

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL:
CONSTRUÇÃO E INFRAESTRUTURA**

**USO DE FINOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO
EM CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

IAGO LOPES DOS SANTOS

**PORTO ALEGRE
2018**

IAGO LOPES DOS SANTOS

**USO DE FINOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO
EM CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Prof.^a Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dra pela Universidade de São Paulo
Orientadora

Porto Alegre
2018

IAGO LOPES DOS SANTOS

**USO DE FINOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO
EM CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

Esta dissertação de mestrado foi julgada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa em Materiais, e aprovada em sua forma final pela Professor Orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 15 de Junho de 2018.

Prof^a. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dra pela Universidade de São Paulo
Orientadora

Prof. Carlos Torres Formoso
Coordenador do PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian (UNISINOS)
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Abrahão Bernardo Rohden (PUCRS)
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof^a Dra. Monica Regina Garcez (UFRGS)
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho, com muito carinho,
aos meus pais, Leodix e Sueli por todo
o incentivo durante estes anos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por confiar a mim o dom da vida.

Agradeço aos meus pais, Leodix Barnabé dos Santos Junior e Sueli Filgueira Lopes Borges, e a minha irmã Talita Krishina Lopes dos Santos, por todo o carinho, apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida e principalmente durante a realização deste trabalho.

À toda minha família, primos, tios, avós e avô pelo apoio durante esses dois anos de mestrado. Agradeço por todas as ligações e mensagens recebidas e pela compreensão durante esse tempo ausente. Amo vocês!

À professora Denise, ao qual eu tenho a honra de tê-la como orientadora. Agradeço pelos ensinamentos, pela atenção, pela paciência que sempre demonstrou e por confiar em mim para a realização deste trabalho. Você, sem dúvida, é uma inspiração para a minha carreira.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, aos técnicos e demais profissionais da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Aos colegas do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), especialmente “os materialistas” que me receberam com muita alegria e fizeram com que eu me sentisse em casa nesses dois anos em Porto Alegre.

Aos colegas de turma do mestrado, especialmente a Laura, Gabi, Felipe, Cristian e Marcelo pela amizade e parceria. Valeu, Galera!

À Laura, Felipe, Deividi, Camila e Roberta pelos vários “happy hour na CB”. Depois de uma semana cheia e cansativa, não tinha nada melhor do que “molhar as palavras” com vocês. E lembrem-se: “UM OPEN, NUNCA É SÓ UM OPEN!”. Levarei pra sempre essa amizade em meu coração. Vocês são incríveis!

Aos técnicos do LAMTAC, em especial ao Airton e Ari pela amizade e pela ajuda indispensável durante toda a etapa experimental desta pesquisa e de outros trabalhos das disciplinas do mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudo de mestrado.

A todos, mais uma vez, muito obrigado!

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

Marthin Luther King

RESUMO

SANTOS, I. L. **Uso de finos de resíduos de construção e demolição em concreto autoadensável.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI), UFRGS, Porto Alegre, 2018.

O concreto autoadensável (CAA) é um concreto especial com a capacidade de fluir e preencher completamente todos os espaços das fôrmas pela ação de seu peso próprio, sem que haja ocorrência de bloqueio e segregação da mistura. Contudo, para alcançar essas características, normalmente esse concreto é dosado com um maior teor de materiais finos e/ou com aditivo modificador de viscosidade. Os agregados provenientes de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) já estão sendo utilizados na produção de concretos, porém o uso dos materiais finos de agregados reciclados não é recomendado para a produção de concretos convencionais. Entretanto, acredita-se que em CAA esses materiais finos podem ser uma oportunidade interessante, tanto para a questão da reutilização desses resíduos, conseguindo uma destinação nobre para esses materiais com baixa demanda no mercado, como na manutenção das propriedades deste concreto, sendo os principais agentes do controle de segregação. Desta forma, o presente trabalho consistiu em estudar a influência da utilização de finos de RCD (concretos, argamassas e tijolos cerâmicos), separadamente, em substituição parcial ao agregado miúdo natural, nas principais propriedades do concreto autoadensável no estado fresco (fluidez, habilidade passante e resistência à segregação) e no estado endurecido (resistência à compressão e módulo de elasticidade), bem como avaliar seu desempenho quanto à durabilidade (absorção de água e penetração de íons cloretos). Os resultados demonstraram perda de fluidez e boa coesão nos concretos autoadensáveis que empregaram agregados reciclados. No entanto, ainda conferem boas características de autoadensabilidade, atendendo as condições normativas para uso em estruturas correntes de engenharia. No que tange às propriedades mecânicas, foi observado aumento de resistência à compressão e decréscimo do módulo de resistência para concretos com finos de RCD. No quesito de durabilidade, os concretos com agregados reciclados apresentaram valores mais elevados para absorção de água por capilaridade e penetração de íons cloretos em comparação aos concretos de referência.

Palavras-chave: Resíduos de Construção e Demolição, Agregado Fino, Concreto autoadensável

ABSTRACT

SANTOS, I. L. **Use of fine recycled aggregate from Construction and demolition waste in self-compacting concrete.** Master Thesis – Post-Graduation Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

Self-compacting concrete (SCC) is a special concrete with the ability to flow into and completely fill all spaces within the formworks only by the action of their own weight, without blocking and segregation of the mixture. However, to achieve these characteristics, normally this concrete needs to be mixed with more content of fine materials and/or viscosity modifiers additives. The aggregates from Construction and Demolition Wastes (CDW) are used for concrete production, but the use of fine recycled aggregate is not recommended for the production of conventional concrete. Although, it is believed that in SCC these fine aggregates can be an interesting opportunity for the reuse of these wastes, achieving a noble destination for these materials with low demand in the market, as for the maintenance of the properties of this concrete, being the main agents of segregation control. So, the present research consisted in studying the influence of the use of CDW fines aggregates (concretes, mortars and ceramic bricks, separately) to replace the natural sand in the main properties of the self-compacting concrete in the fresh state (flowability, passing ability and segregation resistance) and in the hardened state (compressive strength and modulus of elasticity), as well as to evaluate its performance in terms of durability (water absorption and chloride penetration). The study results showed loss of flowability and increased cohesion in the self-compacting concretes that used recycled aggregates. However, they still confer good characteristics for self-compacting concrete, taking into account the normative conditions for using current engineering structures. With respect to the mechanical properties, it was observed an increase of compressive strength and decrease of the modulus of elasticity for concrete with CDW fines aggregates. In terms of durability, concretes with recycled aggregates presented higher values for capillarity water absorption and penetration of chloride ions compared to the references concretes.

Keywords: Construction and Demolition Wastes, Fine aggregate, Self-compacting concrete.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS.....	13
1.1.1	Objetivo principal.....	13
1.1.2	Objetivos específicos.....	13
1.2	DELIMITAÇÕES	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	CONCRETO AUTOADENSÁVEL	15
2.1.1	Concreto autoadensável no estado fresco.....	16
2.1.2	Concreto autoadensável no estado endurecido.....	17
2.1.3	Materiais constituintes do concreto autoadensável	19
2.1.3.1	Cimento.....	19
2.1.3.2	Agregados	20
2.1.3.3	Aditivos.....	21
2.1.3.4	Água.....	23
2.1.3.5	Finos.....	23
2.1.4	Ensaio do concreto autoadensável no estado fresco	25
2.1.4.1	Slump Flow.....	25
2.1.4.2	Slump Flow T ₅₀ cm.....	26
2.1.4.3	Método do Funil V.....	27
2.1.4.4	Método da Caixa L	28
2.1.4.5	Coluna de Segregação.....	30
2.2	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	32
2.2.1	Composição	33
2.2.2	Agregados reciclados.....	34
2.2.3	Produção dos agregados reciclados	35

2.3	FINOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	37
3	TRABALHO EXPERIMENTAL	42
3.1	Variáveis controláveis	43
3.2	Variáveis não controláveis	43
3.3	Fatores fixos	43
3.4	Variáveis de resposta.....	44
3.5	MATERIAIS UTILIZADOS	44
3.5.1	Cimento Portland.....	44
3.5.2	Agregado graúdo	45
3.5.3	Agregado miúdo	46
3.5.4	Finos de RCD	47
3.5.5	Aditivo.....	53
3.5.6	Água	54
3.6	MÉTODO.....	54
3.6.1	Dosagem dos concretos autoadensáveis	54
3.6.2	Ensaio.....	58
3.6.2.1	Ensaio no estado fresco	58
3.6.2.2	Ensaio no estado endurecido	59
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	65
4.1	Resultados e discussões dos concretos autoadensáveis no estado fresco.....	65
4.2	Resultados e discussões dos concretos autoadensáveis no estado endurecido.....	76
4.2.1	Resistência à compressão	76
4.3	Módulo de elasticidade.....	85
4.4	Absorção de água por capilaridade	88
4.5	Penetração de íons cloretos	92
4.6	Análise de Custo.....	95
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	98

REFERÊNCIAS	101
ANEXO A	118
A.1 Planilha de regressão das curvas de dosagem	118
A.1.1 Regressão para os concretos autoadensáveis de referência.....	118
A.1.2 Regressão para os concretos autoadensáveis com finos de concreto	120
A.1.3 Regressão para os concretos autoadensáveis com finos de Argamassa.....	122
A.1.4 Regressão para os concretos autoadensáveis com finos cerâmicos	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre forma do agregado miúdo e resistência ao cisalhamento do CAA ...	21
Figura 2- Slump Flow	26
Figura 3- Funil V	28
Figura 4- Caixa- L	29
Figura 5- Indicação das alturas H1 e H2	30
Figura 6- Coluna de segregação	31
Figura 7- Imagens de Fíler Calcário através de MEV	40
Figura 8- Imagem de MEV de microfinos de Quartzo	40
Figura 9- Metodologia resumida do trabalho experimental	42
Figura 10- Distribuição Granulométrica do agregado graúdo	45
Figura 11- Distribuição Granulométrica do agregado miúdo	46
Figura 12- Aspecto visual dos finos, da esquerda para à direita: finos de argamassa, cerâmico e de concreto	47
Figura 13- Britador de mandíbula	48
Figura 14- Distribuição granulométrica do fino de concreto	49
Figura 15- Distribuição granulométrica do fino de argamassa	49
Figura 16- Distribuição granulométrica do fino cerâmico	49
Figura 17 - Imagens dos finos de concreto obtidas por MEV por elétrons secundários com magnificação de (a) 6000x e (b) 1000x	51
Figura 18 - Imagens dos finos de argamassa obtidas por MEV por elétrons secundários com magnificação de (a) 6500x e (b) 1000x	51
Figura 19- Imagens dos finos cerâmicos obtidas por MEV por elétrons secundários com magnificação de (a) 6500x e (b) 1000x	51
Figura 20- Imagens da areia fina obtida por MEV por elétrons secundários com magnificação de (a) 18x e (b) 95x	52
Figura 21 - Resultado de resistência à compressão obtidos no ensaio de avaliação de índice de pozolanicidade	53
Figura 22- Fluxograma de dosagem do CAA	54
Figura 23 - Configurações dos concretos autoadensáveis do estudo	55
Figura 24 - Ensaio realizados no estado fresco: a) Slump flow; b) Funil V e c) Caixa L	58
Figura 25- Ensaio de módulo de Elasticidade	60

Figura 26- (a) Impermeabilização e (b) colocação dos corpos de prova no recipiente como nível de água prescrito para o ensaio.....	61
Figura 27- Impermeabilização da superfície lateral das amostras.....	63
Figura 28- Submissão das amostras ao vácuo	63
Figura 29- Acoplamento da amostra nas célula com selante PU à base de poliuretano.....	63
Figura 30- Ensaio em andamento	63
Figura 31 - relação água/cimento dos traços executados no estudo	68
Figura 32 - Resultado de espalhamento - Slump Flow test	70
Figura 33- CAA_FREF_2,5	72
Figura 34- CAA_FREF_4	72
Figura 35- CAA_FREF_5,5	72
Figura 36-CAA_FREF_7	72
Figura 37-CAA_FCON_2,5	72
Figura 38- CAA_FCON_4	72
Figura 39- CAA_FCON_5,5	72
Figura 40-CAA_FCON_7	72
Figura 41-CAA_FARG_2,5	72
Figura 42-CAA_FARG_4	72
Figura 43-CAA_FARG_5,5	72
Figura 44- CAA_FARG_7	72
Figura 45-CAA_FCER_2,5	73
Figura 46-CAA_FCER_5,5	73
Figura 47- CAA_FCER_5,5	73
Figura 48- CAA_FCER_7	73
Figura 49 - Ensaio da caixa L dos concretos	74
Figura 50- Resultado do ensaio slump flow T50 cm dos concretos	75
Figura 51- Resultados dos ensaios do Funil V dos concretos	75
Figura 52- Diagrama de dosagem dos concretos aos 7 dias	79
Figura 53- Diagrama de dosagem dos concretos aos 28 dias	80
Figura 54- Comparativo de resistência à compressão fixando a/c	82
Figura 55- Comparativo de consumo de cimento fixando resistência.....	84
Figura 56- Resultado de módulo de elasticidade dos CAA em função do traço 1: m.....	85
Figura 57- Curvas de correlação - Módulo de elasticidade X resistência à compressão.....	87
Figura 58 - Resultados de módulo de elasticidade para os CAA aos 28 dias.....	87

Figura 59 – Índice de absorção de água por capilaridade dos concretos.....	89
Figura 60- Comparativo de absorção de água por capilaridade fixando a/c	91
Figura 61- Comparação de absorção de água por capilaridade fixando níveis de resistência à compressão	92
Figura 62- Penetração de cloretos - Carga total passante em 56 dias.....	93
Figura 63- carga passante de íons cloretos	94
Figura 64- Custo unitário dos CAAs por MPa aos 7 dias	96
Figura 65-Custo unitário dos CAAs por MPa aos 28 dias	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação do CAA de acordo com o ensaio Slump Flow	26
Tabela 2- Classe de viscosidade plástica obtida através do slump flow T ₅₀ cm.	27
Tabela 3- Classe de viscosidade plástica aparente pelo funil-V.....	28
Tabela 4- Classificação de resistência à segregação pela coluna de segregação.....	31
Tabela 5- Caracterização química, física e mecânica do cimento CP V-ARI.....	44
Tabela 6- Caracterização do agregado graúdo	45
Tabela 7- Caracterização física do agregado miúdo.....	46
Tabela 8- Caracterização física dos finos	50
Tabela 9- Resultado do Índice de Pozolanicidade do fino cerâmico-NBR 5752 (ABNT, 2014)	52
Tabela 10 -Caracterização do aditivo superplastificante	53
Tabela 11 - Determinação do teor ideal de argamassa	56
Tabela 12 - Teor ótimo de substituição de areia por finos em todas as configurações de CAA estudadas.....	57
Tabela 13- Classificação de risco quanto à penetração de íons cloreto	64
Tabela 14 - Traços de concreto autoadensável de referência com areia fina	65
Tabela 15- Traços de concreto autoadensável com finos de concreto	66
Tabela 16- Traços de concreto autoadensável com finos de argamassa.....	66
Tabela 17- Traços de concreto autoadensável com finos de argamassa.....	67
Tabela 18- Traços de concreto autoadensável com finos cerâmicos.....	67
Tabela 19- Resultados dos ensaios dos CAAs no estado fresco.....	69
Tabela 20- Resistência à compressão dos concretos de referência	76
Tabela 21 - Resistência à compressão dos concretos com finos de concreto.....	77
Tabela 22 - Resistência à compressão dos concretos com finos cerâmicos	77
Tabela 23 - Resistência à compressão dos concretos com finos de argamassa.....	78
Tabela 24- Equações de dosagem – Resistência à compressão (MPa) em função da relação a/c (kg/kg), teor de agregados secos (m) em função da relação a/c (kg/kg); consumo de cimento em relação ao teor de agregados secos (m)	81
Tabela 25- Comparação dos resultados de módulo de elasticidade dos CAA com finos de RCD em relação ao concreto de referência, em termos percentuais.	86
Tabela 26- Absorção de água por capilaridade dos concretos.....	88
Tabela 27 - Custo de materiais utilizados para produção dos CAA, em R\$/kg.	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

