A distribuição granulométrica ajuda a pasta de cimento a reduzir o atrito interno entre as partículas de areia.

Os estudos de Mohseni *et al.* (2017) demonstraram que é possível utilizar agregados graúdos oriundos da reciclagem em CAA estrutural. A substituição parcial de agregado graúdo natural em concretos com fibras de aço e polipropileno foi possível e adequada. Houve uma redução da resistência à compressão avaliada, contudo, sem comprometer o uso ou as condições construtivas.

Essas características também ocorrem no uso de resíduo de borracha. Segundo Aslani *et al.* (2018a) o uso de materiais reciclados de borracha alteram algumas propriedades das misturas de CAA. O uso desse resíduo como fino na mistura aumenta a fluidez, mas em contrapartida reduz a resistência à compressão, além de possibilitar uma redução no consumo de cimento na ordem de 40%.

A dimensão ideal para essa incorporação em CAA é em torno de 5 mm. Concretos confeccionados com agregados de borracha com diâmetro de 2; 5 e 10 mm apresentam um aumento da resistência à compressão até o valor de 5 mm, e uma redução para os valores de 10 mm. Desta maneira, a dimensão de 5mm apresenta-se como pico entre esses valores do diâmetro dessa incorporação (ASLANI *et al.*, 2018b).

### 2.2.1.3 Agregado miúdo

De modo global, todas as areias são adequadas para a produção do CAA. Pode-se utilizar tanto areias naturais quanto artificiais. Deve-se ter um cuidado especial ao usar areias artificiais, pois normalmente apresentam composição granulométrica com descontinuidades (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

A seleção do agregado miúdo está relacionada à demanda de água, fator essencial por sua influência sobre a coesão e fluidez do concreto. Agregados miúdos com partículas arredondadas e lisas são preferíveis para produção de CAA porque aumentam a fluidez da mistura sem alterar a quantidade de água. Quanto mais angulosas forem as partículas do agregado miúdo, maior será a resistência ao cisalhamento das argamassas, dificultando a capacidade de se deformar do concreto (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Neste contexto a EFNARC (2005) descreve que a influência dos agregados finos nas propriedades frescas do CAA é significativamente maior do que a dos agregados graúdos. Frações de partículas menores que 0,125 mm são consideradas como um aporte adicional de

filer para efeito de dosagem, e aliados ao aglomerante conferem viscosidade e coesão da mistura.

Os pesquisadores Sua-Iam e Makul (2013) estudaram o uso da cinza do bagaço de cana como agregado miúdo no CAA contendo filer. Os resultados demonstraram bloqueios nos ensaios do funil-V e anel-J em teores com 40% de substituição. Contudo, o massa unitária do CAA reduziu com a incorporação da cinza do bagaço de cana, caracterizando um concreto leve e com baixos custos de manutenção à longo prazo. O uso dessa incorporação reduziu a relação água/cimento garantindo concretos mais resistentes, como também incrementou o desenvolvimento da resistência à compressão nas idades iniciais, pelo efeito do empacotamento e reações pozolânicas.

Por outro lado a substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de pneus de borracha apresentou efeitos negativos no CAA. De acordo com Hesami, Salehi Hikouei e Emadi (2016) a substituição do agregado miúdo por grãos de borracha de pneus gera prejuízos nas propriedades reológicas do CAA fresco. No estado endurecido, de modo semelhante, houve um decréscimo na resistência à compressão, tração indireta, tensão na flexão, abrasão e módulo de elasticidade.

#### 2.2.1.4 Aditivos

Um aditivo pode ser definido como um produto químico que é adicionado à mistura de concreto em teores não superiores a 5% da massa do cimento, salvo em casos especiais (NEVILLE, 2016). Possui a finalidade de modificam para melhorar algumas de suas propriedades no sentido de adequá-las a determinadas condições (ABNT NBR 11.768-1, 2019).

Conforme ACI C 212.3 R-16 (ACI, 2016) há 16 finalidades notáveis para o uso destes materiais, como: aumentar a plasticidade do concreto sem aumentar o consumo de água, reduzir a exsudação e segregação, acelerar e reduzir o tempo de pega, acelerar as taxas de desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, reduzir a taxa de evolução do aquecimento e aumentar a durabilidade do concreto em condições específicas de exposição, entre outras.

A NBR 11.768-1 (ABNT, 2019) - Aditivos para concreto de cimento, também adota uma classificação própria, sendo os aditivos classificados como:

- a) redutor de água tipo I (RA1, RA1 – R, RA1 – A);
- b) alta redução de água tipo II (RA1, RA1 – R, RA1 – A);
- c) controlador de hidratação (CH);
- d) acelerador de pega (AP);
- e) acelerador de resistência (AR);

- f) acelerador de pega para concreto projetado (APP);
- g) compensador de retração (CR);
- h) redutor de retração (RR);
- i) incorporador de ar (IA);
- j) incorporador de ar para concreto leve (IA – L);
- k) redutor de corrosão (RC);
- l) modificador de viscosidade retentor de água (MV – RT);
- m) modificador de viscosidade antisegregante (MV – AS);
- n) redutor de absorção capilar (RAC);
- o) redutor de permeabilidade (RP); e
- p) aditivo para concreto vibroprensado (CVP).

As letras R e A nos aditivos redutores de água classificam estes conforme a influência no tempo de pega, sendo: R – retardador; A – acelerador, respectivamente.

A distinção entre os agentes redutores de água normais (P-Plastificantes) e os de alta eficiência (Sp-Superplastificantes) é o desempenho apresentado quando comparados a uma mistura de concreto de referência, sendo os primeiros responsáveis por uma redução de 5% e os últimos de 12% na quantidade de água da mistura de concreto, respectivamente (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Quando o cimento é misturado com um líquido tão polar como a água, as partículas sólidas tendem a flocular, devido à falta de repulsão eletrostática entre as partículas. Admitir a mistura floculada implica que as partículas de cimento aprisionem certa quantidade de água dentro do flóculo e que essa água fique indisponível para lubrificar a mistura. Na presença do aditivo redutor de água ou plastificante, o flóculo de partículas é dividido em mais partículas individuais, reduzindo as forças de atração entre as partículas e permitindo grande mobilidade (AÏTCIN, 2000).

De acordo com Ahmad (2013), o tipo e a dosagem de aditivo superplastificante têm um efeito significativo em ambas as fases do CAA. Os estudos com consumos de aditivo entre 0,72 a 0,93 l/kg de cimento, demonstraram que a dosagem de aditivo é decisiva para garantir a habilidade passante, resistência à segregação e fluidez do CAA. No estado endurecido o consumo de aditivo foi fator relevante na resistência à compressão. Por outro lado, o tipo de aditivo – com base química discrepante, demonstrou influência na resistência à penetração de água no concreto.

A dosagem de aditivo, como também sua eficiência, podem estar atrelados às propriedades da água. Segundo Esfahani, Reisi e Mohr (2018) o uso de água magnetizada em misturas de CAA chegam a incrementar 12% na resistência à compressão. No estado fresco o uso da água magnetizada proporcionou uma redução de 10% no consumo de água. O uso da água magnetizada não influencia a viscosidade do CAA, apenas fomenta a capacidade de fluir e, conseqüentemente, a redução de água.

A demanda de viscosidade é alcançada com o uso de materiais finos ou com o uso de uma classe de aditivos modificadores de viscosidade (AMV). O AMV pode ser classificado de acordo com sua base orgânica (polissacarídeos, celulose, entre outros) ou inorgânica (nanosílica, entre outros). A incorporação de AMV está atrelada à uma redução da relação água/cimento, o que aprimora a viscosidade, e com isso a estabilidade do CAA (ISIK; OZKUL, 2014).

#### 2.2.1.5 Adições e incorporações químicas

As adições minerais são materiais silicosos finamente divididos e adicionados ao concreto em quantidades entre 20 a 70% do cimento. As pozolanas naturais e alguns subprodutos industriais são fonte primária de adições minerais. Devido à aspectos econômicos e ambientais os subprodutos da indústria são utilizados com o intuito de reduzir os custos com recursos naturais, energia e disposição final. Com o controle de qualidade adequado, a adição de pozolanas e subprodutos cimentícios geram uma economia na quantidade de aglomerante, cujo processo de sintetização é oneroso. As adições são classificadas conforme suas características: cimentante (escória), pozolânica (cinza volante) ou ambas (cinza volante + filer) (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Sethy, Pasla e Chandra Sahoo (2016) é possível adicionar até 90% escória no CAA. No estudo utilizando grandes volumes de incorporação de escória, o CAA demonstrou um decréscimo na viscosidade plástica conforme a aumento na incorporação. A tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) permaneceu constante e próxima de zero. A resistência à compressão apresentou decréscimo de resistência conforme o aumento no teor de escória.

As adições podem apresentar um comportamento benéfico quando associados à técnica de dosagem com materiais reciclados. Os estudos de Kapoor, Singh e Singh (2016) com misturas de CAA, demonstraram que a adição de sílica ativa ou metacaulim, no valor de 10% são capazes de restaurar o efeito deletério da substituição de 50% do agregado natural por agregado reciclável.

Segundo Hemalatha, Ramaswamy e Chandra Kishen (2015) a incorporação de sílica ativa em misturas de CAA proporciona uma menor interfase de transição entre as diferentes idades de cura. No estudo, utilizado um procedimento de homogeneização, as propriedades da microestrutura coincidiram com as macro propriedades obtidas experimentalmente. Em misturas de CAA sem adição química, não houve mudança significativa nas propriedades após os 28 dias, onde misturas com adição de cinza volante e sílica ativa apresentaram reações posteriores.

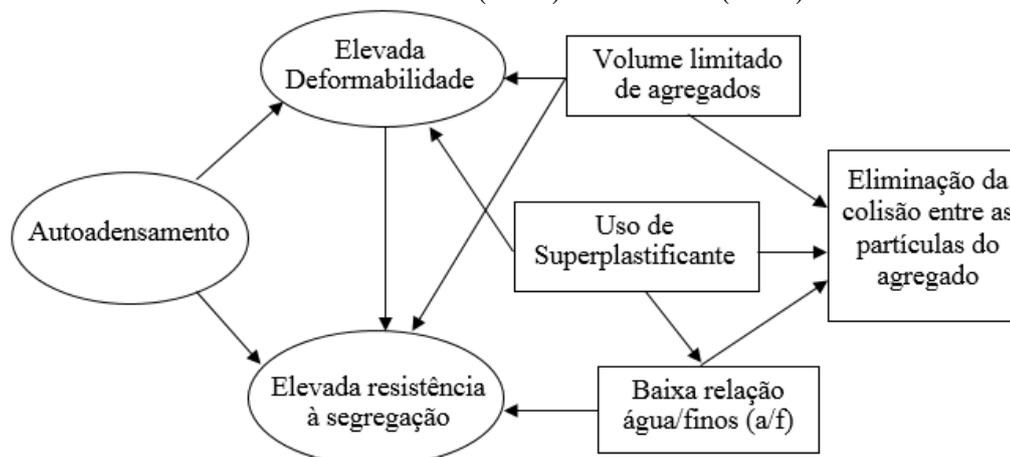
## 2.2.2 Dosagem do Concreto Autoadensável

A dosagem de CAA é apontada como o ponto crítico em comparação com o concreto convencional, pois envolve quantidade de aditivos químicos e propriedades distintas do concreto convencional.

### 2.2.2.1 Método de Ozawa, Maekawa e Okamura (1990), Ouchi, Ozawa e Okamura (1996) e Okamura (1997)

O método de dosagem propostos por Ozawa, Maekawa e Okamura (1990), Ouchi, Ozawa e Okamura (1996) e Okamura (1997) é considerado pioneiro entre os métodos de dosagem. O método de característica experimental considera que o concreto consiste em duas fases: argamassa e agregado graúdo. Os componentes da pasta, relação água/materiais finos (a/f) e aditivo superplastificante ( $S_p$ ), são decisivos para a obtenção do concreto autoadensável e resistência mecânica (GOMES; BARROS, 2009). A Figura 2.6 ilustra os fatores envolvidos neste método de dosagem.

Figura 2.6 – Esquema de Ozawa, Maekawa e Okamura (1990), Ouchi, Ozawa e Okamura (1996) e Okamura (1997)

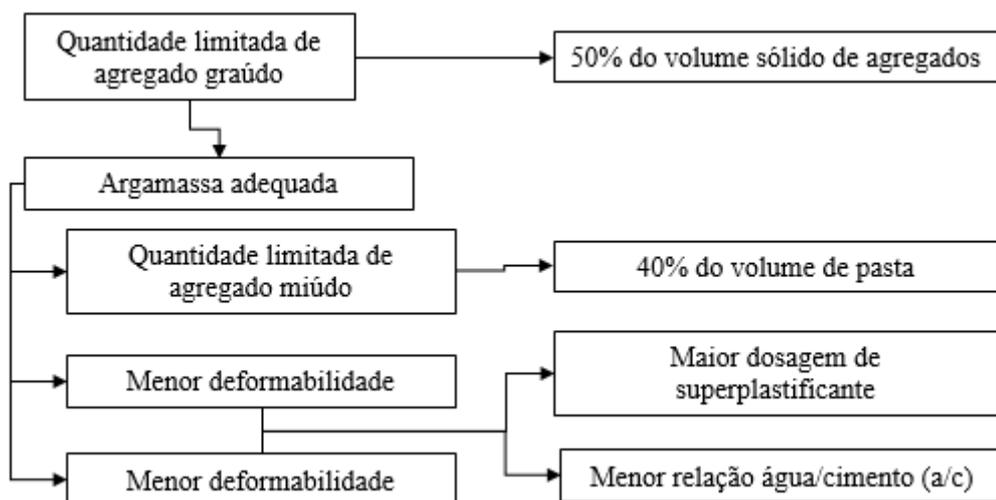


Fonte: Adaptado de Gomes e Barros (2009).

De acordo com Okamura e Ouchi (2003), os teores de agregados graúdo e miúdo são fixados de modo a que a autocompatibilidade possa ser facilmente conseguida ajustando a relação água/materiais finos ( $a/f$ ) e a dosagem de superplastificante ( $S$ ). Desta maneira, a quantidade de agregado graúdo no concreto é fixado em 50% do volume sólido. O teor de agregado miúdo é fixado em 40% do volume da argamassa. A relação água/materiais finos, em volume, é assumida entre 0,9 e 1,0 dependendo das propriedades do material fino. A dosagem do superplastificante e a relação água/materiais finos final são determinadas de forma a garantir a capacidade de adensamento próprio.

Na dosagem de concreto convencional, a relação água/materiais finos ( $a/f$ ) é fixada com foco na obtenção da resistência necessária. Com o concreto autoadensável, porém, a relação  $a/f$  é baseada na capacidade de adensamento próprio, pois a capacidade de adensamento é bastante sensível a esta relação. Na maioria dos casos, a resistência necessária não rege a relação água/cimento, porque a relação água/materiais finos é pequena o suficiente para obter a resistência necessária para estruturas comuns (OKAMURA; OZAWA, 1996; VAN DER VUST *et al.*, 2017). A Figura 2.7 ilustra o método de dosagem.

Figura 2.7 – Esquema do método de Ozawa, Maekawa e Okamura (1990), Ouchi, Ozawa e Okamura (1996) e Okamura (1997)



Fonte: Adaptado de Okamura e Ouchi (2003).

A dosagem de superplastificante por meio da relação superplastificante/materiais finos ( $S_p/f$ ) e a relação água/materiais finos ( $V_a/V_f$ ), em volume, são determinadas através de ensaios na argamassa. As propriedades de alta fluidez e moderada viscosidade, exigidas para a argamassa, são alcançadas variando a dosagem de superplastificante e a relação água/materiais finos (GOMES; BARROS, 2009).

Os parâmetros que definem a fluidez e a viscosidade da argamassa são  $G_m$  e  $R_m$ , consecutivamente. O parâmetro  $G_m$  (Equação 2.1) é medido através do ensaio de consistência no tronco de cone (Figura 2.8).

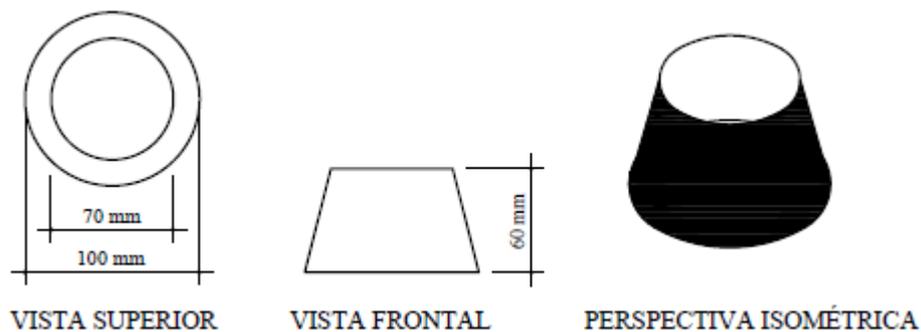
$$G_m = \left( \frac{d_1 d_2 - d_0^2}{d_0} \right)^2 \quad (2.1)$$

Em que,  $G_m$  – Espalhamento relativo.

$d_1$  – Diâmetro de espalhamento (mm) em uma direção perpendicular à  $d_2$ .

$d_2$  – Diâmetro de espalhamento (mm) em uma direção perpendicular à  $d_1$ .

Figura 2.8 – Tronco de cone para ensaios na argamassa



Fonte: adaptado de Gomes e Barros (2009).

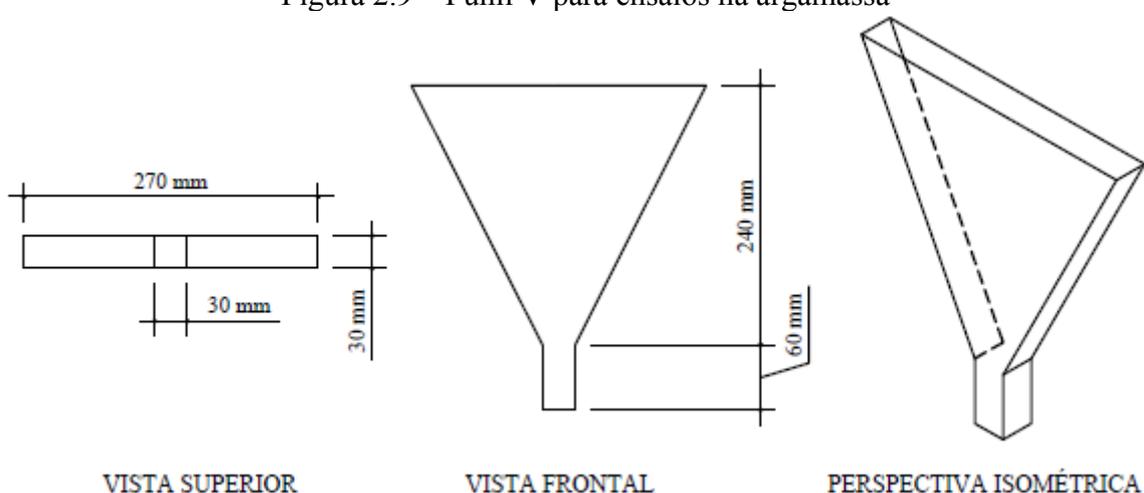
O parâmetro  $R_m$  (Equação 2.2) é medido através do ensaio no Funil V para argamassa (Figura 2.9).

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (2.2)$$

Em que,  $R_m$  – Tempo de escoamento relativo (s).

$t$  – Tempo de fluxo (s) da argamassa no funil V (Figura 2.9)

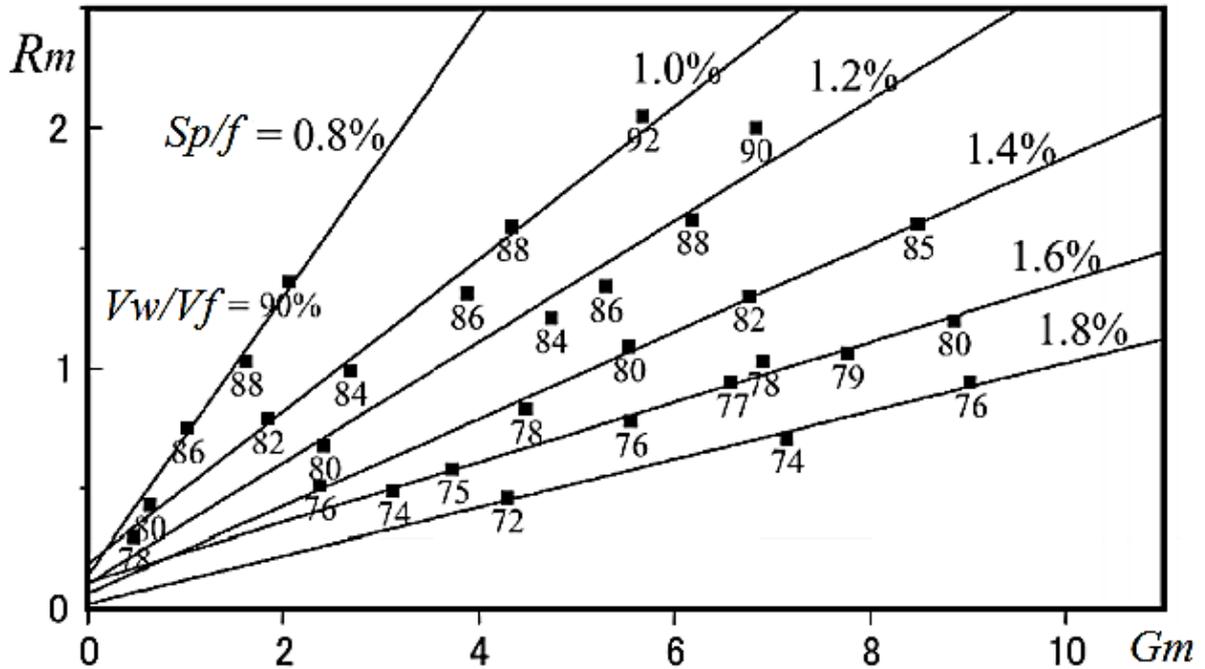
Figura 2.9 – Funil V para ensaios na argamassa



Fonte: adaptado de Gomes e Barros (2009).

Um elevado valor de  $G_m$  indica maior capacidade de deformação e menor valor de  $R_m$  indica maior viscosidade. A proporção de  $G_m$  para  $R_m$  é quase constante com a variação de  $V_w/V_f$  (razão de volume de água/materiais finos) na condição de que  $\beta$  seja constante. A Figura 2.10 ilustra esse efeito (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Figura 2.10 – Relação entre a área de espalhamento e o tempo de escoamento conforme a variação de água e superplastificante



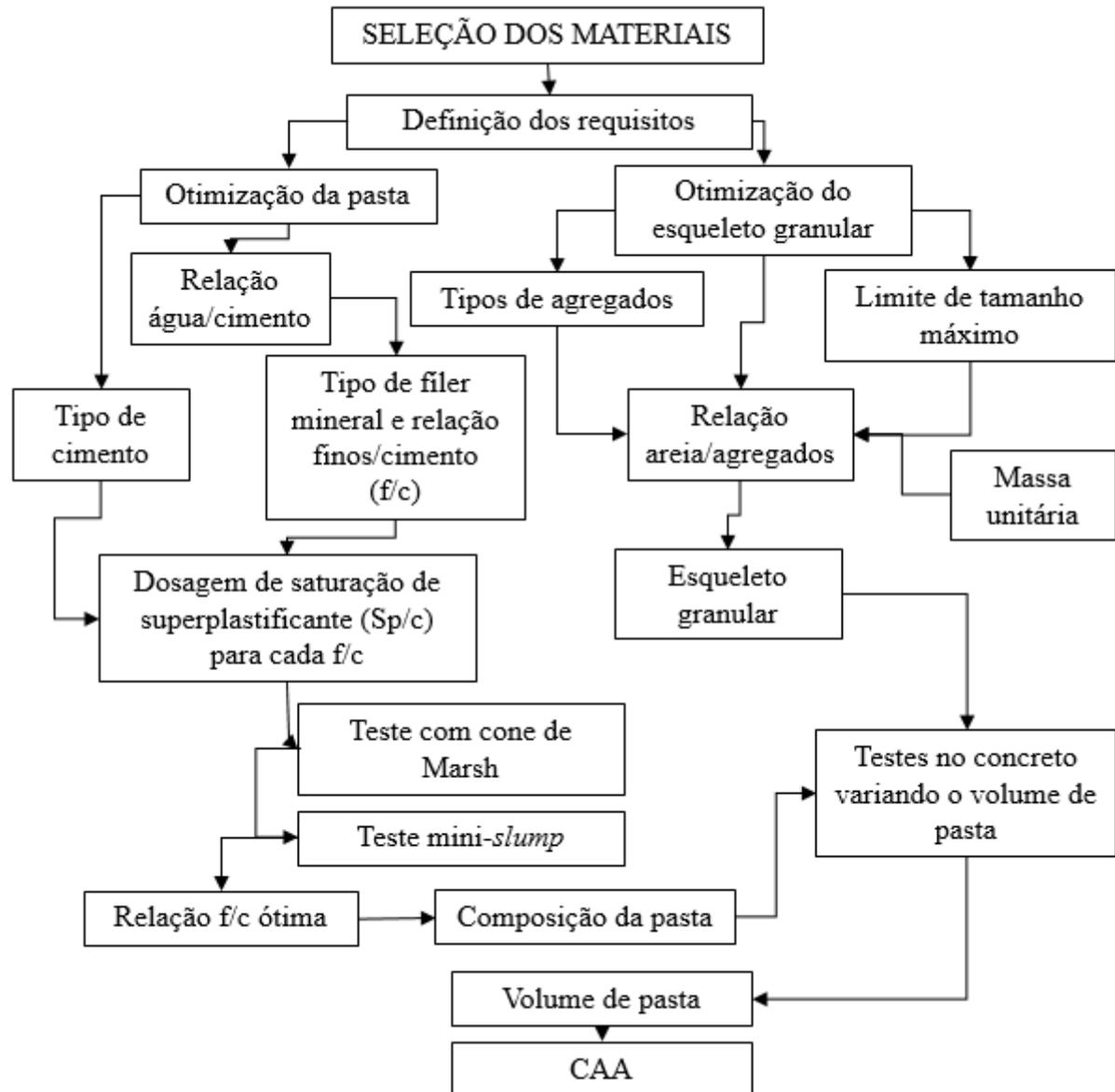
Fonte: Okamura e Ouchi (2003).

#### 2.2.2.2 Método de Gomes, Gettu e Aguilló (2002; 2003)

O método de dosagem proposto por Gomes, Gettu e Aguilló (2002; 2003) apresenta um procedimento de caráter experimental para obtenção da dosagem do CAA de alta resistência. A metodologia proposta para a dosagem de CAA assume que o concreto pode ser obtido com o melhoramento da composição da pasta e do esqueleto granular separadamente. A composição final do concreto é obtida quando o conteúdo de pasta é o suficiente para apresentar fluidez, coesão e resistência à segregação (GOMES; BARROS, 2009).

O modelo sugere que a viscosidade e a fluidez da pasta governam o comportamento reológico do concreto. O método admite que a composição da pasta é independente da proporção dos agregados. A Figura 2.11 ilustra o esquema do método de Gomes, Gettu e Aguilló (2002; 2003).

Figura 2.11 – Esquema do método de Gomes, Gettu e Aguiló (2002;2003)



Fonte: adaptado de Gomes e Barros (2009).

De acordo com Gomes e Barros (2009) o método é executado em três fases: obtenção da composição da pasta; determinação da proporção de mistura dos agregados; e seleção do conteúdo de pasta. Os critérios para obtenção da mistura são:

a) Otimização do esqueleto granular – este ensaio segue recomendação da norma ASTM C29/C29M-17a (ASTM, 2017). Para o esqueleto granular a recomendação é para que o valor máximo do agregado grão seja de até 20 mm. A máxima densidade no estado seco deve ser o critério para dimensionar a relação areia/brita, em que sem o uso de compactação deve-se descobrir a relação que proporcione a menor quantidade de vazios na junção dos dois agregados. Para tanto é utilizado um recipiente com volume conhecido onde busca-se

estabelecer a quantidade de um dos agregados na relação 100% de areia/0% de brita, e adicionando o segundo até que se tenha a relação inversa da inicial (0% de areia/100% de brita). Geralmente, estes valores são incrementados na faixa de 10 em 10% (Figura 2.12).

Figura 2.12 – Aparelhagem e gráfico relacionando areia, volume de vazios e peso unitário



(a) Fotografia do ensaio



(b) Gráfico conteúdo de vazios

Fonte: Gomes e Barros (2009).

b) Melhor composição da pasta com a determinação da dosagem ótima de superplastificante – neste critério é utilizado o funil de Marsh para a obtenção da melhor composição da pasta, se faz a variação do superplastificante fixando os valores das relações água/cimento e filer/cimento.

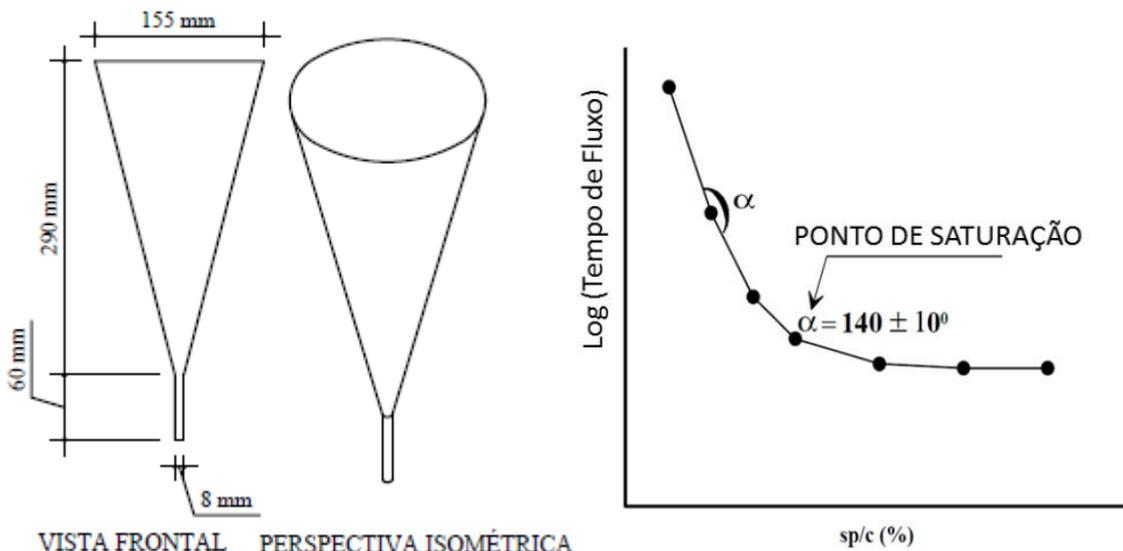
c) Produção do concreto com a dosagem ótima obtida na pasta – determinação do volume de pasta que proporciona ao concreto os requisitos de autoadensável, avaliados em termos das propriedades: habilidade de preenchimento, habilidade de passar entre obstáculos e resistência à segregação.

A seleção dos componentes da mistura é fundamentada nas propriedades desejadas do concreto, levando-se em consideração a disponibilidade de materiais no mercado local. Inicialmente é determinada uma relação água/cimento em função das propriedades desejadas do concreto. A presença de alguma adição deve ser verificada quanto a sua quantidade na dosagem e suas consequências nas propriedades da mistura. O volume de pasta inicial é definido em função do volume necessário para o desenvolvimento dos ensaios. A relação água/cimento definida é utilizada e a dosagem do cimento é fixada em função do volume de pasta necessário (GOMES; BARROS, 2009).

As relações superplastificante/cimento ( $S_p/c$ ) e materiais finos/cimento ( $f/c$ ) na dosagem são determinadas através do índice de fluidez e índice de consistência. O índice de fluidez na pasta (materiais finos + água) é determinado pelo ensaio do Funil de Marsh. O índice de consistência pode ser medido a partir do tempo de espalhamento pelo ensaio do mini-slump.

De acordo com Gomes e Barros (2009) a dosagem de superplastificante é determinada em pastas com quantidade de cimento, água e finos fixos, através do ensaio do Funil de Marsh, de acordo com as recomendações da Norma Européia (EN) – Grautes para bainhas de pretendidos, Métodos de Ensaio, 2007 (EN 445, 2007). Em paralelo há a norma NBR 7.681-2 (ABNT, 2013) que de maneira semelhante narra o ensaio voltado para caldas de cimento para injeção. A Figura 2.13 ilustra o Funil de Marsh (a) e o gráfico resultante com o ponto de saturação de aditivo (b).

Figura 2.13 – Funil de Marsh e ponto de saturação



(a) Funil de Marsh

(b) Gráfico tempo de fluxo por  $S_p$

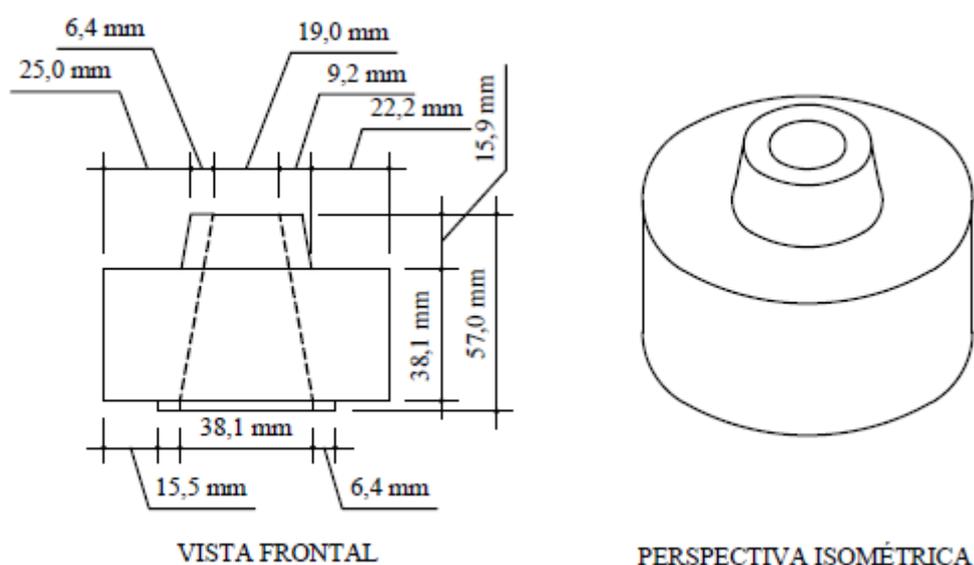
Fonte: Gomes e Barros (2009).