% :	Porcentagem
a	relação agregado miúdo seco/cimento;
a/f:	Relação água/finos
ABNT :	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE :	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza e Resíduos especiais
ANOVA :	Análise de Variância
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
ARM	Agregado Reciclado Misto
ASTM :	American Society for Testing and Materials
C	absorção por capilaridade
C	consumo de cimento por metro cúbico, em Kg/m ³
Cu	Custo de concreto por metro cúbico
C ₃ A:	Aluminato tricálcico
CAA	Concreto Autoadensável
CAA_FARG	Concreto Autoadensável com finos de argamassa
CAA_FCON	Concreto autoadensável com finos de concreto
CAA_F CER	Concreto autoadensável com finos cerâmicos
CAA_FREF	Concreto autoadensável com finos de referência
CONAMA :	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP V ARI :	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CP's :	Corpos-de-Prova
D	Diâmetro
D ₉₀ :	Diâmetro a 90 %
D _m :	Diâmetro Médio
EFNARC:	European Federation for Specialist Construction Chemicals and concrete systems
EPUSP:	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
F	Carga de ruptura
f	relação finos/cimento;
F _c	Resistência à compressão
g/cm ³ :	grama por centímetro cúbico
I ₀	Corrente inicial
IBRACON :	Instituto Brasileiro do Concreto
IDH:	Índice de Desenvolvimento Humano
IPT :	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo
I _t	Corrente total
Kg/m ³ :	quilo por metro cúbico
l/m ³ :	litro por metro cúbico
LACER :	Laboratório de Cerâmica
LAMTAC:	Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído
LAPROM:	Laboratório de Processamento Mineral
LS:	Lignossulfonatos Modificadores
m ² / Kg:	metro quadrado por quilograma
mm :	milímetro
MEV:	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mpa :	Mega Pascal
ms	massa seca

msat	massa saturada
MS	Melamina Sulfonato ou Melamina
NBR :	Norma Brasileira Regulamentada
NM :	Norma Mercosul
NS	Naftaleno
p	relação agregado miúdo/cimento
Pa:	Pascal
PC	Policarboxilatos
PNRS :	Política Nacional de Resíduos Sólidos
Q	carga total
RCD :	Resíduo de Construção e Demolição
RS :	Rio Grande do Sul
RSU :	Resíduo Sólido Urbano
s	segundo
SP%:	dosagem de aditivo por metro cúbico;
S	área da seção transversal
SQR	Soma quadrada dos resíduos
UFRGS :	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VMA:	Viscosity Modifying Admixtures
µm:	micrômetro
\$c:	custo unitário do Kg de cimento;
\$f:	custo unitário do Kg de finos;
\$a:	custo unitário do Kg do agregado miúdo;
\$p:	custo unitário do Kg do agregado graúdo;
\$SP:	custo unitário do Kg de aditivo superplastificante

1 INTRODUÇÃO

Depois da água, o material mais consumido pelo homem é o concreto, com aproximadamente 25 gigatoneladas por ano (GURSEL *et al.*, 2014). Esse consumo tende a crescer cada vez mais, já que este material é útil em vários sistemas construtivos, podendo ser encontrado em diversos ramos da construção civil como edifícios, rodovias, pontes, entre outros.

Essa diversificação de atuação faz com que a construção civil seja essencial para o desenvolvimento do país, uma vez que impulsiona a economia. Em contrapartida, ela também se mostra como uma das indústrias que mais contribui para a alteração do meio ambiente, sendo potencial consumidora de recursos naturais e uma significativa fonte geradora de resíduos sólidos causando impactos ambientais negativos (KARPINSKI *et al.*, 2009).

O crescimento das atividades do setor da construção atrelado ao elevado índice de perdas inerentes a esse setor traz à tona uma grande preocupação quanto à geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). No Brasil, estima-se que a produção desses resíduos, apesar de ser variável e ter correlação com Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), é superior a 70 milhões de toneladas por ano (cerca de 500 kg/habitantes/ano), configurando mais de 50 % de todo o resíduo sólido urbano do país (CONTRERAS *et al.*, 2016).

Assim, existe a preocupação com o gerenciamento e a destinação final desses resíduos de construção e demolição, uma vez que depositados em locais impróprios resultam em diversos impactos socioambientais. A inadequada disposição dos RCD compromete a paisagem do local; o tráfego de pedestres e de veículos; provoca assoreamento dos rios, córregos e lagos; o entupimento da drenagem urbana, contribuindo às enchentes; além de servirem de pretexto para o depósito irregular de outros resíduos não inertes, proporcionando o surgimento e a multiplicação de vetores de doenças, pondo em risco a saúde da população vizinha (CABRAL; MOREIRA, 2011).

A destinação final do RCD é o ponto mais deficiente no sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos. A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais- ABRELPE (2015) registrou um aumento no volume de resíduos enviados para destinação inadequada, com quase 30 milhões de toneladas de resíduos dispostas em lixões ou aterros controlados, que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessárias para proteção do meio ambiente contra danos e degradações.

O aumento das restrições legais de descarte de RCD tem como consequência a necessidade de desenvolver mecanismos que promovam a conscientização e soluções para a implantação de tecnologias capazes de minimizar os impactos decorrentes da disposição destes resíduos no meio ambiente.

A reciclagem de resíduos de construção e demolição está cada vez mais ganhando destaque em relação ao desenvolvimento sustentável na construção civil, uma vez que garante a minimização desses resíduos gerados pelo setor. A dificuldade do descarte desses resíduos, aliada à possibilidade de redução da extração de recursos naturais por meio de emprego de agregados reciclados de RCD, denota o potencial de reciclagem desses resíduos (CONTRERAS *et al.*, 2016). Esta ação já é bastante difundida no exterior e atualmente vem se tornando uma realidade presente também no Brasil.

Na construção civil, o produto da reciclagem de RCD é geralmente empregado na forma de agregados que são utilizados em diversos processos construtivos. Contudo, no processo de beneficiamento deste material, através de procedimentos de britagem, são geradas grandes quantidades de materiais finos, cujo uso não é recomendado em concretos convencionais, pois influenciam diretamente algumas propriedades do concreto, tais como: no estado fresco, trabalhabilidade, coesão e segregação e no estado endurecido, resistência à compressão e módulo de elasticidade (SILVA; BRITO; DHIR, 2014). Entretanto, em caso de concretos especiais, como os concretos autoadensáveis (CAA) que necessitam de grandes volumes de finos para manutenção de suas propriedades no estado fresco (coesão, baixa segregação e exsudação), esses materiais podem ser indicados ao uso, atendendo às suas exigências específicas.

O CAA é um concreto com capacidade de preencher por completo as fôrmas apenas pela ação de seu peso próprio, sem que haja ocorrência de bloqueio e segregação da mistura. Contudo, para alcançar essas características, esse concreto necessita ser dosado com um alto teor de materiais finos e/ou com aditivo modificador de viscosidade. Assim sendo, o CAA é visto como uma interessante oportunidade de utilizar a fração fina dos agregados reciclados como agente de controle de segregação, além de garantir uma destinação mais nobre a esses materiais que tem pouca demanda no mercado.

Gomes (2003) afirma que o desenvolvimento de um CAA utilizando alta dosagem de resíduos sólidos industriais, na forma de finos, é uma contribuição positiva para o desenvolvimento sustentável do concreto. Ao utilizar resíduos de construção e demolição em substituição ao agregado miúdo pode-se obter um ganho ecológico importante, já que

minimiza-se o consumo de matérias primas não renováveis e se dá um destino adequado ao resíduo gerado.

Apesar de estar se difundindo por vários países e ampliando o seu potencial de aplicação, o CAA ainda carece de muitas pesquisas, com o intuito de acrescentar maiores conhecimentos das propriedades mecânicas do CAA, especialmente, aqueles produzidos com finos de RCD.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo principal

O objetivo principal da dissertação é avaliar a potencialidade de substituição parcial de agregado miúdo natural por finos de resíduos de construção e demolição em concreto autoadensável com relação às propriedades no estado fresco e endurecido.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- a) verificar se a origem dos finos de RCD (concreto, argamassa e material cerâmico) influencia no comportamento do CAA;
- b) verificar o desempenho do uso de diferentes finos de RCD, quanto às propriedades no estado fresco do concreto autoadensável;
- c) analisar a influência dos diferentes finos de RCD nas propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo de elasticidade) e nos requisitos de durabilidade do CAA (absorção de água e penetração de íons cloretos);
- d) avaliar o consumo de cimento e os custos dos CAA produzidos com diferentes finos de RCD.

1.2 DELIMITAÇÕES

São delimitações do trabalho:

- a) apenas o tipo de cimento CP V-ARI foi utilizado no trabalho;
- b) foram utilizados três tipos de agregados fino passantes na peneira 100 mesh (#0,15 mm), classificados de acordo com sua origem: concreto, argamassa e tijolo maciço cerâmico;

- c) para a produção dos agregados finos foi utilizado apenas um britador de mandíbula, sem a aplicação de qualquer tipo de processo de moagem, de modo a expressar a realidade prática da reciclagem de resíduos de construção e demolição;
- d) foram avaliadas quatro relações cimento: agregados secos, em massa, de 1:2,5; 1:4; 1:5,5 e 1:7.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo estão abordados três assuntos pertinentes à dissertação. Primeiramente são abordados os assuntos mais relevantes aos concretos autoadensáveis e seus respectivos ensaios no estado fresco e endurecido, em seguida aos resíduos de construção e demolição, e por fim, sobre os finos de RCD, remetendo às propriedades e a sua utilização em concretos.

2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Devido ao grande desafio encontrado nas obras de engenharia, onde aumentou a exigência da criação de estruturas mais duráveis e mais complexas, com altas taxas de armaduras, por consequência dos frequentes abalos sísmicos, o Japão começou a estudar e desenvolver concretos especiais. Assim sendo, na década de 1980, foi produzido um concreto de alto desempenho com o intuito de solucionar problemas oriundos do processo de adensamento decorrentes da complexidade das estruturas, além de resolver problemas de durabilidade de construções em concreto armado, o qual foi denominado concreto autoadensável (TUTIKIAN, 2004; MELO, 2005).

O concreto autoadensável (CAA) é capaz de fluir sob ação de seu próprio peso, preenchendo completamente as fôrmas e alcançando plena compacidade, sem necessidade de vibração externa, mesmo na presença de alta taxa de armadura. Esse concreto no estado endurecido é denso, homogêneo e apresenta características mecânicas e de durabilidade semelhantes ao concreto tradicional (EFNARC, 2005).

O CAA é uma grande revolução na tecnologia do concreto e tem sido amplamente utilizado em construções em todo o mundo, devido as suas diversas vantagens, como as citadas por Okamura e Ouchi (2003); Tutikian e Dal Molin (2015): melhoria do desempenho e da durabilidade da estrutura devido à eliminação de defeitos na concretagem; eliminação da etapa de vibração; melhoria no acabamento superficial; rapidez e facilidade no lançamento do concreto na estrutura; redução da mão de obra no canteiro, melhoria nas condições de trabalho e de segurança nas obras, uma vez que este tipo de concreto reduz o risco de queda, a exposição ao sol e os problemas ergonômicos e de audição dos trabalhadores; possibilidade de uso de resíduos de outras indústrias como finos, tais como o pó-de-pedra, sílica ativa, cinza volante e cinza de casca de arroz; pode reduzir o custo final do concreto e/ou da estrutura, entre outras.

2.1.1 Concreto autoadensável no estado fresco

A mistura do CAA é fortemente dependente da composição e das características de seus constituintes no estado fresco. Segundo Repette (2005), é no estado fresco que se pode perceber as diferenças do concreto convencional para o concreto autoadensável. Segundo a NBR 15823 (ABNT, 2017), os requisitos mínimos para obtenção de um CAA são estabelecidos com o intuito de apresentar alta capacidade de fluxo e uma estabilidade reológica da mistura, de modo a garantir, simultaneamente, as três características essenciais: fluidez ou habilidade de preenchimento, habilidade passante em fluxo livre ou confinado e resistência à segregação ou estabilidade.

A fluidez ou habilidade de preenchimento consiste na capacidade do concreto autoadensável de fluir dentro da fôrma e preencher todos os espaços, passando por entre as armaduras sem obstrução do fluxo ou segregação. A habilidade de passagem é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de passar por entre obstáculos, como: armaduras, diminuições de seções e aberturas e seções estreitas, sem que haja obstrução do fluxo. Os mecanismos que governam essa propriedade são: viscosidade da pasta e da argamassa e as características dos agregados. A estabilidade ou a resistência à segregação é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de evitar a segregação de seus componentes, como a separação do agregado graúdo dos demais componentes do concreto. Essa propriedade garante a homogeneidade do concreto durante as etapas de mistura, transporte e lançamento, sem que ocorra segregação por afundamento dos agregados ou ascensão da água em excesso da mistura (exsudação) no concreto colocado nas fôrmas (GOMES; BARROS, 2009; REPETTE, 2011).

Para o concreto adquirir a autoadensabilidade adequada é necessário que, além dos três requisitos supracitados, tenha uma boa trabalhabilidade da mistura. A ASTM C 125- 16^a (2016) define trabalhabilidade como sendo a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma determinada quantidade do concreto fresco com o mínimo de perda de homogeneidade da mistura.

Em tecnologia do concreto, a trabalhabilidade tem que ser respeitada para cada tipo de concreto, pois esta é uma característica-chave que afeta a capacidade de uma execução adequada. Uma mistura de concreto que não possa ser lançada com facilidade ou plenamente adensada, provavelmente, não apresentará as características esperadas de resistência e durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A avaliação da trabalhabilidade do CAA é feita mediante a determinação da consistência e verificação da coesão do concreto fresco. Dentre os principais parâmetros que modificam a trabalhabilidade do concreto estão: teor de água, teor de cimento, proporção de agregados, teor de finos, adição mineral, teor de aditivo superplastificante, entre outros (SOROKA, 2004; KHATIB, 2008; DINAKAR; KARTIK; SHARMA, 2013).

A trabalhabilidade do concreto não é dependente apenas da umidade do agregado, mas também das características dos materiais, tal como a distribuição granulométrica dos agregados (DING; AN, 2017). Assim sendo, operações de transporte, lançamento e adensamento devem ser executadas com base nas características dos constituintes e no adequado proporcionamento da mistura, além das condições locais que estão expostos.

Fung (2010) considera que as características físicas de maior relevância no controle da trabalhabilidade ou da autoadensabilidade de diferentes materiais cimentícios são a densidade de empacotamento e a área superficial dos sólidos do sistema de partículas. A densidade de empacotamento pode ser entendida como a relação entre a massa de uma amostra em um dado volume. Segundo Castro e Pandolfelli (2009), a distribuição granulométrica das partículas afeta a densidade de empacotamento das partículas, pois determina o volume de vazios a serem preenchidos por pasta de cimento. Assim sendo, é interessante o seu conhecimento para uma maior otimização dos constituintes durante a dosagem do concreto. Outro parâmetro físico que pode alterar as propriedades do concreto no estado fresco é a área superficial total do sistema das partículas sólidas. O aumento do teor de partículas finas necessita maior quantidade de água na mistura para completar a hidratação e garantir uma melhor fluidez devido à elevada superfície específica desses materiais.

2.1.2 Concreto autoadensável no estado endurecido

A EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems) considera parecidas as propriedades no estado endurecido entre CAA e concreto convencional, limitando as diferenças à forma de produção e dosagem do material, pois no CAA é imprescindível a utilização de adições, menores valores de diâmetro máximo do agregado graúdo e o uso de aditivos superplastificantes.

A avaliação do CAA no estado endurecido é a mesma realizada para o concreto convencional. Assim sendo, tais propriedades são determinadas através de ensaios de corpos de

prova que analisam sua resistência à compressão axial, resistência à tração, resistência à flexão, módulo de deformação, ascensão capilar, entre outros (GOMES, 2002).

Alguns fatores influenciam fortemente as propriedades do concreto no estado endurecido, dentre eles estão: dimensões e mineralogia dos agregados, presença de adições minerais, aditivos e composição do concreto (MOLUGARAM; SHANKER; RAMESH, 2014; ALMEIDA, 2006). Desse modo, a combinação desses fatores no CAA faz com que o material apresente uma microestrutura mais homogênea, com uma porosidade mais refinada quando comparada a concretos convencionais, podendo garantir boas características de durabilidade.

A resistência à compressão é, geralmente, a propriedade mais importante do concreto no estado endurecido. Os CAA geralmente apresentam resultados melhores em relação ao concreto convencional com os mesmos materiais e de mesma relação água/cimento, sendo favorecida pelas baixas relações água/finos, e pelo emprego de aditivos superplastificantes.

O concreto, por ser um material heterogêneo e multifásico, tem-se a sua massa específica, a fração volumétrica, a densidade e o módulo dos componentes, além das características da zona de transição na interface, como os fatores determinantes no seu comportamento elástico (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Repette (2011) salienta que a variação do módulo de elasticidade depende, entre outros fatores, do nível de resistência do concreto e da sua composição, não sendo possível fazer uma comparação generalizada.

O incremento de adição fina e o uso de aditivo superplastificante, associada à menor quantidade de agregados graúdos acarreta em valores mais baixos para o módulo de elasticidade do CAA (HOLSCHEMACHER, 2004). Domone (2007) observou um decréscimo do módulo de elasticidade de CAA de 40% em relação ao concreto convencional para classes de baixa resistência à compressão.

Uma boa dosagem do CAA é importante para manutenção das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto autoadensável no estado endurecido. Segundo Tutikian e Dal Molin (2015), esse tipo de concreto apresentará fissuração de secagem e alto calor de hidratação se for dosado com alto consumo de cimento; terá sua pega inicial retardada se o teor do aditivo superplastificante for excessivo; terá seu módulo de elasticidade baixo e uma grande probabilidade de retração plástica, se for dosado com baixo consumo de agregado graúdo.

2.1.3 Materiais constituintes do concreto autoadensável

O concreto autoadensável é constituído pelos mesmos materiais utilizados na produção de concretos convencionais: cimento, agregados e água, porém, com aditivos químicos e uma maior quantidade de materiais finos (adições minerais ou fílers inertes).

2.1.3.1 Cimento

O cimento empregado na confecção do CAA é o mesmo conferido aos concretos convencionais, de acordo com as suas atribuições quanto ao uso adequado desse material. A especificação do cimento a ser utilizado é dependente do alcance das propriedades fundamentais do CAA, visto que as características físico-químicas do cimento influenciam na sua hidratação. Para Tutikian e Dal Molin (2015), não existem critérios científicos que especifiquem o cimento mais adequado para o CAA. O melhor cimento é aquele que apresenta menores variabilidades em termos de resistência à compressão (GIRARDI, 2014).

Em geral, cimentos com maior superfície específica são mais utilizados, pois maior será sua viscosidade plástica, uma vez que a distância entre as partículas é reduzida e, conseqüentemente, com melhor empacotamento dos grãos. Assim, os cimentos com maior finura são mais indicados por promoverem maior coesão à mistura, apesar de demandarem maior quantidade de superplastificante. Este efeito provoca um aumento na fluidez, pela diminuição da tensão de cisalhamento (NUNES, 2001; REPETTE, 2011).

Os cimentos têm grande influência nos parâmetros reológicos dos CAA, haja vista que estes são controlados, principalmente, pela finura e pela quantidade de C_3A presente nos cimentos. Assim sendo, quando menor for o teor de C_3A , mais fácil será o controle reológico do concreto, pois esse composto é responsável pela pega do cimento, ocasionando perda de fluidez e prejudicando a aplicação do CAA (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015). Já no estado endurecido, tais características do cimento têm papel fundamental no ganho de resistência à compressão e na durabilidade do material (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A EFNARC (2002) recomenda um consumo de cimento entre 350 a 500 kg/m³. O consumo superior a 500 kg/m³ pode aumentar a retração e o uso inferior a 350 kg/m³ pode levar a uma mistura com poucos finos, acarretando em uma baixa resistência à segregação, exceto em caso de substituição do cimento por outro material cimentício.

2.1.3.2 Agregados

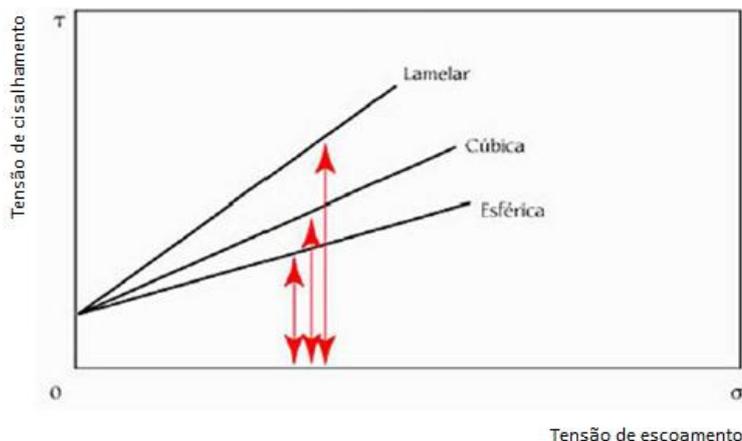
Assim como para os cimentos, os agregados utilizados para confecção do CAA são os mesmos empregados em concretos convencionais, porém, alguns cuidados devem ser levados em consideração. Diante disso, devem-se buscar agregados com módulo de finura menor, como agentes de controle de viscosidade. Segundo Melo (2005), o volume total de agregados, assim como a proporção entre os agregados graúdo e miúdo, exercem grande influência nas propriedades reológicas do concreto.

O conhecimento do espaçamento entre barras é importante para especificação do agregado graúdo, de modo a garantir o fluxo contínuo do concreto por entre as armaduras e, conseqüentemente, a resistência à segregação. O tamanho e a forma do agregado graúdo influenciam diretamente a fluidez e a habilidade passante do CAA. Quanto mais esféricas as partículas dos agregados, menor a chance de haver “bloqueios” e maior a fluidez da mistura, uma vez que há uma redução do atrito interno da mistura (COUTINHO, 2011). Repette (2011) recomenda o uso de agregados com dimensão máxima de 9,5 mm, com possibilidade de utilização de agregados graúdos de até 19 mm, uma vez conhecida a abertura entre barras.

Os agregados miúdos, de forma geral, utilizados para concretos convencionais também são adequados para concretos autoadensáveis, entre eles estão as areias naturais (depósitos eólicos e beira de rio) e as areias obtidas de processos industriais (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015). As características desses agregados são fatores importantes para obtenção de um concreto de qualidade. Desta forma, as areias naturais são mais recomendadas para dosagem do CAA, pois são mais arredondadas, lisas e com granulometria contínua quando comparadas as areias de britagem que apresentam composição granulométrica com descontinuidades e são mais angulosas e ásperas, o que causa um maior intertravamento das partículas e maior adsorção de água, aumentando a demanda por pasta e aditivos na composição do concreto (SCHANKOSKI, 2017).

Segundo Okamura e Ouchi (2003), quanto maior o ângulo da partícula, maior será a resistência ao cisalhamento da argamassa, reduzindo a possibilidade de deformação do concreto. A Figura 1 mostra a relação entre a forma do agregado miúdo e a resistência ao cisalhamento do CAA.

Figura 1 - Relação entre forma do agregado miúdo e resistência ao cisalhamento do CAA



Fonte: Okamura; Ouchi (2003) - Adaptado

O CAA é um concreto que necessita da adição de finos para uma melhor coesão, portanto, quanto mais fino o agregado miúdo for, maior será a área superficial em contato com a água, aumentando, assim, a frequência de colisão entre elas, e reduzindo a tensão de escoamento (TUTIKIAN, 2007). Além disso, a utilização de areias muito grossas, com módulo de finura superior a 3,0, pode causar a segregação da mistura e, assim sendo, devem ser evitadas (OKAMURA; OUCHI, 2003).

2.1.3.3 Aditivos

O uso de aditivos no concreto já é bastante difundido em todo o mundo. Diversos são os tipos de aditivos existentes, com composições químicas diferenciadas e, conseqüentemente, produzindo efeitos variados sobre o concreto. Os aditivos mais comumente utilizados em concretos são os redutores de água ou plastificantes, superplastificantes, incorporadores de ar, aceleradores de pega, retardadores de pega e modificadores de viscosidade (VMA).

Para o concreto autoadensável são usados dois tipos principais de aditivos: os superplastificantes e os modificadores de viscosidade. O uso de aditivo superplastificante é essencial para garantir maior fluidez pela redução da tensão de escoamento e, por vezes, o aditivo modificador de viscosidade para ajudar na estabilidade da mistura (MELO, 2005).

Aditivos superplastificantes são incorporados ao concreto com a finalidade de reduzir a quantidade de água na mistura, mantendo ou aumentando a fluidez e são feitos à base de polímeros sintetizados que dão ao concreto a característica de alta fluidez na mistura (AÏTCIN; SANTOS, I. L. Uso de Finos de Resíduos de Construção e Demolição em concreto autoadensável. Dissertação de Mestrado- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI). Porto Alegre, 2018.

JOLICOEUR; MACGREGOR, 1994; HARTMANN, 2002). Esses aditivos podem ser classificados em quatro categorias de acordo com sua composição química: Lignossulfonatos Modificador (LS), que incorporam ar e retardam a pega do cimento; Naftaleno Sulfonato (NS), que não incorporam ar e não interferem no tempo de pega do cimento; Melamina Sulfonato ou Melamina (MS), que apresentam uma tendência a retardar a pega e incorporar uma pequena quantidade de ar no concreto e, por fim, os Policarboxilatos (PC), são os aditivos mais utilizados para a produção do concreto autoadensável, por serem de alto desempenho e terem caráter de dispersão e desfloculação das partículas do cimento, ocasionando assim uma redução de água na mistura em até 40% mantendo a mesma trabalhabilidade (HARTMANN, 2002).

O aumento da fluidez é atribuído ao aumento da dispersão das partículas de cimento, causado pela adsorção do superplastificante na superfície do cimento seco ou hidratado que ocasiona mudança da carga elétrica e, conseqüentemente, a repulsão entre partículas (ALMEIDA FILHO, 2006). Desta forma, as partículas de cimento são distribuídas na solução aquosa, minimizando a quantidade de água necessária para que estas fiquem dispersas, o que conduz a uma maior fluidez do concreto (RONCERO, 2000).

Além dos aditivos superplastificantes, outro aditivo que pode ser utilizado nos CAA é o modificador de viscosidade. Esse aditivo é formado a partir de derivados da celulose e polissacarídeos que, quando adicionado ao concreto, oferece um aumento da coesão da massa no estado fresco, atuando como agente no controle da segregação e exsudação da mistura, uma vez que aumenta a tensão de cisalhamento, garantindo assim uma maior viscosidade para a pasta de cimento (LEITE, 2007).

Esse aditivo melhora significativamente as propriedades reológicas dos concretos, devido a sua ação dispersora, propiciando uma melhor fluidez, sem segregação, com número relativamente baixo de finos adicionados a mistura. A sua ação ocorre por meio da dispersão de água, fazendo com que as cadeias poliméricas absorvam a água livre presente no concreto (MELO, 2005).

De acordo com a EFNARC (2005), o VMA aumenta a viscosidade plástica (medida da taxa de fluxo do material), mas geralmente provoca um pequeno aumento da tensão de cisalhamento (força necessária para o movimento do concreto) e que é compensado pelo aditivo superplastificante quando necessário.

2.1.3.4 Água

Os requisitos de quantidade de água para o CAA são os mesmos considerados para o concreto convencional. A água é o parâmetro mais importante no controle das propriedades do concreto fresco e endurecido. A quantidade de água em uma mistura depende de vários fatores, tais como: propriedades dos agregados, tipo de cimento, quantidade total de partículas finas na mistura, uso de adições ou aditivos e outros (GOMES; BARROS, 2009). Em uma mistura, a quantidade de água é dividida basicamente em quatro partes: uma para a hidratação do cimento, uma para absorção e adsorção dos agregados e materiais finos, uma para preencher a porosidade do esqueleto granular e uma para garantir a fluidez do concreto (ALMEIDA FILHO, 2006).

A tensão de cisalhamento do concreto também sofre influência da quantidade de água presente na mistura, em que o incremento do teor de água ocasiona um aumento da deformabilidade e uma diminuição da viscosidade do concreto (LEITE, 2007). No entanto, um elevado teor de água pode provocar segregação dos agregados, devido às forças predominantemente gravitacionais que atuam sobre estes, acarretando na redução da homogeneidade e da resistência mecânica (GOMES; BARROS, 2009). Para garantir a alta fluidez do CAA, sem afetar negativamente suas propriedades, parte da água pode ser substituída por superplastificantes (CAVALCANTI, 2006).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2015), o controle de umidade do agregado miúdo deve ser rigoroso, pois aferições erradas da umidade dos agregados é a principal causa de variação de fluidez da mistura, além de alterar as propriedades mecânicas e de durabilidade do CAA.

2.1.3.5 Finos

Os materiais finos são um dos tópicos interessantes e desafiadores a serem estudados para desenvolver ainda mais a tecnologia, otimizar a composição, melhorar a técnica de produção e melhorar a relação custo/benefício dos concretos autoadensáveis (SKARENDAHL; PETERSSON, 2000).

O CAA necessita de materiais finos em sua composição, pois esses são responsáveis pela coesão e resistência à segregação do concreto. Diversas adições minerais utilizadas na produção de concretos são subprodutos industriais, gerados em grandes quantidades e descartados em aterros, causando sérios problemas de cunho ambiental. Entretanto, o uso desses resíduos como

materiais finos, em pasta, argamassas e concretos, em sua grande maioria, proporciona uma melhora nas propriedades do estado fresco e endurecido do CAA (GOMES, 2002). Dentre os finos mais utilizados em CAA estão: areia fina, fíler calcário, cinza volante, cinza da casca de arroz, escórias, finos de pedra britada, finos basálticos, entre outros.

Com relação à dimensão dos grãos, a NBR 9935 (2011) denomina de fíler todo material granular que passa na peneira de malha 150 μm (#100 mesh); e de material pulverulento as partículas com dimensão inferior a 75 μm . Já a EFNARC (2005) considera finos os materiais com partículas menores que 0,125 mm, sendo indicado que mais de 70% tenham dimensões menores que 0,063 mm. Repette (2011) recomenda que sejam considerados finos as partículas menores que 0,150 mm e que 75% sejam passantes na peneira 0,075 mm.

A adição de finos promove melhoria em diversas propriedades do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido. A grande quantidade de finos é usada para reduzir a frequência de colisão entre as partículas, aumentando a viscosidade da mistura, consequentemente resultando em uma menor segregação (SIDDIQUE; KUNAL, 2015). Esses materiais atuam como pontos de nucleação, tornando a reação das partículas de cimento com a água mais rápida, proporcionando ganhos de resistência mecânica nas primeiras idades. Além disso, o empacotamento de grãos finos faz com que haja um aumento na densidade da pasta, dificultando a penetração de agentes agressivos e melhorando a zona de transição (BOSILJKOV, 2003; TUTIKIAN, 2004).

Dal Molin (2005) descreve duas formas de ocorrência do efeito físico das adições minerais. A primeira é chamada de efeito microfíler e ocorre devido ao tamanho reduzido das partículas das adições minerais, que permite que estas preencham os espaços vazios existentes entre as partículas do cimento e os produtos de hidratação. A segunda está associada ao refinamento da estrutura dos poros e dos produtos de hidratação, causada pelas pequenas partículas das adições que agem como pontos de nucleação para os produtos de hidratação. Assim, há a formação de cristais de C-S-H nos poros ocupados pelas adições e pela água, e não somente a partir dos grãos de cimento.

A finura do fíler é parâmetro importante no controle das propriedades do CAA, desta forma é fortemente estudado por diversos pesquisadores em todo o mundo. Materiais ultrafinos são bem vistos pelo fato de otimizar o CAA, aumentando a viscosidade do concreto no estado fresco, mas sem diminuir a fluidez (XIE et al., 2002). A utilização de cinza volante ultrafina leva uma melhoria das propriedades mecânicas do CAA, como baixa permeabilidade, pouca retração e alta durabilidade (ALMEIDA FILHO, 2006).