O procedimento consiste em anotar o tempo para uma quantidade de pasta fluir pelo funil. Esse tempo ( $T$ ) de fluxo se apresenta como um parâmetro inverso da fluidez da pasta. Variando a relação  $S_p/c$  na pasta, obtém-se uma curva  $\log T$  versus dosagem de superplastificante, conforme mostra a Figura 2.13-b. O gráfico  $\log (T)$  versus superplastificante/cimento ( $S_p/c$ ) é utilizado para a definição do ponto de saturação da dosagem, que constitui a porcentagem ótima de aditivo. No gráfico, é determinado como o ponto em que

a relação de superplastificante/cimento corresponde a um ângulo interno de  $140 \pm 10^\circ$  na curva log (T) (GOMES; BARROS, 2009).

O índice de consistência na pasta é mensurado pela capacidade de espalhamento com a utilização do Minicone (Figura 2.14) para ensaio de Mini – *slump*. Verifica-se nesse ensaio o tempo ( $T_{115}$ ) que a amostra leva para atingir o círculo com 115 mm e o seu espalhamento final limitado em  $180 \pm 10$  mm. As relações ótimas de dosagens são aquelas nas quais os resultados estejam na faixa de 2 a 3,5s (GOMES; BARROS, 2009).

Figura 2.14 – Minicone para o ensaio do Mini- *slump*



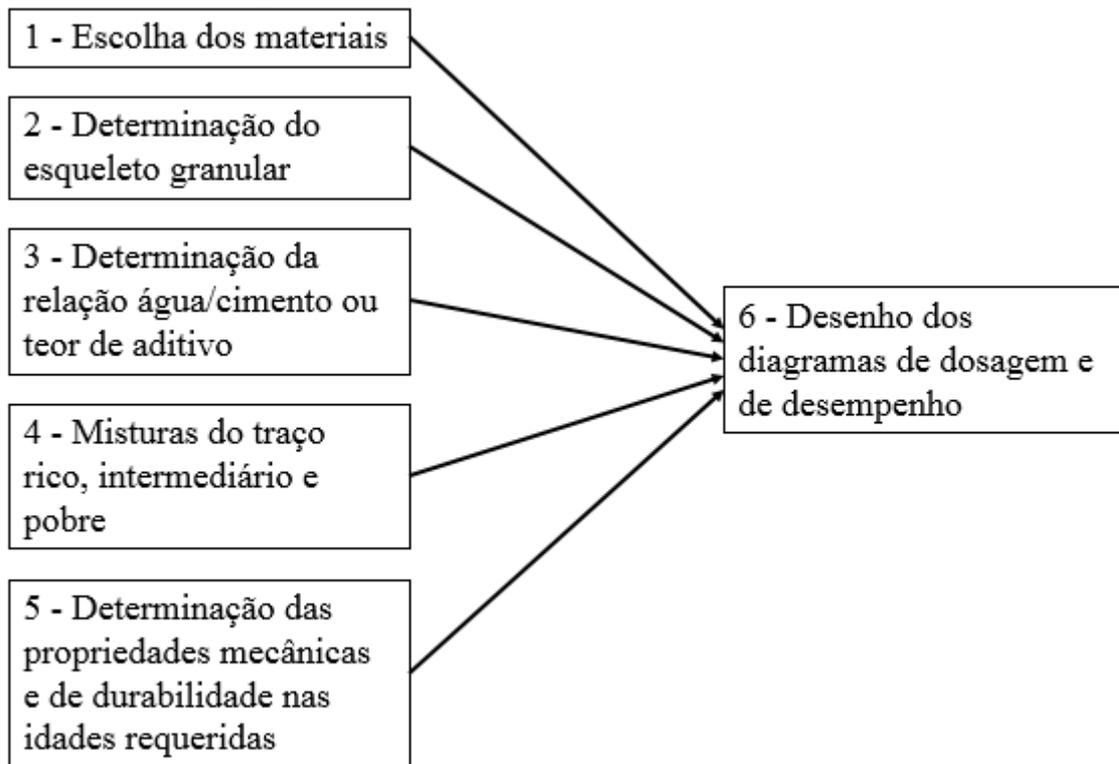
Fonte: adaptado de Gomes e Barros (2009).

### 2.2.2.3 Método de Tutikian e Dal Molin (2007)

O método proposto por Tutikian e Dal Molin (2007) é um procedimento simples, experimental e permite a utilização de quaisquer materiais locais desde que cumpram alguns requisitos básicos. De acordo com o método (Figura 2.15) o procedimento de dosagem pode ser realizado em seis passos:

a) Os materiais constituintes: cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água, acrescidos de um material fino, de granulometria inferior à do agregado miúdo, e aditivo superplastificante. Ocasionalmente, é possível acrescentar outras classes de agregado graúdo e um aditivo modificador de viscosidade (AMV). Deve-se priorizar a escolha de agregados mais arredondados e com o menor diâmetro máximo ( $\bar{D}_x < 19\text{mm}$ ) possível para maximizar o empacotamento e reduzir a segregação (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Figura 2.15 – Esquema do procedimento de dosagem



Fonte: Tutikian e Dal Molin (2008).

b) A determinação do esqueleto granular é idêntico ao do método de Gomes, Gettu e Aguilló (2002; 2003). Para isso, deve-se acondicionar todos os componentes do concreto autoadensável aos pares, e em ordem decrescente de diâmetro das partículas. Assim que se determinar a primeira composição entre os dois materiais de maior diâmetro, o mesmo procedimento será realizado com a mistura e o próximo componente até chegar ao cimento.

c) A determinação da relação água/cimento ou teor do aditivo superplastificante é realizada antes da mistura dos materiais, em função da escolha do traço intermediário. A relação água/cimento pode ser determinada com base em históricos de concretos similares, ou aplicação específica. A partir desse passo, deve-se escolher o traço intermediário para se realizar a mistura de ajuste, com a finalidade de se confirmar a relação água/cimento. Determina-se experimentalmente o teor de aditivo superplastificante, a partir do traço intermediário cujo resultado não é utilizado para confecção das curvas de dosagem e desempenho.

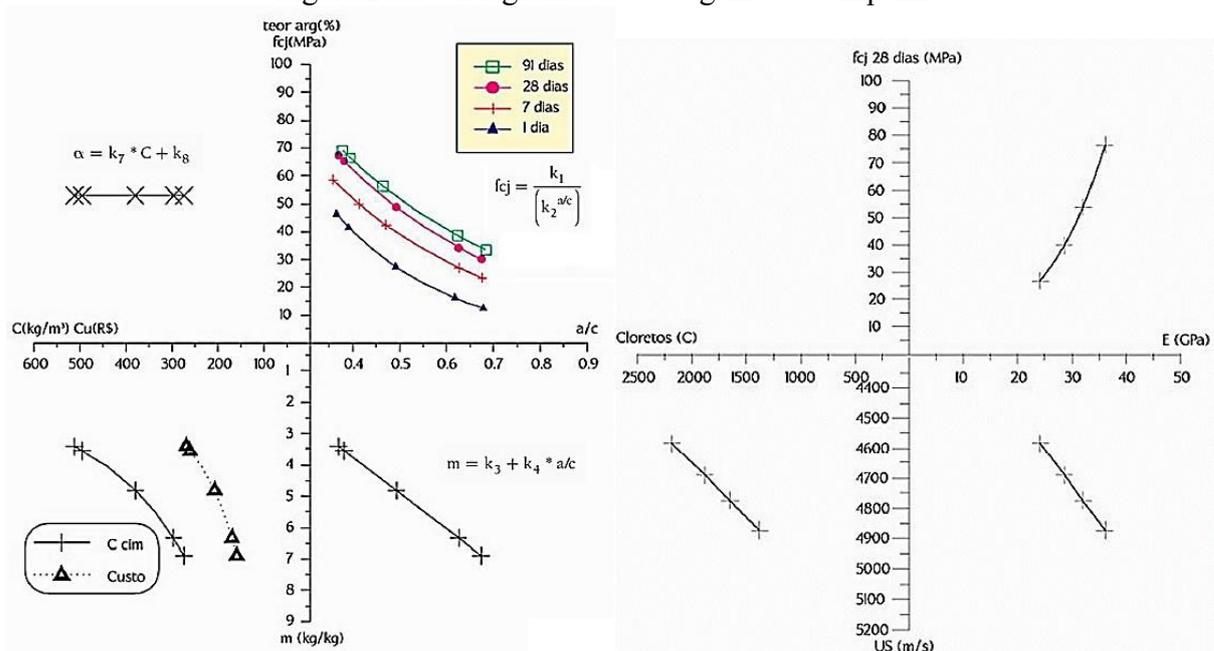
d) A mistura dos traços rico, intermediário e pobre em argamassa é feita com três pontos para a determinação das equações de comportamento e coeficientes de correlação, para confecção da curva de dosagem e desempenho. O ideal é a realização de quatro pontos para que as equações possuam um coeficiente de determinação maior, e as curvas fiquem melhor ajustadas. É importante frisar que o teor de argamassa seca de todos os pontos não será

constante. O que permite que todos os pontos sejam considerados da mesma família e possam ser plotados nos mesmos gráficos é o teor de aditivo superplastificante constante, bem como as relações entre todos os agregados (neste caso, materiais finos são considerados agregados).

e) Com os corpos de prova moldados realiza-se os ensaios pré-determinados: mecânicos e de durabilidade, entre outros. É recomendável a realização do ensaio de módulo de elasticidade, devido ao efeito de limitação do agregado graúdo e sua relação direta com o módulo de elasticidade.

f) Confecciona-se o diagrama de dosagem (Figura 2.16-a) e o de desempenho (Figura 2.16-b) a partir do cálculo das equações que descrevem o comportamento de cada propriedade estudada. Os coeficientes de determinação que expressam quão ajustadas estão as curvas e retas também devem ser determinados. O objetivo do diagrama de desempenho é similar ao de dosagem. O diagrama de desempenho consiste em relacionar a resistência à compressão com outras propriedades mecânicas ou de durabilidade dos concretos. Deve-se escolher apenas ensaios que não estejam representados no diagrama de dosagem. De modo geral, os ensaios são relacionados com a resistência à compressão, que é a propriedade do concreto mais notória. A Figura 2.16-a ilustra o diagrama de dosagem e alguns coeficientes. A Figura 2.16-b ilustra o diagrama de desempenho correlacionando a resistência à compressão, módulo de elasticidade, penetração das ondas de ultrassônicas (US) e durabilidade (penetração de íons cloretos).

Figura 2.16 – Diagramas de dosagem e desempenho



Fonte: Tutikian e Dal Molin (2008).

#### 2.2.2.4 Método da EFNARC (2005)

A composição da mistura é escolhida para satisfazer todos os critérios de desempenho do concreto, nos estados fresco e endurecido. Esses critérios são fornecidos como especificações pelo comprador de acordo com o tipo de aplicação, seguindo preceitos normativos (GOMES; BARROS, 2009). A EFNARC estabelece algumas referências normativas no processo de confecção de CAA (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 – Referências normativas da EFNARC

<b>Especificação</b>	<b>Norma</b>	<b>Assunto</b>
Cimento	EN 197-1	Composição, especificação e critérios de conformidade para cimentos comuns.
Concreto	EN 206-1	Especificação, desempenho, produção e conformidade.
Cinza volante	EN 450	Cinza volante para o concreto.
Aditivos	EN 934-2	Aditivos para concreto – Definição e requerimentos.
Água de amassamento	EN 1.008	Água de amassamento – Amostragem, testes e avaliação da sustentabilidade da água, incluindo água recuperada a partir de centrais dosadoras.
Agregados	EN 12.620 EN 13.055-1	Agregados para concreto. Agregados leves para concreto, argamassa e graute.
Pigmentos	EN 12.878	Pigmentos para colorir materiais construtivos baseados em cimentos ou cal – Especificação e metodologia de testes.
Sílica ativa	EN 13.263	Definição, requerimentos, controle de conformidade e avaliação da conformidade.
Escória de Alto forno	EN 15.167-1	Escória de alto forno para concreto, argamassa e graute.
Fibras	EN 14.889	Fibras para o concreto.
Sistema de qualidade e gestão	EN ISO 5.725 EN ISO 9001	Acurácia e precisão de métodos de medida e resultados.

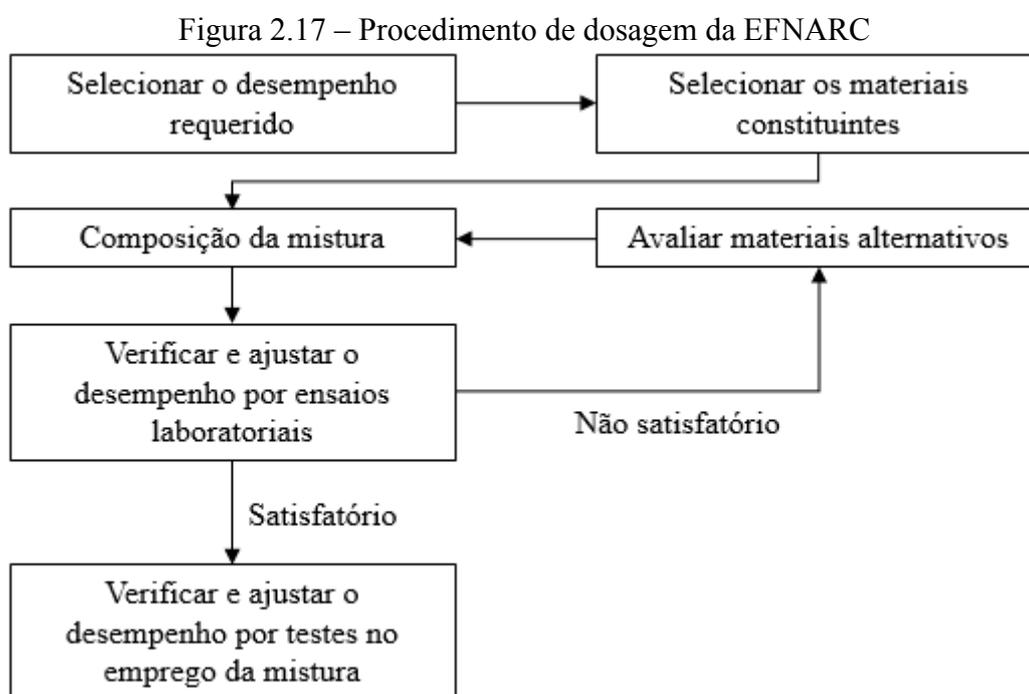
Fonte: EFNARC, 2005.

O CAA é menos tolerante à mudanças nas características dos materiais constituintes e variações de dosagem do que concretos convencionais. Desta maneira, é importante a supervisão cuidadosa de todos os aspectos da produção e emprego. A dosagem, de maneira geral, é fundamentada nas aproximações relacionadas (EFNARC, 2005; VAN DER VURST *et al.*, 2017):

- a) Avaliar a demanda de água, otimizar a fluidez e estabilidade da pasta;
- b) Determinar a proporção de areia e a dosagem de aditivo para obter a robustez exigida;
- c) Ensaiar a sensibilidade a pequenas variações nas quantidades (Robustez);

- d) Adicionar uma quantidade apropriada de agregado graúdo;
- e) Produzir o CAA fresco em misturadores no laboratório e executar os ensaios requeridos;
- f) Ensaiar as propriedades do CAA no estado endurecido; e
- g) Produzir misturas de teste nas centrais de dosagem.

A composição da mistura é escolhida para satisfazer todos os critérios de desempenho do concreto, nos estados fresco e endurecido. Neste sentido, a Figura 2.17 ilustra o método da EFNARC (2005).



Fonte: adaptado EFNARC (2005).

Caso a performance satisfatória não seja obtida, considerações devem ser dadas para uma fundamental reformulação da mistura. Dependendo do problema aparente, as seguintes ações podem ser apropriadas:

- a) Ajustar a relação cimento/materiais finos (c/f) e a relação água/materiais finos (a/f) e ensaiar a fluidez e outras propriedades da pasta;
- b) Tentar diferentes tipos de adições (se disponíveis);
- c) Ajustar as proporções do agregado miúdo e a dosagem de superplastificante;
- d) Considerar o uso de agente modificador de viscosidade para reduzir a sensibilidade da mistura; e
- e) Ajustar a proporção ou granulometria do agregado graúdo.

Segundo Van Der Vurst *et al.* (2017) o volume de pasta e a relação água/materiais finos influenciam principalmente a tensão de cisalhamento. Nos estudos com a avaliação da robustez de misturas no estado fresco, a quantidade de água é um fator direto na tensão de cisalhamento, quando esta tensão promove a estabilidade da mistura. Quando a robustez é determinada pela constância da tensão de cisalhamento, a estabilidade é incrementada pela redução da quantidade de pasta. Em misturas com elevada viscosidade plástica e baixa tensão de cisalhamento, a inclusão de aditivo modificador de viscosidade reduz a robustez da mistura.

De acordo com Bucher *et al.* (2015) uma abordagem difásica pode ser adotada na confecção de concretos autoadensáveis com incorporação de metacaulim. Neste caso, dois procedimentos foram seguidos para dosar os materiais. O primeiro envolveu a determinação da pasta de cimento (cimento + material pozolânico + água + aditivo) e o segundo o esqueleto granular. Neste caso, a adição pozolânica de metacaulim agiu de modo diferente de um filler, devido à redução da densidade de empacotamento e do tamanho da partícula.

Segundo Long, Gao e Xie (2015) as proporções dos materiais influenciam de modo expressivo nas propriedades do CAA. A dosagem possui relação direta com a confecção de concretos mais econômicos quanto aos recursos ambientais. As misturas de 16 dosagens distintas de CAA sob inspeção de três índices garantiram esse vínculo. Os índices emissão de dióxido de carbono, energia consumida e recursos naturais, discriminaram essas misturas. Os concretos autoadensáveis mais econômicos (energia e recursos) e ecológicos (redução na emissão de gás) foram aqueles com estratégias de substituição parcial e reciclagem de agregados durante o projeto de dosagem.

## 2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

As propriedades mecânicas são divididas em duas etapas: no estado fresco e endurecido, conforme o comportamento multifásico do concreto.

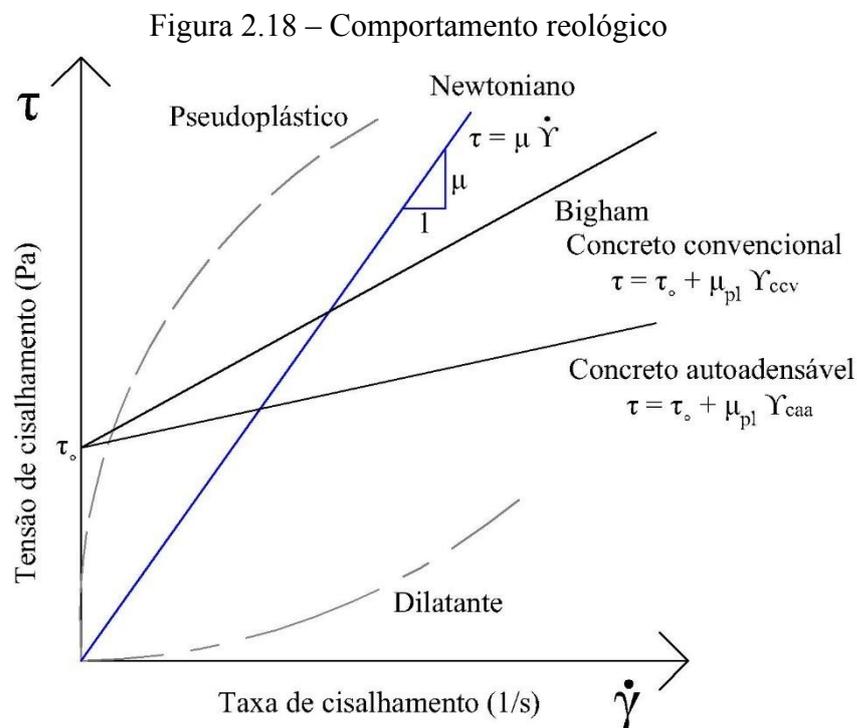
### 2.3.1 Propriedades no estado fresco

Embora o concreto fresco não seja o foco principal deste material, a concepção e a viabilidade da construção estão profundamente atreladas ao grau de adensamento. Assim, é fundamental a percepção da trabalhabilidade e sua importância nesta mistura. A trabalhabilidade é a propriedade que determina o esforço exigido para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade. O esforço para iniciar e

manter o fluxo depende das propriedades reológicas do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

Na reologia (deformação irrecuperável no tempo), os fluidos podem ser classificados de acordo com suas propriedades. As categorias mais amplas são: Newtonianos, não-Newtonianos e viscoelásticos. Na Figura 3.14 são mostrados diferentes tipos de respostas que os materiais podem apresentar, inclusive a do concreto. Para definir o comportamento reológico de um fluido primeiro se estabelece a curva de fluxo, que descreve a relação entre a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) e a taxa de cisalhamento ( $d\gamma/dt = \dot{\gamma}$ ). Vários fluidos, como a água e o óleo, comportam-se como um fluido Newtoniano, no qual a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) (GOMES; BARROS, 2009).

Do ponto de vista reológico, o comportamento do concreto autoadensável pode ser entendido pelo modelo de Bingham (linear e quadrático). No modelo linear, tal fluido é caracterizado por dois parâmetros: a viscosidade plástica ( $\mu$ ) e a tensão de cisalhamento mínimo ( $\tau_0$ ). A Figura 2.18 ilustra este modelo junto com a equação linear de Bingham e uma comparação com o concreto autoadensável e o convencional (ALYHYA; KULASEGARAM; KARIHALOO, 2017; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; VAN DER VURT *et al.*, 2017).



Fonte: adaptado de Gomes e Barros, 2009; Tutikian e Dal Molin, 2008.

Para avaliação e determinação dos aspectos reológicos do concreto autoadensável são aplicados ensaios com métodos e equipamentos particulares a cada categoria. O conjunto de equipamentos para a avaliação da trabalhabilidade do concreto autoadensável foi desenvolvido de maneira especial para esse novo tipo de concreto. A EFNARC (2005) lista as características e os ensaios mais comuns (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 – Características, ensaios e unidades de medida

<b>Característica</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Avaliação</b>
Habilidade de preenchimento	Espalhamento ( <i>Slump Flow</i> )	Espalhamento total
	Caixa Kajima	Preenchimento visual
Habilidade de preenchimento Viscosidade aparente	Espalhamento T <sub>500</sub>	Tempo de escoamento
	Funil-V	
	Funil-O	
	Orimet	
Habilidade passante	Caixa-L	Proporção passante
	Caixa-U	Diferença de altura
	Anel-J	Altura do degrau, Espalhamento total
	Caixa Kajima	Visual habilidade passante
Resistência à segregação	Penetração	Profundidade
	Método da peneira	Porcentagem retida
	Coluna de segregação	Porcentagem de segregação

Fonte: Adaptado EFNARC (2005).

A NBR 15.823 (ABNT, 2017) normatiza alguns ensaios prescrevendo limites, terminologias e classificações no estado fresco do concreto autoadensável. Dentre as terminologias referentes à reologia do CAA tem-se:

- a) viscosidade plástica aparente: propriedade importante quando for requerido um bom acabamento superficial ou grande densidade de armadura, está relacionada com a coesão, influenciando diretamente o comportamento no escoamento;
- b) habilidade passante: capacidade do CAA fluir dentro da fôrma, sem perder a uniformidade, passar por obstáculos sem obstrução do fluxo ou segregação;
- c) resistência à segregação: capacidade do concreto permanecer homogêneo durante todas as etapas, fundamental para a homogeneidade e a qualidade do CAA, em especial para CAA de maior fluidez e baixa viscosidade;
- d) habilidade de preenchimento (fluidez): capacidade do CAA preencher fôrmas e os espaços destinados ao lançamento;
- e) segregação dinâmica: segregação que ocorre durante a concretagem dentro da fôrma durante o lançamento; e

f) segregação estática: sedimentação que ocorre após a concretagem, quando o concreto já se encontra em repouso.

A aplicabilidade da NBR 15.823-1 (ABNT, 2017) está compreendida em um intervalo entre 2.000 kg/m<sup>3</sup> e 2.800 kg/m<sup>3</sup> dos grupos I e II de resistência, conforme disposto na NBR 8.953 (ABNT, 2015). A incorporação de materiais como agregados leves, pesados, fibras ou ar, cuja massa específica classifique o concreto como leve ou pesado necessita de uma avaliação individualizada da aplicabilidade da NBR 15.823-1 (ABNT, 2017).

A NBR 15.823 (ABNT, 2017) normaliza alguns procedimentos, especificações e medidas nas seguintes partes:

- a) Parte 1 – Classificação, controle e aceitação no estado fresco;
- b) Parte 2 – Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams;
- c) Parte 3 – Determinação da habilidade passante - Método do Anel J;
- d) Parte 4 – Determinação da habilidade passante - Métodos da Caixa L e da Caixa U;
- e) Parte 5 – Determinação da viscosidade - Método do Funil V; e
- f) Parte 6 – Determinação da resistência à segregação - Método da coluna de segregação e da peneira.

De acordo com a NBR 15.823-1 (ABNT, 2017) alguns requisitos precisam ser atingidos para garantir as propriedades reológicas do CAA. O Quadro 2.3 ilustra estes requisitos, como também sua respectiva classificação. A partir das propriedades no estado fresco, de acordo com a mesma norma, é possível relacionar algumas aplicações de acordo com a faixa de classificação. O Quadro 2.4 relaciona as propriedades, faixas e aplicações.

Quadro 2.3 – Requisitos e classificação do CAA no estado fresco

Ensaio	Propriedade	Parâmetros			
		Classe	Medida	Intervalo	Observação
NBR 15.823 – 2 (ABNT, 2017)	Espalhamento ( <i>Slump-flow</i> )	SF 1	mm	550 a 650	
		SF 2		660 a 750	
		SF 3		760 a 850	
	Viscosidade aparente t500 (sob fluxo livre)	VS 1	s	≤ 2	
		VS 2		> 2	

Fonte: adaptado de NBR 15.823-1 (ABNT, 2017).

Continuação Quadro 2.3 – Requisitos e classificação do CAA no estado fresco

Ensaio	Propriedade	Parâmetros			
		Classe	Medida	Intervalo	Observação
NBR 15.823 – 2 (ABNT, 2017)	Índice de estabilidade visual (sob fluxo livre)	IEV 0 (Altamente estável)	visual	Sem evidência de segregação ou exsudação	
		IEV 1 (Estável)		Sem evidência de segregação e leve exsudação	
		IEV 2 (Instável)		Presença de pequena auréola de argamassa ( $\leq 10$ mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto	
		IEV 3 (Altamente instável)		Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades (auréola de argamassa $> 10$ mm)	
NBR 15.823 – 3 (ABNT, 2017)	Habilidade passante pelo anel J	PJ 1	mm	0 a 25	Com 16 barras de aço
		PJ 2		25 a 50	
NBR 15.823 – 4 (ABNT, 2017)	Habilidade passante caixa L	PL 1	$H_2/H_1$	$\geq 0,80$	Com 2 barras de aço
		PL 2		$\geq 0,80$	Com 3 barras de aço
	Habilidade passante caixa U	-	$H_2 - H_1$	Não aplicável	Neste ensaio não há classificação
		-		Até 30 mm	
NBR 15.823 – 5 (ABNT, 2017)	Viscosidade aparente funil V	VF 1	s	$< 8$	
		VF 2		9 a 25	
NBR 15.823 – 6 (ABNT, 2017)	Resistência à segregação pela coluna de segregação e peneira	SR 1 TP 1	%	$\leq 20$	
		SR 2 TP 2		$\leq 15$	

Fonte: adaptado NBR 15.823-1 (ABNT, 2017).

Quadro 2.4 – Classes do CAA e suas aplicações

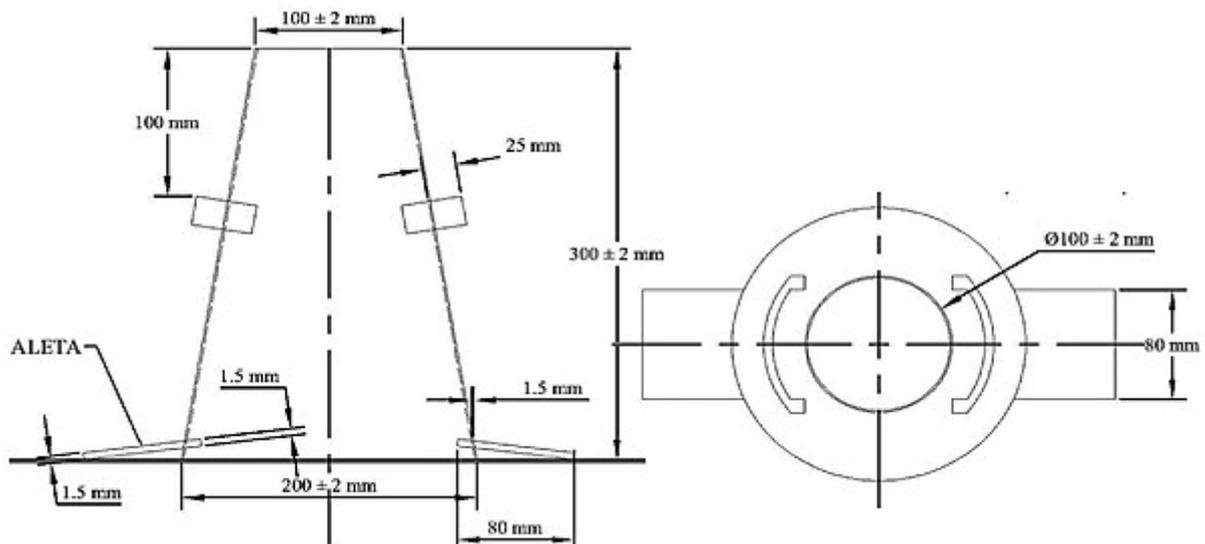
Propriedades	Clas.	Faixa	Aplicação	Exemplo
Espalhamento	SF 1	550 a 650 (mm)	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, com concretagem no ponto mais alto e deslocamento livre. CAA bombeável. Estruturas que exigem curta distância de espalhamento horizontal.	Lajes, Revestimento de túneis, Estacas e certas fundações profundas.
	SF 2	660 a 750 (mm)	Adequado para a maioria das aplicações correntes.	Paredes, vigas, pilares e outras.
	SF 3	760 a 850 (mm)	Alta densidade de armadura e ou forma arquitetônica complexa com uso de agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm).	Pilares-parede, paredes-diafragma e pilares.
Viscosidade Plástica	VF 1 VS 1	< 8 (s) ≤ 2	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos exigindo controle da exsudação. Concretagens realizadas do ponto mais alto com deslocamento livre.	Lajes, paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente.
	VF 2 VS 2	9 a 25 (s) > 2	Adequado para maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação. Efeitos problemáticos podem acontecer com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado) no preenchimento de cantos e suscetibilidade à interrupções ou demora entre sucessivas camadas.	Vigas, pilares e outras.
Habilidade passante	PJ 1 PL 1	25 a 50 (mm) ≥ 0,80 (H2/H1) 2 barras	Adequada para elementos estruturais com espaçamento de 80 a 100mm.	Lajes, painéis, elementos de fundação.
	PJ 2 PL 2	0 a 50 (mm) ≥ 0,80 (H2/H1) 3 barras	Adequada para a maioria dos elementos correntes. Elementos estruturais com espaçamento de 60 mm e 80 mm.	Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-moldados.
Resistência à segregação	SR 1 TP 1	≤ 20 % Distância a ser percorrida < 5 m	Espaçamento entre armaduras > 80	Lajes de pequena espessura. Estruturas convencionais com pouca complexidade.
	SR 2 TP 2	≤ 15 % Distância a ser percorrida > 5m	Espaçamento entre armaduras > 80	Elementos de fundações profundas.
		≤ 15 % Distância a ser percorrida < 5m	Espaçamento entre armaduras < 80	Elementos pré-moldados.

Fonte: adaptado NBR 15.823-1 (ABNT, 2017).

### 2.3.1.1 Método do cone de Abrams: Espalhamento e viscosidade aparente (*Slump Flow*)

O ensaio de espalhamento foi padronizado no Japão em 1990, para avaliar concretos submersos. Consiste em verificar se o concreto, sob ação do peso próprio, é capaz de se espalhar até atingir determinada dimensão em determinado tempo e uma dimensão limite. O ensaio é utilizado para verificar a capacidade de preenchimento do concreto autoadensável e está diretamente relacionado com a sua fluidez. É o ensaio mais utilizado em laboratório e no local da construção pela sua facilidade de execução, rapidez e por usar um equipamento, cone de Abrams (Figura 2.19), que é bastante utilizado em concretos convencionais (GOMES; BARROS, 2009).

Figura 2.19 – Dimensões do Cone de Abrams



Fonte: adaptado de NBR 15.823-2 (ABNT, 2017)

A medida de fluidez a ser obtida do concreto autoadensável é o diâmetro do círculo formado pelo concreto. Para concretos convencionais, a trabalhabilidade é medida pela determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998). O ensaio também permite observar visualmente se o concreto está segregando ou não (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Na execução do ensaio deve-se umedecer a placa e o tronco de cone para que não absorvam água do concreto durante o ensaio. O adensamento deve ser feito pela força da gravidade, não devendo ser realizado qualquer tipo de compactação NBR 15.823-2 (ABNT, 2017).

Permitir que o concreto flua livremente e medir o diâmetro do espalhamento em duas direções perpendiculares. A média dessas medidas é o valor do espalhamento (SF). Durante o

ensaio é importante a observação da ocorrência ou não de segregação, esta verificação é classificada de acordo com o índice de estabilidade visual (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; ABNT NBR 15.823-2, 2017).

O teste de viscosidade aparente ( $T_{500}$ ) é uma variação do espalhamento, o procedimento e os equipamentos são os mesmos. As únicas alterações são a marcação de um círculo de 500 mm de diâmetro centrado na base, e a necessidade de um cronômetro para a realização do teste. Assim que o cone for erguido verticalmente, o operador deve acionar o cronômetro e marcar o tempo em que o concreto alcança a marca dos 500 mm (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

De acordo com Gomes e Barros (2009), a faixa de espalhamento deve situar-se entre 600 a 800 mm e o tempo deve estar entre 2 a 7 segundos. As determinações da NBR 15.823-2 (ABNT, 2017) para o espalhamento são para três faixas, conforme Quadro 2.3. Nos estudos de Alberti, Enfedaque e Gálvez (2014) os valores de  $T_0$  variaram de 3,5 até 7 segundos e o espalhamento de 580 até 655 mm. Estes resultados classificaram o comportamento da substituição de fibras de aço por fibras sintéticas no CAAA. As fibras sintéticas apresentaram um melhor desempenho no estado fresco do CAA em comparação com as fibras de aço.

Para Khaloo *et al.* (2014) o volume de adição de fibras de aço também é importante. O espalhamento observado para CAA convencional foi de aproximadamente 800 mm (sem fibras) e 600 mm com 2% de fibras. O tempo  $T_{500}$  seguiu a mesma tendência, dentro do intervalo de 2 a 3,5 segundos. Conclui-se que a presença das fibras reduz a trabalhabilidade do CAA no estado fresco.

Pop *et al.* (2015) avaliaram a capacidade de aderência de concretos autoadensáveis com diferentes propriedades no estado fresco. Conforme o estudo, os concretos confeccionados apresentaram espalhamento no intervalo de 585 a 790 mm. Foi observada que a resistência à aderência pode ser atribuída ao histórico de espalhamento do concreto, pois a resistência está intimamente relacionada à segregação dinâmica e ao volume de vazios.

Ponikiewski e Golaszewski (2014) avaliaram a incorporação de cinza volante no CAA e no aglomerante. Na avaliação das propriedades no estado fresco os autores utilizaram apenas o ensaio de espalhamento. Os valores observados estão em um intervalo de 650 a 758 mm, para o ensaio  $T_{500}$  os valores estão contidos entre 1 a 3 segundos aproximadamente.

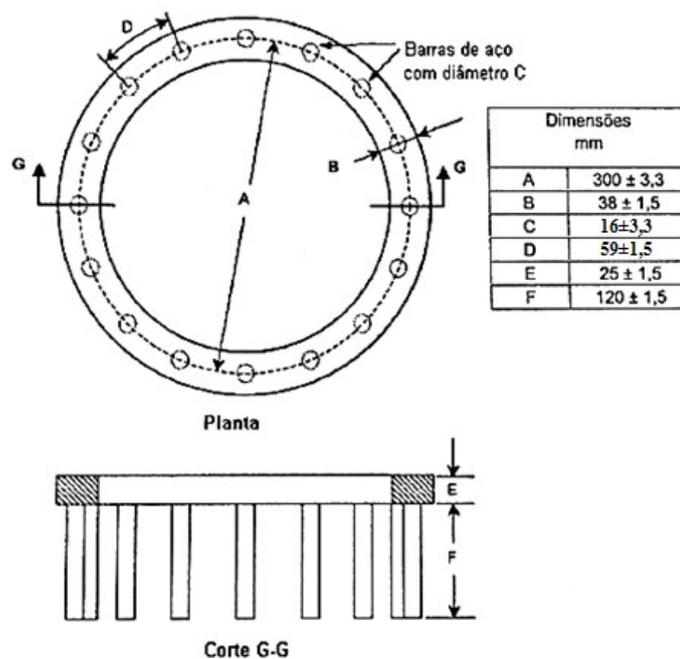
### **2.3.1.2 Método do Anel J**

Os resultados obtidos no ensaio de espalhamento não proporcionam uma medida direta para avaliar a habilidade de o concreto autoadensável passar entre as armaduras. Desta maneira o método do Anel J simula o fluxo do concreto por armaduras (TUTIKIAN; DAL MOLIN,

2008). O ensaio do Anel J mede três parâmetros: extensão de fluxo, tempo de fluxo ( $T_{500J}$ ) e habilidade passante. A extensão de fluxo do ensaio do Anel J indica a capacidade de deformação restrita do concreto autoadensável. O tempo de fluxo  $T_{500J}$  indica o fator de capacidade de deformação dentro de uma distância de fluxo definida. A habilidade passante é quantificada pela altura do degrau (GOMES; BARROS, 2009).

Segundo a NBR 15.823-3 (ABNT, 2017) apenas a distância do fluxo é avaliada. A aparelhagem necessária para execução do ensaio é a mesma para o ensaio do espalhamento com a adição do Anel J (Figura 2.20). O procedimento para execução no ensaio também é idêntico ao do espalhamento, com o acréscimo do Anel J, concêntrico às marcações e com o tronco de cone (Cone de Abrams).

Figura 2.20 – Dimensões Anel-J



Fonte: adaptado de NBR 15.823-3 (ABNT, 2017).

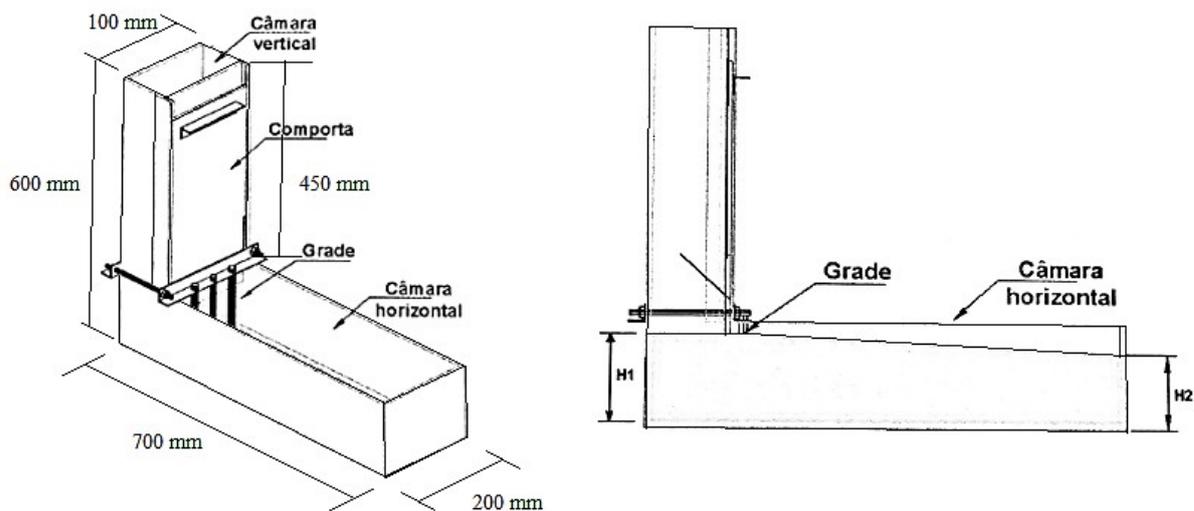
O resultado do ensaio consiste na determinação da diferença entre o espalhamento (SF), sem o anel J, e o espalhamento final ( $j_f$ ) atingido pela massa de concreto, com o anel J. O diâmetro final ( $j_f$ ) é obtido por meio da média aritmética de duas medidas realizadas em direções perpendiculares. A diferença é obtida pela subtração do diâmetro médio (SF) obtido no ensaio do espalhamento, pelo diâmetro final ( $j_f$ ). A obstrução à passagem é verificada pela presença das barras no Anel J (NBR 15.823-3, ABNT 2017). A NBR 15.823-1 (ABNT, 2017) classifica em duas categorias a diferença entre os diâmetros conforme ilustra o Quadro 2.3.

### 2.3.1.3 Método da Caixa L

O ensaio pelo método da Caixa L consiste em verificar se o concreto, sob a força de seu peso próprio, consegue passar por obstáculos sem que ocorra bloqueios (GOMES; BARROS, 2009). O ensaio mede a fluidez do concreto simultaneamente à sua capacidade de passar por obstáculos e permanecer coeso (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

A execução do ensaio da Caixa L é normatizado pela NBR 15.823-4 (ABNT, 2017). Esta norma determina as dimensões e o procedimento metodológico. A caixa L é uma caixa retangular com perfil em L, constituída por um compartimento vertical e outro horizontal (Figura 2.21). A execução do ensaio exige algumas condições laboratoriais, como temperatura e umidade.

Figura 2.21 – Caixa L



Fonte: adaptado de NBR 15.823-4 (ABNT, 2017).

O procedimento basicamente envolve o fechamento da comporta, preenchimento com o CAA (12 litros), abertura da comporta e verificação do escoamento. Cessado o escoamento, mede-se a altura de H1 e H2 (Figura 2.21). Após a medida calcula-se a habilidade passante ( $HP = H2/H1$ ) pela razão entre a altura final (H2) e a altura inicial (H1). A classificação conforme a habilidade passante está relacionada no Quadro 2.3 (ABNT NBR 15.823-4, 2017).

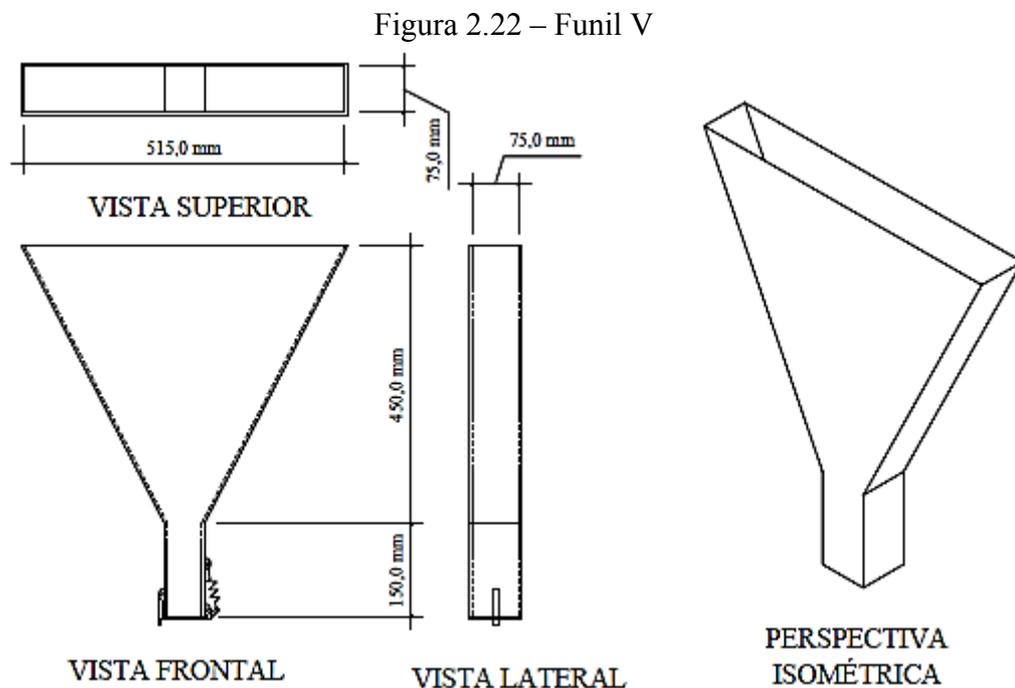
Pop *et al.* (2015) e Khaloo *et al.* (2014) utilizaram o método da Caixa L nas verificações do estado fresco de CAA. Na verificação da aderência de CAA em barras de aço, Pop *et al.* (2015) obtiveram valores de 0,80 a 0,95 para a habilidade passante de suas misturas. No estudo da incorporação de fibras de aço, Khaloo *et al.* (2014) obtiveram uma habilidade passante de 0,80 para misturas sem fibras, enquanto que 2% de incorporação de fibras proporcionou uma

redução da habilidade passante para aproximadamente 0,72. Tem-se, assim a redução da trabalhabilidade proporcionada pelo aumento do teor de fibra.

### 2.3.1.4 Ensaio de Funil V

O método de ensaio do Funil V foi desenvolvido na Universidade de Tóquio para simular a capacidade de passagem do concreto autoadensável através do estreitamento de uma seção. Esse ensaio também é utilizado para verificar a presença de segregação, quando o concreto é impedido de escorrer pela saída do funil (GOMES; BARROS, 2009).

O ensaio do Funil V pode fornecer uma compreensão completa do comportamento do fluxo do CAA. Particularmente em fôrmas complexas, essenciais para um acabamento de elevada qualidade. A viscosidade aparente, habilidade passante e resistência à segregação podem ser considerados como requisitos distintivos do CAA no estado fresco. Neste contexto, o ensaio do funil V é capaz de revelar a capacidade de preenchimento e resistência à segregação de uma mistura pelo menor tempo de descarga ( $T_v$ ). A fôrma V (Figura 2.22) restringe o fluxo e os tempos de descarga prolongados podem indicar um bloqueio do fluxo (ALYHYA; KULASEGARAM; KARIHALOO, 2017).



Fonte: adaptado NBR 15.823 (ABNT, 2017).

Segundo a NBR 15.823-5 (ABNT, 2017) a execução do ensaio é fundamentalmente o preenchimento sem adensamento do funil V e abertura da comporta (em um tempo de  $10 \pm 2$

segundos) simultaneamente ao acionamento do cronômetro. O tempo de descarga (T10seg) é obtido para o escoamento total da massa.

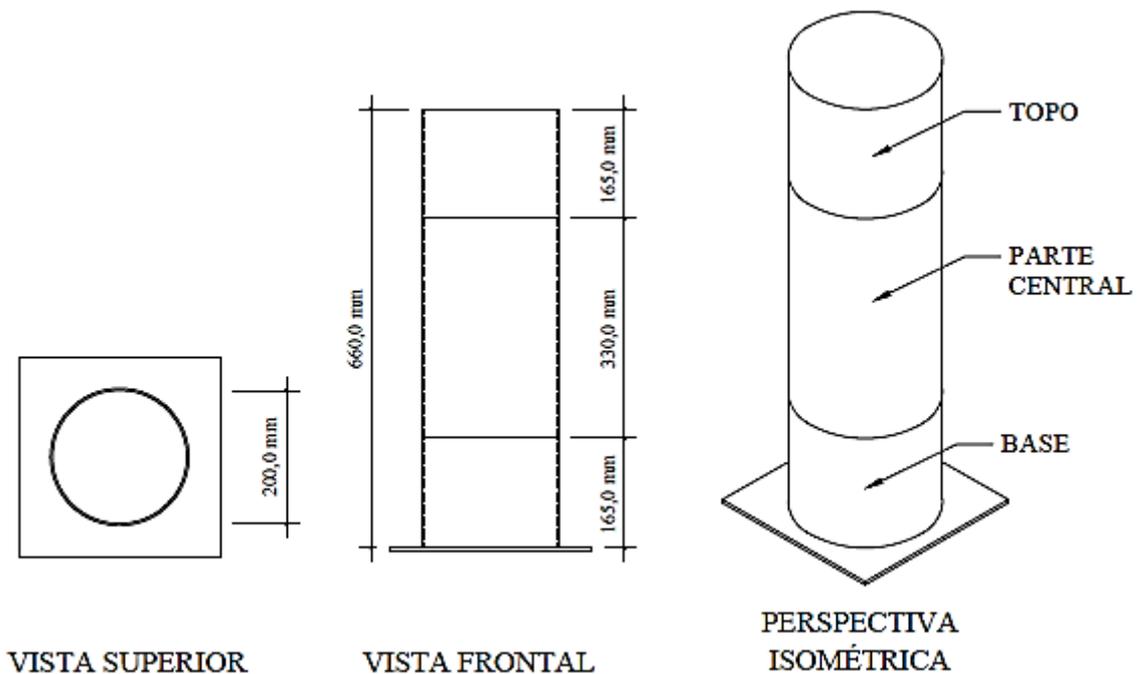
De acordo com a NBR 15.823-5 (ABNT, 2017), os tempos de escoamento recomendados situam-se em duas faixas admissíveis como descritos no Quadro 2.3. Gomes e Barros (2009) admitem uma faixa de 6 a 15 segundos. Nos estudos de Pop et al. (2015) esse intervalo variou de 10,1 a 24 segundos em misturas de CAA.

Em concretos autoadensáveis com fibras aço e fibras sintéticas o valor do tempo de descarga foi mais distante. Com valores variando de 4 s para misturas sem fibras até 20 segundo com misturas com elevado teor de incorporação (ALBERTI; ENFEDAQUE; GÁLVEZ, 2014; KHALOO *et al.*, 2014).

### 2.3.1.5 Métodos da coluna de segregação e peneira

O ensaio da coluna de segregação (Figura 2.23) disposto na NBR 15.823-6 (ABNT, 2017), descreve o ensaio para determinação da resistência à segregação do CAA. Avalia-se a diferença das massas de agregado gráudo existentes no topo e na base da coluna de segregação.

Figura 2.23 – Coluna de segregação



Fonte: adaptado de NBR 15.823-6 (ABNT, 2017).

Preenche-se a coluna totalmente. As amostras no topo e na base são retiradas 20 minutos após a moldagem, e lavadas em uma peneira de malha 5 mm, ficando o agregado gráudo retido.

A verificação da resistência à segregação (SR) é definida pela NBR 15.823-6 (ABNT, 2017) pela Equação 2.3 e a classificação pode ser observada no Quadro 2.3.

$$SR = \frac{2(m_b - m_t)}{m_b + m_t} 100 \quad (2.3)$$

No qual: SR = resistência à segregação do concreto (%);

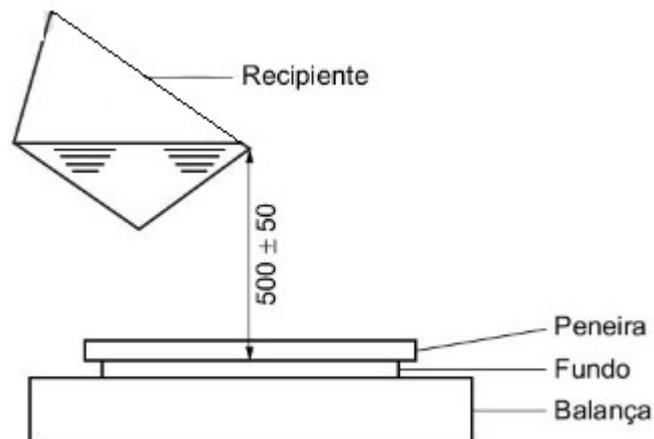
$m_B$  = massa do agregado graúdo obtida na porção retida na base da coluna (g);

$m_T$  = massa do agregado graúdo obtida na porção retida no topo da coluna (g).

A NBR 15.823-6 (ABNT, 2017) também descreve o método da peneira (Figura 2.24).

Possui o objetivo de determinar a quantidade de concreto passante por uma determinada peneira (4,75 mm), após esta massa de concreto permanecer em repouso por 2 minutos.

Figura 2.24 – Método da peneira



Fonte: adaptado de NBR 15.823-6 (ABNT, 2017).

O concreto é preparado em um recipiente de acordo com a NBR 15.823-6 (ABNT, 2017), e então disposto na peneira sobre uma balança. A resistência a segregação (SR) é determinada a partir da Equação 2.4.

$$SR = \frac{(m_{ps} - m_p)}{m_c} 100 \quad (2.4)$$

Em que: SR = resistência à segregação do concreto (%);

$m_{ps}$  = massa do fundo da peneira, contendo o concreto passante pela peneira (g);

$m_p$  = massa do fundo da peneira (g).

$m_c$  = massa de concreto inicialmente colocado sobre a peneira (g).

Este método não é indicado para CAA contendo agregados leves ou adição de fibras.

### 2.3.2 Propriedades no estado endurecido

No estado endurecido o concreto possui propriedades como: resistência à ações mecânicas, permeabilidade, estabilidade dimensional, estabilidade química e durabilidade, entre outras. Contudo, a resistência mecânica é considerada sua propriedade mais importante, pois é invariavelmente um elemento fundamental para os engenheiros estruturais (NEVILLE, 2016).

Por outro lado, nos sólidos a relação entre a fração de volume de vazios (porosidade) e a resistência, é equacionada de maneira inversa. Deste modo, em materiais heterogêneos e multifásicos como o concreto, a resistência está atrelada à porosidade de cada componente da mistura. A relação água/cimento tem uma influência importante na porosidade da matriz pasta de cimento e na zona de transição na interface agregado-pasta, conseqüentemente, na resistência mecânica. Outros fatores como adensamento, granulometria, tipos de aditivo, tipos de adição tipos de cura e velocidade de carregamento também podem exercer influência na resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

As propriedades no estado endurecido para o CAA são basicamente as mesmas para o concreto convencional. Assim, o comportamento é explicado com os conhecimentos já fundamentados em tecnologia do concreto.

Devido à melhor qualidade do lançamento de CAA, as propriedades do concreto no estado endurecido são idêntica ou até superiores aos concretos convencionais equivalentes. Isso reflete na durabilidade do concreto, um vez que é reduzida a influência humana no processo de concretagem. Outros fatores como relação água/cimento, evolução da resistência com a idade, resistência à tração e retração permanecem idênticas entre estes tipos de concreto (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; PONIKIEWSKI; GOŁASZEWSKI, 2014).

De acordo com Khaloo *et al.* (2014) é possível avaliar os efeitos da incorporação de fibra de aço (0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%) no concreto autoadensável com base nas propriedades no estado endurecido. Neste estudo foram realizados ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm e tração indireta em 150 x 300 mm. Devido à natureza da fibra de aço e sua função no concreto, os ensaios de tração na flexão e rigidez na flexão foram realizados em corpos de prova no formato de vigas com 100 x 140 x 1.200 mm de dimensão. Verificou-se que em concretos convencionais com maiores teores de fibras há enfraquecimento na resistência à compressão. Para o teor de 2,0% houve uma redução de 7,4 MPa. Em contrapartida, houve um incremento na resistência à tração indireta (0,96 MPa), tração na flexão (2,03 MPa) e na rigidez na flexão da viga ensaiada para o teor de 2,0%.

Alberti, Enfedaque e Gálvez (2014) de maneira semelhante utilizaram os corpos de prova cilíndricos (150 x 300) mm para avaliarem a resistência à compressão dos concreto autoadensáveis. Conforme o estudo, foi utilizado a resistência à compressão de cilindros, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade em corpos de prova prismáticos. Desta maneira, pode-se verificar as influências da substituição da fibra do aço por fibra sintética.

A respeito do uso agregados graúdos oriundos de reciclagem, segundo Aslani *et al.* (2018a), o incremento na porcentagem de agregado graúdo reciclado demonstra uma redução na resistência à compressão. Os estudos conduzidos com uma mistura envolvendo 40% de substituição apresentou um decréscimo de 13% na resistência à compressão comparada com a mistura piloto. De acordo com os estudos de Aslani *et al.* (2018b) em agregados graúdos de borracha a resistência à compressão tende a se manter intacta para valores de substituição de 10%.

Nos estudos de Sethy, Pasla e Sahoo (2015) a avaliação da resistência à compressão em diferentes idades revelou que é possível desenvolver uma variedade de misturas de concreto com resistências de 20 a 100 MPa. Estes concretos permitem adição de escória nos teores de substituição de 30 a 90%, onde concretos com resistências mais baixas admitem maiores volumes de substituição.

Em relação à incorporação de materiais finos os estudos de Sua-iam e Makul (2013) indicam que a adição de teores adequados de cinza de bagaço de cana e filer calcário é capaz de aumentar a evolução de resistência à compressão em idades iniciais. Este aumento é devido ao efeito de preenchimento e às reações pozolânicas. Segundo Şahmaran, Christianto e Yaman (2006) é importante observar a desvantagens na redução da resistência à compressão quando a adição mineral substitui parcialmente o cimento.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados no programa experimental e os procedimentos metodológicos adotados no transcorrer do trabalho, com o intuito de atender aos objetivos propostos. Os procedimentos metodológicos foram fundamentados na execução de quatro fases particulares e encadeadas em sequência.

#### 3.1 FASE 1 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES (F1)

Os materiais contidos no programa experimental são componentes da mistura de concreto. Dessa maneira, o aglomerante utilizado foi o cimento Portland (uso corrente). O agregado miúdo padrão foi a areia natural quartzosa e o agregado graúdo foi a rocha basáltica oriunda do processo de moagem e britagem. Na dosagem de CAA foi utilizado aditivo químico superplastificante. A lama residual de concreto (LRC) foi incorporada nas misturas de concreto depois de processado e seco (condição granular seca em estufa a 105°C).

##### 3.1.1 Cimento

O cimento utilizado na confecção das misturas do programa experimental foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI). De modo geral, este tipo de cimento apresenta um finura maior e uma composição rica em silicato tricálcico ( $C_3S$ ), responsável pela elevada resistência em idades iniciais. As características químicas, físicas e mecânicas do cimento foram obtidas a partir do laudo técnico emitido pelo fabricante. O Quadro 3.1 relaciona as principais características do cimento.

Quadro 3.1 – Características principais do cimento

Caracterização		CP V ARI	Limites normativos	Norma	
Químicos	Perda ao fogo (PF) %	$5,5 \pm 0,26$	$\leq 6,5$	NBR 16.697 (ABNT, 2017)	
	Óxido de Magnésio (MgO) %	$5,0 \pm 0,52$	$\leq 6,5$		
	Anidrido Sulfúrico ( $SO_3$ ) %	$3,1 \pm 0,10$	$\leq 4,5$		
	Anidrido carbônico ( $CO_2$ ) %	_ <sup>[a]</sup>	$\leq 5,5$		
	Resíduo Insolúvel (RI) %	_ <sup>[b]</sup>	$\leq 3,5$		
Físicos	Finura	Resíduo na peneira de 75µm (#200) %	$0,3 \pm 0,00$		$\leq 6,0$
		Resíduo na peneira de 45 µm (#325) %	$1,5 \pm 0,22$		_ <sup>[c]</sup>
		Área específica (Blaine) ( $cm^2/g$ )	$4.790 \pm 121,74$		_ <sup>[c]</sup>

Notas: (a) – Ensaio facultativo, (b) – Característica não avaliada e (c) – Norma não apresenta limites para esta peneira.

Fonte: Fabricante.

Continuação Quadro 3.1 – Características principais do cimento

Caracterização		CP V ARI	Limites normativos	Norma
Físicos	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,05 ± 0,02	- [d]	NBR 16.605 (ABNT, 2017)
Mecânicos	Tempos de pega	Início de pega (min.)	255 ± 13,62	> 60
		Fim de pega (min.)	309 ± 14,7 [e]	≤ 600
	Resistência à compressão (MPa)	1 dias	21,8 ± 0,77	≥ 14
		3 dias	37,1 ± 0,56	≥ 24
7 dias		42,0 ± 0,69	≥ 34	
				NBR 16.697 (ABNT, 2017)

Notas: (d) – Sem limite normativo e (e) – Ensaio facultativo.

Fonte: Fabricante.

Verificou-se que todas as características avaliadas do cimento estão de acordo com a normativa vigente. O ensaio que determina o resíduo insolúvel (RI) do cimento em ácido clorídrico (HCl) não foi avaliado.

### 3.1.2 Agregados

Os agregados miúdo e graúdo foram: a areia natural de origem quartzosa e a brita de origem basáltica, ambas adquiridas da região de Maringá – Paraná. A caracterização foi realizada conforme as normas brasileiras para agregado miúdo e graúdo no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

A amostragem seguiu os procedimentos orientados na NBR NM 26 (ABNT, 2009) quanto a determinação das amostras parciais e amostras de campo. Com o intuito de evitar a segregação do material pulverulento, a amostragem foi realizada na condição úmida. O estudo não objetiva a verificação de viabilidade para o uso dos agregados em concreto e sim uma caracterização, portanto o volume mínimo não foi adotado.

Devido ao caráter do estudo, volume de material e ambiente laboratorial as amostras foram reduzidas de acordo com as orientações da NBR NM 27 (ABNT, 2001), pelo método B quarteamento. Obedecem-se aos preceitos de máxima quantidade de material sobre a tela.

A composição granulométrica foi determinada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Foram utilizadas as peneiras da série normal e intermediária. A agitação do conjunto de peneiras foi realizada manualmente. Os materiais foram secados em estufa à uma temperatura de (105±5) °C e retirados após a verificação de constância de massa.

O Quadro 3.2 relaciona a composição granulométrica dos agregados utilizados na confecção das misturas conforme NBR 7.211 (ABNT, 2009) e NBR NM 248 (2003), realizados em temperatura de  $(23\pm 2)$  °C e umidade  $(60\pm 5)$  %.

Quadro 3.2 – Composição granulométrica dos agregados

Peneira	Agregado miúdo (%)				Agregado graúdo (%)		
	Retida	Retida acumulada	NBR 7.211 (ABNT, 2009)		Retida	Retida acumulada	NBR 7.211 (ABNT, 2009) ZG 9,5/25 <sup>a</sup>
			Zona Utilizável	Zona ótima			
25,0 mm					0,0	0	0-5
19,0 mm					0,0	0	2-15 <sup>b</sup>
12,5 mm					36,4	36	40 <sup>b</sup> -65 <sup>b</sup>
9,5 mm					40,0	76	80 <sup>b</sup> -100
6,3 mm	0,0	0,0	0-7	0	21,2	97	92-100
4,75 mm	0,0	0,0	0-10	0-5	1,5	99	95-100
2,36 mm	0,1	0,1	0-25	10-20			
1,18 mm	1,5	1,6	5-50	20-30			
600 µm	4,6	6,2	15-70	35-55			
300 µm	51,9	58,1	50-95	65-85			
150 µm	40,0	98,1	85-100	90-95			
	<b>Agregado miúdo</b>				<b>Agregado graúdo</b>		
<b>Dimensão máxima característica</b>	1,18 mm				19,0 mm		
<b>Modulo de finura</b>	1,64				6,70		

Nota: (a) Zona Granulométrica (ZG) correspondente à menor e à maior dimensões do agregado graúdo; (b) Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco pontos percentuais em apenas um dos limites marcados com “b”. Essa variação pode estar também distribuída em vários destes limites.

Fonte: Autor (2019).

O Quadro 3.3 relaciona o teor de material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem, conforme NBR NM 46 (ABNT, 2003). Para determinação deste teor foi utilizado o procedimento A dessa norma na temperatura de 25°C e umidade de  $(65\pm 10)$  %.

Quadro 3.3 – Teor de material fino

NBR 7.211 (ABNT, 2009)	Limite	Areia	Brita
Concreto submetido a desgaste superficial	< 3%	0,15%	0,32%
Concreto protegido do desgaste superficial	< 5%		

Fonte: Autor (2019).

O ensaio que determina a massa específica para o agregado miúdo foi fundamentado nos preceitos da NBR NM 52 (ABNT, 2009), utilizando um picnômetro conforme a Figura 3.1-a como recipiente de ensaio.

A absorção do agregado miúdo foi determinado a partir de uma amostra de areia úmida saturada perfeitamente homogeneizada. Determina-se a umidade total pela estufa (secagem à 105 °C) e a umidade superficial pelo processo do frasco de Chapman (Figura 3.1-b), conforme NBR 9.775 (ABNT, 2011). Assim, a Equação 3.1 determina o valor da absorção.

$$A = h - h_{sup} \quad (3.1)$$

Em que: A = Absorção.

h = Umidade total na condição saturada.

$h_{sup}$  = Umidade superficial determinada pela NBR 9.775 (ABNT, 2011).

Figura 3.1 – Picnômetro e frasco de Chapman



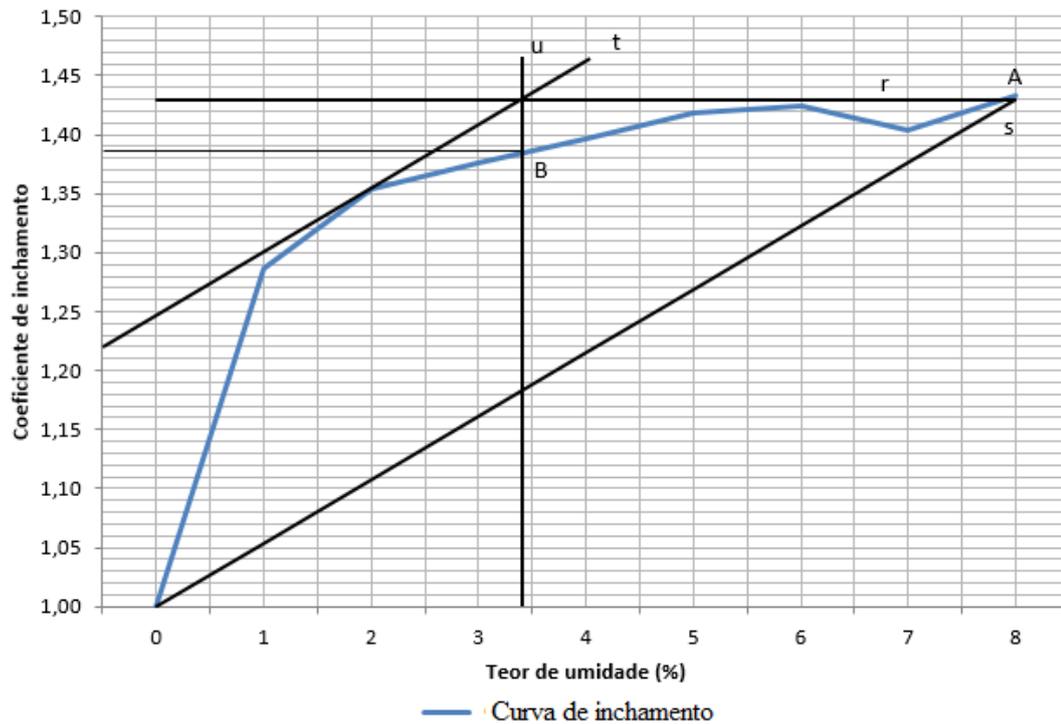
(a) Picnômetro

(b) Frasco de Chapman

Fonte: Autor(2019)

A massa unitária e o volume de vazios dos agregados foram determinados de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006), pelos métodos A para a massa unitária compactada e o método C para massa unitária solta. O inchamento do agregado miúdo foi determinado conforme a NBR 6.467 (ABNT, 2006). A Figura 3.2 demonstra a curva de inchamento, os pontos A, B; as retas r, s, t, e u utilizadas para determinar a umidade crítica e o coeficiente de inchamento.