A morfologia e o tamanho de partícula dos finos desempenham um papel importante na fluidez e na trabalhabilidade dos CAA. Esping (2008) estudou a influência da superfície específica em concretos ao aumentar de 2000 m²/kg para 6000 m²/kg a superfície específica do fíler calcário. Tal acréscimo resultou em um aumento da viscosidade de 35 Pa.s para 50 Pa.s e no dobro da tensão de escoamento. Segundo Yahia, Tanimura e Shimoyama (2005) este incremento na superfície específica pode levar a um maior consumo de água na mistura.

Patel *et al.* (2004) utilizaram cinza volante como adição mineral para produção de CAA e tiveram como resultado a redução do consumo de aditivo superplastificante para alcançar o espalhamento desejado. No estudo, para a porcentagem de massa de 55 a 60%, em massa de cinza em relação ao total de finos, houve redução na resistência à compressão na idade de 1 dia, principalmente para o teor de 60% de substituição. Contudo, nos requisitos de durabilidade foi observado redução na permeabilidade e retração por secagem.

O emprego de outros tipos de resíduos como adições minerais em concreto, especialmente em concreto autoadensável está cada vez mais evidente nos últimos anos. Dentre eles pode-se destacar o resíduo do corte de blocos cerâmicos, apresentado por Diniz (2005), resíduo de corte de rochas ornamentais, como mármore e granito, apresentado por Cavalcanti (2006), além da escória de aciaria da produção do aço em conversores LD (CALMON *et.al.*, 2007).

2.1.4 Ensaios do concreto autoadensável no estado fresco

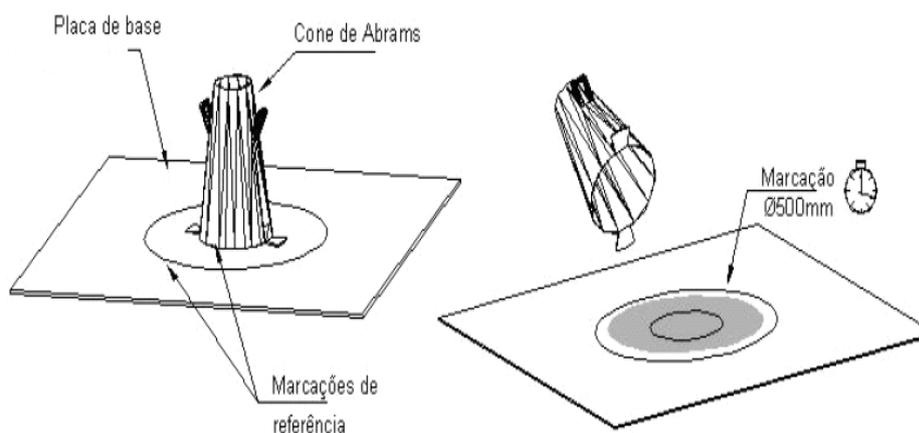
As propriedades do CAA no estado fresco são determinadas através de diversos ensaios de caracterização preconizadas pela NBR 15823 (ABNT, 2017). Os principais ensaios e parâmetros de dosagem que podem influenciar a obtenção de um concreto autoadensável estão descritos a seguir.

2.1.4.1 Slump Flow

O Slump Flow, também conhecido como ensaio de espalhamento, é o mais utilizado e o mais simples ensaio de caracterização do CAA. Segundo Gettu *et. al.* (2004) este ensaio foi adotado no Japão em 1990 como norma JSCE-F503 e recomendado pela EFNARC em 2005. O objetivo principal deste ensaio é medir a capacidade do concreto autoadensável de fluir, apenas pela ação do seu peso próprio, sem segregar. A fluidez do CAA é medida através do diâmetro médio da amostra após a retirada do tronco de cone, conforme mostra a figura 2.

O referido ensaio é utilizado também para determinar a consistência do CAA, sendo um dos principais fatores que influenciam na trabalhabilidade desse concreto. Assim sendo, o valor do Slump flow é influenciado pelo consumo de água do concreto, volume de finos e pelo tipo e teor de aditivo superplastificante incorporado à mistura (EFNARC, 2005).

Figura 2- Slump Flow



Fonte: NBR 15823 - Parte 2 (ABNT, 2017)

A classificação do CAA quanto ao escoamento é mostrada na tabela 1.

Tabela 1- Classificação do CAA de acordo com o ensaio Slump Flow

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

Fonte: NBR 15823- Parte 1 (ABNT, 2017)

A verificação do espalhamento do concreto autoadensável é o principal ensaio de recebimento em obras, a fim de se conferir se o produto está dentro das especificações desejadas.

2.1.4.2 Slump Flow T₅₀ cm

Este ensaio é o mesmo slump flow apresentado anteriormente, com os mesmos procedimentos de execução, porém, a avaliação é diferenciada, uma vez que neste ensaio é

medido o tempo que o concreto leva para atingir o espalhamento de 50 cm de diâmetro, permitindo avaliar, além do espalhamento, a viscosidade da mistura (TREGGER *et al.*, 2012).

Devido o slump flow T_{50} cm ser uma variação do slump flow, qualquer material que venha a alterar os resultados de espalhamento do CAA, também influenciará no slump flow T_{50} cm. Para concretos com alta fluidez e baixa viscosidade apresenta-se valores menores de espalhamento T_{50} cm. A classificação dos concretos de acordo com o slump flow T_{50} cm é observada na tabela 2.

Tabela 2- Classe de viscosidade plástica obtida através do slump flow T_{50} cm.

Classe	T_{50} cm S	Método de ensaio
VS 1	≤ 2	ABNT NBR 15823-2
VS 2	> 2	

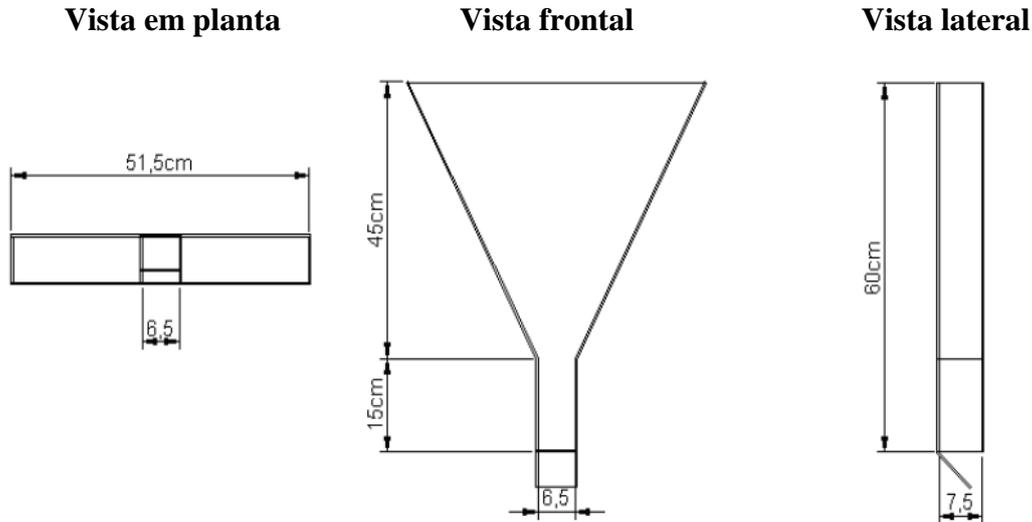
Fonte: Adaptado NBR 15823 - Parte 1 (ABNT, 2017)

2.1.4.3 Método do Funil V

Este ensaio consiste na determinação da viscosidade aparente do CAA, pela medida do tempo de escoamento de uma massa de concreto através do funil V (Figura 3). Assim como observado no ensaio slump flow T_{50} cm, a NBR15823 - Parte 5 (ABNT, 2017) classifica o CAA por meio da viscosidade plástica obtida pelo tempo de escoamento, conforme mostra a tabela 3.

Como visto no tópico sobre o ensaio slump flow T_{50} cm, o tempo de escoamento sofre grande influência do consumo de água e do teor de materiais finos presentes na mistura. Assim, CAA com consumo de água inferior a 180 l/m^3 tende a ser muito mais viscoso e, conseqüentemente, seu tempo de escoamento será maior. Essa característica também é observada quando o consumo de finos (cimento, adições e material pulverulento dos agregados) passa de 500 kg/m^3 (DACZKO, 2012).

Figura 3- Funil V



Fonte: NBR 15823- Parte 5 (ABNT, 2017)

Tabela 3- Classe de viscosidade plástica aparente pelo funil-V

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

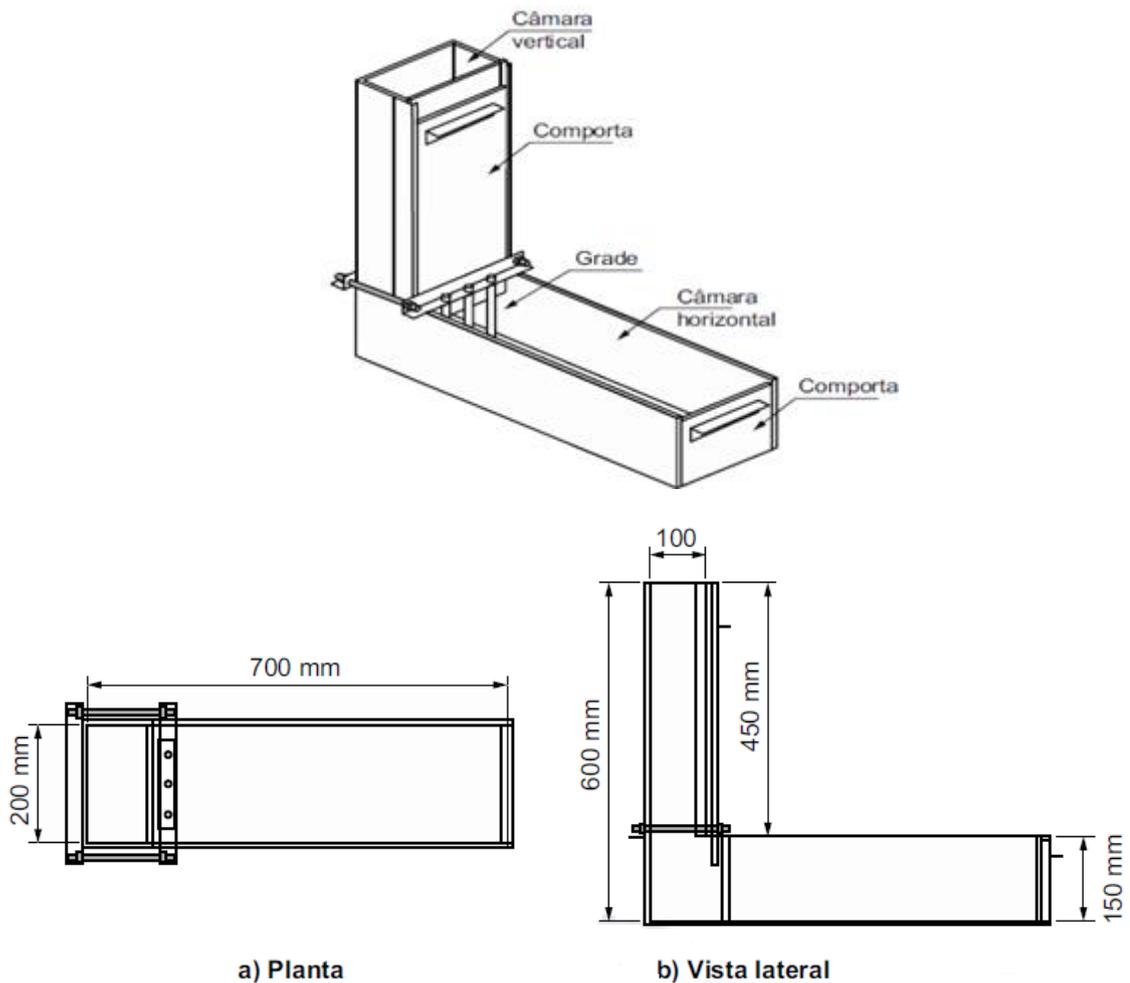
Fonte: NBR 15823- Parte 1 (ABNT, 2017)

2.1.4.4 Método da Caixa L

Este ensaio é utilizado para avaliar a fluidez do CAA com a capacidade de passar por obstáculos de forma coesa e sem apresentar segregação.

O equipamento necessário para este ensaio consiste em uma caixa de seção retangular com perfil em L (Figura 4), com uma comporta na base da parte vertical do L com duas ou três barras metálicas lisas com diâmetro de $(12,5 \pm 0,2)$ mm equidistantes entre si e em relação às laterais da caixa L, que simulam a armação de uma estrutura real. O espaçamento entre as barras é de (58 ± 1) mm para o caso de duas barras e de (40 ± 1) mm para o caso de três barras. Segundo Nguyen, Roussel e Coussot (2006) é importante salientar que o diâmetro das barras de aço e o espaçamento entre elas, no ensaio, dependem basicamente das condições reais da estrutura em que o concreto será aplicado.

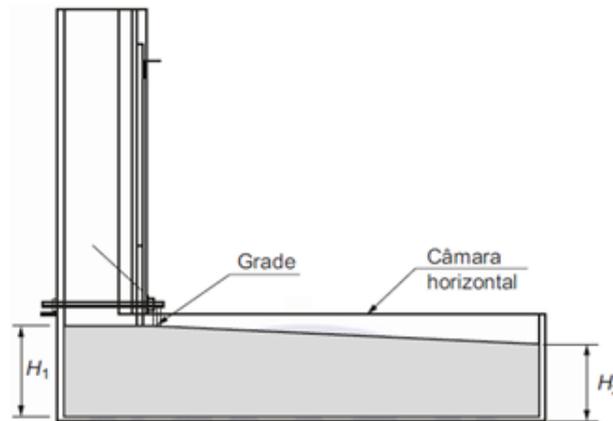
Figura 4- Caixa- L



Fonte: NBR 15823 -Parte 4 (ABNT, 2017)

Para a execução do ensaio, deve-se preencher a parte vertical da caixa com concreto sem qualquer compactação, e deixá-lo repousar de 30 a 60 segundos. Posteriormente, deve ser efetuada a abertura da comporta de forma rápida, uniforme e sem interrupção, permitindo o escoamento do concreto para a câmara horizontal, atravessando as barras verticais. Depois de cessar o fluxo, medem-se as alturas H_1 e H_2 (figura 5), em milímetros, e calcula-se a relação H_2/H_1 . Esta relação é chamada de razão de bloqueio e indica a facilidade do concreto em escoar e passar por restrições impostas pelas barras de aço (REPETTE, 2005). Um dos critérios de aceitação recomendado pela maioria dos pesquisadores é adotar valores que fiquem entre 0,80 e 1,00 (NBR 15823, 2017; GOMES, 2002; REPETTE, 2005; NGUYEN; ROUSSEL; COUSSOT, 2006).

Figura 5- Indicação das alturas H1 e H2



Fonte: NBR 15823-Parte 4 (ABNT, 2017)

Desta forma, a distribuição granulométrica dos constituintes do concreto, a fim de permitir que a argamassa carregue os agregados graúdos por entre as barras de aço, resultando em um material homogêneo por toda a extensão do equipamento, é um critério de suma importância para avaliação das propriedades do CAA. Uma granulométrica inadequada acarretará uma viscosidade incompatível com o propósito do concreto autoadensável e, por conseguinte, alterações reológicas que repercutem no desempenho a longo prazo do material, tais como efeito parede, heterogeneidades na distribuição dos constituintes, preenchimento inadequado das formas, entre outras (CINCOTTO *et. al.*, 2007).