Figura 3.2 – Curva de Inchamento



Fonte: Autor (2019).

A massa específica do agregado graúdo foi determinada pela NBR NM 53 (ABNT, 2009). O parâmetro índice de forma foi avaliado com o auxílio do paquímetro, conforme prescrição na NBR 7.809 (ABNT, 2019). O Quadro 3.4 relaciona as propriedades físicas verificadas para o agregado miúdo e graúdo.

Quadro 3.4 – Propriedades físicas dos agregados

Propriedade	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Massa específica ( $d_s$ )	2,64 g/cm <sup>3</sup>	_[a]
Massa específica aparente ( $d_t$ )	2,62 g/cm <sup>3</sup>	
Massa específica do agregado seco ( $d$ )	_[a]	2,89 g/cm <sup>3</sup>
Massa específica do agregado saturado superfície seca ( $d_s$ )		2,75 g/cm <sup>3</sup>
Massa específica aparente do agregado seco ( $d_t$ )		2,68 g/cm <sup>3</sup>
Absorção do agregado (A)	0,20 %	2,66 %
Massa unitária compactada ( $\rho_{ap\ compactada}$ )	1.610 kg/m <sup>3</sup>	1580 kg/m <sup>3</sup>
Massa unitária compactada ( $\rho_{ap\ solta}$ )	1.490 kg/m <sup>3</sup>	1430 kg/m <sup>3</sup>
Volume de vazios ( $E_v$ )	43 %	45 %
Umidade crítica	3,4%	_[a]
Coeficiente de inchamento médio	1,39	
Índice de forma	_[a]	2,27

Nota: a – Propriedade não aplicável ao tipo de agregado.

Fonte: Autor (2019).

Não foram realizados ensaios de umidade conforme a NBR 9.939 (ABNT, 2011), pois, os agregados foram utilizados nas misturas na condição seca (secagem em estufa a 105±5 °C).

### 3.1.3 Aditivo químico

As características do aditivo químico utilizado na dosagem para promover a plasticidade das misturas foram obtidas com o laudo técnico do fabricante. O Quadro 3.5 relaciona as principais características do aditivo químico, conforme sua marca e função.

Quadro 3.5– Principais características dos aditivos químicos

Ensaio de caracterização	Classificação NBR 11.768-1 (ABNT, 2019)
1 – Classificação de perigos	Sensibilização à pele – Categoria 1 H317. Pode provocar reações alérgicas na pele.
2 – Função no concreto	Redutor de água tipo II
3 – Dosagem recomendada	0,3 – 2,0 %
4 – Estado físico	Líquido
5 – Homogeneidade	Homogêneo
6 – Cor	Laranja
7 – pH (25 °C)	6
8 – Teor de sólidos (%)	- [a]
9 – Massa específica (25 °C)	1,1 g/cm <sup>3</sup>
10 – Teor de cloretos (Cl)	- [a]
11 – Base química	Éster policarboxilato (PA)

Nota: a – Propriedade não informada.

Fonte: Fabricante.

A propriedades de verificação visual estão de acordo com a NBR 11.768-1 (ABNT, 2019).

### 3.1.4 Lama residual de concreto (LRC)

A LRC foi coletada em uma central dosadora de concreto e produtos pré-fabricados na cidade de Mandaguari – PR. A coleta do resíduo da fabricação de concreto seguiu as diretrizes e preceitos da NBR NM 26 (ABNT, 2009) para materiais pulverulentos (coleta com teor de umidade diferente de zero) e conforme a NBR 10.007 (ABNT, 2004) para amostragem. O quarteamento foi feito de acordo com a NBR NM 27 (ABNT, 2001). O estudo com a LRC coletada foi conduzido no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

A Figura 3.3-a demonstra o depósito sobre o solo onde foi coletada a lama residual de concreto oriunda do processos de fabricação do concreto na indústria de pré-fabricados. A LRC foi coletada e armazenada em recipientes plásticos conforme a Figura 3.3-b, de acordo com a NBR 8.952 (ANBT, 1992) para materiais pozolânicos.

Figura 3.3 – Depósito LRC



(a) Depósito de LRC

(b) Recipiente plástico

Fonte: Autor (2019).

Após a coleta o material foi disposto em fôrmas retangulares para a secagem e armazenamento (Figura 3.4-a). A Figura 3.4-b demonstra a película de água formada pela sedimentação da LRC.

Figura 3.4 – Disposição da LRC



(a) Disposição em fôrmas metálicas

(b) Película de água sobre a LRC

Fonte: Autor (2019).

A secagem da LRC foi realizada em três procedimentos. O primeiro feito ao ar livre para secagem superficial. O segundo feito em estufa ( $105 \pm 5$ )°C para secagem dos torrões formados. E o terceiro realizado em estufa ( $105 \pm 5$ )°C para secagem do material solto.

Após a disposição do material em fôrmas, este foi submetido ao primeiro procedimento de secagem: ao ar livre para a secagem da água superficial (Figura 3.5-a). Com o intuito de aumentar a superfície livre, a camada de LRC enrijecida foi fragmentada (Figura 3.5-b).

Figura 3.5 – Secagem da LRC ao ar



(a) Secagem superficial da LRC

(b) Formação de torrões de LRC

Fonte: Autor (2019).

Finalizado o primeiro processo de secagem (ao ar livre), a LRC foi submetida ao segundo processo de secagem: em estufa (105°C sem circulação de ar). A Figura 3.6-a demonstra o aspecto entorroadado na LRC após a secagem em estufa. Em seguida, a LRC foi destorroada manualmente com auxílio de soquetes e um almofariz (Figura 3.6-b).

Figura 3.6 – LRC após secagem em estufa



(a) Torrões de LRC secos em estufa

(b) LRC destorroadada e seca

Fonte: Autor (2019).

O terceiro processo de secagem foi iniciado na LRC destorroada e seca. Após este processo a LRC foi disposta em fôrmas metálicas para o esfriamento (Figura 3.7-a). O armazenamento da LRC em estado sólido granular (pó), foi realizado em sacos plásticos, como demonstra a Figura 3.7-b.

Figura 3.7 – Armazenamento da LRC



(a) LRC em pó no interior da estufa

(b) Armazenamento da LRC

Fonte: Autor (2019).

Neste estudo a LRC foi considerada como um pó resultante da secagem da lama residual de concreto oriunda dos processos de fabricação de concreto. Desta maneira, para os efeitos de caracterização e adição em misturas de CAA, a LRC foi o sólido granular resultante do processo de secagem em estufa a  $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$ , com teor de umidade zero.

A composição granulométrica foi determinada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). E, o teor de material fino seguiu os preceitos da NBR NM 46 (ABNT, 2003), para o método umedecido com água. A massa específica seca foi determinada seguindo as orientações da NBR NM 52 (ABNT, 2009). O recipiente utilizado para o ensaio foi o picnômetro (Figura 3.1-a). De modo complementar foi realizado a determinação da massa específica de acordo com a NBR 16.605 (ABNT, 2017) utilizando o frasco de Le Chatelier. Foi realizada a determinação da umidade total da LRC antes do processo de secagem pelo método da estufa. Este teor representa a umidade no momento da coleta da LRC no depósito. O Quadro 3.6 relaciona a

composição granulométrica, o teor de material fino, a massa específica seca e a umidade total da LRC (no local).

Quadro 3.6 – Composição granulométrica e teor de material fino

Peneira	LRC			
	Retida	Retida acumulada	Massa específica seca NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,60 g/cm <sup>3</sup>
2,36 mm	0,0	0,0		
1,18 mm	16,9	16,9		
600 µm	13,3	30,2		
300 µm	22,9	53,1	Massa específica NBR 16.605 (ABNT, 2017)	2,58 g/cm <sup>3</sup>
150 µm	26,9	80,0		
Dimensão máxima característica		2,36 mm		
Modulo de finura		1,80		
Teor de material fino		7,8 %	Umidade total (no local)	93 %

Fonte: Autor (2019).

Foram realizados dois ensaios com o intuito de identificar e avaliar a atividade pozolânica da LRC. O primeiro determinou a atividade pozolânica com a cal aos 7 dias, conforme NBR 5.751 (ABNT, 2015). E o segundo avaliou o desempenho pozolânico utilizando cimento Portland, de acordo com a NBR 5.752 (ABNT, 2014).

Para o ensaio da determinação do índice de atividade pozolânica com argamassas de cal utilizou-se hidróxido de cálcio (cal hidratada, CH-III), areia normal de acordo com NBR 7.214 (ABNT, 2015) beneficiada no Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo (IPT), LRC e água. A massa específica do hidróxido de cálcio  $[Ca(OH)_2]$  foi obtido através do ensaio normatizado pela NBR 16.605 (ABNT, 2017) por meio do frasco volumétrico Le Chatelier. A massa unitária foi obtida através de informações técnicas do fabricante com o valor de 0,68 g/cm<sup>3</sup>.

Foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos em argamassa de cal em um misturador mecânico, de acordo com a NBR 7.215 (ABNT, 2019); com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm.

O teor de água foi determinado de maneira que a mistura alcançasse um índice de consistência de  $225 \pm 5$  mm obtido no ensaio de abatimento com a mesa de queda. A cura das argamassas de cal foi realizada nos próprios moldes cilíndricos por sete dias. Nas primeiras 24 h permaneceram em uma temperatura de 23°C. No restante dos seis dias as argamassas permaneceram na estufa a uma temperatura de 55°C. Os corpos de prova foram esfriados a

temperatura ambiente, fresados e ensaiados para determinar a resistência de compressão aos sete dias. O Quadro 3.7 relaciona os valores obtidos.

Quadro 3.7 – Dosagem, característica e resistência das argamassas de cal

Materiais		Quantidade	Massa específica ( $\delta$ )	
Hidróxido de cálcio		104 g	Hidróxido de cálcio	2,5 g/cm <sup>3</sup>
Areia normal	Fração 16	234 g	LRC	2,58 g/cm <sup>3</sup>
	Fração 30	234 g	<b>Resistência à compressão uniaxial (6 cps.)</b>	
	Fração 50	234 g	I – Ruptura durante o manejo	IV – 0,2 MPa
	Fração 100	234 g	II – Ruptura durante o ajuste na prensa	V – 0,3 Mpa
LRC <sup>[a]</sup>		$2 \cdot \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cal}} \cdot 104 = 206,32 \text{ g}$	III – 0,3 MPa	VI – 0,2 MPa
Água		300 g	<b>Resistência média (<math>f_c</math>): 0,2 MPa</b> <b>DRM: 14 %</b>	

Notas: a – massa determinada de acordo com NBR 5.751 (ABNT, 2015)

Fonte: Autor (2019).

Para o ensaio da determinação do índice de atividade pozolânica com argamassas de cimento utilizou-se cimento Portland (CP II-F-32), areia normal de acordo com a NBR 7.214 (ABNT, 2015), água, LRC e aditivo plastificante. A massa específica do cimento foi obtida junto ao fabricante.

Foram confeccionadas duas composições de argamassas. A primeira argamassa (A) foi de referência, sem a incorporação do resíduo, apenas com cimento, areia normal e água. A segunda argamassa (B), incluía 25% em massa de LRC, em substituição à igual porcentagem de cimento.

Foram moldados 6 corpos de prova para cada argamassa (A e B), totalizando 12 corpos de prova. Os corpos de prova cilíndricos apresentavam diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm. A quantidade de aditivo plastificante na argamassa B foi determinada de maneira a manter o mesmo índice de consistência da argamassa A  $\pm$  10 mm.

As argamassas permaneceram nos moldes durante as primeiras 24 h, como também em câmara úmida a 23°C, na sequência foram desmoldadas. Até a idade de ruptura (28 dias) foram mantidas em cura submersa com água saturada de hidróxido de cálcio. As argamassas foram fresadas com o intuito de regularizar a superfície, e submetidas ao ensaio de resistência à compressão uniaxial aos 28 dias. O consumo, massa específica, resistência à compressão uniaxial estão relacionados no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 – Dosagem, característica e resistência das argamassas de cimento

Materiais		Quantidade		Massa específica ( $\delta$ )			
		A	B	Cimento CP II F – 32		3,1 g/cm <sup>3</sup>	
Cimento CP II F-32		(624±0,4) g	(468±0,4) g	<b>Resistência à compressão uniaxial (12 cps.)</b>			
Areia normal	Fração 16	468 g	468 g	<b>A</b> <b>(MPa)</b>	24,4	<b>B</b> <b>(MPa)</b>	7,9
	Fração 30	468 g	468 g		25,9		6,9
	Fração 50	468 g	468 g		25,6		7,1
	Fração 100	468 g	468 g		25,8		7,0
LRC <sup>[a]</sup>	0 g	(156±0,4) g	24,5		6,2		
Água	(300±0,2) g	(300±0,2) g	23,0		8,1		
Aditivo químico		0 g	4,03 g	<b>Resistência média (fc):</b>			
				A = (24,9 ± 1,1) MPa		B = (7,2 ± 0,7) MPa	
				DRM = 4 %		DRM = 13 %	
				<b>Icimento = 29 %</b>			

Notas: a – massa determinada de acordo com NBR 5.752 (ABNT, 2015)

Fonte: Autor (2019).

Com o intuito de identificar a estrutura dos sólidos que compõe a LRC, foi realizada um análise de difração de raio X (DRX). O estudo foi realizado no Laboratório de Caracterização e Reciclagem de Resíduos (LCRR) do Departamento de Agronomia (DAG) da Universidade Estadual de Maringá. Foi empregado o equipamento de DRX modelo Shimadzu XRD 6000 com fonte em Cobalto (Co, voltagem de 40 kV, 30 mA e alcance de 3 a 80 graus) e monocromador de cristal de grafite.

A análise do difração de raio X focou na determinação comparativa de possíveis materiais sólidos cristalinos presentes na LRC. A comparação foi fundamentada na identificação e comparação dos picos de concentração de raio X e os elementos prováveis com picos coincidentes.

Foram realizados nos Laboratório de Saneamento do Departamento de Engenharia Civil (DEC), Laboratório de Catálise do Departamento de Engenharia Química (DEQ) e no Laboratório de Gestão, Controle e Preservação Ambiental do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Estadual de Maringá (UEM) os ensaios nos extratos de LRC lixiviado conforme NBR 10.005 (ABNT, 2004) e solubilizado conforme NBR 10.006 (ABNT, 2004).

Foi verificada a classificação da LRC conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004) à respeito dos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que este resíduo seja gerenciado de maneira adequada.

### 3.1.5 Água de amassamento

A água de amassamento empregada nas misturas de concreto foram oriundas da rede pública de distribuição de água potável de Maringá – Paraná. A Sanepar, empresa responsável pela prestação desse serviço realiza análises periódicas das características da água distribuída. O Quadro 3.9 demonstra os resultados da análise realizada pela empresa.

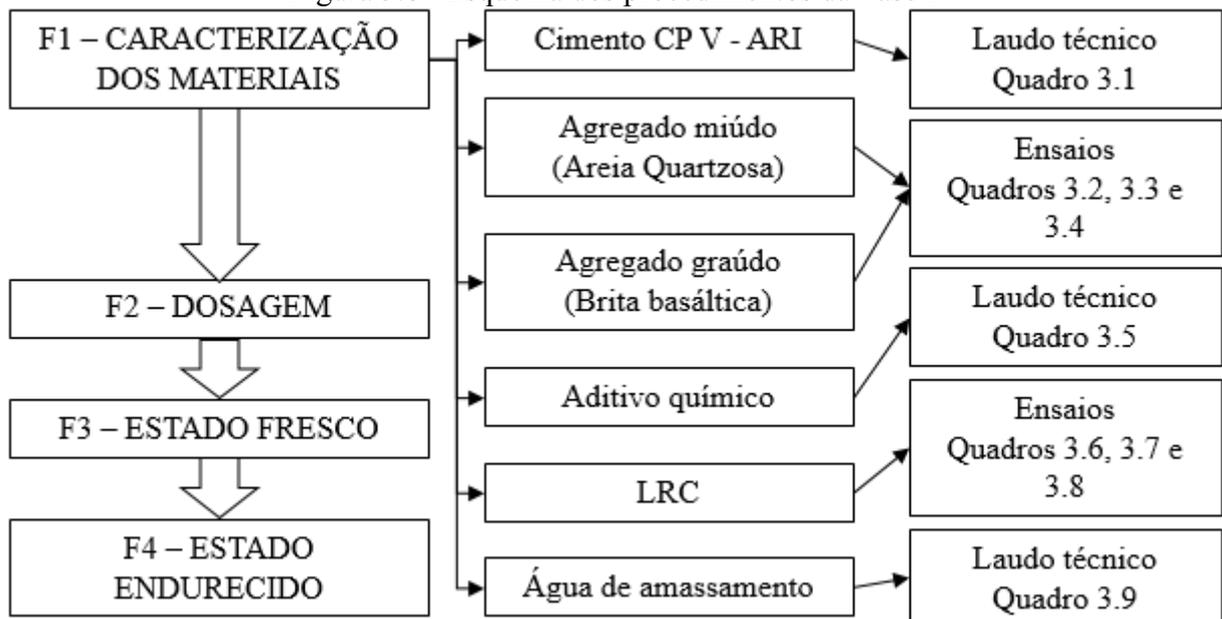
Quadro 3.9– Análise da água em Maringá – Paraná

Característica	Média dos últimos 30 resultados	Mínimo / máximo permitido	Unidade
Cor	2,5	15,0	µH
Fluoretos	0,7	0,6 – 1,1	mg/l F
Turbidez	0,23 - 0,26	5,0	NTU
pH	6,9 - 7,1	6,0 – 9,5	Unidade de pH
Cloro Residual	0,8 - 0,9	0,2 – 5,0	mg/l de Cl
Alumínio	0,015 - 0,05	0,2	mg/l de Al
Ferro Total	0,01 - 0,03	0,3	mg/l de Fe
Manganês	0,01	0,1	mg/l de Mn
Microcistinas	0	1,00	µg/l
Coliformes Totais	0	Ausente	
Escherichia Coli	0	Ausente	

Fonte: Boletim Análise da Água em Maringá - Paraná, Sanepar 12/12 (2019).

Em resumo a Figura 3.8 esquematiza os procedimentos que foram realizados na Fase 1 dos procedimentos metodológicos.

Figura 3.8– Esquema dos procedimentos da Fase 1

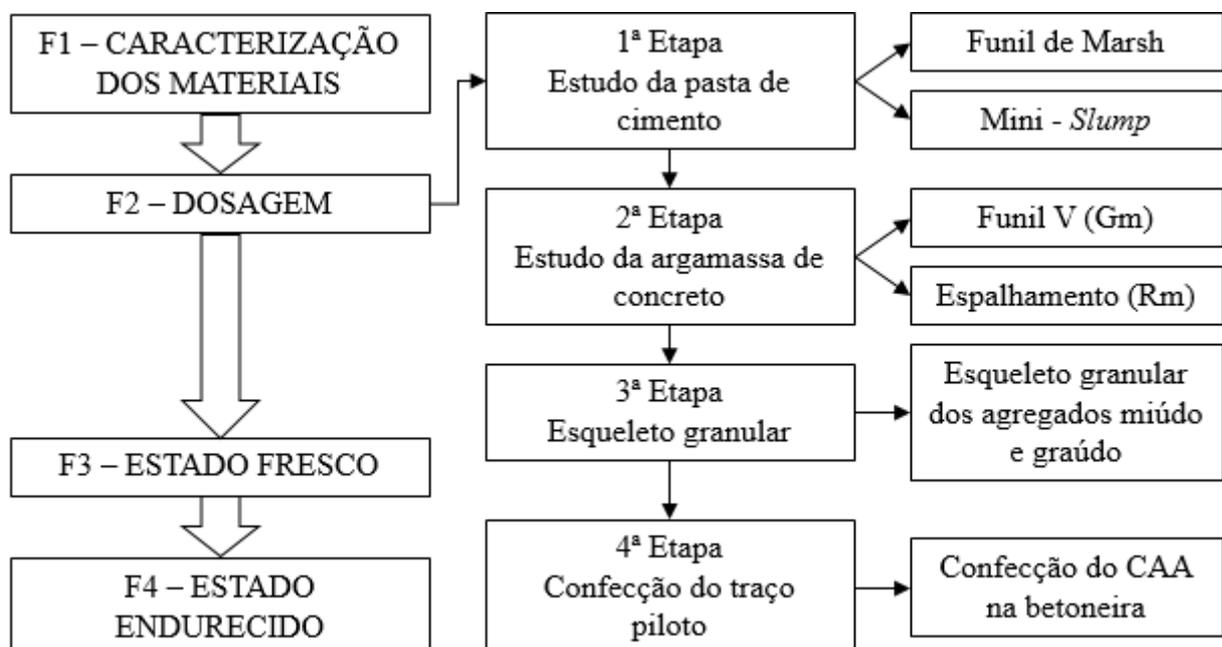


Fonte: Autor (2019).

### 3.2 FASE 2 –DOSAGEM

A Fase 2 do procedimento metodológico consistiu em determinar o traço piloto experimental. A dosagem do CAA: determinação do traço piloto (T0) e com incorporação da LRC, seguiu os preceitos envolvidos nos métodos de Ozawa, Maekawa e Okamura (1990), Ouchi, Ozawa e Okamura (1996) e Okamura (1997); Gomes, Gettu e Aguilló (2002;2003); Tutikian e Dal Molin (2007) e EFNARC (2005). A Figura 3.9 esquematiza as quatro etapas da Fase 2 do programa experimental.

Figura 3.9– Esquema dos procedimentos da Fase 2



Fonte: Autor (2019).

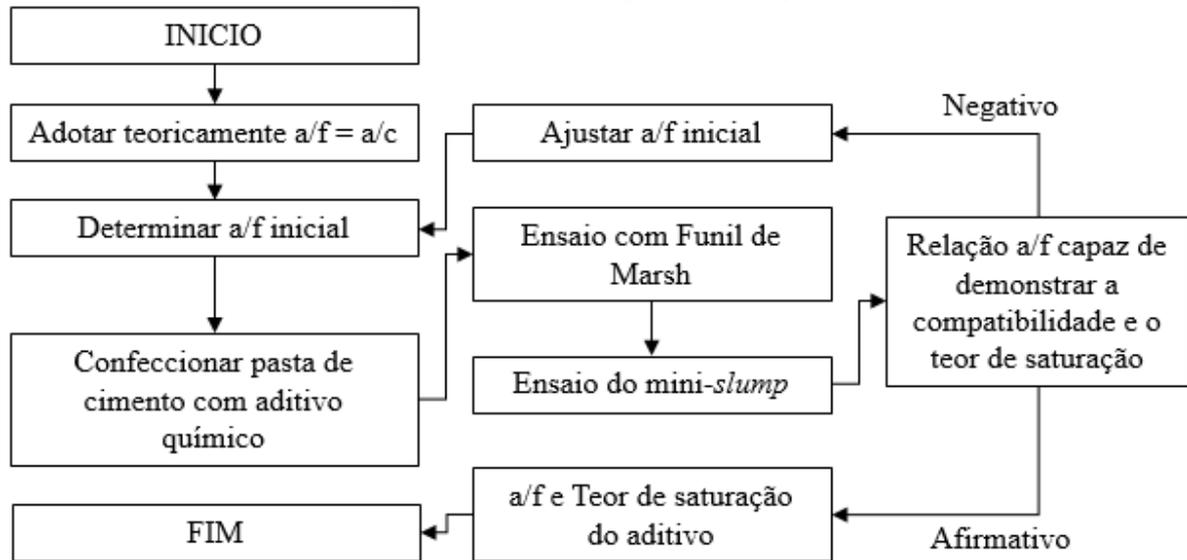
#### 3.2.1 1ª Etapa – Estudo da pasta de cimento

A primeira etapa da Fase 2 envolve o estudo pasta de cimento. A determinação da relação água/cimento ( $a/c$ ) seguiu o objetivo de confeção de CAA orientado para o uso em estruturas, com base em históricos de concretos similares e aplicações específicas.

Foi realizado o ensaio com o funil de Marsh, executado com o intuito de determinar a compatibilidade do aditivo com o concreto e o teor de saturação de aditivo para um valor inicial de  $a/c$ . Os valores de  $S_p/c$  foram fundamentados nos limites máximo e mínimo aconselhados pelo fabricante. A relação finos/cimento ( $f/c$ ) foi determinada considerando as prescrições da EFNARC (2005) e do ensaio do mini-*slump* executado com o minicone.

A Figura 3.10 demonstra o fluxograma para a determinação da relação a/c, f/c e teor de saturação de aditivo para a 1ª etapa da Fase 2. Os passos ilustrados são iterativos e foram finalizados quando a relação a/f foi capaz de atender aos critérios selecionados.

Figura 3.10 – Fluxograma da etapa 1



Fonte: Autor (2019).

Para o ensaio com o Funil de Marsh o critério que demonstra a compatibilidade do cimento e do aditivo químico foi a viabilidade do ensaio com um tempo de fluxo (T) menor que 90 segundos. No ensaio do mini-slump foi um tempo ( $T_{115}$ ) menor que 3,5 segundos.

A pasta de cimento foi confeccionada em um misturador mecânico dotado de duas velocidades (Quadro 3.10). A pasta foi preparada com a mistura de cimento, aditivo químico e água.

Quadro 3.10 – Velocidade da pá do misturador

Velocidade	Rotação em torno do eixo	Movimento Planetário
Baixa	140±5	62±5
Alta	285±10	125±10

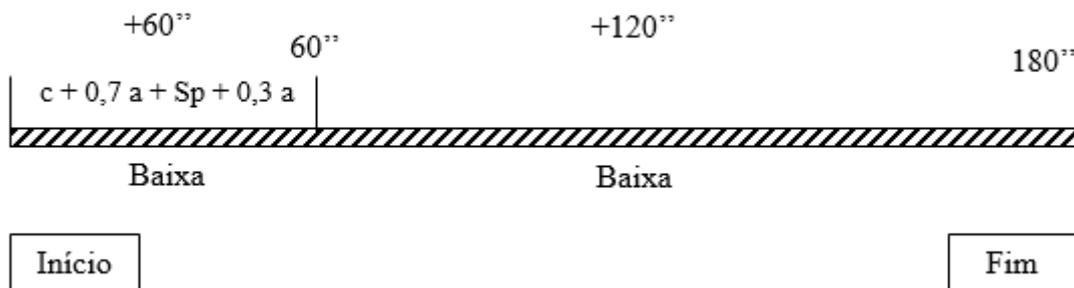
Fonte: NBR 7.215 (ABNT, 2019).

O mistura inicial foi confeccionada com o teor de aditivo de 0,3% e as misturas seguintes foram confeccionadas com um incremento de 0,1% no teor de aditivo. Os limites foram determinados a partir das especificações do fabricante. O intervalo foi de 0,3% a 2,0% de aditivo.

A confecção da pasta foi realizada na velocidade baixa (Quadro 3.10). Inicialmente foi colocado o cimento no recipiente, então ligava-se o misturador e o cronômetro. Durante um

minuto era acrescentada na mistura 70% da água, o aditivo superplastificante e 30% de água restante (utilizada para lavar o recipiente que continha o aditivo). Então, a mistura permanecia em velocidade baixa por mais 2 minutos. Finalizada a mistura, verificava-se a temperatura e os ensaios de Funil de Marsh e *mini-slump* eram realizados. A Figura 3.11 ilustra as etapas da confecção da pasta.

Figura 3.11 – Confecção de pasta de cimento: tempo e velocidade de mistura



Fonte: Autor (2019).

O Funil de Marsh utilizado atende às medidas da NBR 7.681-2 (ABNT, 2013), com diâmetro do orifício inferior de 10 mm. A determinação do índice de fluidez também seguiu as prescrições desta norma. Contudo, o volume de material disposto no Funil de Marsh foi de 1 litro. Desta maneira o índice de fluidez da pasta foi pautado no tempo para o escoamento de 500 ml de pasta.

O ensaio do *mini-slump* foi realizado logo após o ensaio de índice de fluidez com o Funil de Marsh. As dimensões do cone podem ser vistas na Figura 2.14. O índice de consistência foi medido a partir do tempo ( $T_{115}$ ) e com espalhamento não superior a  $(180 \pm 10)$  mm.

Ambos os ensaios (Funil de Marsh e *mini-slump*) foram filmados durante sua execução, com o intuito de auxiliar a determinação dos tempos de escoamento. Foram comparados os tempos a partir das filmagens e aqueles determinados com o cronômetro.

### 3.2.2 2ª Etapa – Estudo da argamassa de concreto

A segunda etapa envolve o estudo na argamassa. A relação  $Sp/c$  foi determinada nessa etapa pelos valores de  $G_m$  (Equação 2.1) e  $R_m$  (Equação 2.2) referentes ao espalhamento e tempo de fluxo da argamassa. O teor de aditivo levou em consideração a presença da LRC nos teores de 10, 20 e 30% da massa do cimento. Estes teores foram pautados nos estudos e resultados de Mohammed, Dawson e Thom (2013); Buchert *et al.* (2015); Şahmaran, Christianto e Yaman

(2006); Ponikiewski e Gołaszewski (2014); Sua-iam e Makul (2013) e Sethy, Pasla e Chandra Sahoo (2016). O Quadro 3.11 relaciona os autores, o tipo de incorporação e os teores adotados nos estudos.

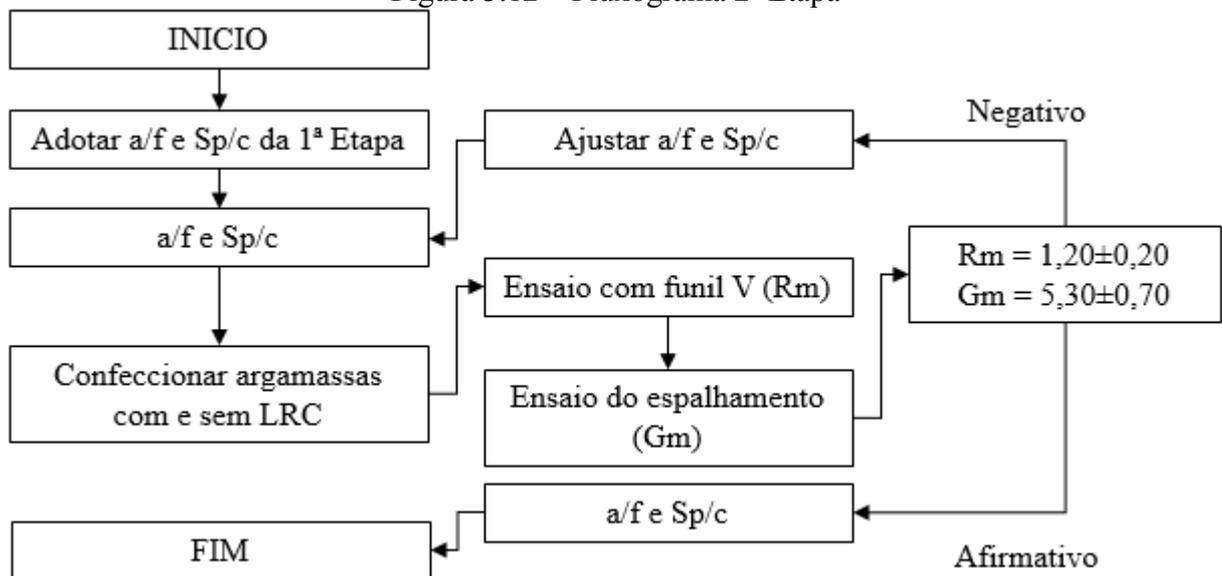
Quadro 3.11 – Relação de autores, incorporação e teores

<b>Autor</b>	<b>Incorporação</b>	<b>Teor (%)</b>
Mohammed, Dawson e Thom (2013)	Fíler Cinza volante	33
Bucher <i>et al.</i> (2015)	Metacaulim	15, 25 e 35
Şahmaran, Christianto e Yaman (2006)	Cinza volante Fíler Pó de tijolo argiloso moído Caulinita	15 e 30
Ponikiewski e Gołaszewski (2014)	Cinza volante com alto teor de cálcio	10, 20 e 30
Sua-iam e Makul (2013)	Cinza do bagaço de cana Fíler	10, 20, 40, 60, 80 e 100
Sethy, Pasla e Chandra Sahoo (2016)	Escória industrial	30, 40, 60, 80 e 90

Fonte: Autor (2019).

O fluxograma disposto na Figura 3.12 demonstra os passos da 2ª Etapa. Os valores de  $a/f$  e teor de saturação de aditivo oriundos da 1ª Etapa foram utilizados como ponto de partida para o estudo na argamassa de concreto.

Figura 3.12 – Fluxograma 2ª Etapa



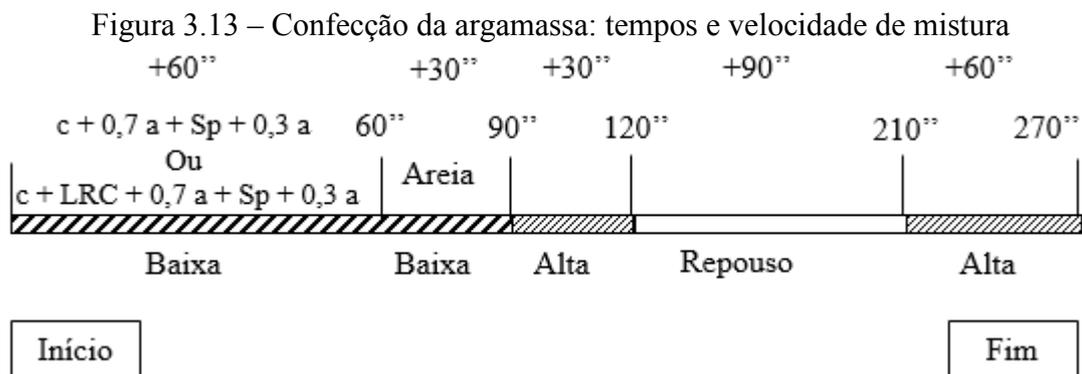
Fonte: Autor (2019).

Os valores de  $R_m$  e  $G_m$  foram determinados a partir do escoamento no funil V ( $R_m$ ) e espalhamento com cone ( $G_m$ ). O critério exigido para as argamassas foi de  $R_m$  igual a  $(1,2 \pm 0,2)$  e  $R_m$  igual a  $(5,30 \pm 0,70)$  provenientes da relação entre o escoamento e o espalhamento (Figura

2.10) proposto por Okamura e Ouchi (2003). Para a confecção das argamassas foi fixada a relação areia/cimento ( $s/c = 2$ ), de maneira que todos os traços estudados apresentassem a mesma quantidade de areia.

A mistura da argamassa foi realizada com um misturador mecânico em duas velocidades (Quadro 3.10). O procedimento foi baseado nas prescrições da NBR 7.215 (ABNT, 2019), com algumas alterações no tempo de mistura e na ordem da disposição dos materiais no recipiente. Devido ao manejo do superplastificante e da LRC com seu aspecto fino, optou-se por adicionar os materiais secos antes da água.

Neste caso, o cimento foi colocado por primeiro no recipiente de mistura, então foram adicionados 70% do volume da água, o aditivo químico e os 30% restantes de água – utilizada na limpeza do recipiente que continha o aditivo. Após 60 segundos de mistura foi adicionado o agregado miúdo (areia). Nos caso em que foram adicionados LRC, este material foi colocado junto com o aglomerante nos teores pertinentes. A Figura 3.13 ilustra a confecção, tempos de mistura e velocidade do misturador.



Fonte: Autor (2019).

O funil V e o tronco de cone, utilizados para determinação dos tempos relativos e dos espalhamentos relativos seguiram as especificações de dimensão descritas nas Figuras 2.8 e 2.9.

Após a confecção das argamassas primeiro foi realizado o ensaio no funil V, verificava-se o tempo de escoamento com um cronômetro. Com a argamassa restante, foi realizado por segundo, ensaio no tronco de cone. O espalhamento foi aferido com um paquímetro, os diâmetros ( $d_1$  e  $d_2$ ) medidos eram perpendiculares entre si.

### 3.2.3 3ª Etapa – Esqueleto granular

A terceira etapa foi a determinação do esqueleto granular conforme fundamentado por Gomes, Barros (2009), Tutikian e Dal Molin (2008). O recipiente utilizado para a mistura dos materiais possuía diâmetro superior à cinco vezes do diâmetro máximo do agregado graúdo.

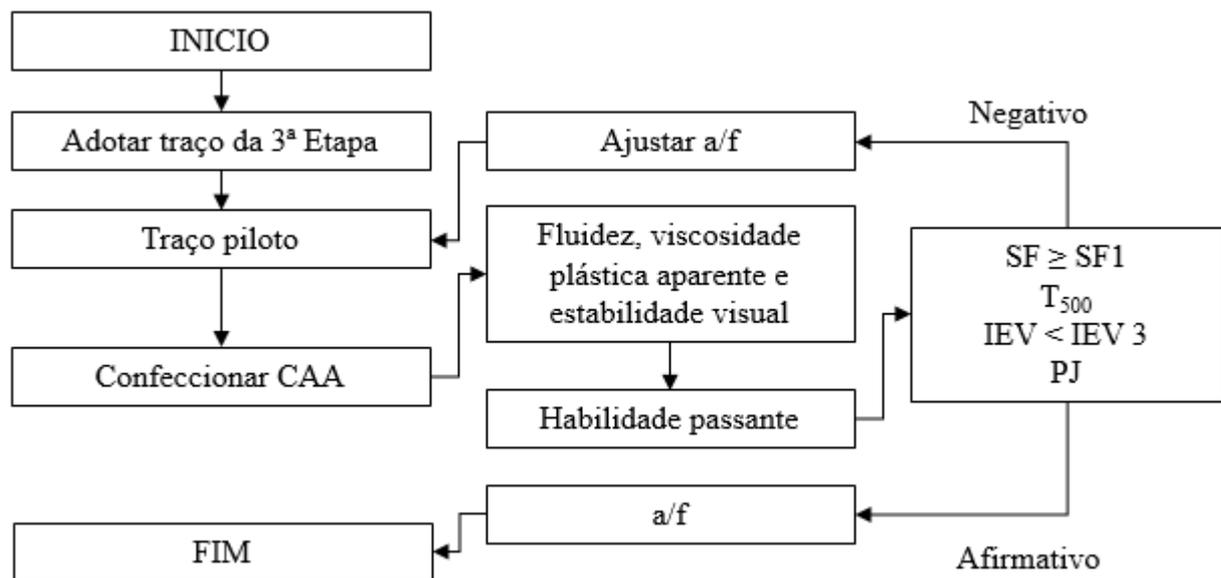
A mistura foi realizada com os agregados com o intuito determinar a proporção que gere o menor volume de vazios. Desta maneira, foram realizadas três misturas com a mesma proporção dos componentes. O valor médio foi adotado para representar tal composição. Os incrementos nesta proporção entre agregados foi de 10%, quando a relação foi se aproximando da ideal o incremento foi de 2%.

### 3.2.4 4ª Etapa – Confeção do concreto autoadensável

Nesta etapa foi confeccionado o CAA piloto. Foram realizados ajustes no fator a/f para a obtenção de um concreto plástico que pudesse ser avaliado conforme a NBR 15.823 (ABNT, 2017).

O critério estabelecido foi o mesmo determinado na NBR 15.823 (ABNT, 2017) para controle de CAA na indústria de pré-fabricados e em casos especiais. O fluxograma descrito na Figura 3.14 ilustra o critério para os traços de CAA.

Figura 3.14 – Fluxograma para o ajuste do traço

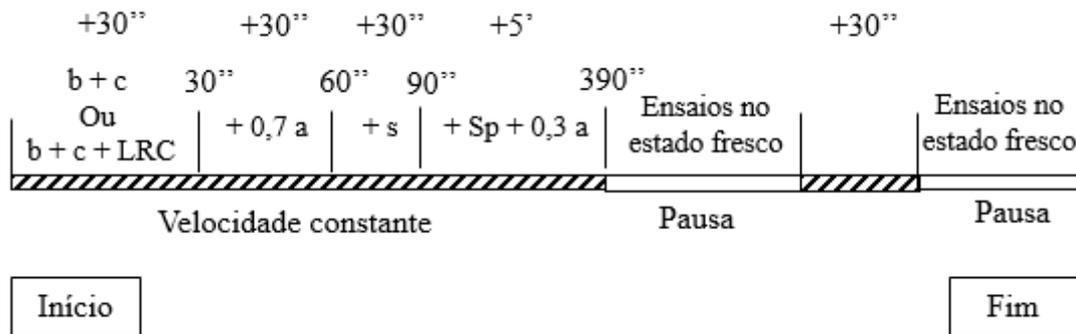


Fonte: Autor (2019).

A betoneira (400 l) foi umedecida e imprimada (traço da mistura) com duas vezes o traço. Após o processo de imprimação foi confeccionado o CAA conforme ilustrado na Figura 3.15. Primeiro foi misturado o agregado graúdo (b) com os materiais finos (c ou c+LRC) por 30 segundos. Em seguida, foi adicionado 70% da água (0,7 a). Em terceiro, o agregado miúdo (s), seguindo pela adição do aditivo superplastificante e os 30% de água restantes (limpeza dos

recipientes com aditivo). O CAA foi misturado novamente por 30 segundos a cada ensaio no estado fresco.

Figura 3.15 – Confeção do CAA



Fonte: Autor (2019).

O critério disposto na Figura 3.14 e na NBR 15.823 (ABNT, 2017) quando estabelecido determina a quantidade de água adicional no traço, devido à adição do agregado graúdo.

A determinação da massa específica do CAA no estado fresco, do rendimento e o teor de ar incorporado pelo método gravimétrico foi realizada conforme a NBR 9.833 (ABNT, 2008). Foi utilizado um recipiente de 15,1 cm<sup>3</sup>, calibrado conforme a norma e o CAA preencheu o recipiente sem qualquer vibração.

### 3.3 FASE 3 – ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

As propriedades no estado fresco do CAA foram avaliadas conforme nove ensaios recomendados pela NBR 15.823 (ABNT, 2017). Com intuito de reduzir a influência da perda abatimento do CAA com o tempo, foram realizados duas betonadas (I e II) para a investigação das propriedades frescas. O Quadro 3.12 ilustra as misturas e os ensaios realizados.

Quadro 3.12 – Traços de CAA e ensaios no estado fresco

	T0		T1		T2		T3	
	T0-I	T0-II	T1-I	T1-II	T2-I	T2-II	T3-I	T3-II
Espalhamento	X	X	X	X	X	X	X	X
T <sub>500</sub>	X	X	X	X	X	X	X	X
IEV	X	X	X	X	X	X	X	X
Anel J	X	X	X	X	X	X	X	X
Massa específica	X	X	X	X	X	X	X	X
Funil V	X		X		X		X	
Caixa L	X			X		X		X
Coluna de segregação		X		X		X		X
Segregação pela peneira		X	X		X		X	

Fonte: Autor (2019).

O ensaio de Anel J foi realizado utilizando barras de 12,7 mm. De acordo com a NBR 15.823-3 (ABNT, 2017) as barras devem possuir  $(16\pm 3,3)$  mm. Portanto, esse diâmetro atende as prescrições da norma para a avaliação da habilidade passante do CAA.

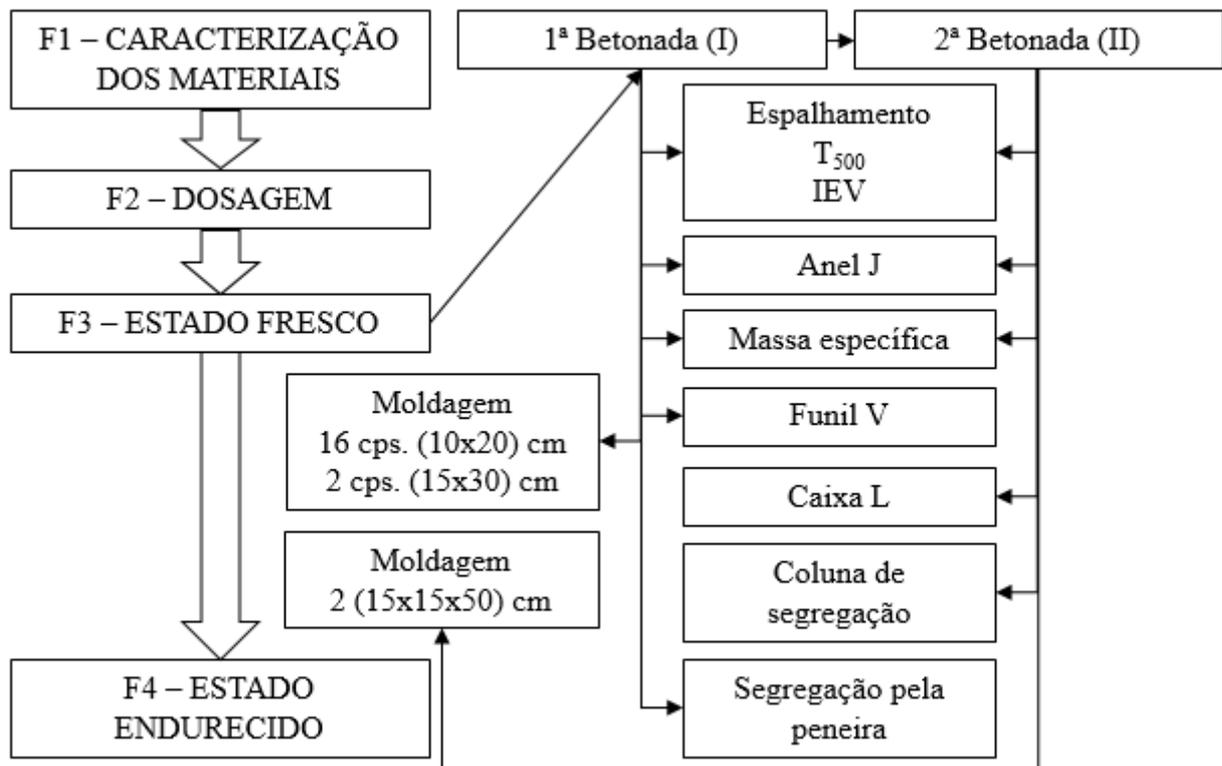
No ensaio da caixa L, a temperatura e a umidade foram ajustadas umedecendo o aparelho do ensaio. No funil V não foi necessária a instigação da perda de abatimento no CAA. Desta maneira o tempo  $T_{5min}$  não foi avaliado.

Após a confecção do CAA e execução dos ensaios no estado fresco, foram moldados:

- 16 corpos de prova cilíndricos de (100 x 200) mm;
- 2 corpos de prova cilíndricos de (150 x 300) mm; e
- 2 copos de prova prismáticos de (150 x 150 x 500) mm.

Os corpos de prova, após a moldagem, foram armazenados para a cura em câmara úmida a  $(23\pm 2)$  °C. Passadas 24 horas da moldagem, foram desformados, identificados e devolvidos à câmara húmida. Os corpos de prova permaneceram na câmara até o instante anterior aos ensaios no estado endurecido, conforme NBR 5.738 (ABNT, 2015). A Figura 3.16 resume as atividades realizadas na Fase 3.

Figura 3.16 – Fluxograma Fase 3



### 3.4 FASE 4 – ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

A Fase 4 foi caracterizada pelos ensaios realizados no estado endurecido das misturas de CAA. As propriedades avaliadas nesta fase foram: a resistência à compressão, resistência à tração e o módulo de elasticidade.

O ensaio de resistência à compressão uniaxial foi realizada conforme a NBR 5.739 (ABNT, 2018) e NBR 5.738 (ABNT, 2015). Os corpos de prova para a resistência à compressão foram moldados ao fim do processo de ensaios no estado fresco. Para garantir as características planas foi feita a retificação das superfícies de contato da prensa, com o intuito de manter a superfície perpendicular, uniforme, livre de ondulações e abaulamentos.

A calibração da prensa foi realizada no dia 03 de dezembro de 2018 e as curvas de calibração foram utilizadas na correção dos valores de ruptura. A velocidade de aplicação de carga foi 0,59 MPa/s; de acordo com a prescrição normativa de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s. Após o ensaio os corpos de prova foram descartados.

A resistência a tração foi determinada através de dois métodos: tração na compressão diametral (ABNT NBR 7.222, 2011) e tração na flexão de corpos prismáticos (ABNT NBR 12.142, 2010). Foram seguidas as prescrições normativas e a velocidade de aplicação de carga foi controlada através da filmagem e do cronômetro.

A determinação do módulo de elasticidade foi realizada de acordo com dois métodos: estático (ABNT NBR 8.552, 2017) e dinâmico através do estímulo por impulso e aquisição da resposta acústica. O módulo de elasticidade estático foi determinado de acordo com a metodologia B da NBR 8.552 (ABNT, 2017) em cada traço. Foi utilizado os aparelhos para medida da deformação estão ilustrados na Figura 3.17.

Figura 3.17 –Aparelho eletrônico para medida da deformação



Fonte: Autor (2019).

O módulo de elasticidade dinâmico foi estimado a partir do ensaio não destrutivo de estímulo mecânico (Figuras 3.18 e 3.19). Neste método, um impulsor (Figura 3.18-b) estimula uma das superfícies do concreto e mede-se a onda gerada pela agitação mecânica na outra superfície do corpo de prova através da resposta acústica (Figura 3.18-a). Este ensaio foi realizado com um aparelho médio Sonelastic (Suporte AS-BC, pulsador automático IED, captador acústico CA-DP e *software* Sonelastic). A estimativa do módulo de elasticidade é calculada a partir das dimensões do corpo de prova, da massa e do coeficiente de Poisson (neste estudo foi adotado o valor de 0,25).

Figura 3.18 – Captador e pulsador



(a) Microfone receptor

(b) Martelo impulsor

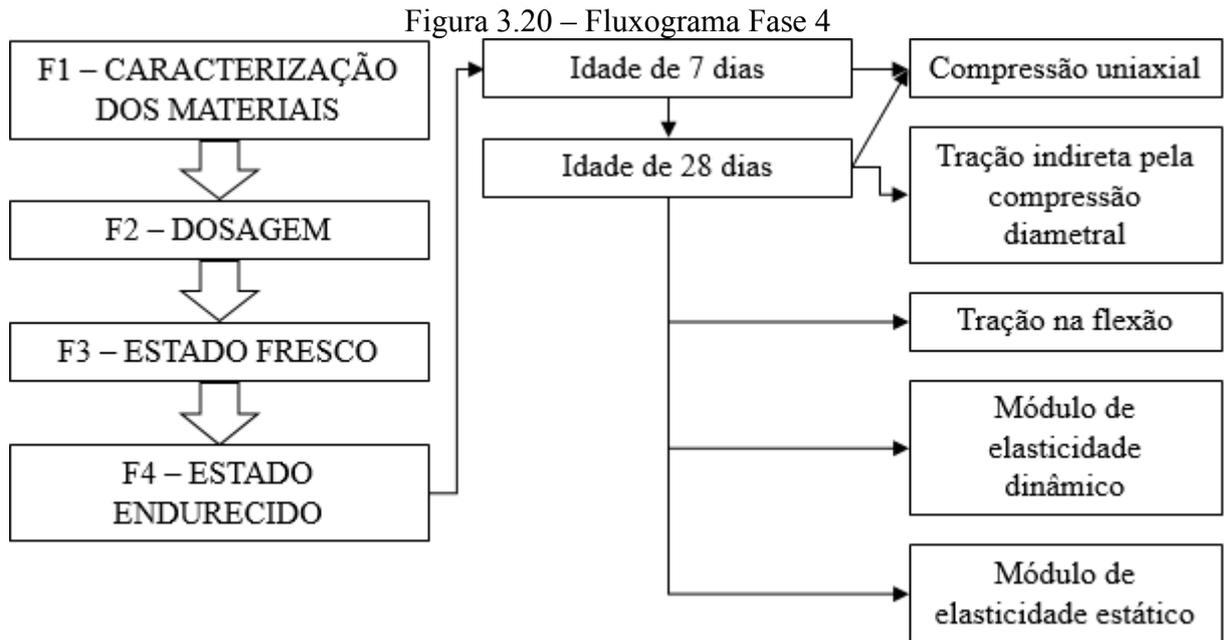
Fonte: Autor (2019).

Figura 3.19 – Montagem ensaio do módulo de elasticidade indireto



Fonte: Autor (2019).

Os traços de CAA foram classificados conforme os concretos com fins estruturais de acordo com a NBR 8.953 (ABNT, 2015) quanto à sua resistência à compressão uniaxial. A Figura 3.20 ilustra o esquema com os ensaios no estado ensurdecido.



Fonte: Autor (2019).

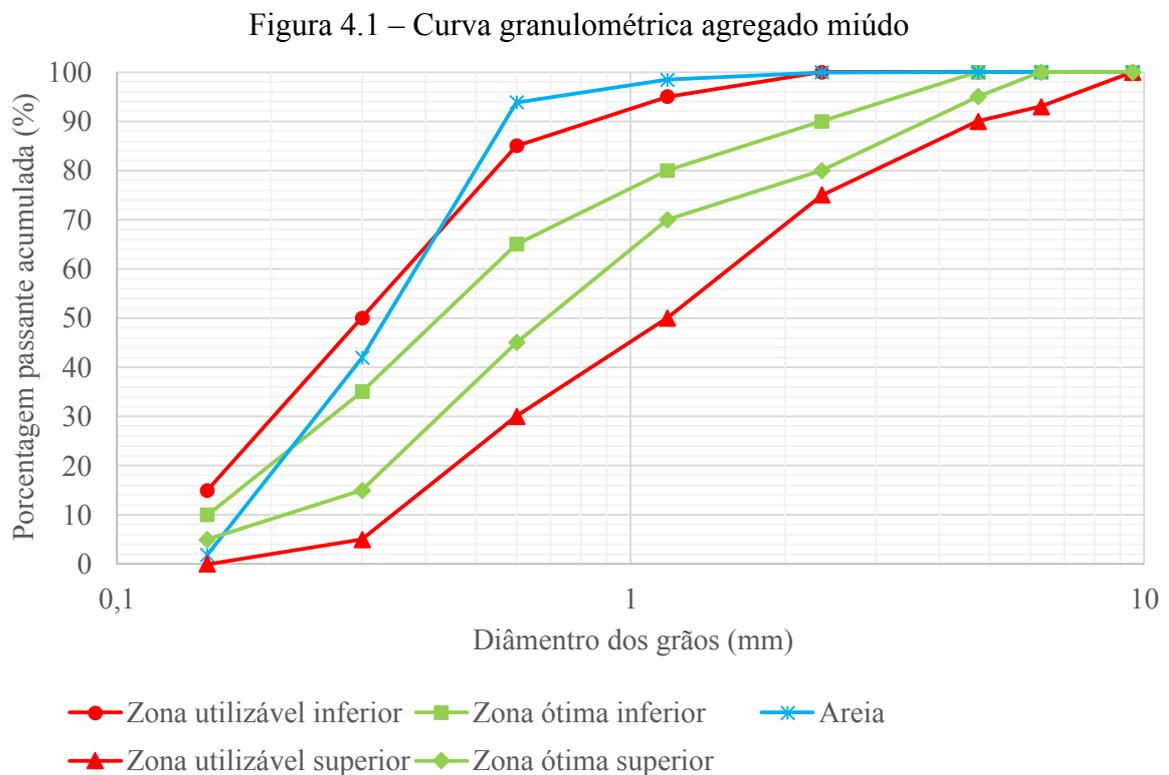
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são apresentados os resultados e as discussões a partir dos objetivos e do programa metodológico adotados para o estudo da adição de LRC nas misturas de CAA. O estudo estatístico limitou-se a descrição dos dados e ao estudo das medidas de posição.

### 4.1 F1 – MATERIAIS CONSTITUINTES

O cimento apresentou as características estabelecidas pela NBR 16.697 (ABNT, 2017). Apesar de não ter sido avaliado o teor de material insolúvel, o cimento CP V – ARI apresentou baixas quantidades de adições químicas em adjunto com o clínquer (Quadro 3.1). Além de um tipo de cimento com baixo teor de adições, as elevadas resistências iniciais combinam com as demanda da indústria de concreto.

O agregado miúdo utilizado na pesquisa apresentou um comportamento granulométrico fora da zona ótima. A Figura 4.1 demonstra a curva granulométrica apresentando o diâmetro e a porcentagem passante acumulada.



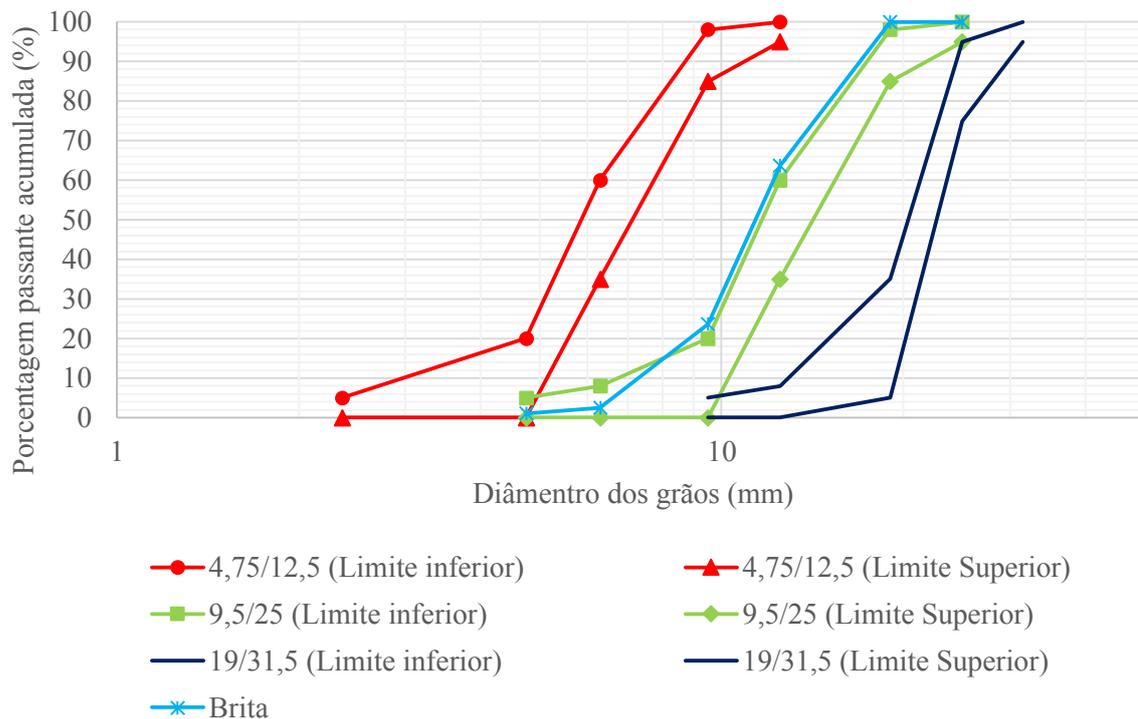
Fonte: Autor (2019).

Verifica-se a partir da Figura 4.1 que o agregado miúdo apresenta uma demanda de grãos com maior diâmetro, saindo dos limites normativos para granulometria ótima em todas

as peneiras utilizadas. O limite de utilização do agregado miúdo proposto pela NBR 7.211 (ABNT, 2009) foi extrapolado na terceira peneira da composição normal. Desta maneira, a areia utilizada na confecção do CAA apresenta uma característica excessivamente fina.

O agregado graúdo empregado nas misturas apresentou uma distribuição granulométrica semelhante à normativa. A Figura 4.2 demonstra a curva granulométrica da brita basáltica.

Figura 4.2 – Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autor (2019).

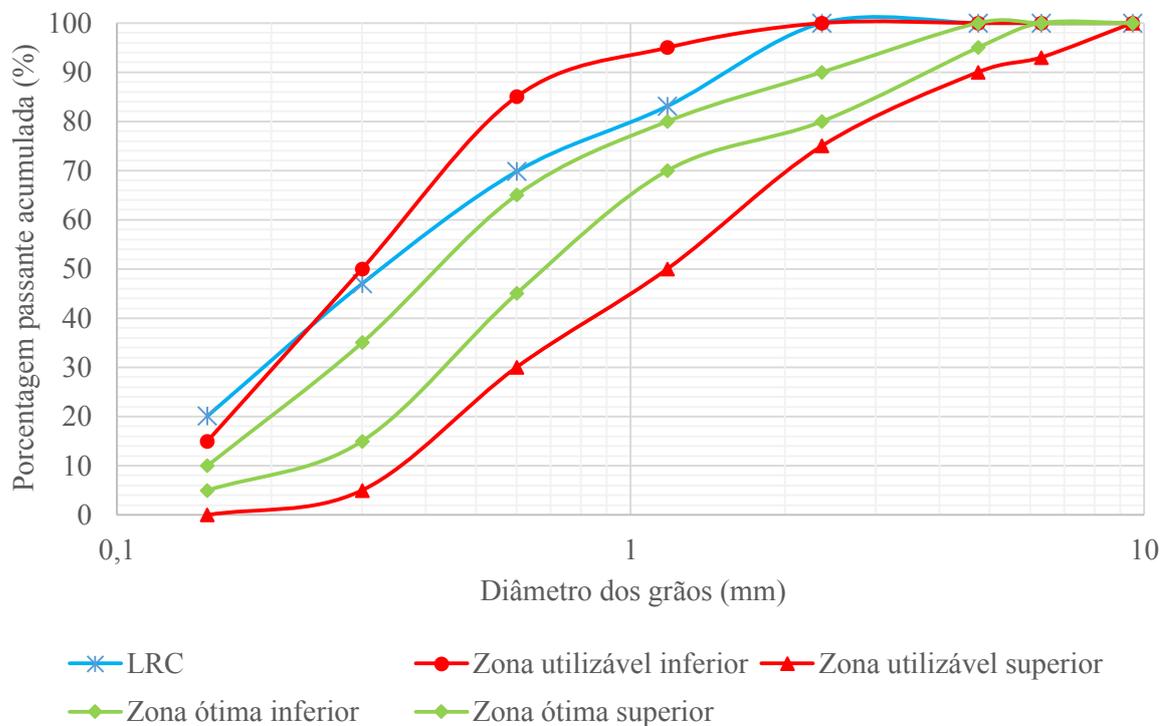
Verifica-se que a brita se encaixa no limite normativo para uma distribuição de 9,5 à 25 mm de diâmetro dos grãos. A variação do diâmetro nas peneiras internas ao limite (9,5/25) seguiram as prescrições normativas, sendo adotado para alguns casos uma pequena variação na porcentagem para algumas zonas granulométricas. O agregado graúdo apresenta um diâmetro máximo de 19 mm - indicado como máximo para a confecção de CAA. E, devido sua natureza basáltica e processo de britagem, o índice de forma foi de 2,25 (Lamelar), com implicações diretas na plasticidade final do CAA.

O aditivo químico superplastificante (Tipo II) permitiu a obtenção do CAA com baixa relação água/cimento, garantindo a manutenção da trabalhabilidade durante a avaliação das misturas confeccionadas.

A LRC foi utilizada na condição seca em estufa, apesar de ser extraída úmida com aspecto de lama. Isto se deve à dificuldade de obtenção de um teor de umidade que represente a LRC. Além disso, este material apresenta uma sedimentação das partículas quando não ocorre fluxo, agitação ou cisalhamento hidráulico. Uma vez sedimentado, o material se configura de modo heterogêneo e com diferentes teores de umidade. Desta maneira, a adição de LRC no CAA foi estabelecida viavelmente considerando o pó resultante da secagem em estufa da LRC.

Como produto residual da fabricação de concreto a LRC apresenta uma granulometria próxima aos materiais finos componentes do concreto. A Figura 4.3 demonstra a curva granulométrica da LRC comparada com os limites normativos para agregado miúdo.

Figura 4.3 – Curva granulométrica da LRC



Fonte: Autor (2019).

Como demonstrado na Figura 4.3, a distribuição granulométrica da LRC foi semelhante à de um agregado miúdo. A norma de agregados para concreto não se aplica à agregados industriais, e no caso de reciclados permite até 5% da quantidade total de agregados. Entretanto, para efeito de comparação, os limites inferiores utilizáveis da NBR 7.211 (ABNT, 2009) foram atendidos, exceto pela peneira de 150  $\mu\text{m}$ . Desta maneira, a LRC apresentou uma distribuição granulométrica semelhante a um agregado miúdo com excesso de material fino. O teor de 7,8% foi constatado para material passante na peneira de 75  $\mu\text{m}$ , enquanto que a NBR 7.211 (ABNT, 2009) aponta um valor de no máximo 5% para concretos protegidos de desgaste superficial.

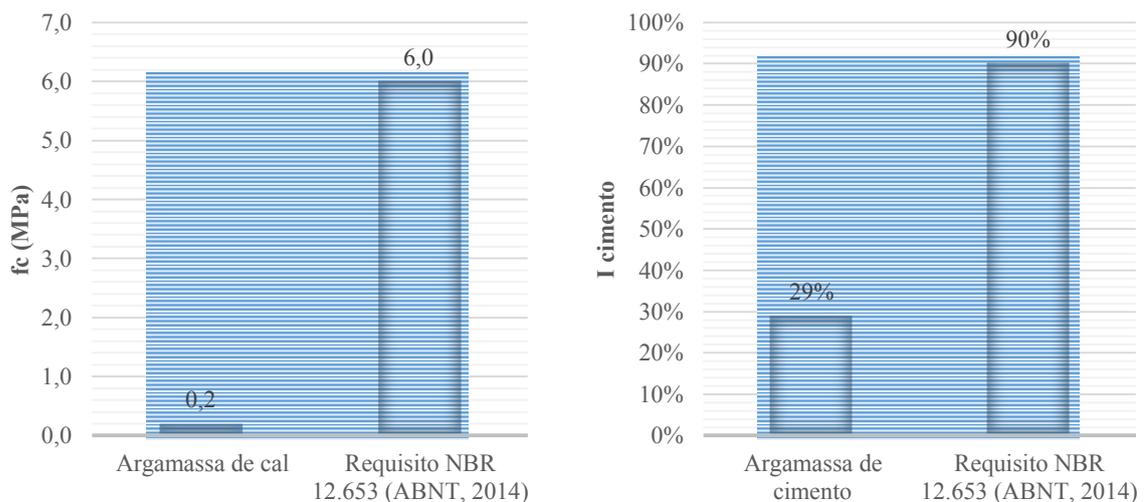
Apesar de apresentar um diâmetro máximo de 2,36 mm e uma massa específica de 2,60 g/cm<sup>3</sup>, os materiais finos da LRC adicionam uma característica distinta das areias. O módulo de finura (1,80) e o teor de finos (7,8%) alteram a absorção e a viscosidade em meio aquoso, de modo que os ensaios de absorção do agregado miúdo não são conclusivos ou precisos.

Os ensaios que determinam a atividade pozolânica realizados com argamassas de cal e cimento indicaram que a LRC não possui atividade reativa com o hidróxido de cálcio em meio aquoso. De acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 2014) o valor mínimo exigido para um material pozolânico é de 6 MPa para argamassas de cal e um índice de desempenho em argamassas de cimento superior à 90%.