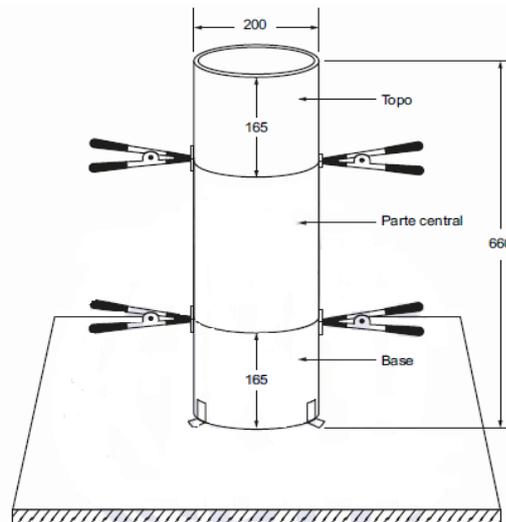
2.1.4.5 Coluna de Segregação

A resistência à segregação pode ser determinada por meio do método de ensaio denominado de coluna de segregação, que consiste na diferença das massas de agregado graúdo existente no topo e na base da coluna de segregação (Figura 6). O aparato constitui-se de um tubo de PVC, de diâmetro nominal de 200 mm e 660 mm de altura total, dividido em três seções. O topo e a base devem ter alturas de 165 mm e a parte central deve ter altura de 330 mm. As três partes devem ser unidas de maneira que não ocorra vazamento de concreto durante a execução do ensaio NBR 15823 – Parte 6 (ABNT, 2017).

O tempo de preenchimento da coluna não deve ser superior a 5 minutos e, aproximadamente 20 minutos após a moldagem, devem ser retiradas as porções de concreto do topo e da base, procedendo a lavagem e peneiramento (com abertura da malha de 5 mm) da mistura, de forma a remover totalmente a argamassa, permanecendo somente os agregados

graúdos. Esses agregados são pesados, obtendo-se as massas m_B e m_T para cada amostra NBR 15823 - Parte 6, (ABNT, 2017).

Figura 6- Coluna de segregação



Fonte: NBR 15823- 6 (ABNT, 2017)

Segundo a NBR 15823 – Parte 6 (ABNT, 2017), a porcentagem de segregação é calculada através da Equação 1. As classes de resistência à segregação do CAA estão expressas na tabela 4.

$$SR = [2(m_B - m_T)/(m_B + m_T)] \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

SR: resistência à segregação do concreto (%);

m_B : massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retirada da base da coluna (em gramas);

m_T : massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retirada do topo da coluna (em gramas)

Tabela 4- Classificação de resistência à segregação pela coluna de segregação

Classe	Coluna de segregação (%)	Método de ensaio
SR1	≤ 20	ABNT NBR 15823-6
SR2	≤ 15	

Fonte: adaptado NBR 15823- Parte 1 (ABNT, 2017)

2.2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), os resíduos de construção e demolição são provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassas, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, entre outros.

O uso de RCD começou a ser expandido após a Segunda Guerra Mundial com o objetivo de reconstruir as cidades que foram devastadas e, devido à falta de área de destinação dos grandes volumes de resíduos e a escassez de matéria prima, os RCD foram reaproveitados como agregados para a produção de concretos (KHALAF; DEVENNY, 2004). Porém muito antes, na época da Roma Antiga, tais resíduos já haviam sido utilizados como matérias primas (MYMRIN; CORREA, 2007).

No Brasil, o ponto de partida da gestão de resíduos de construção e demolição foi a Resolução nº 307 baixada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente em 2002, a qual estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Tal resolução visa à elaboração de um diagnóstico da situação dos resíduos gerados pelos construtores, com a finalidade de reduzir os impactos ambientais inerentes à construção civil.

Em 02 de agosto de 2010 foi sancionada a Lei Federal Nº 12.305, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS). A Lei regulamenta os princípios, objetivos e instrumentos, bem como as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, dentre eles o resíduo de construção civil, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis (BRASIL, 2010).

O sistema de logística reversa é também tratado como instrumento de desenvolvimento econômico e social da PNRS, caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Um dos objetivos da PNRS é a não geração de resíduos, seguida da redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos mesmos, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Assim, para alcançar seus objetivos, dentre os instrumentos utilizados pela PNRS,

destaca-se a pesquisa científica e tecnológica, reforçando o papel da comunidade acadêmica na solução ou minimização dos problemas ambientais.

Os resíduos de construção e demolição são geralmente classificados como materiais inertes e podem ser potencialmente usados como materiais de construção (KABIR; AL-SHAYEB; KHAN, 2016). Assim, existe um empenho por parte da comunidade científica em desenvolver estudos sobre o uso de RCD para diversos fins.

De acordo com a resolução nº 307 do CONAMA (2002) os resíduos podem ser classificados em quatro classes: Classe A, resíduos reutilizados ou recicláveis como agregados provenientes de construção, demolição, reforma e reparos; Classe B, resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso; Classe C, resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação e, Classe D, resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

2.2.1 Composição

Nas usinas de reciclagem, os resíduos de construção e demolição são comumente classificados, visualmente, conforme a coloração da sua fração mineral, com o objetivo de melhorar a qualidade do agregado reciclado produzido. Assim, existem dois tipos de resíduos de construção e demolição: cinza e vermelho. De acordo com Ângulo (2005), o RCD mineral cinza é composto de materiais de construção com base cimentícia e é empregado preferencialmente em blocos de concreto, calçadas e mobiliários urbanos à base de cimento, além de bases de pavimentação. Já a fração de RCD mineral vermelho é predominantemente composta por materiais de construção de natureza cerâmica, especialmente do tipo vermelha, e é empregada, na maioria dos casos, em atividades de pavimentação.

Na construção civil existem diversas formas de execução e uma infinidade de materiais que são empregados nas obras de engenharia. Assim sendo, a composição do RCD é bastante variável de um lugar para o outro, pois são dependentes das técnicas construtivas adotadas, podendo interferir no seu aproveitamento pela indústria. No Brasil, a origem principal é a mista (concreto, argamassa e alvenaria), assim como em muitos países europeus (ULSEN, 2011).

Para Cabral (2007), os constituintes dos resíduos de construção e demolição são, em média, 65 % de restos de argamassa, concreto e material cerâmico.

Em estudo realizado na cidade de Fortaleza/CE, Lima e Cabral (2013) identificaram que 93,4% dos Resíduos da Construção Civil (RCC) são classificados como resíduos de classe A. A composição gravimétrica mostrou que os RCC de Fortaleza/CE são compostos, em média, por 24,6% de areia e solo, 22,0% de argamassa, 15,6% de concreto, 14,3% de cerâmica vermelha, 10,4% de tijolo branco, 6,3% de cerâmica de revestimento, entre outros.

Uma das maiores dificuldades relacionadas à reciclagem desses resíduos refere-se à separação eficiente da fração representada pelos resíduos de concreto das demais fases presentes nos RCD (argamassa, cerâmica, madeira, plástico, entre outros), com o objetivo de atender as especificações normativas de agregados para a produção de concreto estrutural, as quais geralmente tratam do emprego de resíduos de concreto (BRANCO, 2012).

Essa enorme variabilidade dos agregados reciclados de RCD motiva a falta de confiança no uso desses materiais, uma vez que isso reflete diretamente nas características finais de desempenho e durabilidade dos produtos desenvolvidos a partir desses agregados (LOVATO, 2007). Desta forma, há a necessidade de intensificar o controle de produção desses agregados com o objetivo de minimizar essa variabilidade e garantir uma destinação mais adequada para esses materiais.

2.2.2 Agregados reciclados

Segundo John (2001), o próprio setor da construção civil possui grande capacidade de incorporar novos materiais, pois além de ser o maior responsável pela geração de resíduos, é também grande responsável pela reciclagem no Brasil e na maioria dos países.

Na construção civil, os materiais reciclados têm enorme potencial da utilização como agregado graúdo na produção de concretos. Os agregados ocupam de 65% a 70% do volume total do concreto (KOSMATKA E WILSON, 2011). Sem a alternativa de agregados reciclados, a indústria global de concreto consumiria de 8 a 12 bilhões de toneladas de agregados naturais anualmente. Tal consumo causaria a destruição do meio ambiente (TU *et.al.*, 2006). Com isso, tem se buscado alternativas para diminuir essa elevada demanda de recursos naturais, de modo a preservar o meio ambiente.

Os agregados reciclados são definidos como materiais granulares provenientes do beneficiamento de resíduos que apresentem características técnicas para a aplicação em obras

de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia (CONAMA, 2002).

A NBR 15.116 (2004) divide os agregados reciclados em dois tipos, de acordo com a porcentagem de fragmentos de concreto na sua fração graúda:

- a) **Agregado Reciclado de Concreto (ARC):** é o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composta na fração graúda, de no mínimo de 90%, em massa, de fragmentos à base de cimento Portland e rochas;
- b) **Agregado Reciclado Misto (ARM):** é o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda com menos de 90%, em massa, de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

Atualmente, diversas pesquisas têm sido realizadas utilizando agregados reciclados devido ao seu grande potencial de uso em estruturas de concreto (HUDA; ALAM, 2014). Segundo Fachini (2010), os resíduos de tijolos cerâmicos têm excelentes resultados quando utilizados em argamassas, enquanto os resíduos de concreto apresentam resultados mais satisfatórios como agregados reciclados para a produção de concreto.

Os resultados de diversos estudos apontam que é possível obter resistência e durabilidade frente à carbonatação e penetração de íons cloretos em concretos com agregados de RCD, em substituições parciais e até totais dos agregados naturais. Vieira (2003) concluiu que o uso de agregado reciclado misto no concreto, em proporções convenientemente dosadas, não reduz a durabilidade frente à penetração de íons cloretos quando esses concretos são comparados aos concretos produzidos, exclusivamente, com agregados naturais.

Os agregados reciclados, oriundos dos resíduos gerados na construção civil, em geral apresentam massa específica menor, porém, com uma maior absorção de água em relação aos agregados provenientes da natureza. Diante disso, uma dosagem adequada é necessária a fim de se obter as qualidades desejadas para os concretos produzidos com agregados reciclados (LIN YH *et al.*, 2004).

2.2.3 Produção dos agregados reciclados

A produção dos agregados reciclados visa garantir benefícios de ordem ambiental, visto que reduz os resíduos gerados pelo setor. Para que isso seja possível, a obtenção dos agregados

recicladados requer um simples e bem definido processo de produção. Esta etapa consiste na cominuição da matéria-prima através de dois procedimentos: a britagem e/ou moagem do material, dependendo da granulometria do material (ÂNGULO, 2005).

A reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição, basicamente, envolve as seguintes etapas:

- a) britagem, que reduz as partículas por meio de ação mecânica externa como força de compressão (britagem por mandíbulas) ou impacto (britagem por impacto);
- b) peneiramento, utilizado para separar as partículas por seus tamanhos, podendo ser utilizados também classificadores que separam as partículas leves e finas (<0,15 mm) dos agregados reciclados e;
- c) catação, geralmente manual e visual, que separa a fração mineral da não mineral (retirada de contaminantes) e também a mineral em suas diferentes espécies, podendo esta ser realizada antes ou após a britagem.

As usinas brasileiras de reciclagem de RCD, de modo geral, possuem um processo de reciclagem bem semelhante às usinas de mineração utilizadas para produção de agregados naturais. Entretanto, algumas particularidades devido às características dos resíduos de construção e demolição, como a presença de materiais contaminantes, devem ser previamente eliminadas no processo. Esses resíduos possuem teores de cerâmica, argamassas e concretos porosos que podem variar, afetando a qualidade e o desempenho, já que a grande parte dos requisitos mecânicos depende da porosidade. Procedimentos para redução de variabilidade dos agregados reciclados são importantes; e o tipo de equipamento utilizado e a natureza do RCD podem influenciar em propriedades importantes do agregado, como a lamelaridade e teor de finos, e na viabilidade econômica da usina (MIRANDA *et al.*, 2009).

A britagem do material é realizada por intermédio de um britador de impacto ou por um britador do tipo mandíbula, sendo possível reduzir os agregados às dimensões desejadas. Buttler e Machado (2003) informaram que o processo de britagem utilizado em suas pesquisas determinou as características dos resíduos, a granulometria e a quantidade de argamassa aderida aos agregados.

O processo de britagem do RCD gera agregados graúdos e materiais finos. Contudo, estudos a respeito do uso de agregados reciclados são mais direcionados às parcelas graúdas, evitando o uso das frações finas, pois estas podem reduzir o desempenho mecânico do concreto (NENO, BRITO E VEIGA, 2014).

A produção do agregado reciclado de forma separada, conforme a origem do resíduo, pode garantir um melhor desempenho nas propriedades do concreto, pois se obtém um controle total das variáveis existentes nos agregados, garantindo uma maior homogeneidade do material. Leite *et. al.* (2011) dizem que o RCD composto em sua maioria por materiais cerâmicos resulta em um aumento na absorção de água quando comparado ao RCD de origem de concreto, influenciando diretamente as propriedades dos concretos (maior relação água/cimento, redução da resistência à compressão, resistência à tração, módulo, entre outros). Esse acréscimo na taxa de absorção de água dos materiais cerâmicos está relacionado ao deficiente controle do processo produtivo desse material, sendo responsável por grande variação na porosidade (DAMINELLI, 2007).

Carrijo (2005) utilizou resíduos mistos de RCD separados por categorias, menos porosos (argamassas e concretos) e mais porosos (cerâmica). A autora conclui que ocorre redução da resistência mecânica de concretos na medida em que aumenta a porosidade e reduz a massa específica, refletindo diretamente no aumento da relação água/cimento dos agregados reciclados.

2.3 FINOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Os agregados finos de RCD são gerados a partir do processo de beneficiamento do resíduo de construção e demolição, através da etapa de britagem desse material, objetivando a produção do agregado graúdo e miúdo reciclado de RCD. Estima-se que 15 a 25% de massa total dos agregados reciclados gerados na cominuição desses resíduos são de finos (MURTAZAEV et al., 2015).

A maioria das pesquisas nacionais e internacionais sobre o uso de agregados reciclados é voltada para a fração graúda, com um número relativamente baixo de trabalhos que utilizam agregados finos de RCD. Segundo Carneiro et. al. (2001), deve-se evitar a utilização da fração menor que 2 mm do agregado reciclado para a produção de novos concretos, com a finalidade de evitar-se problemas relacionados com absorção de água, forma e textura superficial. A NBR 15116 (2004) limita o uso de agregados reciclados para o preparo de concreto sem função estrutural com partículas inferiores a 0,075mm, pois esses materiais podem ficar aderidos na superfície dos agregados miúdos e graúdos, prejudicando o desempenho desses concretos.

Apesar do uso de materiais finos no concreto convencional não ser recomendado, estes têm grande aceitação nos concretos autoadensáveis, pois a presença de finos se faz necessária

para que se alcancem as propriedades do mesmo, sendo responsáveis pelo controle da segregação e exsudação do concreto.

Subaşı, Öztürk e Emiroğlu (2017) utilizaram finos cerâmicos em CAA em substituição ao cimento, em teores de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, em massa. Os resultados evidenciam que houve uma melhora nas propriedades do estado fresco do CAA com o aumento do teor de finos cerâmicos na mistura. Entretanto, a resistência à compressão desse concreto não sofreu uma drástica redução até o teor de 15% de substituição de cimento por finos cerâmicos, mostrando que esses materiais podem ter potencial para uso em CAA, contribuindo para a reciclagem de resíduos sólidos e diminuindo a poluição ambiental.

A variabilidade das características dos finos de RCD tem grande influência no que tange à aplicação destes resíduos em concretos. Assim sendo, a caracterização desses agregados é de extrema necessidade ao se produzir concretos e deve ser baseada em critérios quanto à origem, forma, textura e granulometria.

O conhecimento da origem do material é importante para o controle das propriedades do concreto. Os agregados originários de um material cerâmico têm maior absorção de água quando comparados com aqueles oriundos de um material cimentício. Tal característica se deve ao fato do material cerâmico possuir uma maior porosidade em sua estrutura, além de, durante o processo de britagem, gerar uma maior quantidade de partículas finas, no qual eleva a sua superfície específica e, conseqüentemente, sua capacidade de absorção de água (MIRANDA; SELMO, 2006).

A absorção de água dos agregados reciclados é muito importante quando se estuda o seu uso em concretos, pois esta taxa interfere diretamente na relação água/cimento final das misturas. Além disso, se a absorção não for considerada, além da redução da relação a/c, haverá uma diminuição substancial da trabalhabilidade do material, deixando o concreto muito seco (PEDROZO, 2008).