As argamassas confeccionadas com hidróxido de cálcio e LRC apresentaram um valor médio de 0,2 MPa. As argamassas de cimento com substituição de 25% da massa apresentaram um índice de desempenho de 29%, valores inferiores aos requisitados pela norma. Desta maneira, de acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 2014) a LRC não pode ser classificada como um material pozolânico.

A Figura 4.4-a ilustra a resistência média à compressão uniaxial dos corpos de prova confeccionados com argamassas cal, e o índice de desempenho das argamassas confeccionadas com cimento e com 25% de substituição deste aglomerante por LRC (Figura 4.4-b). Os valores do desvio relativo máximo superiores aos normativos (> 10%) para o conjunto de corpos de prova são irrelevantes para pequenos resultados de resistência.

Figura 4.4 – Resistência à compressão da argamassas de cal e índice de desempenho



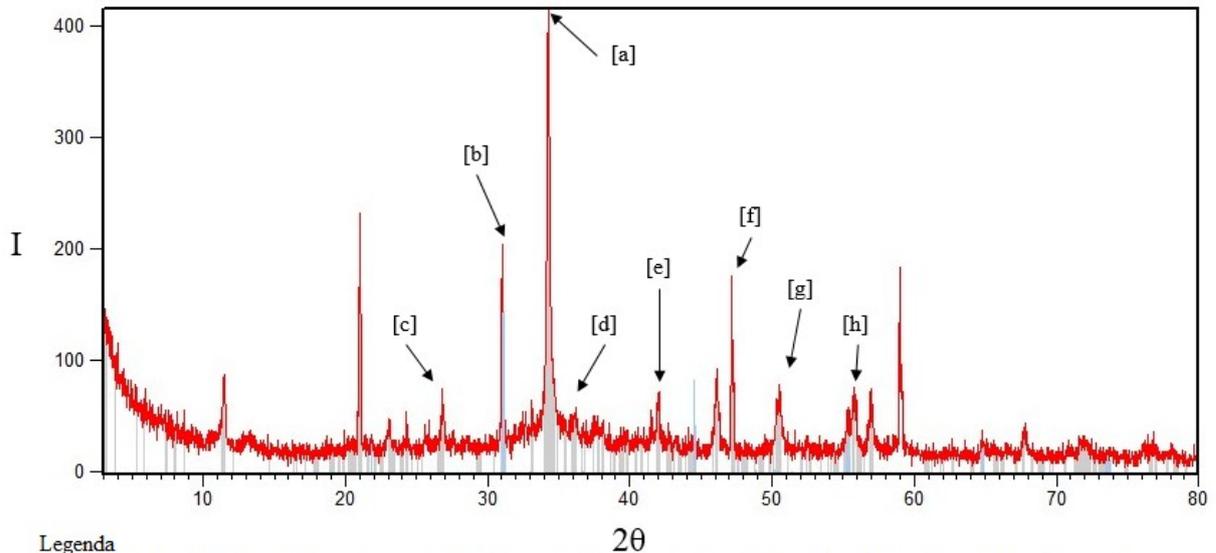
(a) Resistência à compressão

(b) Índice de desempenho

Fonte: Autor (2019).

É possível verificar a natureza cristalina da LRC a partir da difração de raio X. A Figura 4.5 demonstra o gráfico que correlaciona a intensidade de raios X com o ângulo de incidência destes raios.

Figura 4.5 – Gráfico de difração de raio X na LRC



Legenda

- [a] – Óxido de alumínio, cálcio e ferro [ $\text{Ca}_2(\text{Al}_{0,69}\text{Fe}_{0,31})_2\text{O}_5$ ], *Brownmillerite* [ $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe}^{+3})_2\text{O}_5$ ], Óxido de cálcio e alumínio ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5$ ), Óxido de cálcio e ferro ( $3\text{CaO} \cdot \text{FeO} \cdot 7\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Portlandita [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ], Óxido de cálcio e alumínio ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ), Magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ).
- [b] – *Cebollite* [ $\text{Ca}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ], Óxido de cálcio, alumínio e cloreto hidratado [ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,16\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 0,83\text{CaCl}_2$ ].
- [c] – *Doyleite* [ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ], Óxido de alumínio, cálcio e ferro [ $\text{Ca}_2(\text{Al}_{0,69}\text{Fe}_{0,31})_2\text{O}_5$ ], *Brownmillerite* [ $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe}^{+3})_2\text{O}_5$ ].
- [d] – Dolomita [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ].
- [e] – *Brownmillerite* [ $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe}^{+3})_2\text{O}_5$ ], *Houyne* [ $\text{Na}_6\text{Ca}_2\text{Al}_{10}\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{SO}_4)_2$ ], Óxido de cálcio e ferro ( $\text{Ca}_4\text{Fe}_{14}\text{O}_{25}$ ).
- [f] – Óxido de alumínio, cálcio e ferro [ $\text{Ca}_2(\text{Al}_{0,69}\text{Fe}_{0,31})_2\text{O}_5$ ], *Brownmillerite* [ $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe}^{+3})_2\text{O}_5$ ], Óxido de cálcio e alumínio ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ).
- [g] – Óxido de alumínio, cálcio e ferro [ $\text{Ca}_2(\text{Al}_{0,69}\text{Fe}_{0,31})_2\text{O}_5$ ], Aragonita ( $\text{CaCO}_3$ ), Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ).
- [h] – *Hydrocalumite* ( $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{Cl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ).

Fonte: Autor (2019).

Identifica-se a partir da Figura 4.5 que a LRC é composta por minerais cristalinos formados por aluminatos e ferro-aluminatos de cálcio (Figura 4.5-a, b, c). Também possui minerais de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), portlandita [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ]; dolomita e carbonatos de magnésio e cálcio. Estes minerais são produtos da hidratação do cimento e dos agregados adicionados na mistura de concreto, geradora do resíduo.

Em meio aquoso a LRC apresentou um pH básico de 12,57. Os ensaios de extratos lixiviado (ABNT NBR 10.005, 2004) e solubilizado (ABNT NBR 10.006, 2004) indicaram a presença de metais pesados nos extratos. Entretanto, apenas a composição do metal chumbo (Pb) apresentou uma concentração superior aos limites da NBR 10.004 (ABNT, 2004). O Quadro 4.1 relaciona as concentrações de compostos químicos avaliados para os extratos de LRC e os limites normativos conforme NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Quadro 4.1 – Concentrações de compostos químicos nos extratos lixiviado e solubilizado

Extrato lixiviado			Extrato solubilizado		
Composto químico inorgânico	NBR 10.004 (ABNT, 2004) Limite máximo mg/l	LRC (mg/l)	Composto químico inorgânico	NBR 10.004 (ABNT, 2004) Limite máximo mg/l	LRC (mg/l)
As	1,0	0,592	Al	0,2	0,222
Ba	70	_[a]	As	0,01	_[a]
Cd	0,5	0,000	Ba	0,7	
Pb	1,0	0,835	Cd	0,005	0,000
Cr	5,0	0,190	<b>Pb</b>	<b>0,01</b>	<b>0,413</b>
F <sup>-</sup>	150	0,271	CN <sup>-</sup>	0,07	_[a]
Hg	0,1	_[a]	Cl <sup>-</sup>	250,0	7,576
Ag	5,0	0,050	Cu	2,0	_[a]
Se	1,0	_[a]	Cr	0,05	0,041
Fe	_[b]	0,252	Fe	0,3	0,157
Mn		0,035	F <sup>-</sup>	1,5	0,380
Hg		_[a]	Mn	0,1	0,019
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		5,72	Hg	0,001	_[a]
Ag	_[b]	0,050	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10	4,52
Se		_[a]	Ag	0,05	0,021
Na		16,874	Se	0,01	_[a]
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>		54	Na	200,0	14,079
Zn		0,157	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	250,0	5,0
			Zn	5,0	0,117
<b>pH</b>	<b>11,47</b>			<b>12,57</b>	

Notas: a – Não realizado devido à limitações operacionais, b – sem especificação de limite  
 Fonte: Autor (2019).

A resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) número 307 classifica a LRC como Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, gerado do processo de fabricação de peças pré-moldadas em concreto produzidas nos canteiros de obras.

Para a NBR 10.004 (ABNT, 2004) a LRC pode ser classificada como Classe II – A (Resíduo não perigoso e não inerte), visto que não apresenta resíduos perigosos oriundos de fontes específicas ou não específicas. A LRC não contém propriedades inflamáveis, tóxicas ou patogênicas. Os limites para extratos lixiviados (Quadro 4.1) não são atingidos. O pH básico da LRC apresentou um valor limite para o efeito de classificação quanto à corrosão.

Apesar de ser considerado um resíduo não perigoso, possui atividade química. O extrato solubilizado da LRC superou os limites dispostos na NBR 10.004 (ABNT, 2004) para as concentrações de chumbo solubilizados (Quadro 4.1). Portanto, não inerte quimicamente no ambiente.

Nos estudos de Paula e Ilha (2014) a água residual de concreto apresentou um pH entre 6 a 9, assim como teores médios de 40 mg/l de cloreto e 3 mg/l ferro. Os extratos da LRC apresentaram um pH médio de 12,02 enquanto que a concentração de ferro e cloretos foram de 0,3 mg/l e 250,0 mg/l; respectivamente. No estudo de Asadollahfardi *et al.* (2015) o pH da água residual foi de 11,36 com concentrações de 260 mg/l de sódio (Na), 320 de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e 125 mg/l de cloretos.

A água de amassamento proveniente do sistema de distribuição de água atingiu as especificações da NBR 15.900 – 1 (ABNT, 2009). Portanto, adequada para o uso em misturas de concreto.

## 4.2 F2 – DOSAGEM

A dosagem com a finalidade de determinar o traço piloto (T0) e os demais (T1, T2 e T3) foi iniciada com a 1ª Etapa e finalizada com a 4ª Etapa.

### 4.2.1 1ª Etapa – Estudo da pasta de cimento

Nesta etapa verificou-se a relação a/c, a/f e teor de saturação de aditivo químico a partir dos ensaios do Funil de Marsh e *mini-slump*. No contexto do CAA a água é o principal modificador da tensão de cisalhamento no estado fresco. Desta maneira, a presença deste material determina a plasticidade do estado fresco do CAA.

O traço piloto (T0) de CAA não prevê a adição de LRC. Portanto, na pasta de cimento o aglomerante é o único fino presente na mistura, tal que a relação a/c para o traço piloto é igual a relação a/f ( $a/c = a/f$ ).

Devido à elevada eficiência do aditivo redutor de água (Tipo II) e a composição da pasta ser de apenas cimento, adotou-se o valor de a/f inicial de 0,30. Este valor inicial foi fundamentado na relação a/c = 0,40 da mistura de controle do estudo de Şahmaran, Christianto e Yaman (2006) em argamassas autoadensáveis. Neste estudo os autores não utilizaram aditivo redutor de água na mistura de controle. Desta maneira para o valor de a/f inicial, optou-se por um valor menor considerando a eficiência do aditivo superplastificante indicada pelo fabricante.

A verificação da compatibilidade entre aditivo e cimento a partir dos ensaios na pasta de cimento dependem diretamente da plasticidade da pasta. O valor 0,30 representa o ponto de partida do estudo da pasta de CAA considerando a quantidade mínima de água para a hidratação

do cimento e a plasticidade da mistura. Esta imposição do fator a/f representa o início no processo iterativo descrito no item 3.2.1 conforme Gomes e Barros (2009).

A Tabela 4.1 relaciona a composição e a temperatura da pasta durante ensaios de Funil de Marsh e mini-slump. A temperatura da pasta durante os ensaios foi de  $(23,9 \pm 1,3)$  °C. Os equipamentos e o local em que foram realizados os ensaios estiveram na temperatura de 25°C e umidade relativa de 60%.

Tabela 4.1 – Composição e temperatura da pasta

Cimento (g)	Água (g)	Aditivo (g)	Teor de aditivo (%)	Temperatura (°C)
1.800	540	5,40	0,30%	24,0
		7,20	0,40%	24,0
		9,00	0,50%	24,0
		10,80	0,60%	25,0
		12,60	0,70%	24,0
		14,40	0,80%	22,0
		16,20	0,90%	22,0
		18,00	1,00%	22,0
		19,80	1,10%	22,0
		21,60	1,20%	25,0
		23,40	1,30%	25,0
		25,20	1,40%	25,0
		27,00	1,50%	25,0
		28,80	1,60%	25,0
		30,60	1,70%	25,0
		32,40	1,80%	25,0
34,20	1,90%	25,0		
36,00	2,00%	22,0		
32,40 kg	9,72 kg	0,37 kg	a/c = a/f = 0,30	

Fonte: Autor (2019).

Os resultados destes ensaios estão dispostos na Tabela 4.2, na qual, são apresentados os tempos de escoamento (T) através do cronômetro e da filmagem, a média ( $\bar{T}$ ), o desvio padrão ( $\zeta$ ), o tempo para o espalhamento de 155 mm ( $T_{155}$ ) com o minicone e os valores da curva logaritmo do tempo médio ( $\log \bar{T}$ ) conforme o teor de aditivo superplastificante.

Tabela 4.2 – Tempos de escoamento e espalhamento

Teor de aditivo (%)	T cronômetro (s)	T filmagem (s)	$\bar{T}$ (s) <sup>[a]</sup>	$\zeta$ (s) <sup>[b]</sup>	$T_{155}$ (s) <sup>[c]</sup>	Log ( $\bar{T}$ ) <sup>[d]</sup>
0,30%	77,87	74,63	76,25	2,29	2,30	1,88
0,40%	74,40	73,33	73,87	0,76	1,72	1,87
0,50%	54,50	52,29	53,40	1,56	1,46	1,73
0,60%	34,34	33,52	33,93	0,58	1,13	1,53

Nota: a – tempo médio ( $\bar{T}$ ), b – desvio padrão ( $\zeta$ ), c – tempo para a pasta alcançar 115 mm de diâmetro no ensaio do mini-slump, d – logaritmo do tempo médio conforme Gomes e Barros (2009).

Fonte: Autor (2019).

Continuação Tabela 4.2 – Tempos de escoamento e espalhamento

Teor de aditivo (%)	T cronômetro (s)	T filmagem (s)	$\bar{T}$ (s) <sup>[a]</sup>	$\zeta$ (s) <sup>[b]</sup>	$T_{155}$ (s) <sup>[c]</sup>	$\text{Log}(\bar{T})$ <sup>[d]</sup>
0,70%	34,21	33,64	33,93	0,40	0,64	1,53
0,80%	34,91	35,03	34,97	0,08	1,17	1,54
0,90%	38,15	37,05	37,60	0,78	0,78	1,58
1,00%	30,05	29,07	29,56	0,69	0,65	1,47
1,10%	28,35	27,77	28,06	0,41	1,01	1,45
1,20%	28,03	25,60	26,82	1,72	0,65	1,43
1,30%	41,41	40,07	40,74	0,95	0,80	1,61
1,40%	36,09	34,60	35,35	1,05	0,87	1,55
1,50%	38,25	36,80	37,53	1,03	0,67	1,57
1,60%	40,84	40,24	40,54	0,42	0,71	1,61
1,70%	28,50	27,62	28,06	0,62	0,66	1,45
1,80%	25,40	25,46	25,43	0,04	0,60	1,41
1,90%	39,63	38,54	39,09	0,77	0,74	1,59
2,00%	26,95	25,60	26,28	0,95	1,09	1,42

Nota: a – tempo médio ( $\bar{T}$ ), b – desvio padrão ( $\zeta$ ), c – tempo para a pasta alcançar 115 mm de diâmetro no ensaio do mini-slump, d – logaritmo do tempo médio conforme Gomes e Barros (2009).

Fonte: Autor (2019).

A Figura 4.6 demonstra o espalhamento da pasta no ensaio do mini-slump. Verifica-se que a pasta não atingiu o limite máximo para o espalhamento com o teor de aditivo de 1,0%.

Figura 4.6 – Mini-slump: espalhamento com Sp/c = 1,0 %



Fonte: Autor (2019).

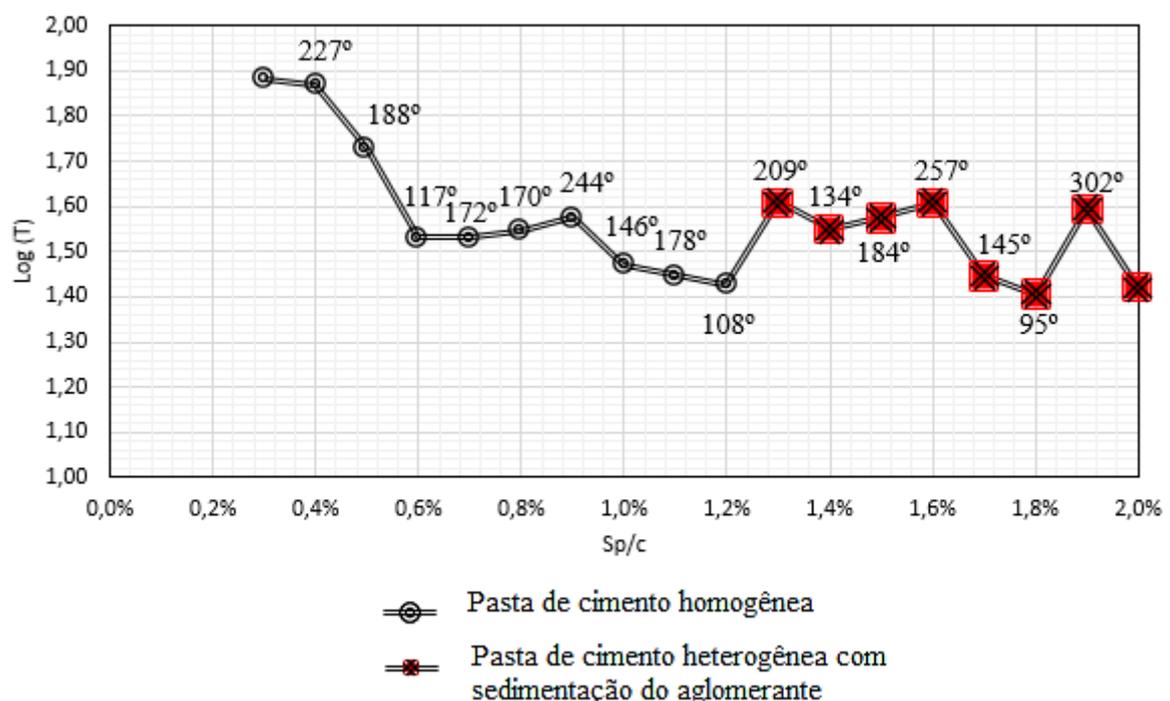
Verificou-se que na relação a/f igual a 0,30 foi possível verificar a compatibilidade entre o cimento e o aditivo químico com índice de fluidez e consistência. Entretanto, foi feito o incremento de 0,1 na relação a/f conforme procedimento metodológico. Contudo, em uma relação a/f de 0,40 não foi possível avaliar o índice de fluidez e espalhamento na pasta.

A quantidade de água na mistura é diretamente influente na plasticidade da pasta e, portanto, no ensaio do Funil de Marsh. Na relação a/f de 0,4 e Sp/c de 0,3% o tempo de escoamento da pasta no Funil de Marsh foi de 11,46 segundos. Este valor representa um índice de fluidez muito elevado para o primeiro teor de aditivo avaliado, tal que os próximos teores de aditivo não apresentam diferenças entre si. No ensaio de espalhamento a pasta excede os  $(180 \pm 10)$  mm. Desta maneira, a relação a/f de 0,30 classificou-se como a relação que melhor representou o efeito do aditivo superplastificante na pasta de cimento.

Adotou-se para o tempo de escoamento no funil de Marsh (T) a média entre os valores do cronômetro e da filmagem, pois, apresentaram uma discrepância de até 2,3 segundos. Devido à rapidez do ensaio, os valores de tempo  $T_{15}$  no mini-*slump* foram os adquiridos pela filmagem.

O gráfico que ilustra o índice de fluidez através do tempo de escoamento pelo Funil de Marsh pode ser observado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Gráfico fluxo e teor de aditivo



Fonte: Autor (2019).

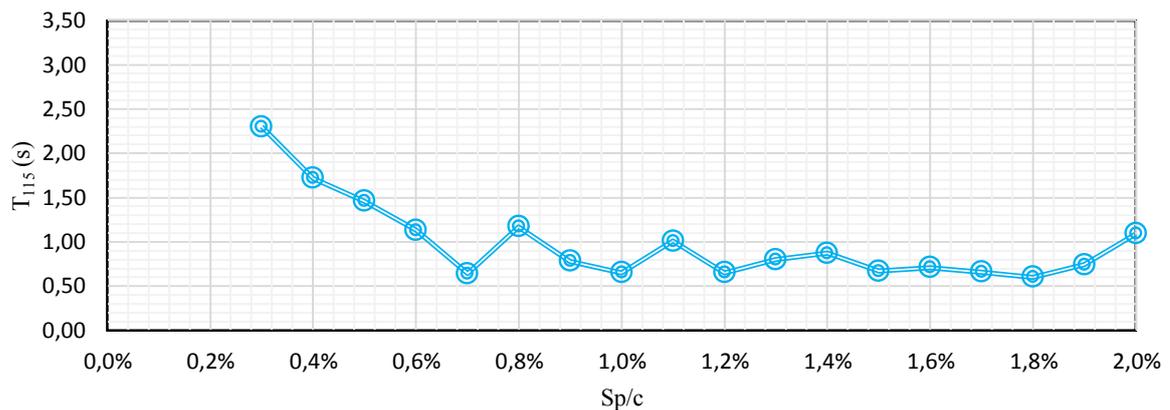
Verifica-se com a Figura 4.7 que a relação a/f de 0,30 proporciona uma curva onde os efeitos dos incrementos nos teores de aditivo são observados. A partir da curva é possível identificar o teor de saturação de aditivo cujo incremento no teor não apresenta o mesmo efeito na fluidez. Assim, o teor Sp/c de 0,6% pode ser eleito como o teor de saturação.

De acordo com Gomes e Barros (2009) o ponto de saturação é determinado pelo ângulo  $\alpha$  igual a  $(140 \pm 10)^\circ$ . O teor 1,0% ( $146^\circ$ ) correspondeu a este ângulo. Contudo, este ponto não

se configurou como o teor pelo qual incrementos de aditivo são ineficazes, pois, este efeito foi observado no teor de 0,6%.

O índice de consistência medido pelo espalhamento no ensaio do mini-*slump* pode ser observado na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Gráfico tempo de espalhamento e teor de aditivo



Fonte: Autor (2019).

Observa-se que todos os teores de aditivo apresentaram  $T_{115}$  menores que 3,5 segundos e que a curva é semelhante ao índice de fluidez (Figura 4.7). Nenhum valor excedeu o espalhamento máximo de  $(180 \pm 10)$  mm e, de maneira semelhante ao escoamento, os teores de 0,6% e 0,7% de aditivo apresentaram características de saturação de aditivo.

Para os teores de aditivo superiores a 1,2%, as pastas de cimento apresentaram um comportamento heterogêneo. Estas pastas com elevado teor de aditivo exibiram uma sedimentação do cimento após a agitação da mistura. O material permanecia fluido, contudo, a camada superior apresentava uma fluidez maior que as camadas inferiores. Assim, após o preenchimento do Funil de Marsh o volume restante no recipiente demonstrava uma característica lamacenta, de fluidez reduzida.

Por consequência do índice de fluidez, consistência e sedimentação, o ponto de saturação de aditivo químico para a relação a/f de 0,30 foi determinado como 0,6%. O teor de aditivo máximo pode ser estipulado como 1,2%.

#### 4.2.2 2ª Etapa – Estudo da argamassa de concreto

Na argamassa de concreto constatou-se que o fator a/f igual à 0,30 determinado na pasta de cimento não é capaz de gerar plasticidade na argamassa. Devido à adição de areia, a demanda por água gerou um aumento na relação a/c.

Nas misturas com a LRC a demanda por água também foi elevada, na proporção da adição na mistura. Deste modo, a adição de LRC na argamassa de concreto está diretamente atrelada à um incremento na quantidade de água da mistura. Certamente esta demanda por água está relacionada com a sensibilidade na dosagem das misturas de CAA, aspectos químicos e físicos da LRC.

A análise da LRC não indicou reatividade química com a água nem com o hidróxido de cálcio  $[Ca(OH)_2]$  e as verificações com o raio X demonstram indícios da presença de materiais cristalinos provenientes do concreto matriz. Contudo, no aspecto físico a LRC apresenta um elevado teor de finos, módulo de finura de 1,80 e uma elevada absorção, interpretada pela sua umidade total, formação de torrões e retenção de água. Ademais, a presença de material fino demanda maior quantidade de água na mistura porque ele pode ficar adsorvido nas partículas de maior diâmetro, reduzindo assim, a eficiência plastificante da água.

A Tabela 4.3 relaciona os resultados dos índices de fluidez e consistência das argamassas de CAA ensaiadas.

Tabela 4.3 – Índice de fluidez e consistência

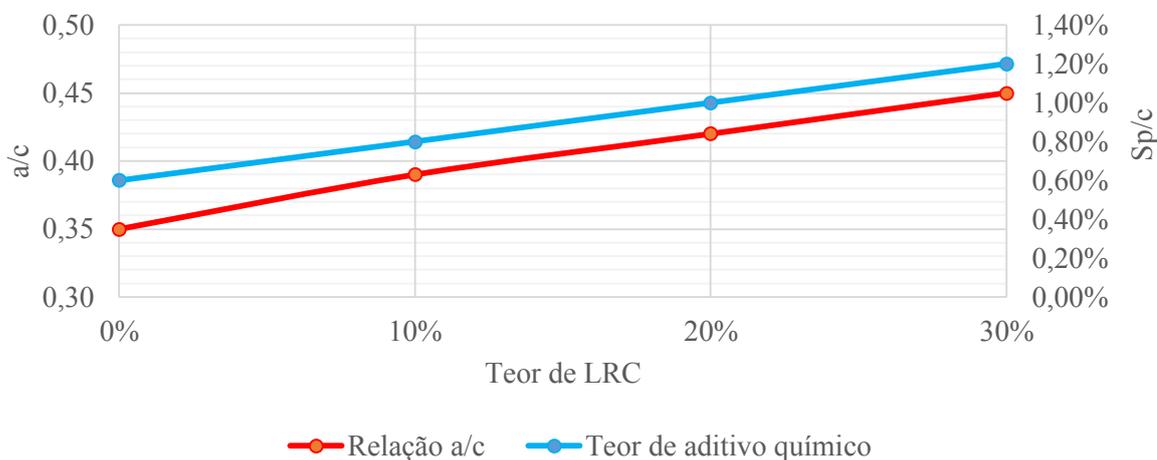
Teor LRC	Nome	a/c	a/f	S <sub>p</sub> /c	Tempo escoamento (s)	R <sub>m</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	G <sub>m</sub>	Temperatura (°C)
0%	A1	0,30	0,30	0,60	∞	0,00	100	100	0,0	23,0
0%	A2	0,35	0,35	0,60	9,54	1,05	260,7	253,3	5,6	23,0
10%	A3	0,35	0,32	1,00	10,56	0,95	261,0	258,5	5,7	25,0
10%	A4	0,39	0,35	0,80	7,47	1,34	261,5	253,8	5,6	24,0
10%	A5	0,39	0,35	0,60	8,37	1,19	214,6	210,0	3,5	24,0
20%	A6	0,42	0,35	1,20	11,54	0,87	214,0	218,0	3,7	24,0
20%	A7	0,42	0,35	1,00	8,76	1,14	244,8	246,4	5,0	25,0
30%	A8	0,45	0,35	1,00	13,93	0,72	186,1	190,5	2,5	23,0
30%	A9	0,45	0,35	1,20	9,47	1,06	239,6	238,0	4,7	23,0
30%	A10	0,45	0,35	1,40	7,46	1,34	296,0	293,0	7,7	24,0

Fonte: Autor (2019).

A Tabela 5.3 indica que a temperatura da mistura durante os ensaios foi de  $(23,8 \pm 0,8)^\circ\text{C}$ . A demanda por água e aditivo químico foram aumentadas conforme incremento no teor de LRC. Esse incremento foi necessário para que a argamassa atendesse aos critérios estabelecidos no item 3.2.2. Supõe-se que este incremento seja devido à absorção dos materiais adicionados e de sua eficácia na promoção de plasticidade. Portanto, não foi possível confeccionar argamassas de concreto CAA fixando a relação a/c. Contudo, para efeito de comparação entre os traços piloto (T0) e os demais, foi estabelecido que devido ao comportamento da LRC nas características de dosagem, é possível interpretá-la como um fino.

A partir desta consideração, as argamassas confeccionadas possuíram uma relação a/f fixa no valor de 0,35. O incremento de 10% de LRC na argamassa demanda o aumento de 0,035 no fator a/c e de 0,2% no teor de aditivo (Figura 4.9).

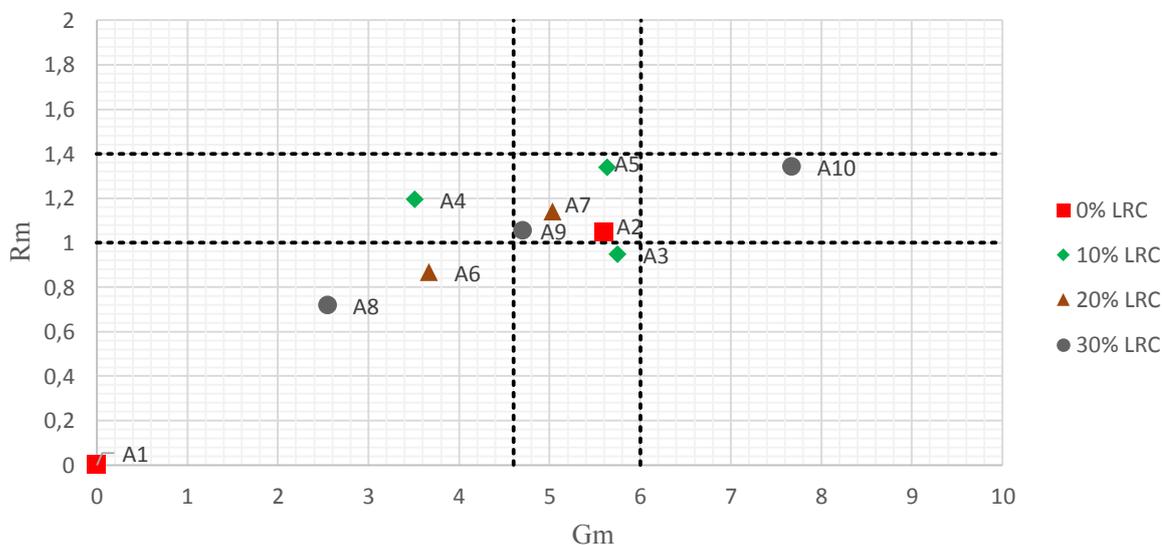
Figura 4.9 – Acréscimo de água e aditivo superplastificante



Fonte: Autor (2019).

A LRC demonstrou um comportamento dúbio entre agregado miúdo e um fino. Ao ser adicionada na pasta de cimento, além de alterar o fator a/c, adicionava características de argamassa, devido à sua granulometria. Todavia, na argamassa a solicitação por água é característica da adição de finos na mistura. Eleger a LRC como um fino na relação a/f tornou viável e possível a confecção de argamassas incorporando este resíduo. A Figura 4.10 o gráfico índice de fluidez e consistência para as argamassas confeccionadas (Tabela 4.3).

Figura 4.10 – Gráfico do índice de fluidez e consistência



Fonte: Autor (2019).

Os traços de argamassa de CAA resultantes dos ensaios da 2ª Etapa e determinados na Figura 4.10 e na Tabela 4.3, quanto a fluidez e escoamento estão relacionados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Traço de argamassa de CAA

Traço	Cimento	LRC	Areia	Água	a/f	Aditivo químico (%)
T0 – piloto	1	-	2	0,35	0,35	0,6
T1 – 10% LRC		0,1		0,39		0,8
T2 – 20% LRC		0,2		0,42		1,0
T3 – 30% LRC		0,3		0,45		1,2

Fonte: Autor (2019).

#### 4.2.3 3ª Etapa – Esqueleto Granular

O ensaio do esqueleto granular foi realizado com os dois agregados com o intuito de determinar a quantidade de agregado graúdo no traço. Para cada proporção foram realizadas 3 misturas, com o intuito de verificar o desvio padrão; e foi adotada a média entre estas. O recipiente possuía 3 dm<sup>3</sup> de volume. A mistura foi realizada com uma colher de pedreiro e uma fôrma metálica. A Tabela 4.4 relaciona os valores determinados para o esqueleto granular.

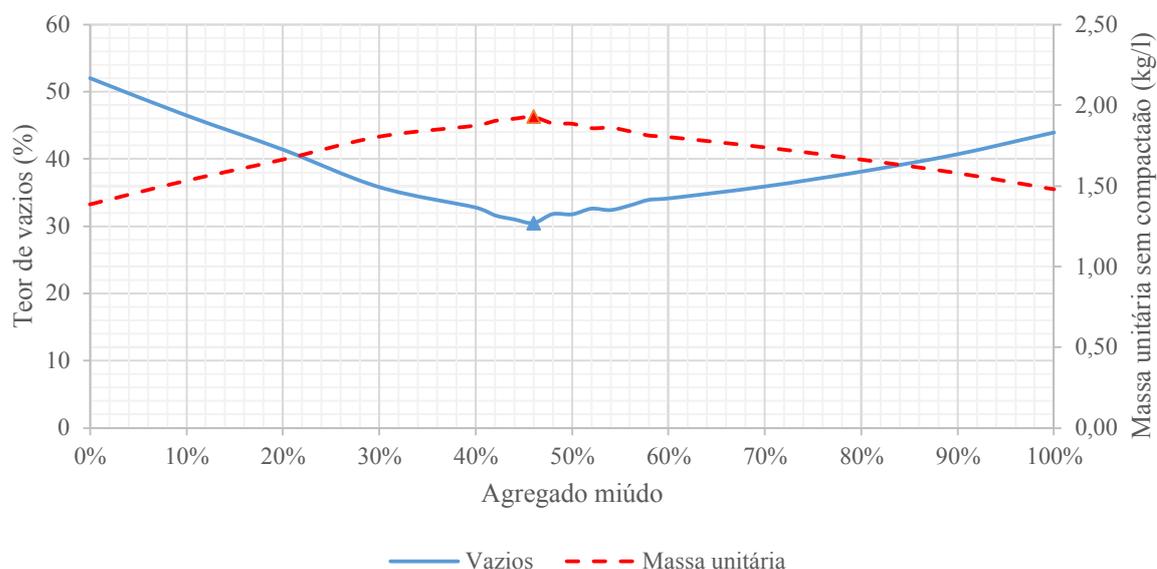
Tabela 4.4 – Esqueleto granular

Proporção		Misturas				Resultado		
Brita	Areia	M1 (kg)	M2 (kg)	M3 (kg)	$\bar{M}$ (kg)	Desvio padrão (kg)	Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	Vazios (%)
100%	0%	4,16	4,16	4,16	4,16	0,00	1,39	52
90%	10%	4,60	4,60	4,60	4,60	0,00	1,53	46
80%	20%	5,04	4,94	5,00	4,99	0,05	1,66	41
70%	30%	5,46	5,42	5,38	5,42	0,04	1,81	36
60%	40%	5,64	5,64	5,60	5,63	0,02	1,88	33
58%	42%	5,68	5,72	5,74	5,71	0,03	1,90	32
56%	44%	5,72	5,76	5,78	5,75	0,03	1,92	31
54%	46%	5,78	5,76	5,82	5,79	0,03	1,93	30
52%	48%	5,78	5,60	5,62	5,67	0,10	1,89	32
50%	50%	5,68	5,64	5,66	5,66	0,02	1,89	32
48%	52%	5,64	5,56	5,54	5,58	0,05	1,86	33
46%	54%	5,56	5,62	5,58	5,59	0,03	1,86	32
44%	56%	5,52	5,50	5,54	5,52	0,02	1,84	33
42%	58%	5,44	5,44	5,44	5,44	0,00	1,81	34
40%	60%	5,42	5,38	5,44	5,41	0,03	1,80	34
30%	70%	5,22	5,22	5,22	5,22	0,00	1,74	36
20%	80%	5,02	4,98	4,98	4,99	0,02	1,66	38
10%	90%	4,74	4,74	4,74	4,74	0,00	1,58	41
0%	100%	4,44	4,44	4,44	4,44	0,00	1,48	44

Fonte: Autor.

A Figura 4.11 demonstra o gráfico composto pela curva do massa unitária da mistura dos materiais e do volume de vazios presente na mistura.

Figura 4.11 – Curva volume de vazios e massa unitária



Fonte: Autor (2019).

Observa-se a partir da Figura 4.11 as curvas de massa unitária e teor de vazios. A proporção que fornece o menor volume de vazios (30%) é a de 46% de areia e 54% de brita (Figura 4.11 e Tabela 4.4). Logo, determina-se a quantidade de brita nos traços de CAA (Quadro 4.3).

Quadro 4.3 – Traço de CAA

Traço	Cimento	LRC	Areia	Brita	Água	a/f	Aditivo químico (%)
T0	1	-	2	2,35	0,35	0,35	0,6
T1		0,1			0,39		0,8
T2		0,2			0,42		1,0
T3		0,3			0,45		1,2

Fonte: Autor (2019).

As estimativas relacionadas no Quadro 4.3 são ajustadas na 4ª Etapa com a confecção do CAA.

#### 4.2.4 4ª Etapa – Confecção do concreto autoadensável

A confecção do traço piloto em CAA teve o objetivo de ajustar a plasticidade com a adição do agregado graúdo, de maneira que para o concreto atingir as características autoadensáveis foi necessário um ajuste na relação a/f do traço. A Figura 4.12 demonstra o traço T0 com um ajuste de 0,06 na relação a/f. Os dados obtidos para os ensaios no estado fresco estão relacionados no Quadro 4.4.

Figura 4.12 – Espalhamento, IEV para T0 e a/f de 0,41



Fonte: Autor (2019).

Quadro 4.4 – Resultados estado fresco para T0

Nomenclatura		Espalhamento (mm)			$T_{500}$ (s)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	IEV	Anel J		
		d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	SF				d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	PJ
<b>T0</b>	1BR41	625	630	628	8,08	2223,84	IEV2	520	510	113

Fonte: Autor (2019).

Verifica-se com o Quadro 4.4 que o T0 com a/f de 0,41 atende às prescrições da NBR 15.823 (ABNT, 2017) conforme descrito no item 4.2.4. A classificação do traço T0 foi de SF1, VS2, IEV 2 e PJ2.

Os demais traços de CAA adicionam LRC e aditivo químico conforme determinado no item 5.2.3. Desta maneira os traços de CAA estudados podem ser determinados conforme o Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Traços de CAA

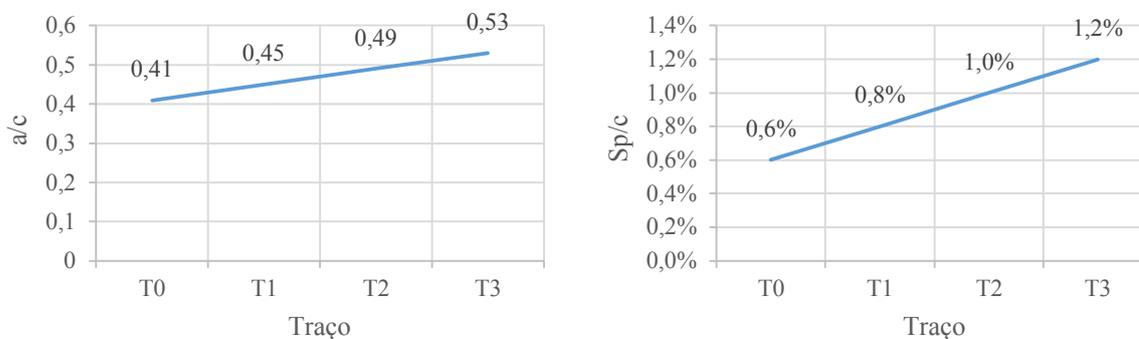
Traço	Cimento	LRC	Areia	Brita	Água	Sp/c (%)
T0	1	0	2	2,35	0,41	0,6
T1		0,1			0,45	0,8
T2		0,2			0,49	1,0
T3		0,3			0,53	1,2

Fonte: Autor (2019).

O Quadro 4.5 indica que a diferença entre os traços está na adição de 10% de LRC, 0,035 na relação a/c e 0,2% no consumo de aditivo químico. A Figura 4.13 demonstram

graficamente a relação entre os traços de acordo com a relação a/c (Figura 4.13-a) e teor de aditivo superplastificante (Figura 4.13-b).

Figura 4.13 – Relação a/c e Sp/c



(a) Relação a/c no traço

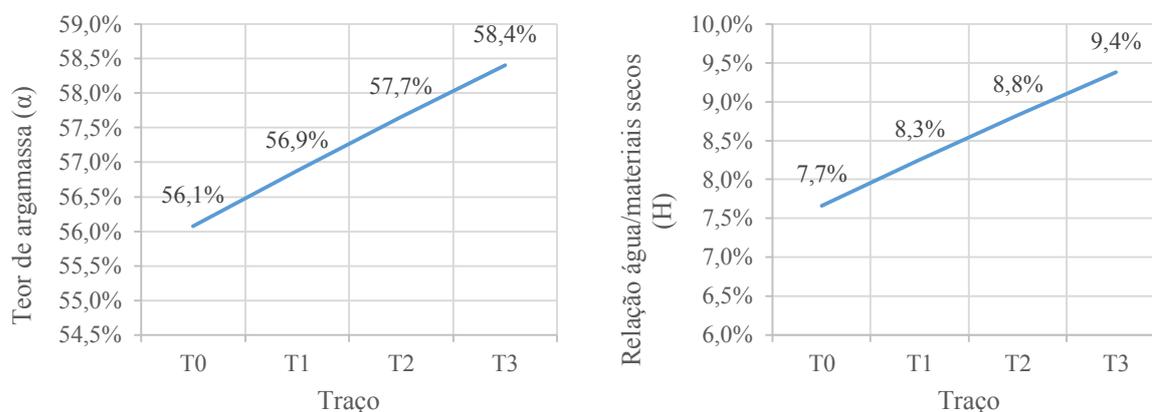
(b) Relação Sp/c no traço

Fonte: Autor (2019).

Nos traços de CAA assim como na argamassa de CAA a LRC demonstrou um comportamento semelhante ao material fino. Portanto, o incremento de 0,06 na relação a/f representa a demanda de água necessária para atingir a plasticidade utilizando o agregado graúdo descrito no item 3.1.2. Pode-se admitir que a forma lamelar (índice de forma de 2,27) e a absorção de 2,66% foram responsáveis diretos na demanda por água e plasticidade na mistura.

A Figura 4.14 demonstra o teor de argamassa ( $\alpha$ ) de acordo com cada traço gerado pela adição da LRC, bem como a relação água/materiais secos (H).

Figura 4.14 – Teor de argamassa e relação água/materiais secos



Fonte: Autor (2019).

O teor de argamassa é incrementado devido à LRC, de modo que 10% de adição de LRC em relação ao cimento representa 0,8% em argamassa adicional nos traços. Apesar da relação

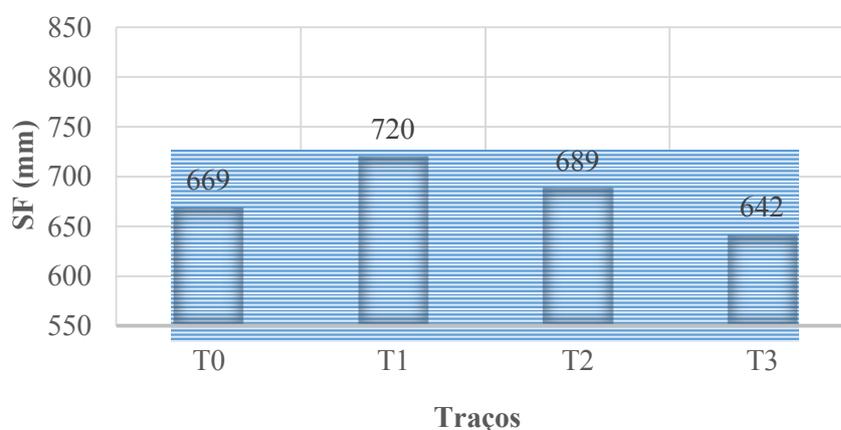
a/f permanecer constante em todos os traços, a quantidade de água é acrescida conforme a porcentagem de LRC. O incremento na relação água/materiais secos de 0,55% indica que a LRC eleva a demanda por água nas misturas. Uma vez que os traços consideram a LRC como um fino, a quantidade de agregado (m) permaneceu constante em todos os traços, no valor de 4,35.

#### 4.3 F3 – ESTADO FRESCO

O CAA nesta fase foi avaliado conforme a habilidade de preenchimento, viscosidade aparente, habilidade passante e resistência à segregação. O CAA foi confeccionado conforme descrito na Figura 3.15 e no Quadro 3.12 pertencentes ao item 3.3. A temperatura dos ensaios foi de  $(25,7 \pm 3,1) ^\circ\text{C}$ .

A habilidade de preenchimento dos traços estudados pode ser vista na Figura 4.15. Neste caso, a habilidade de preenchimento foi unicamente avaliada pelo espalhamento médio do CAA.

Figura 4.15- Espalhamento (SF)



Fonte: Autor (2019).

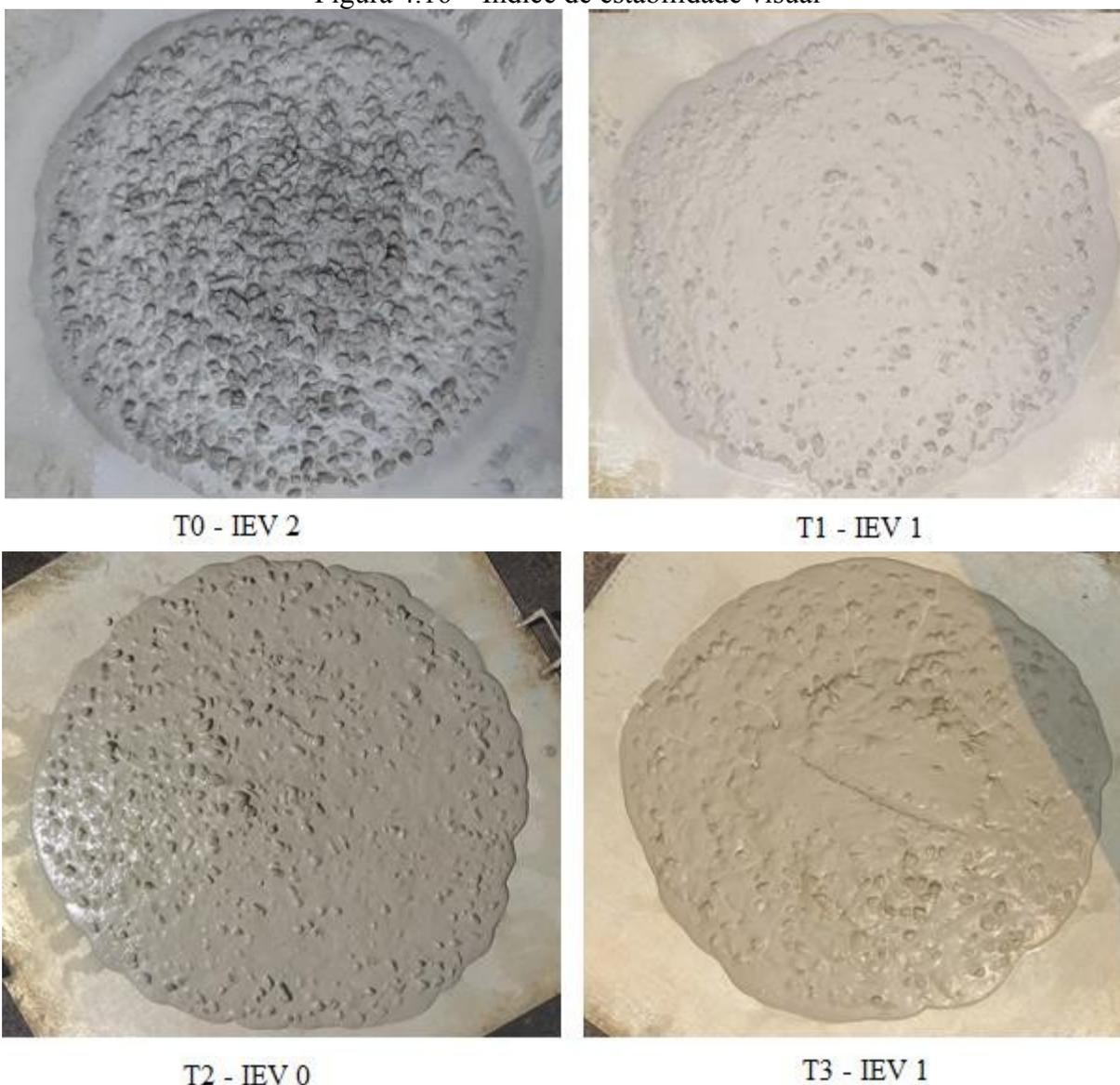
Verifica-se a partir da Figura 4.15 que os traços de CAA apresentam diferentes classificações conforme a NBR 15.823 (ABNT, 2017). O traço T1 forneceu a melhor habilidade de preenchimento (SF2) comparada aos demais traços. Em relação ao traço piloto T0, apenas o T3 apresentou espalhamento inferior. Desta maneira, os teores de 10% e 20% de adição de LRC apresentaram a classificação de SF2, enquanto que os demais traços apresentaram a classificação SF1.

A habilidade de preenchimento é influenciada por diversos fatores. Neste caso, o teor de argamassa ( $\alpha$ ) e a plasticidade da argamassa ( $R_m$  e  $G_m$ ) têm maior relevância, uma vez que a

quantidade de agregado permaneceu constante. O teor de argamassa tem influência direta no preenchimento dos espaços entre agregados graúdos, seu distanciamento e comportamento dentro do concreto.

Este efeito foi observado nos traços estudados. O déficit de argamassa no traço T0 foi preenchido nos traços T1 e T2; assim, houve um acréscimo na habilidade de preenchimento. Contudo, a habilidade de preenchimento não aumentou conforme o aumento do teor de argamassa. Nos traços seguintes (T2 e T3) o fator plasticidade superou o fator teor de argamassa e o efeito de preenchimento foi determinado pela plasticidade da argamassa. Desta maneira, o traço com maior teor de argamassa não apresentou a melhor habilidade de preenchimento. A Figura 4.16 demonstra esse efeito a partir da vista superior na classificação do IEV.

Figura 4.16 – Índice de estabilidade visual

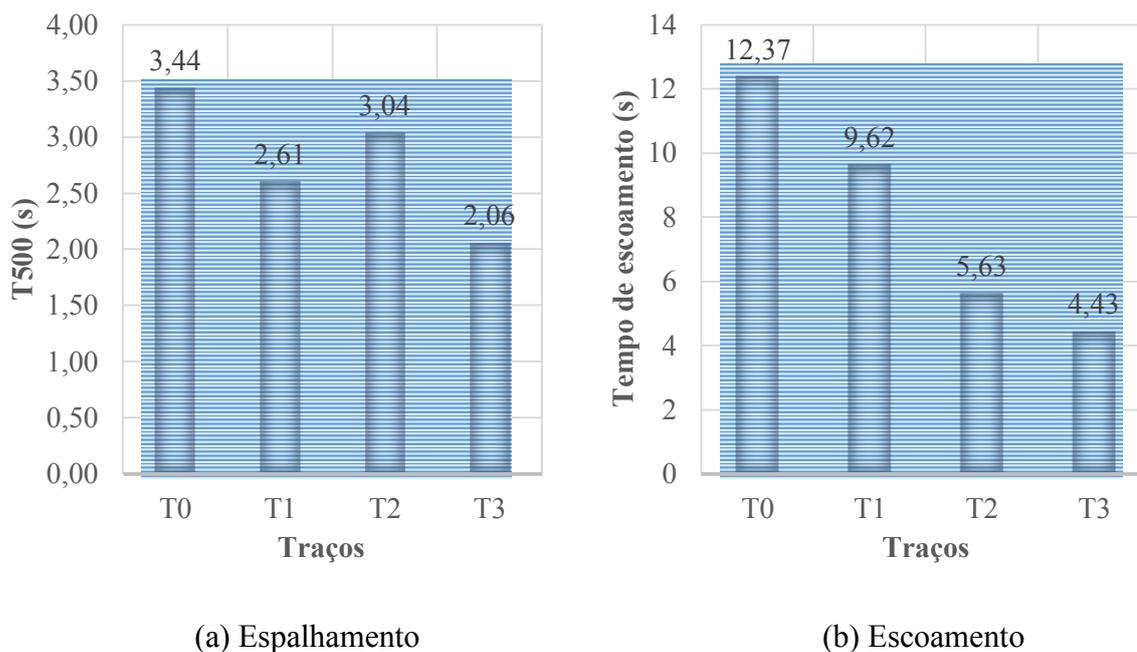


Fonte: Autor (2019).

Observa-se a partir da Figura 4.16 que o traço com a melhor estabilidade visual é o T2, sem a presença de exsudação ou segregação.

No âmbito da viscosidade aparente do CAA foram realizados dois ensaios,  $T_{500}$  durante o espalhamento do concreto e o escoamento através do funil V. A Figura 4.17 demonstra o resultado em ambos os ensaios.

Figura 4.17 – Tempo ( $T_{500}$ ) e escoamento no funil V



Fonte: Autor (2019).

Verifica-se com a Figura 4.17-a que a viscosidade, avaliada através do espalhamento, é menor nos traços que contém LRC. A viscosidade tende a diminuir conforme o incremento da LRC (Figura 4.17-b). O CAA com baixa viscosidade apresenta um rápido espalhamento, porém de curta duração, enquanto que a elevada viscosidade gera o movimento mais lento e progride por um tempo maior.

O tempo de espalhamento  $T_{500}$  indica uma redução na viscosidade através dos traços, em que o traço T0 apresenta a maior viscosidade. Todavia, esse efeito é mais evidente no funil V em que a diferença entre o tempo de escoamento dos traços é mais evidente. De modo concordante, os traços com menor viscosidade apresentam menor espalhamento. A exceção do traço piloto ocorre devido a necessidade de argamassa no traço e não devido a viscosidade unicamente.

A viscosidade tem influência direta no acabamento superficial das peças de concreto. Este efeito pode ser observado no acabamento superficial (Figura 4.18) dos corpos de prova. Em que não se utiliza nenhum recurso para assistir o adensamento.

Figura 4.18 – Acabamento superficial

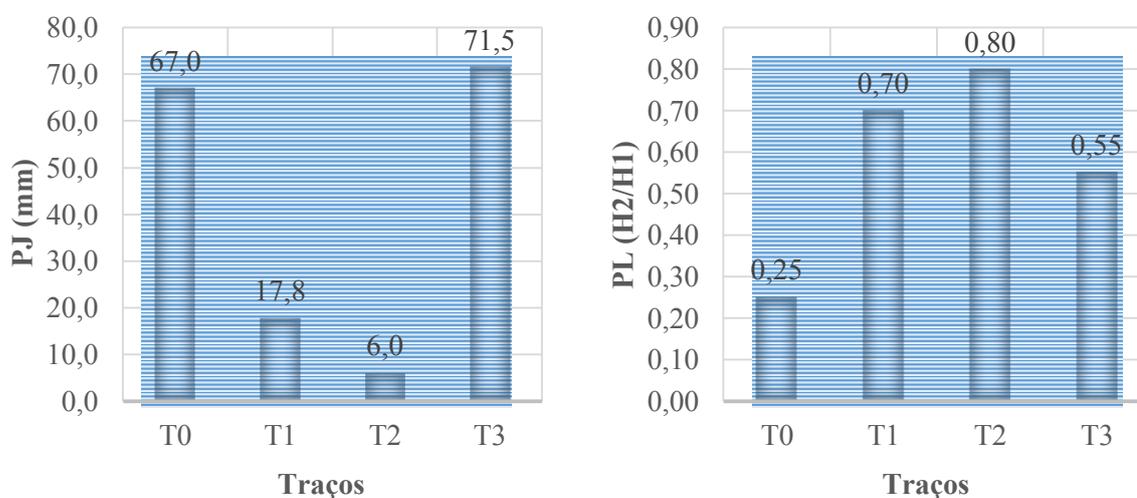


Fonte: Autor (2019).

A classificação quanto à viscosidade plástica aparente foi díspar entre os ensaios. O tempo  $T_{500}$  classifica todos os traços como VS2, segunda classificação, enquanto que o funil V classifica T0 e T1 como VF2 e os traços T2 e T3 como VF1. A viscosidade plástica aparente é melhor verificada no funil V, pois a sensibilidade do ensaio consegue verificar pequenas alterações na plasticidade e a diferença é mais evidente (na ordem de segundos).

A habilidade passante foi avaliada de acordo com o ensaio do anel J (PJ) e da caixa L (PL). A Figura 4.19-a demonstra os valores determinados no anel J conforme o traço e a Figura 4.19-b ilustra os valores na caixa L. Verifica-se que o traço T0 e T3 apresentam valores elevados de PJ, indicando uma reduzida capacidade de fluir, perdendo sua uniformidade ou causando bloqueio. Essa tendência foi seguida no ensaio da caixa L.

Figura 4.19 – Habilidade passante no anel J (PJ) e caixa L (PL)



(a) Anel J

(b) Caixa L

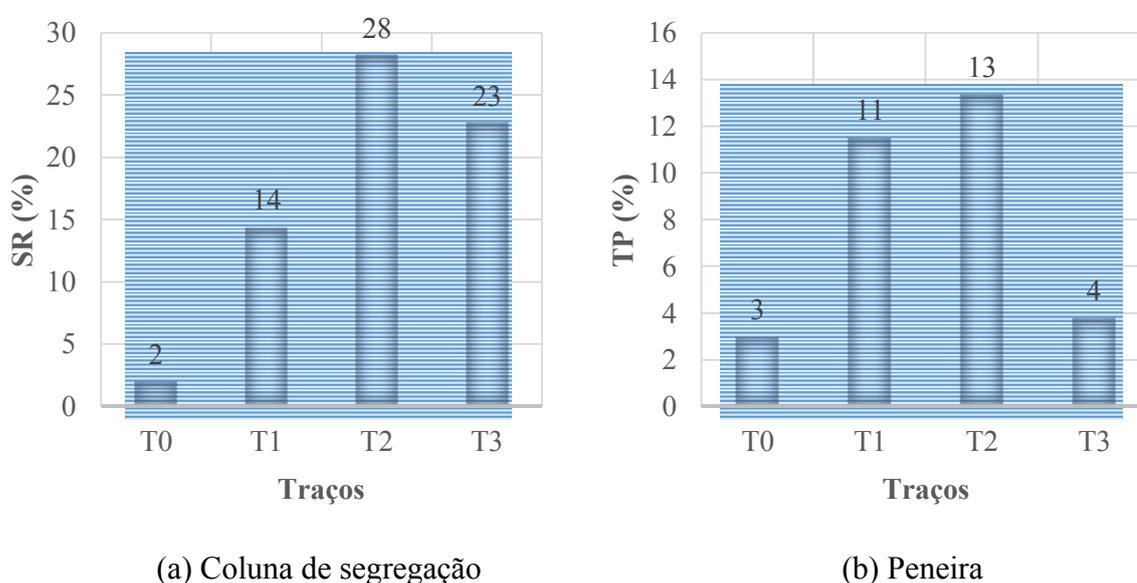
Fonte: Autor (2019).

O ensaio com o anel J indica que o traço com a melhor habilidade passante é o T2 seguido pelo T1. O pior desempenho foi verificado nos traços T0 e T3. No caso de T0 a habilidade passante pode ser sido severamente afetada pelo baixo teor de argamassa, enquanto que no traço T3 a reduzida habilidade passante está relacionada a consistência da argamassa. A habilidade passante avaliada pelo ensaio com a caixa L confirma as conclusões observadas no anel J.

As verificações na caixa L utilizaram a segunda configuração normativa (3 barras de aço) e apenas o traço T2 atingiu o mínimo normativo (PL2), possuindo assim adequada aplicação para todos os elementos estruturais correntes. O anel J classifica a habilidade passante dos traços T1, T2 como PJ2, e os traços T0, T3 como PJ 1. Desta maneira, os traços T1 e T2 apresentam uma melhor habilidade passante comparada aos demais traços.

A resistência a segregação foi determinada pelos ensaios com a coluna de segregação (SR) e pelo método da peneira (TP). As Figuras 4.20-a e 4.20-b demonstram os resultados obtidos com ambos os ensaios.

Figura 4.20 – Porcentagem de segregação pela coluna e pela peneira



Fonte: Autor (2019).

A segregação é particularmente importante em traços de CAA com maior fluidez e baixa viscosidade. A Figura 4.17 demonstra os traços mais suscetíveis a esse efeito. E, de modo concordante, os traços mais fluidos apresentaram maiores porcentagens de segregação.

O método da coluna de segregação demonstra que o traço T0 apresenta o menor percentual de segregação, enquanto que o T2 apresenta o maior percentual. De modo geral, ocorre um crescimento na segregação conforme a adição de LRC. Esse crescimento acompanha

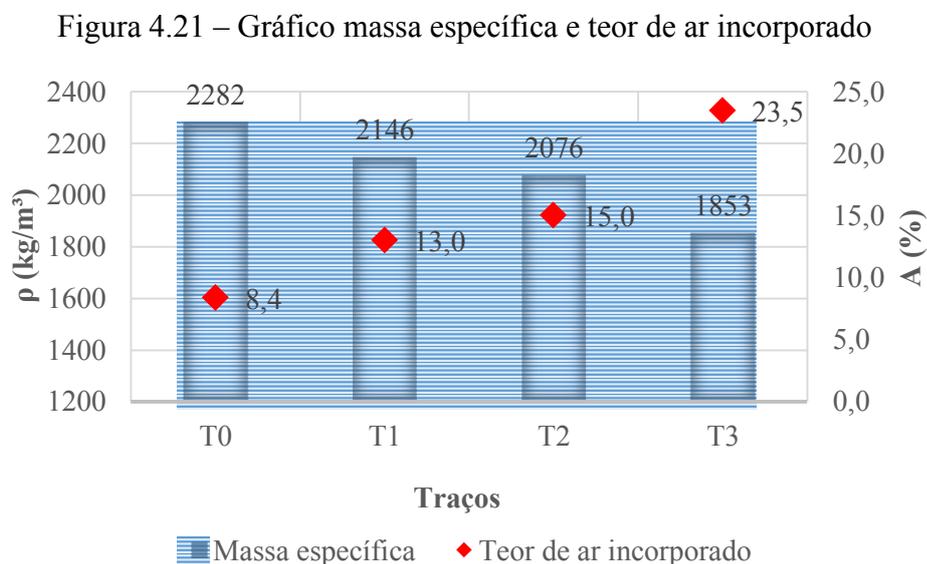
dois fatores: a baixa viscosidade e a capacidade de deformação. Contudo, o traço T3, em particular, apresenta elevada fluidez (Figura 4.17) e uma reduzida capacidade de deformação (Figuras 4.15 e 4.19). Desta maneira a segregação em T3 é menor do que nos traços T1 e T2.

O ensaio com a peneira evidencia o mesmo comportamento verificado no ensaio com a coluna de segregação. Neste caso, os traços mais fluidos (T1 e T2) e com maior capacidade de deformação apresentaram maiores porcentagens de segregação.

A classificação, conforme o ensaio da coluna de segregação, indica que os traços T0 e T1 apresentam classe SR2, e os demais excedem a classificação normativa. Esse excesso indica que o traço apresenta demasiada segregação e potenciais efeitos deletérios às peças estruturais.

De modo diferente ao método da coluna de segregação, o método da peneira classifica todos os traços como TP2, pertencentes a melhor classificação quanto à segregação. Todavia, o método da peneira se configura como adicional ao método da coluna e em termos de classificação e aplicação, portanto, a preferência classificativa permanece no método da coluna de segregação.

O traços de CAA apresentaram diferentes valores de massa específica ( $\rho$ ), rendimento, volume total, índice de ar e teor de ar incorporado (A). A Figura 4.21 demonstra, em resumo, os valores da massa específica e do teor de ar incorporado conforme o traço verificado.



Fonte: Autor (2019).

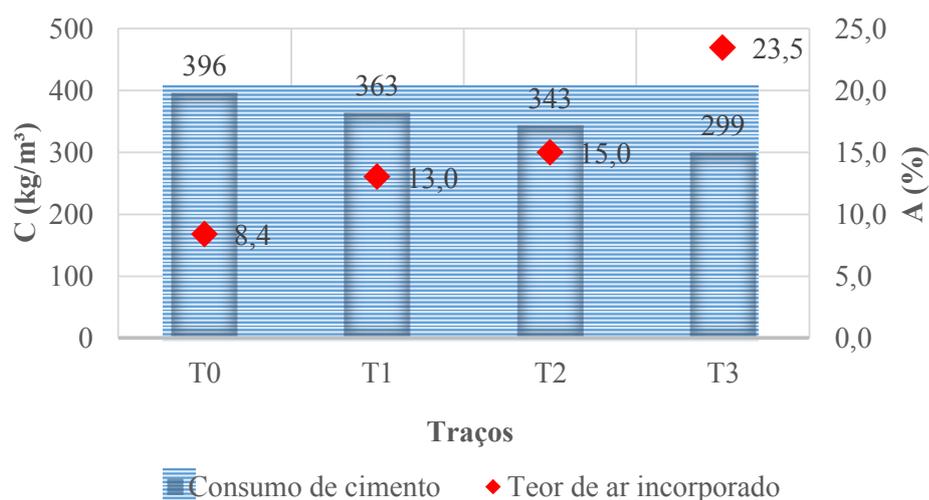
Observa-se a partir da Figura 4.21 que a massa específica no estado fresco dos concreto é reduzida conforme adiciona-se LRC. O traço T0 apresenta o maior valor de massa específica, enquanto que T3 apresenta o menor valor, de maneira que se configura inferior ao intervalo disposto na NBR 8.953 (ABNT, 2015). Portanto, todos os traços, com exceção de T3,

apresentam a classificação normal, ao passo que T3 pode ser classificado como concreto leve. Esta redução na massa específica é acompanhada inversamente pelo aumento do teor de ar incorporado.

A adição de LRC eleva a porcentagens de vazios, gerados pelo aprisionamento de ar na matriz de argamassa. O traço T3 foi o traço que apresentou a maior quantidade de ar incorporado, e o T0 o menor percentual. Os traços com T1 e T2 apresentaram a menor diferença nos valores, de modo que a proporção de LRC nos traços não alterou significativamente o teor de ar incorporado.

O consumo de cimento (C) e o teor de ar incorporado (A) estão diretamente relacionados com a resistência do concreto no estado endurecido. A Figura 4.22 demonstra os valores do consumo de cimento e teor de ar incorporado para os traços estudados.

Figura 4.22 – Consumo de cimento e teor de ar incorporado



Fonte: Autor (2019).

Observa-se que o traço T0 apresentou o maior consumo de cimento, no valor de 396 kg/m³. Os demais traços de CAA possuíram um consumo menor, devido à adição de LRC nas misturas. Essa adição representa uma redução de aproximadamente 48,5 kg/m³ de cimento, de maneira que o traço T3 apresenta um consumo de 299 kg/m³.

O comportamento da resistência à compressão entre os traços pode ser relacionada com o consumo de aglomerante e do teor de ar incorporado. A porosidade do concreto está diretamente relacionada com a resistência aos esforços, na mesma proporção que a redução de aglomerante na mistura. Dessa maneira, verifica-se que os traços antecipam um comportamento de resistência descendente, uma vez que o consumo de cimento reduz e o teor de ar incorporado aumenta.