A absorção de água dos agregados reciclados é dependente do tipo e da forma que estes são obtidos durante o beneficiamento. Nesse sentido, a etapa de cominuição associada à fragilidade dos materiais reciclados resulta em agregados finos com uma maior angularidade, em que associado aos poros abertos presentes na sua superfície acarreta na elevação da superfície específica, prejudicando a qualidade dos concretos, pois demanda maior consumo de água, o que afeta as propriedades tanto no estado fresco como no estado endurecido dos concretos (FUMOTO; YAMADA, 2002; ZEGA; DI MAIO, 2011).

Os diversos estudos que utilizaram os agregados finos de RCD como adição na produção de concreto divergem quanto aos resultados de resistência à compressão. Vários pesquisadores mostram em seus resultados que o uso de finos de RCD pode reduzir a resistência à compressão dos concretos. Segundo Evangelista e Brito (2010), quando se utilizou finos de agregados reciclados de concreto em substituição, em massa, a areia natural houve uma perda de 30% da resistência do concreto.

Dhir, Paine e Halliday (2008) verificaram que a substituição de 20% de areia por agregados finos reciclados de concreto na produção de concreto não influencia a resistência à compressão dos mesmos. Já Khatib (2005) percebeu uma redução da resistência à compressão de 30% quando se substituiu o agregado miúdo natural por agregado fino de concreto para o teor de substituição de 100%. Porém quando houve a substituição de 50 % do agregado miúdo por agregado fino cerâmico percebeu-se similaridade nos resultados obtidos com concreto de referência aos 28 dias. Contudo, para idades entre 28 e 90 dias houve um incremento da taxa da resistência do concreto contendo finos cerâmicos triturados, sendo tal fato atribuído à reação pozolânica causada pelos teores de sílica e alumina dos agregados cerâmicos com o produto de hidratação do cimento.

A britagem dos resíduos de construção e demolição gera agregados finos reciclados mais rugosos, com formas mais angulares e irregulares. Essa característica é a principal razão para a perda da trabalhabilidade do concreto no estado fresco quando mantida a mesma relação água/cimento na mistura (EVANGELISTA; BRITO, 2007; WANG, 2012).

A forma dos agregados tem um efeito importante na produção de concretos, principalmente no que tange à trabalhabilidade e à quantidade de água de amassamento da mistura, além de ser de suma importância para a compreensão dos efeitos que estes causam na viscosidade e na tensão de escoamento da mistura, pois podem influenciar na adsorção das partículas. Quanto mais arredondado ou cúbico for o grão do agregado, menor a demanda de água para um mesmo abatimento de tronco de cone e, conseqüentemente, menor a quantidade de pasta necessária para envolver os grãos e promover a mobilidade da mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

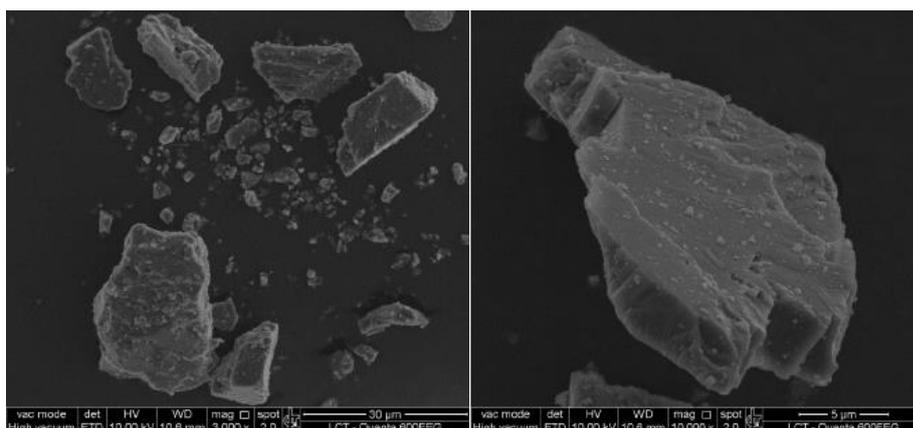
Leite (2001) acredita que os agregados reciclados possuem forma mais angular e taxa de superfície/volume maiores que os agregados naturais, conduzindo a uma maior fricção interna dos agregados reciclados, tornando a mistura mais coesa e requerendo maior quantidade de argamassa para melhorar a trabalhabilidade do concreto produzido, determinando um maior custo. Entretanto, a autora acrescenta que a textura mais rugosa, a maior angulosidade e maior área específica dos agregados reciclados colaboram com a maior aderência pasta/agregado,

além de, absorver pasta de cimento pelos poros superficiais, proporcionando maior precipitação de cristais de hidratação nestes poros, permitindo maior fechamento da zona de transição do concreto, tornando a matriz de concreto um bloco único de material, o que pode melhorar o desempenho do concreto.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) tem sido uma ótima alternativa para avaliar os parâmetros relativos à forma dos grãos dos materiais finos. De acordo Mehta e Monteiro (2014), através do MEV é possível caracterizar a forma, angularidade e textura superficial de materiais microfinos, em 2-D, com capacidade de ampliação de até 10^5 vezes.

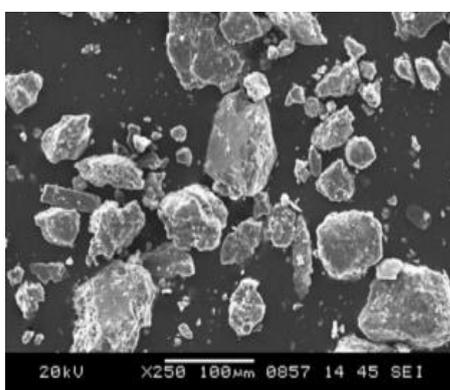
Felekoglu (2009) e Damineli (2013) utilizaram a técnica de MEV para caracterizar, respectivamente, microfinos de quartzo e fíler calcário e ambos obtiveram imagens que determinam, de forma clara, o tamanho e a forma das partículas, conforme mostram as figuras 7 e 8.

Figura 7- Imagens de Fíler Calcário através de MEV



Fonte: DAMINELI (2013)

Figura 8- Imagem de MEV de microfinos de Quartzo



Fonte: FELEKOGLU (2009)

Recentemente, alguns estudos foram feitos sobre a forma de grãos menores que 0,3 mm e, até mesmo menores que 0,075 mm, e os resultados indicaram que a geometria das partículas apresenta influência significativa nas propriedades das misturas cimentícias (STEWART *et al.*, 2003; FELEKOGLU, 2009; DAMINELI, 2013).

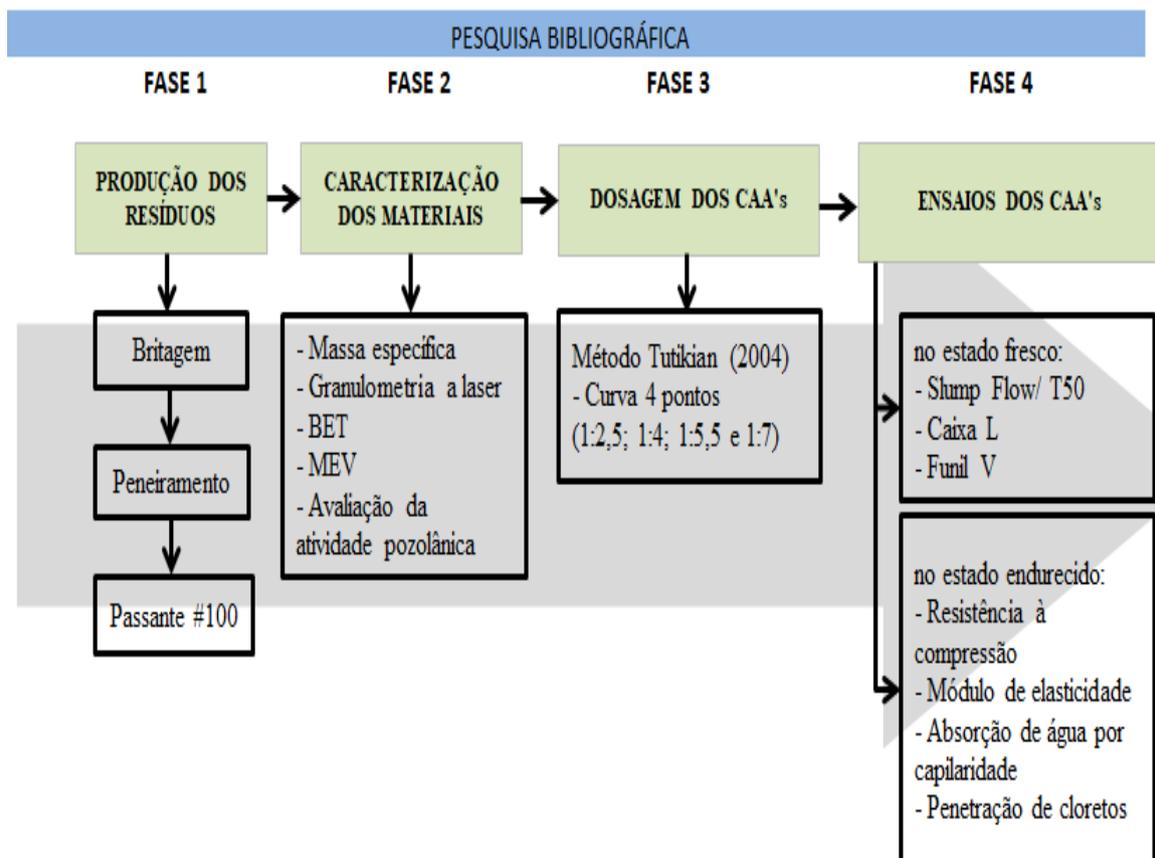
De maneira geral, observa-se que não existem muitas pesquisas acerca do emprego de forma separada dos finos de resíduos de construção e demolição em concreto autoadensável. Assim com o intuito de contribuir com o avanço do conhecimento no tema proposto, o capítulo seguinte trará os materiais e métodos empregados no programa experimental, visando atingir os objetivos da pesquisa.

3 TRABALHO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são abordadas as variáveis controláveis, não controláveis, os fatores fixos e as variáveis de resposta, além dos materiais e métodos de ensaios empregados no presente estudo. Em “*Materiais*” são apresentados os materiais e os seus respectivos ensaios de caracterização utilizados no trabalho, enquanto em “*Métodos*” são apresentadas as etapas que foram desenvolvidas, referentes ao método de dosagem do CAA, além da descrição dos ensaios no estado fresco e no estado endurecido dos concretos autoadensáveis produzidos na pesquisa.

As etapas experimentais deste trabalho foram realizadas no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (LAMTAC/NORIE), no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) e no Centro de Microscopia e Microanálise (CMM), todos na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); e consistem em quatro fases principais, conforme esquematizado na figura 9.

Figura 9-Metodologia resumida do trabalho experimental



Fonte: o autor

3.1 Variáveis controláveis

As variáveis controláveis foram definidas de acordo com os objetivos do trabalho, de forma que possibilitasse avaliar sua influência nas respostas de pesquisa. Essas variáveis foram divididas em: a) traço do concreto; b) tipo de agregado fino utilizado; c) idade de ruptura dos corpos de prova (CP's). Quanto ao traço do concreto, foram executados concretos com quatro relações cimento: agregados secos em massa, 1:2,5; 1:4; 1:5,5 e 1:7. Os tipos de agregados finos utilizados são: a) areia fina, que servirá de referência para o estudo; b) finos de concretos; c) finos de argamassas e; d) finos cerâmicos. Já para as idades de ruptura dos corpos de prova foram adotados 7 e 28 dias.

A composição do RCD no Brasil apresenta grande quantidade de materiais cimentícios e materiais cerâmicos. Essa heterogeneidade pode representar uma dificuldade encontrada para sua utilização, em que cada parte do resíduo pode influenciar diferentemente nas propriedades dos concretos. Então, a análise separada dos finos se faz necessária para verificar se essa variabilidade do material influencia no comportamento do concreto, garantindo total controle das variáveis de resposta dos experimentos.

3.2 Variáveis não controláveis

A produção total dos concretos levou dias de execução e, deste modo, devido às constantes variações térmicas e de umidade local, foi bastante difícil de obter um maior controle desses fatores durante esta etapa de pesquisa.

3.3 Fatores fixos

Os fatores fixos foram definidos de acordo com o objetivo do trabalho, em virtude de não ser avaliada sua influência direta sobre as variáveis de resposta. Assim, serão mantidos constantes: a) tipo de cimento: CP V-ARI; b) equipamentos: misturador de eixo vertical, tronco de cone, caixa-L, Funil-V e prensa hidráulica; c) procedimentos de mistura e de ensaios; d) operador; e) teor de aditivo da mistura e; f) espalhamento (Slump flow) referente a classe SF 2 (660 a 750 mm) da NBR 15823-1 (ABNT, 2017).

3.4 Variáveis de resposta

As variáveis de resposta foram definidas de acordo com os objetivos do trabalho e são resultantes dos ensaios do CAA no estado fresco e endurecido, como o fluidez, habilidade passante, resistência à segregação e exsudação, resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água por capilaridade e penetração de íons cloretos.

3.5 MATERIAIS UTILIZADOS

3.5.1 Cimento Portland

Para a produção dos concretos, foi utilizado o cimento Portland CP V- ARI, cimento de alta resistência inicial. Esse material foi escolhido por ser mais puro que os demais cimentos disponíveis no mercado local, devido em sua composição não possuir adições minerais pozolânicas, sendo mais representativo para efetivação dos resultados da pesquisa.

O cimento CP V-ARI foi caracterizado de acordo com as prescrições normativas vigentes e os resultados estão apresentados na tabela 5. Observou-se, em função dos resultados obtidos, que o cimento Portland utilizado neste estudo atendeu aos limites especificados na NBR 5733 (ABNT, 1991).

Tabela 5- Caracterização química, física e mecânica do cimento CP V-ARI.

Ensaio	CPV-ARI	unidade	Norma	Exigências
MgO	2,7	%	NM 14:2012	≤ 6,5
SO ₃	3,0	%	NM 14:2012	≤ 4,5
Massa específica	3,14	g/cm ³	NBR 16605:2017	-
Finura Blaine	4628	cm ² /g	NBR 16372:2015	≥ 3000
#200	0,3	%	-	≤ 6
#325	1,7	%	-	-
Perda de massa ao fogo (temp. de ensaio 1000 °C)	3,6	%	NBR NM 18:2012	≤ 4,5
Início de pega	249	min	NBR 16607:2017	≥ 60
Final de pega	323	min	NBR 16607:2017	≤ 600
Resistência à compressão 1 dia	21,1	Mpa	NBR 7215:1997	≥ 14
Resistência à compressão 3 dias	37,6	MPa	NBR 7215:1997	≥ 24
Resistência à compressão 7 dias	42,5	Mpa	NBR 7215:1997	≥ 34
Resistência à compressão 28 dias	47,9	MPa	NBR 7215:1997	-

Fonte: disponibilizado pelo fabricante – Adaptado

3.5.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi uma brita de origem basáltica, com dimensão máxima característica de 19 mm, proveniente de uma pedreira localizada no município de Montenegro/RS. O agregado foi lavado para a retirada de impurezas e material pulverulento que o mesmo pudesse conter, e posteriormente colocado ao ar livre para secagem.

Antecedente à produção dos concretos, o agregado graúdo foi previamente submetido ao processo de peneiramento, de modo a ser retirada a parcela superior a 19 mm, sendo utilizadas apenas as parcelas compreendidas abaixo dessa fração, pois de acordo com a literatura é o diâmetro máximo de agregado habitualmente aplicado para os concretos autoadensáveis (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

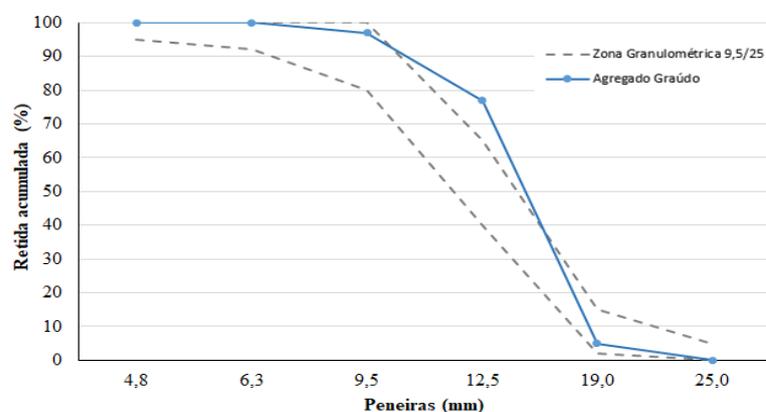
A caracterização física desta brita está apresentada na tabela 6 e a sua respectiva curva granulométrica apresentada na figura 10.

Tabela 6- Caracterização do agregado graúdo

Agregado graúdo natural				
Peneiras (mm)	Massa Retida(g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma de Ensaio
25	0	0	0	ABNT NBR NM 248 (2003)
19	100	5	5	
12,5	1440	72	77	
9,5	400	20	97	
6,3	60	3	100	
4,75	0	0	100	
Fundo	0	0	100	
	2000	100		
Massa Específica			2,64 g/cm ³	ABNT NBR NM 53 (2009)
Massa Unitária			1,64 g/cm ²	ABNT NBR NM 45 (2006)
Módulo de Finura			7,02	ABNT NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima			19 mm	ABNT NBR NM 248 (2003)

Fonte: elaborada pelo autor

Figura 10- Distribuição Granulométrica do agregado graúdo



Fonte: elaborada pelo autor

3.5.3 Agregado miúdo

No estudo foi utilizada uma areia natural quartzosa, proveniente do leito do rio Jacuí, sendo esta comumente utilizada na produção de concretos na região.

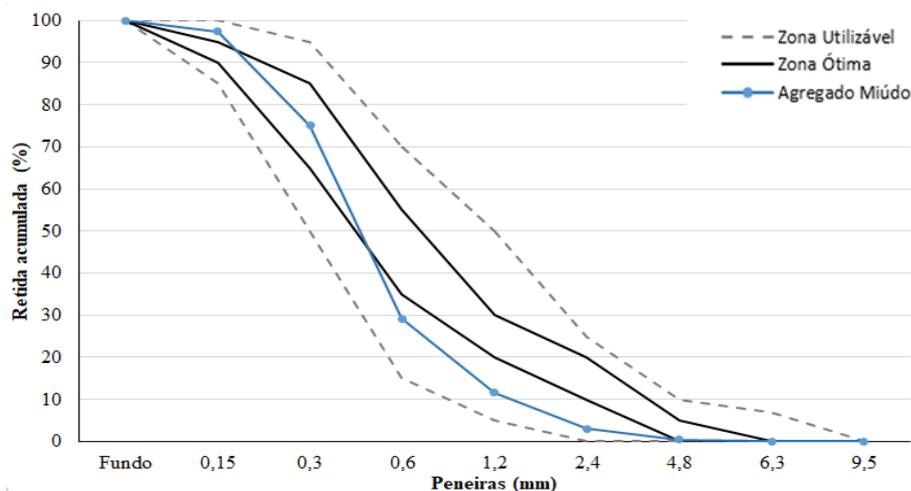
A caracterização física desta areia foi realizada de acordo com as prescrições normativas apresentada na tabela 7 e a sua curva granulométrica apresentada na figura 11. Percebe-se que a composição granulométrica desta areia está adequada na zona utilizável descrita para agregados miúdos de concretos pela ABNT NBR 7211 (2009), porém não se encontra situada na zona ótima. Os demais resultados obtidos atendem aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211 (2009).

Tabela 7- Caracterização física do agregado miúdo

Agregado miúdo natural (areia quartzosa)				
Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma de Ensaio
4,8	4	0	0	ABNT NBR NM 248 (2003)
2,4	26	3	3	
1,2	87	9	12	
0,6	175	18	29	
0,3	459	46	75	
0,15	224	22	97	
Fundo	25	3	100	
	1000	100		
Massa Específica			2,50 g/cm ³	ABNT NBR NM 52 (2009)
Massa Unitária			1,59 g/cm ²	ABNT NBR NM 52 (2009)
Módulo de Finura			2,16	ABNT NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima			2,36 mm	ABNT NBR NM 248 (2003)

Fonte: elaborada pelo autor

Figura 11- Distribuição Granulométrica do agregado miúdo



Fonte: elaborada pelo autor

Contudo, para a produção do concreto autoadensável de referência, esta areia passou pelo processo de peneiramento, sendo utilizada apenas a fração de 0,15 mm como material fino a ser adicionado à mistura, conforme preconiza o método de dosagem proposto por Tutikian (2004).

3.5.4 Finos de RCD

No estudo foram avaliados três tipos diferentes de finos de RCD, conforme sua origem cimentícia (finos de concreto e de argamassa), obtidos a partir do beneficiamento de corpos de prova de concreto, com resistência à compressão variando de 25 a 80 MPa, e argamassas descartados no LAMTAC/NORIE; e origem cerâmica (tijolos maciços cerâmicos comuns). A figura 12 mostra os três tipos de finos utilizados no estudo.

Figura 12- Aspecto visual dos finos, da esquerda para à direita: finos de argamassa, cerâmico e de concreto.



Fonte: o autor

O processo de beneficiamento consistiu na britagem do resíduo, a qual foi realizada em laboratório utilizando um britador de mandíbulas, ilustrado na Figura 13. Por fim, todo material britado foi peneirado, com auxílio de um peneirador mecânico, a fim de se obter o material reciclado passante na peneira de 0,150 mm (#100 mesh), o qual foi utilizado neste trabalho em substituição de parte da areia natural.

Figura 13- Britador de mandíbula



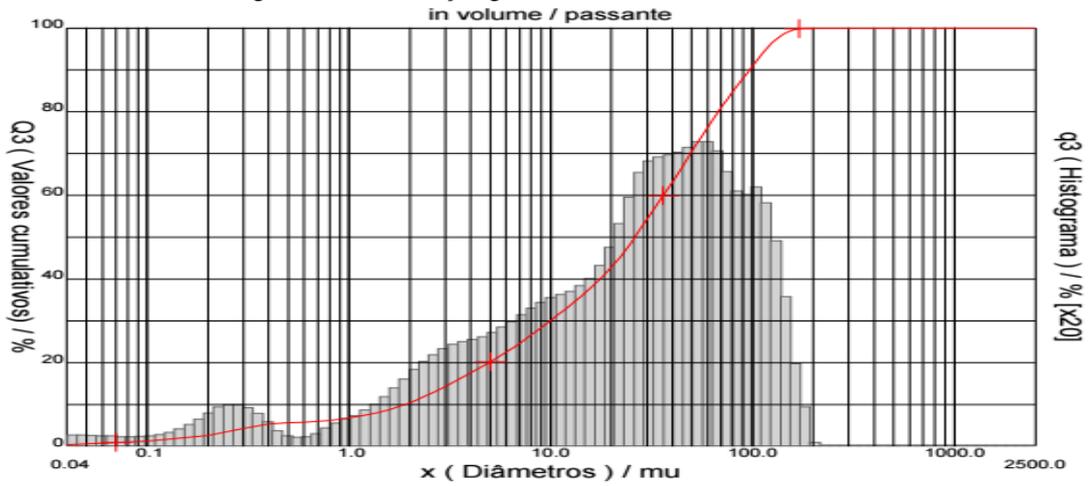
Fonte: Próprio autor

Com o intuito de caracterizar os finos utilizados nas misturas dos concretos autoadensáveis, foram realizados os seguintes ensaios:

- a) **granulometria a laser.** A análise de distribuição do tamanho de partícula dos finos de RCD foi realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER/UFRGS) por difração a laser em um equipamento CILAS Particle Size Analyser, modelo CILAS 1180 Liquid, utilizando álcool isopropílico como solvente, sem meio dispersante e aplicando ultrassom de 38 kHz por 60 s.

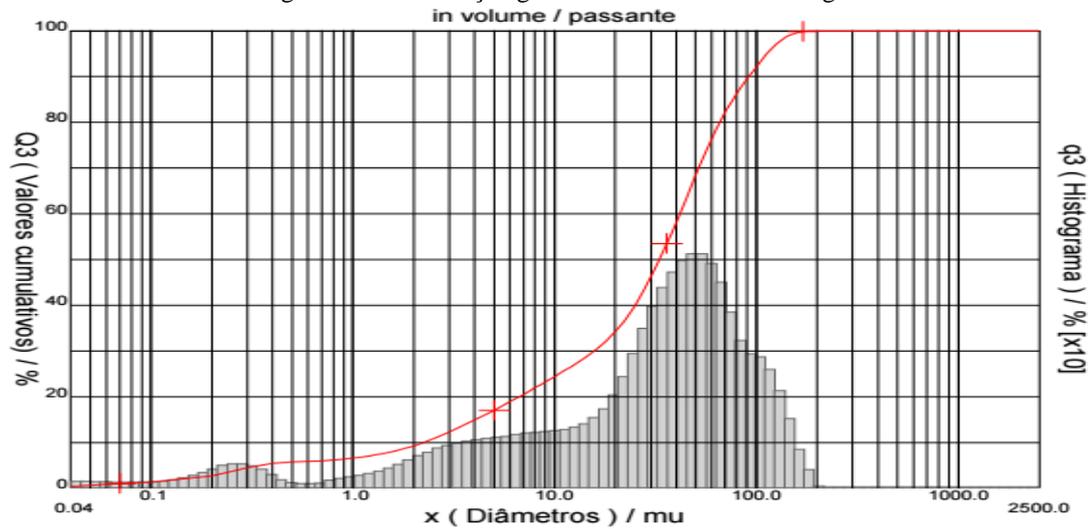
A granulometria a laser permite identificar a quantidade de partículas finas e seu diâmetro correspondente. Assim sendo, nas figuras 14 a 16 são apresentadas as distribuições granulométricas dos três tipos de finos estudados e os demais resultados dos ensaios supracitados são apresentados a seguir na tabela 08.

Figura 14- Distribuição granulométrica do fino de concreto



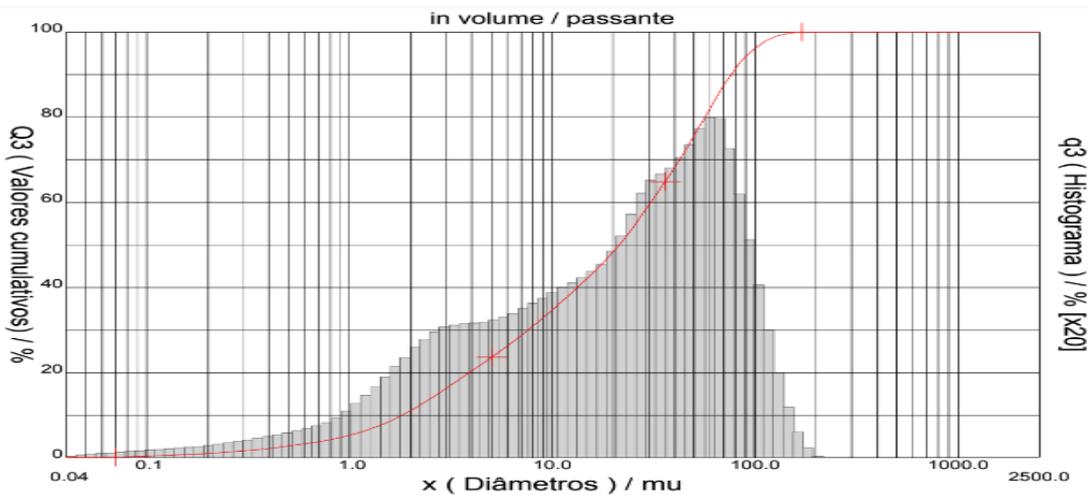
Fonte: relatório de ensaio de Granulometria a laser

Figura 15- Distribuição granulométrica do fino de argamassa



Fonte: relatório de ensaio de Granulometria a laser

Figura 16- Distribuição granulométrica do fino cerâmico



Fonte: relatório de ensaio de Granulometria a laser

- b) **área superficial específica.** A área superficial dos finos foi determinada a partir do método da área superficial específica (BET), com o auxílio do equipamento Nova Station A, utilizando gás nitrogênio, no LACER/UFRGS.
- c) **massa específica.** A massa específica de materiais em pó foi realizada conforme o procedimento normalizado pela NBR 16607 (ABNT, 2017) para os três tipos de finos estudados.

A tabela 8 apresenta em resumo a caracterização física dos agregados finos de RCD utilizados na pesquisa.

Tabela 8- Caracterização física dos finos

Ensaio		Tipo			Unidade
		Finos de concreto	Finos de argamassa	Finos cerâmico	
Granulometria a laser	D ₁₀	1,89	2,24	1,81	µm
	D ₅₀	26,13	33,1	21,34	
	D ₉₀	96,55	91,83	75,9	
	D _{médio}	37,99	40,2	31,23	
BET	-	12,86	17,61	24,1	m ² /g
Massa específica	-	2,49	2,28	2,55	g/cm ³

Fonte: elaborada pelo autor

A partir do beneficiamento dos resíduos de construção e demolição, por meio de britagem, obtiveram-se finos com variadas granulometrias e superfícies específicas, devido a suas diferentes composições e origem. Dentre os tipos de finos de RCD, os finos cerâmicos resultaram em um menor diâmetro médio e uma maior área superficial específica, quando comparados aos finos de origem cimentícia (concreto e argamassa), conforme pôde ser observado na tabela 8.

- d) **Forma das partículas.** A forma das partículas foi determinada através das imagens obtidas por MEV JSM 6060 com detector de elétrons secundários do laboratório de Microscopia e Microanálise da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. As figuras 17-19 mostram as imagens obtidas por MEV.