No estado fresco os traços de CAA podem ser classificados e possuem a aplicabilidade conforme relacionado no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Classificação e aplicabilidade conforme NBR 15.823-1 (ABNT, 2017)

Traço	Clas.	Habilidade de preenchimento	Viscosidade Plástica	Habilidade passante	Resistência à segregação
T0	SF1/IEV2 VS2/VF2 PJ2/PL2 SR2/TP2	Lajes, Revestimento de túneis, Estacas e certas fundações profundas.	Vigas, pilares e outras.	Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-moldados.	Elementos de fundações profundas. Elementos pré-moldados.
T1	SF1/IEV1 VS2/VF2 PJ1/PL1 SR2/TP2			Lajes, painéis, elementos de fundação.	
T2	SF2/IEV0 VS2/VF2 PJ1/PL1 SR2/TP2	Paredes, vigas, pilares e outras.	Lajes, paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente.	Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-moldados.	_[a]
T3	SF2/IEV1 VS1/VF1 PJ1/PL1 SR2/TP2				

Notas: a – Traço com demasiada segregação, e portanto, sem classificação e aplicação.

Fonte: Autor (2019).

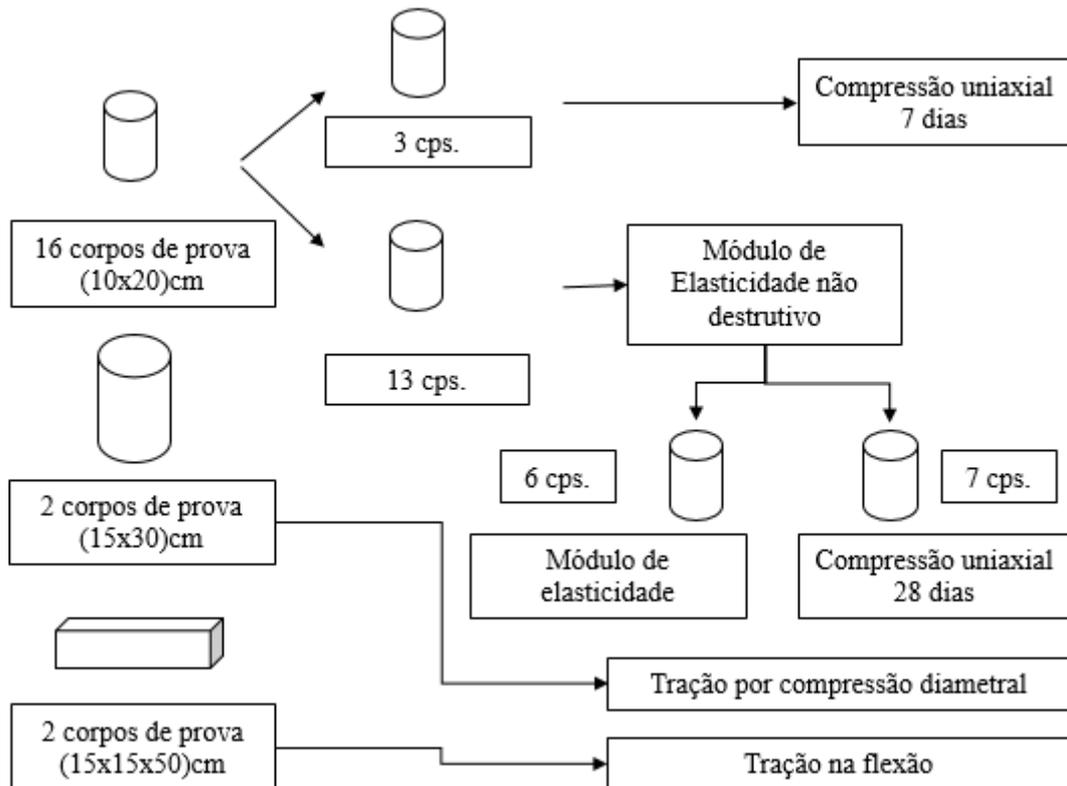
Resumidamente, o traço T1 possuiu o melhor desempenho no estado fresco quando comparado aos demais traços. Apesar de não apresentar o melhor índice de estabilidade visual, viscosidade plástica aparente e habilidade passante, foi o único que promoveu incrementos em todas estas características dentro das classificações da NBR 15.823-1 (ABNT, 2017).

#### 4.4 F4 – ESTADO ENDURECIDO

O CAA nesta fase foi avaliado no estado endurecido. Portanto, de maneira equivalente ao concreto convencional. Foram verificadas a resistência à compressão uniaxial, resistência à tração indireta, resistência à tração na flexão, módulos de elasticidade dinâmico e estático.

O número total dos corpos de prova (20 unidades) e sua separação foi determinada de acordo com o volume de concreto, material disponível, moldes disponíveis e o tempo para a moldagem e execução. A Figura 4.23 ilustra o esquema de separação dos corpos de prova destinados a cada ensaio.

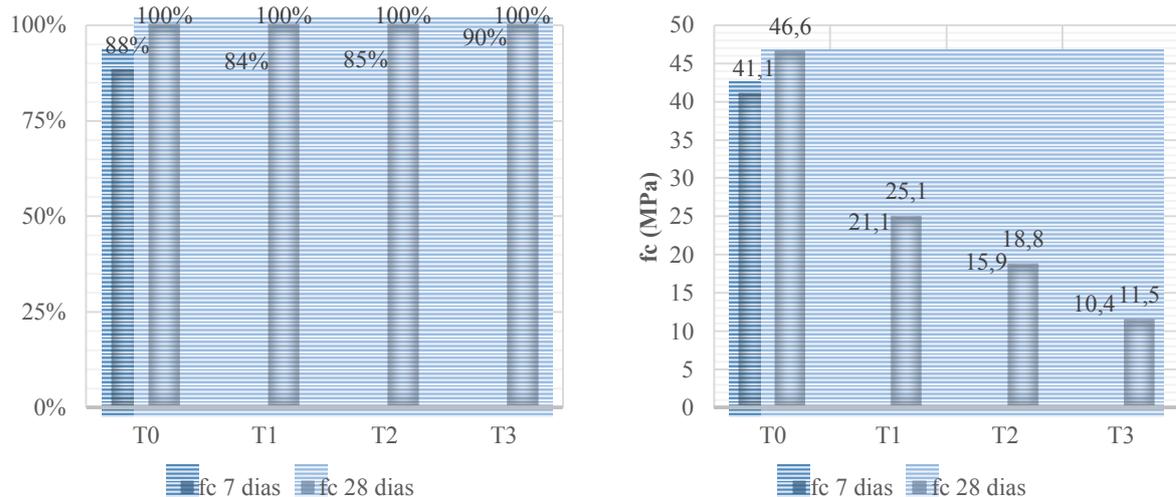
Figura 4.23 – Separação dos corpos de prova



Fonte: Autor (2019).

A evolução e a resistência a compressão uniaxial dos traços podem ser observadas nas Figuras 4.24-a e 4.24-b, respectivamente.

Figura 4.24 – Evolução e resistência à compressão uniaxial



(a) Evolução da resistência

(b) Resistência à compressão

Fonte: Autor (2019).

Observa-se na Figura 4.24-a que aos 7 dias a resistência à compressão entre os traços foi 84% superior ao valor de  $f_c$  aos 28 dias. Esta evolução na resistência à compressão aos 7 dias está relacionada com o tipo de cimento utilizado na confecção do CAA (CP V – ARI). Em relação à T0 os traços com LRC apresentaram um comportamento inferior (T1 e T2) e superior (T3) conforme o teor de incorporação. Portanto, a presença da LRC nos traços não possuiu elevada influência ou efeito deletério nas reações de hidratação do cimento e ganho de resistência inicial.

Os valores de resistência à compressão uniaxial do concreto apresentaram uma redução conforme a incorporação da LRC. Essa redução segue os conceitos determinados pela Lei de Abrams, quanto à relação a/c crescente. Aliada ao aumento da relação a/c, os concretos com LRC apresentaram um teor de incorporação maior e um consumo de cimento menor que o traço piloto, responsável por reduzir a resistência no estado endurecido.

O traço T0 apresentou a maior resistência à compressão, no valor de  $(46,6 \pm 5,5)$  MPa, seguido pelo traço T1  $(25,1 \pm 1,4)$  MPa. A mudança no traço gerada pela adição de 10% de LRC reduziu a resistência do CAA em 46% (21,5 MPa). Entre os traços com LRC a redução foi de 6,3 MPa entre T2 e T1; e de 7,3 MPa entre T3 e T2.

Conforme a NBR 8.953 (ABNT, 2015) os traços podem ser classificados em diferentes classes. Devido à reduzida resistência à compressão os traços T2 e T3 ( $< C20$ ) não possuem finalidade estrutural. Os traços T0 e T1 classificam-se como C45 e C25, respectivamente. Portanto, com a finalidade estrutural o traço de CAA dosado conforme o item 4.2 não admite adições de LRC em teores superiores a 10%.

O comportamento no esforço de tração, seguiu o mesmo padrão. A Figura 4.25 demonstra o gráfico de resistência à tração através da compressão diametral e flexão.

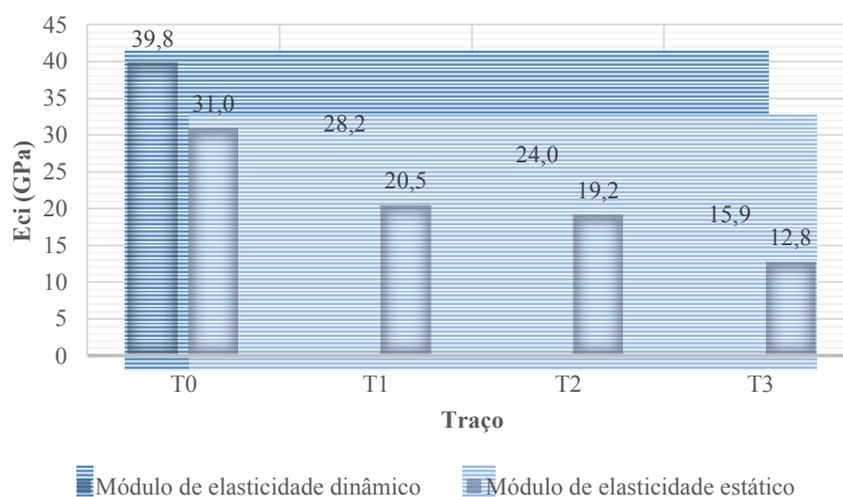


Fonte: Autor (2019).

Verifica-se com a Figura 4.25 que a resistência à tração reduziu conforme a incorporação de LRC, semelhante ao comportamento da resistência à compressão. De modo equivalente ao concreto convencional, a resistência à tração ( $f_{ct}$ ) apresentou cerca de 10% da resistência a compressão ( $f_{ck}$ ). Os valores de tração determinados pela tração indireta ( $f_{ct,sp}$ ) foram menores aos valores determinados pela tração na flexão ( $f_{ct,f}$ ). Esta diferença entre os métodos foi maior conforme a resistência.

O módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) apresentou uma relação idêntica à resistência. A Figura 4.26 demonstra os resultados apresentados para o módulo de elasticidade dinâmico (método não destrutivo) e estático (destrutivo).

Figura 4.26 – Módulo de elasticidade



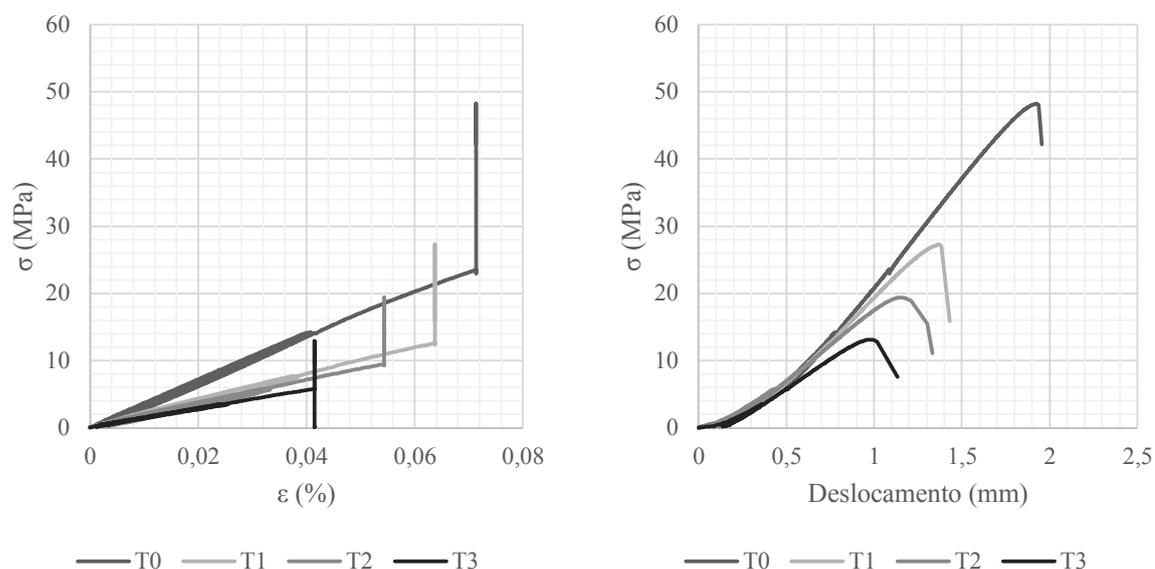
Fonte: Autor (2019).

Observa-se que o valor do módulo de elasticidade reduz conforme o teor de adição de LRC. Os valores do módulo de elasticidade dinâmico apresentam valores maiores que os valores do módulo de elasticidade estático. Esses valores são em média 29% maiores. Contudo, ambos os métodos convergem e configuram a LRC como um resíduo com influência direta no módulo de elasticidade.

Essa influência pode ser observada durante o ensaio do módulo de deformação tangente inicial ( $E_{ci}$ ) ou módulo de elasticidade no regime elástico. O traço T0 apresentou maior resistência à compressão e portanto, obteve a duração mais longa durante o ensaio. Os traços com adição de LRC apresentaram duração menor, conforme a o teor de adição.

O gráfico tensão ( $\sigma$ ) por deformação ( $\epsilon$ ) ilustra a redução do módulo de elasticidade gerado pela adição de LRC. As Figuras 4.27-a e 4.27-b demonstram o gráfico tensão pela deformação e pelo deslocamento da superfície da prensa, respectivamente.

Figura 4.27 – Gráfico tensão, deformação e deslocamento



(a) Tensão por deformação

(b) Tensão por deslocamento

Fonte: Autor (2019).

Na Figura 4.27 a retas verticais no gráfico tensão por deformação indicam o momento da retirada dos aparelhos de medida. Desta maneira, o incremento de tensão não geram a respectiva deformação. Todavia, observa-se que os traços com LRC apresentam menor inclinação da reta ( $E_{ci}$ ). No gráfico tensão por deslocamento é possível verificar o comportamento frágil do concreto e sua ruptura. Esse efeito é semelhante em todos os traços, a principal diferença ocorre devido à resistência final e ao módulo de elasticidade.

O comportamento do concreto no estado endurecido é protagonizado pela resistência à compressão, e a NBR 6.118 (ABNT, 2014) propõe modelos que estimam a resistência à tração e o módulo de elasticidade inicial a partir da resistência à compressão. Para o CAA estudado, o Quadro 4.7 relaciona os valores determinados experimentalmente e os estimados pela NBR 6.118 (ABNT, 2014).

Quadro 4.7 – Resultados experimentais e estimativas da a NBR 6.118 (ABNT, 2014)

	NBR 5.739 (ABNT, 2018) NBR 7.222 (ABNT, 2011) NBR 12.142 (ABNT, 2010)			Módulo dinâmico	NBR 8.522 (ABNT, 2017)	NBR 6.118 (ABNT, 2014)			
	$f_{ck}$ (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	$f_{ct,f}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)	$E_{ci}$ (GPa)	$f_{ct,m}$ (MPa)	$f_{ctk, inf}$ (MPa)	$f_{ctk, sup}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)
T0	46,6±5,5	4,1±0,4	5,4±0,4	39,8±0,1	31,0±2,3	3,9	2,7	5,1	45,9
T1	25,1±1,4	1,9±0,4	3,4±0,2	28,0±0,0	20,5±1,8	2,6	1,8	3,3	33,7
T2	18,8±1,4	2,4±0,3	3,0±0,2	24,0±0,0	19,2±1,1	2,1	1,5	2,8	- <sup>[a]</sup>
T3	11,5±1,5	1,4±0,4	1,5±0,0	15,9±0,0	12,8±0,4	1,5	1,1	2,0	- <sup>[a]</sup>

Nota: a – Não há estimativas para concretos não estruturais.

Fonte: Autor (2019); NBR 6.118 (ABNT, 2014).

Observa-se que a NBR 6.118 (ABNT, 2014) consegue estimar precisamente os valores da resistência à tração, mesmo para os traços de concretos não estruturais (T2 e T3). Contudo, os valores estimados para o módulo de elasticidade dos traços T0 e T1 foram superestimados. O valor estimado para o traço T0 foi 14,9GPa (48%) maior que o valor determinado experimentalmente, no traço T1 a norma estimou 13,2GPa (64%) a mais que o valor determinado. Para os traços confeccionados a NBR 6.118 (ABNT, 2014) não apresentou uma estimativa acurada.

A redução nas propriedades no estado endurecido do concreto, estão vinculadas à alteração da matriz cimentícia. Na Figura 4.28 é possível comparar visualmente o efeito da LRC no concreto endurecido.

Figura 4.28 – Superfície de ruptura



Fonte: Autor (2019).

Verifica-se uma distinção entre as superfícies de ruptura. No traço com elevado teor de adição de LRC (T3) a ruptura ocorreu em grande proporção na pasta de cimento. No traço T0 a ruptura ocorreu acompanhando a interface agregado-pasta. Esse efeito pode estar relacionado com o enfraquecimento da pasta gerado pela adsorção de água na superfície do resíduo incorporado. Desta maneira, a resistência na pasta e na interface se tornam equivalentes e são ambas afetadas pela microfissuração.

No contexto do estado endurecido a adição de LRC no CAA possui elevada influência, de modo que as propriedades no estado endurecido não são beneficiadas com a adição. A simples incorporação de teores de LRC superiores à 10% geram um efeito negativo na resistência e no módulo de elasticidade dos CAA. Em contrapartida, apresentam um aumento no acabamento superficial, devido à viscosidade plástica aparente (Figura 4.17).

Em síntese, o Quadro 4.8 apresenta a classificação do CAA (ABNT NBR 8.953, 2015) com LRC considerando dois aspectos: resistência aos esforços e módulo de deformação.

Quadro 4.8 – Uso do concreto com LRC

<b>Traço</b>	<b>Concreto estrutural NBR 8.953 (ABNT, 2015)</b>	<b>Módulo de deformação</b>
T0	C45	31,0 GPa
T1	C25	20,5 GPa
T2	-	19,2 GPa
T3	-	12,8 GPa

Fonte: Autor (2019).

## 5 CONCLUSÃO

Conforme objetivo de caracterizar os materiais constituintes. A ausência de adições no cimento evidenciam os possíveis efeitos benéficos gerados pela LRC nos processos de hidratação do cimento e na reação com o hidróxido de cálcio. As verificações físicas e químicas da LRC apresentam um material composto por diversas substâncias amorfas e cristalinas. Essas substâncias amorfas não apresentaram potencial reativo característico de pozolanas. Desta maneira, a incorporação da LRC no CAA representou um efeito físico nas misturas de CAA.

No contexto da determinação e confecção dos traços de CAA. A definição da LRC como fino nas equações de dosagem tornou possível a incorporação desse resíduo nos traços de CAA. Ocorre que o comportamento impreciso da LRC não permite ensaios com a pasta de cimento. E sua adição em argamassa gera uma demanda por água semelhante a incorporação de um material fino. O fato é que a LRC eleva a demanda por água nas misturas confeccionadas.

O CAA apresenta maior sensibilidade no âmbito da adição de materiais. Portanto, pequenas alterações no traço possuem elevada influência nos estado multifásico do concreto. A distinção dos traços de CAA verificados demonstram que para adicionar a LRC foi necessária mudanças no fatores a/c, teor de argamassa e aditivo químico. De outro modo, não seria possível estabelecer uma comparação entre concretos autoadensáveis. Portanto, a adição de LRC nos traços exige um aumento na quantidade de água e aditivo químico. Desta maneira, foi estabelecido os traços T0 (Piloto), T1 (10% de LRC), T2 (20% de LRC) e T3(30% de LRC).

No âmbito do estado fresco, as quatro características principais do CAA (Habilidade de preenchimento, viscosidade plástica aparente, habilidade passante e resistência à segregação) apontam alguns efeitos positivos na incorporação de LRC nas propriedades avaliadas no estado fresco. Apesar de nenhum traço em específico se destacar em todas as propriedades, o traço T1 se destacou por promover unicamente todas as propriedades frescas do CAA dentro dos limites da NBR 15.823 (ABNT, 2017). Houve um incremento no teor de ar incorporado proporcional a adição de LRC na mistura. A adição desse resíduo no traço T3, aliada à um incremento no teor de argamassa de 2,4% gerou um acréscimo de 15,1% no teor de ar incorporado.

Com relação as verificações no estado endurecido, a LRC não apresentou atividade pozolânica nem efeitos na hidratação do cimento. A adição de LRC nos traços produziu uma redução no consumo de cimento e um acréscimo de ar incorporado. O comportamento no estado endurecido do concreto é protagonizado pela resistência à compressão. Por conseguinte, as demais propriedades investigadas seguiram de maneira equivalente os efeitos verificados na

resistência à compressão uniaxial. Assim, os teores de adição superiores a 10% de LRC não apresentam função estrutural ( $f_{ck} < 20\text{MPa}$ ).

Em síntese a LRC é um recurso material de fácil aquisição. Configura-se como resíduo da indústria de concreto não perigoso e não inerte, devido às concentrações de chumbo extrapolarem os valores da NBR 10.004 (ABNT, 2004). Sua adição no CAA deve ocorrer em pequenos teores, afim de proporcionar incrementos nas propriedades do estado fresco e reduzir os efeitos resistivos no estado endurecido.

Os resultados obtidos pela metodologia aplicada neste trabalho possibilitou a obtenção de quatro traços de CAA (T0, T1, T2 e T3) e a verificação de suas propriedades no estado fresco e endurecido. No entanto, devido às limitações do procedimento metodológico e aos objetivos específicos, recomenda-se em pesquisas futuras:

- a) a dosagem de misturas com pequenos teores de LRC e consumo de cimento semelhante;
- b) o estudo das características de gelo e degelo, porosidade e retração de concretos contendo LRC;
- c) a resistência ao ataque químico de sulfatos, cloretos e ácidos em CAA com adição de LRC;
- d) a verificação comparativa de diferentes adições no CAA e seus efeito em traços com a presença de materiais finos;
- e) a análise da substituição parcial do agregado miúdo pela LRC em traços de CAA;
- f) avaliar o impacto ambiental da incorporação da LRC no CAA para indústria de concreto.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AARTHI, K.; ARUNACHALAM, K. Durability studies on fibre reinforced self compacting concrete with sustainable wastes. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 174, p. 247–255, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.270>.
- AHMAD, S. Evaluation of Effect of Superplasticizer on Performance of Self-Compacting Concrete. **Journal of Testing and Evaluation**, [s. l.], v. 41, n. 5, p. 754–760, 2013. Disponível em: <http://www.astm.org/doiLink.cgi?JTE20120208>.
- ALBERTI, M. G.; ENFEDAQUE, A.; GÁLVEZ, J. C. On the mechanical properties and fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 55, p. 274–288, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.024>.
- ALYHYA, W. S.; KULASEGARAM, S.; KARIHALOO, B. L. Simulation of the flow of self-compacting concrete in the V-funnel by SPH. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 100, p. 47–59, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.021>.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. **ACI C 212.3 R-16**: Report on Chemical Admixtures for Concrete. Farmington Hills, Michigan, EUA, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM C29/C29-17a**. Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C. C.; BARBOSA, L. A. G. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete modified with lightweight and recycled aggregates. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 11, n. 7, p. 76–94, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952018000100005>.
- ASADOLLAHFARDI, G.; GHOLAMREZA A.; MOHSEN, J.; HAMIDREZA, M.; ABDOLMOHAMMAD M.; ASADOLLAHFARDI, R. Experimental and statistical studies of using wash water from ready-mix concrete trucks and a batching plant in the production of fresh concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 98, p. 305–314, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.053>.
- ASHTIANI, M. S.; DHAKAL, R. P.; SCOTT, A. N. Seismic Performance of High-Strength Self-Compacting Concrete in Reinforced Concrete Beam-Column Joints. **Journal of Structural Engineering**, [s. l.], v. 140, n. 5, p. 1-12, 2014. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0000973>.
- ASLANI, F.; MA G.; YIM WAN, D. L.; MUSELIN, G. Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 182, p. 553–566, 2018. a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.074>.
- ASLANI, F.; MA G.; YIM WAN, D. L.; TRAN LE, V. X. Experimental investigation into rubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 172, p. 1835–1847, 2018. b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.003>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26:** Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 27:** Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46:** Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5.738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. Versão corrigida, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 5.739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 5.741:** Extração e preparação de amostras de cimentos. Rio de Janeiro, 1993.

\_\_\_\_\_. **NBR 5.751:** Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5.752:** Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 6.118:** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 6.467:** Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006. Versão corrigida, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7.211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7.214:** Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 7.215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos – Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 7.222:** Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 7.681-2:** Calda de cimento para injeção – Determinação do índice de fluidez e vida útil – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 7.809:** Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 8.522:** Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 8.952:** Coleta e preparação de amostras de materiais pozolânicos – Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 8.953:** Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 9.775:** Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 9.833:** Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008. Versão corrigida, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 9.939:** Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.005:** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.006:** Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.007:** Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 11.768-1:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 12.142:** Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 12.653:** Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. Versão corrigida, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.823-1:** Concreto autoadensável Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.823-2:** Concreto autoadensável Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.823-3:** Concreto autoadensável Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.823-4:** Concreto autoadensável Parte 4: Determinação da habilidade passante - Métodos da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.823-5:** Concreto autoadensável Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.823-6:** Concreto autoadensável Parte 6: Determinação da resistência à segregação – Métodos da coluna de segregação e da peneira. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.900-1:** Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 16.605:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 16.697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

AUDO, M.; MAHIEUX, P.; TURCRY, P. Utilization of sludge from ready-mixed concrete plants as a substitute for limestone fillers. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 112, p. 790–799, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.044>.

BIDONE, F. A. (Org). **Resíduo sólido proveniente de coletas especiais: eliminação e valorização**. Brasília: FINEP/PROSAB, 2001. 216 p.

BRASIL. **LEI Nº 6.938**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília 31 de agosto de 1981.

BRASIL. **LEI Nº 9.605**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília 12 de fevereiro de 1998.

BRASIL. **LEI Nº 12.305**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília 2 de agosto de 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 307, 6 de julho de 2002**. Dou nº 136/2002, de 17-07-2002. Brasília – DF.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 448, 18 de janeiro de 2012**. Dou nº 14/2012, de 19-01-2012. Brasília – DF.

BUCHER, R.; DIEDERICH, P.; MOURET, M.; ESCADEILLAS, G.; Cyr, M. Self-compacting concrete using flash-metakaolin: design method. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 48, n. 6, p. 1717–1737, 2015. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-014-0267-x>.

CAVALCANTI, D. J. de H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. 2006, 141 p. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2006.

ESFAHANI, A. R.; REISI, M.; MOHR, B. Magnetized Water Effect on Compressive Strength and Dosage of Superplasticizers and Water in Self-Compacting Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 1-7, 2018. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002174>.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – EN. **EN 445**. Grout for prestressing tendons. Test methods. Brussels, BE. 2007.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. In: EFNARC, Maio, 2005. 32p.

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

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Pini, 1ª edição, 2009. 165 p.

GOMES, P. C. C.; GETTU, R.; AGUILLÓ, L. Uma nova metodologia para obtenção de concreto autoadensável de alta resistência com aditivos minerais. *In: Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto*, 2003, São Paulo – Brasil.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: IBRACON, 3ª edição, 2017. 1760 p.

HEMALATHA, T.; RAMASWAMY, A.; CHANDRA KISHEN, J. M. Micromechanical analysis of self compacting concrete. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 48, n. 11, p. 3719–3734, 2015. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-014-0435-z>.

HESAMI, S.; SALEHI HIKOUEI, I.; EMADI, S. A. A. Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 133, p. 228–234, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.079>.

HOSSAIN, M. U.; XUAN, D.; POON, C. S. Sustainable management and utilisation of concrete slurry waste: A case study in Hong Kong. **Waste Management**, [s. l.], v. 61, p. 397–404, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.038>.

ISIK, I. E.; OZKUL, M. H. Utilization of polysaccharides as viscosity modifying agent in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 72, p. 239–247, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.017>.

KAPOOR, K.; SINGH, S. P.; SINGH, B. Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 128, p. 67–76, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.026>.

KHALOO, A.; RAISI, E. M.; HOSSEINI, P.; TAHSIRI, H. Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. **Construction and Building Materials**, [s.

l.], v. 51, p. 179–186, 2014. Disponível em:  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.054>.

KOU, S.; ZHAN, B.; POON, C. Properties of partition wall blocks prepared with fresh concrete wastes. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 36, p. 566–571, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.063>.

LONG, G.; GAO, Y.; XIE, Y. Designing more sustainable and greener self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 84, p. 301–306, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.072>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2 edição, 2014. 782 p.

MOHAMMED, M. K.; DAWSON, A. R.; THOM, N. H. Production, microstructure and hydration of sustainable self-compacting concrete with different types of filler. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 49, p. 84–92, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.107>.

MOHSENI, E.; SAADATI, N.; KORDBACHEH, N.; PARPINCHI, Z. S.; TANG, W. Engineering and microstructural assessment of fibre-reinforced self-compacting concrete containing recycled coarse aggregate. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 168, p. 605–613, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.070>.

NAGALLI, A. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil**. São Paulo: Oficina de Textos. 2014. 175 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 5ª edição, 2016. 912 p.

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

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-Compacting Concrete. **Jornal of Advanced Concrete Technology**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 5–15, 2003. Disponível em: [www.j-act.org/headers/1\\_5.pdf](http://www.j-act.org/headers/1_5.pdf). Acesso em: 10 ago. 2018.

OKAMURA, H.; OZAWA, K. Self-Compacting High Performance Concrete. **Structural Engineering International**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 269–270, 1996. Disponível em: <http://www.ingentaconnect.com/content/10.2749/101686696780496292>.

OUCHI, M.; OZAWA, K.; OKAMURA, H. Development of a simple self-compactability testing method for acceptance at job site, In: **First International Conference On Concrete Structure**, 1996.

OZAWA, K., MAEKAWA, K., Y OKAMURA, H. High performance concrete with high filling capacity. In: E.Vázquez. **Admixtures for Concrete: Improvement of Properties**. 1990, p. 51-63.

PAULA, H. M.; ILHA, M. S. O. Quality of concrete plant wastewater for reuse Qualidade da água residuária de usina de concreto. **IBRACON Structural and Materials Journal**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 349–366, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952014000300003>.

PELISSER, F.; VIEIRA, A.; BERNARDIN, A. M. Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 175, p. 324–332, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.084>.

PONIKIEWSKI, T.; GOŁASZEWSKI, J. The influence of high-calcium fly ash on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete and high performance self-compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 72, p. 212–221, 2014. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614002042>.

POP, I.; DE SCHUTTER, G.; DESNERCK, P.; SZILAGY, H. Influence of self-compacting concrete fresh properties on bond to reinforcement. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 48, n. 6, p. 1875–1886, 2015. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-014-0280-0>.

SCHOON, J.; BUYSSER, K. D.; DRIESSCHE, I. V.; BELIE, N. D. Feasibility Study of the Use of Concrete Sludge As Alternative Raw Material for Portland Clinker Production. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 10, p. 1-12, 2015. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001230>.

SETHY, K. P.; PASLA, D.; CHANDRA SAHOO, U. Utilization of high volume of industrial slag in self compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 112, p. 581–587, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.039>.

SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 57, p. 308–319, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.009>.

ŞAHMARAN, M.; CHRISTIANTO, H. A.; YAMAN, İ. Ö. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 28, p. 432–440, 2006. Disponível em: [10.1016/j.cemconcomp.2005.12.003](http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.003).

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Autoadensável**. São Paulo: Pini, 1ª edição, 2008. 240 p.

UYGUNOĞLU, T.; TOPÇU, İ. B.; ÇELİK, A. G. Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 84, n. 1, p. 691–700, 2014. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614006076>.

VAN DER VURST, F.; GRÜNEWALD, S.; FEYS, D.; LESAGE, K.; VANDEWALLE, L.; VANTOMME, J.; DE SCHUTTER, G. Effect of the mix design on the robustness of fresh self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 82, p. 190–201, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.06.005>.

VIEIRA, L. de B. P.; FIGUEIREDO, A. D. De. Evaluation of concrete recycling system efficiency for ready-mix concrete plants. **Waste Management**, [s. l.], v. 56, p. 337–351, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.015>.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S.; ZHENG, W. Innovative reuse of concrete slurry waste from ready-mixed concrete plants in construction products. **Journal of Hazardous**

**Materials**, [s. l.], v. 312, p. 65–72, 2016. a. Disponível em:  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.03.036>.

XUAN, D.; ZHAN, B.; SUN, C.; ZHENG, W. Carbon dioxide sequestration of concrete slurry waste and its valorisation in construction products. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 113, p. 664–672, 2016. b. Disponível em:  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.109>.

XUAN, D.; POON, C. S.; ZHENG, W. Management and sustainable utilization of processing wastes from ready- mixed concrete plants in construction: A review. **Resources, Conservation & Recycling**, [s. l.], v. 136, n. May, p. 238–247, 2018. Disponível em:  
[10.1016/j.resconrec.2018.04.007](http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.007).