Figura 17 - Imagens dos finos de concreto obtidas por MEV por elétrons secundários com magnificação de (a) 6000x e (b) 1000x

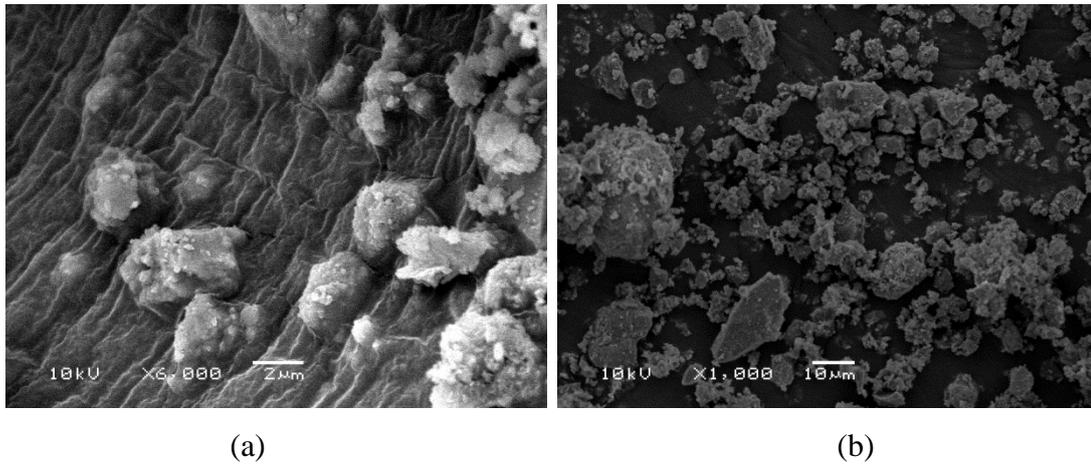


Figura 18 - Imagens dos finos de argamassa obtidas por MEV por elétrons secundários com magnificação de (a) 6500x e (b) 1000x

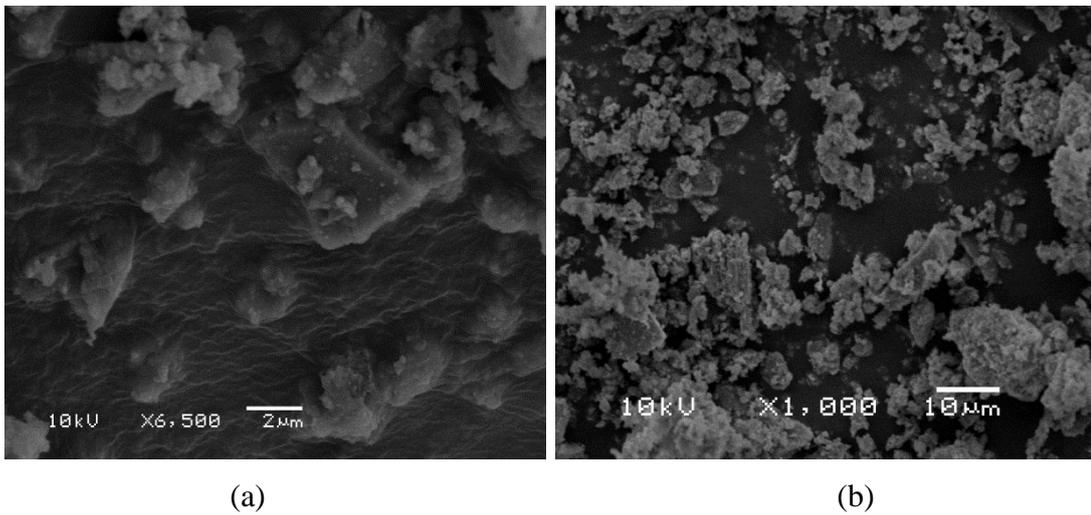


Figura 19- Imagens dos finos cerâmicos obtidas por MEV por elétrons secundários com magnificação de (a) 6500x e (b) 1000x

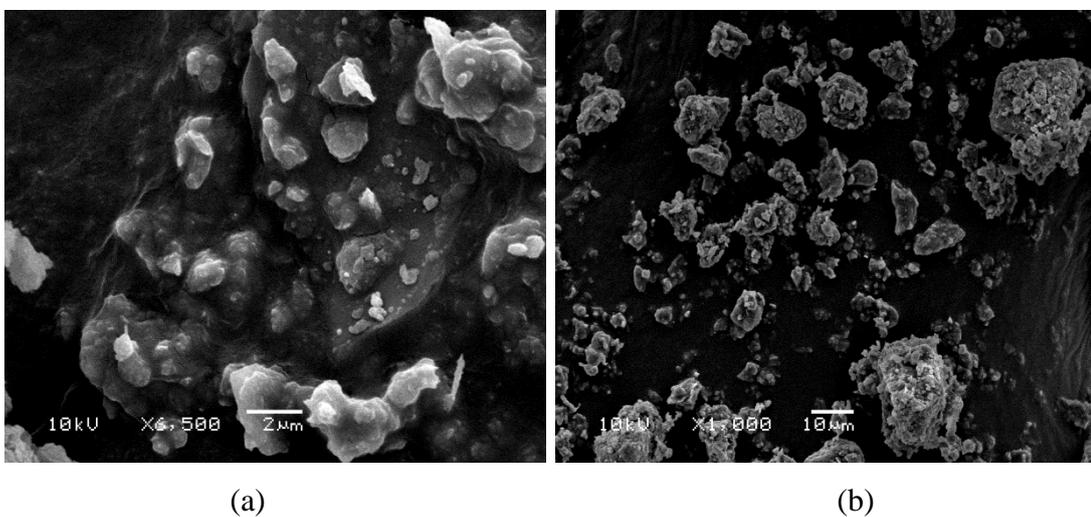
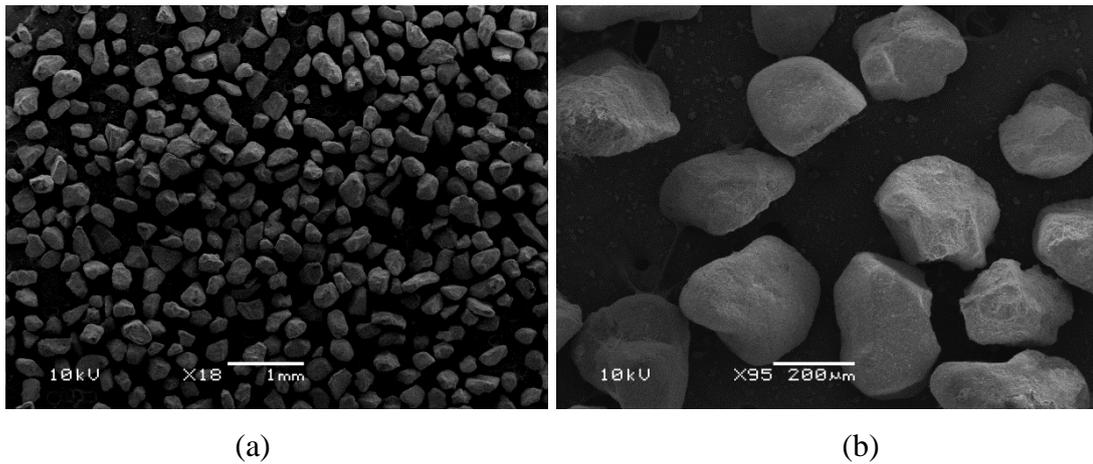


Figura 20- Imagens da areia fina obtida por MEV por elétrons secundários com magnificação de (a) 18x e (b) 95x



Através das imagens de MEV, percebe-se que os materiais finos oriundos do processo de britagem dos resíduos de construção e demolição apresentam formas irregulares, com texturas ásperas e rugosas, e as areias finas são mais arredondadas e lisas.

a) **avaliação da atividade pozolânica.** Esta foi realizada de acordo com a prescrição da NBR 5752 (ABNT, 2014).

A avaliação do índice de pozolanicidade foi realizada apenas para os finos de origem cerâmica, pois se acreditava que estes poderiam apresentar atividade pozolânica, contribuindo para melhorias das propriedades mecânicas dos concretos.

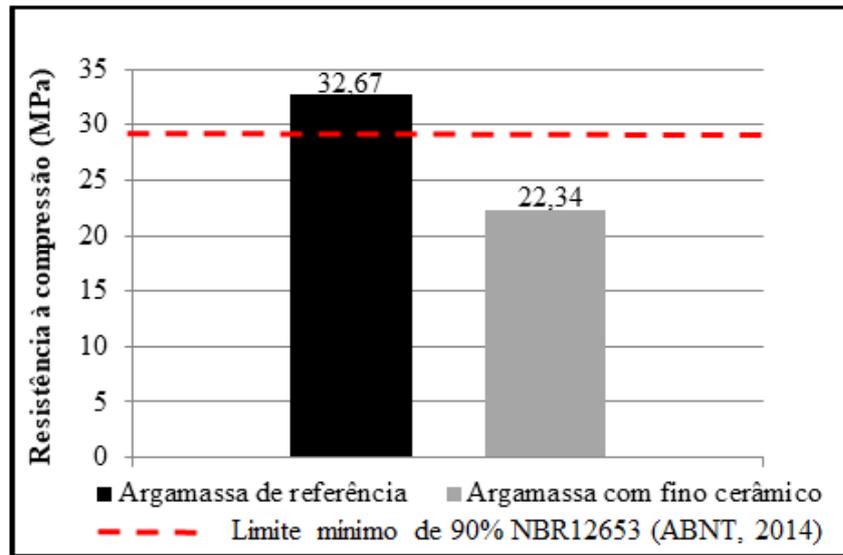
O índice de desempenho pozolânico é dado pela relação entre a resistência à compressão da argamassa com os finos cerâmicos e a resistência à compressão da argamassa de referência, aos 28 dias. A figura 21 mostra os resultados de resistência à compressão obtidos no ensaio e a tabela 9 indica o índice de pozolanicidade das argamassas com adição de finos cerâmicos.

Tabela 9- Resultado do Índice de Pozolanicidade do fino cerâmico-NBR 5752 (ABNT, 2014)

	Argamassa de referência	Argamassa com fino cerâmico
Resistência à compressão (MPa)	32,67	22,34
Índice de Pozolanicidade (IP)	68,38%	

Fonte: o autor

Figura 21 - Resultado de resistência à compressão obtidos no ensaio de avaliação de índice de pozolanicidade



Fonte: o autor

O resultado da análise da pozolanicidade com o cimento Portland, apresentado na tabela 9, indica que o índice de pozolanicidade (IP) dos corpos de prova com finos cerâmicos foi de 68,38%. Desta forma, o fino cerâmico estudado não atinge os critérios mínimos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014), pois está abaixo do valor exigido pela norma, de maior ou igual a 90%, conforme apresentado na figura 21, sendo então classificado como material não pozolânico.

3.5.5 Aditivo

Para a produção dos concretos autoadensáveis foi necessária a utilização de um aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, devido o seu melhor desempenho na produção de CAA, atuando como dispersantes do material aglomerante, propiciando elevada redução de água. O teor recomendado pelo fabricante varia de 0,2 a 1,2%, sobre a massa de cimento. A caracterização deste aditivo está descrita na tabela 10.

Tabela 10 -Caracterização do aditivo superplastificante

Produto	Aspecto	Cor	pH	Densidade (g/cm ³)	Teor de sólidos (%)
Aditivo superplastificante à base de policarboxilato	Líquido	Amarelado	6,58	1,061	31,58

Fonte: Fornecida pelo fabricante

3.5.6 Água

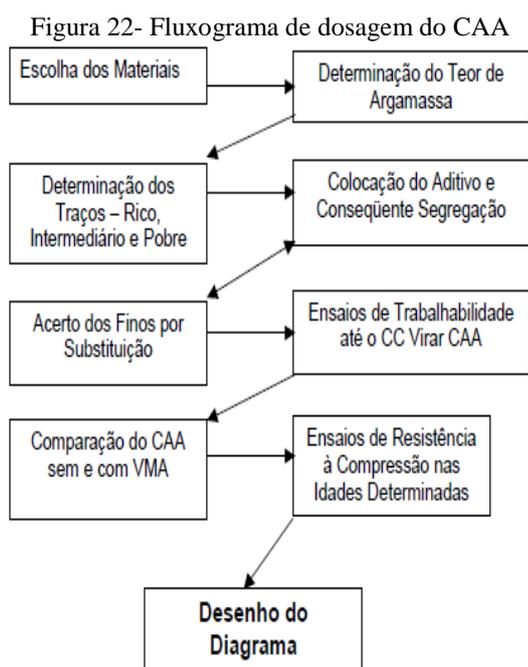
A água utilizada foi proveniente da rede pública de abastecimento de Porto Alegre/RS.

3.6 MÉTODO

A metodologia foi planejada com o objetivo de tornar o trabalho mais organizado e eficaz, contribuindo para o avanço do conhecimento através de procedimentos e métodos realizados ao longo da pesquisa.

3.6.1 Dosagem dos concretos autoadensáveis

A dosagem do concreto é realizada com base em uma seleção e combinação dos materiais constituintes, de modo a propiciar a racionalização de recursos e a obtenção do melhor custo-benefício. Para o presente estudo, o método de dosagem experimental executado foi o proposto por Tutikian (2004), o qual é baseado no método de dosagem IPT/EPUSP para concretos convencionais (Helene e Terzian, 1992), com adaptações para transformá-lo em autoadensável com adição de finos e aditivo superplastificante. Este método consiste em fazer três ou mais traços de concreto para obtenção de um diagrama de dosagem. Este diagrama correlaciona a resistência à compressão (f_c), a relação água/cimento (a/c), o teor de agregados secos (m) e o consumo de cimento (c) por metro cúbico de concreto. O fluxograma (figura 22) traz a ordem sequencial a ser seguida na dosagem proposta por Tutikian.



Fonte: Tutikian , 2004

A primeira etapa da dosagem proposta por Tutikian (2004) é a escolha dos materiais que serão utilizados na produção do concreto autoadensável. Todos esses materiais foram descritos na seção “materiais utilizados”, no item 3.5 deste trabalho.

Para o estudo foram efetuadas quatro famílias de concreto autoadensável, sendo a referência de CAA com areia fina (CAA_FREF) e as outras três de concretos autoadensáveis com finos de RCD: finos de concretos (CAA_FCON), de argamassa (CAA_FARG) e de tijolos maciços cerâmicos (CAA_FCER), toda elas com quatro proporcionamentos diferentes, previamente determinados, baseado na relação cimento/agregados secos (1:m), em massa: um traço rico (1:2,5), dois intermediários (1:4 e 1:5,5) e um traço pobre (1:7). Ao todo, o estudo contemplou 16 configurações de concretos diferentes, conforme mostra a figura 23.

Figura 23 - Configurações dos concretos autoadensáveis do estudo

Designação	Configuração (1: m)
CAA_REF_2,5	CAA com fino de agregado natural e traço rico (1:2,5)
CAA_REF_4	CAA com fino de agregado natural e traço intermediário (1:4)
CAA_REF_5,5	CAA com fino de agregado natural e traço intermediário (1:5,5)
CAA_REF_7	CAA com fino de agregado natural e traço pobre (1:7)
CAA_Fcon_2,5	CAA com fino de concreto e traço rico (1:2,5)
CAA_Fcon_4	CAA com fino de concreto e traço intermediário (1:4)
CAA_Fcon_5,5	CAA com fino de concreto e traço intermediário (1:5,5)
CAA_Fcon_7	CAA com fino de concreto e traço rico (1:7)
CAA_Farg_2,5	CAA com fino de argamassa e traço rico (1:2,5)
CAA_Farg_4	CAA com fino de argamassa e traço intermediário (1:4)
CAA_Farg_5,5	CAA com fino de argamassa e traço intermediário (1:5,5)
CAA_Farg_7	CAA com fino de argamassa e traço pobre (1:7)
CAA_Fcer_2,5	CAA com fino cerâmico e traço rico (1:2,5)
CAA_Fcer_4	CAA com fino cerâmico e traço intermediário (1:4)
CAA_Fcer_5,5	CAA com fino cerâmico e traço intermediário (1:5,5)
CAA_Fcer_7	CAA com fino cerâmico e traço pobre (1:7)

Fonte: elaborada pelo autor

A principal modificação nos traços adotados é a substituição, em massa, de parte da areia natural por um tipo de agregado fino estudado, com teor variável e obtido no momento da mistura, conforme observação das características dos CAA.

Segundo Tutikian (2004), após as escolhas dos materiais que serão utilizados nas dosagens, deve-se determinar o teor de argamassa do concreto de referência com base no método tradicional IPT/EPUSP para concreto convencional (Helene e Terzian, 1992). Neste

primeiro momento, este teor de argamassa foi determinado para o concreto sem adição de material fino, partindo-se de um traço 1: m, em massa, com m igual a 5,5, iniciando com o teor de argamassa em 51% e aumentando este teor de 2 em 2%. O teor ideal de argamassa foi obtido através da análise visual durante a mistura. Diante disso, foi obtido um teor ideal de argamassa seca para os concretos de 55%, o qual foi mantido constante para todos os traços e famílias de CAA produzidos no estudo. A Tabela 11 apresenta os valores obtidos na determinação do teor ideal de argamassa.

Tabela 11 - Determinação do teor ideal de argamassa

Determinação do teor de argamassa ideal (Traço 1:5,5)						
Teor (%)	Traço unitário (1:a:p)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	a/c
51	1: 2,31: 3,18	7,849	18,171	25	4,068	0,52
53	1: 2,44: 3,05	8,183	20,008	25	4,957	0,60
55	1: 2,57: 2,92	8,547	22,009	25	5,427	0,63

Fonte: elaborada pelo autor

Após a fixação do teor de argamassa ideal dos concretos e com os todos os traços já definidos, partiu-se para etapa seguinte da dosagem. Neste momento, foi determinado o teor ideal de aditivo superplastificante nas misturas. O teor de aditivo foi estabelecido em função da massa de cimento, sendo colocado, inicialmente, em pequena quantidade até alcançar o ponto ideal, visualmente identificado. Neste instante da colocação do aditivo não foi levada em consideração a segregação, pois esta foi corrigida com a adição do agregado fino. Diante do exposto, chegou-se, experimentalmente, a um teor de aditivo ideal para todos os traços de 0,91% da massa de cimento. Este foi mantido constante no estudo, de forma a se tornar possível a comparação dos resultados obtidos.

De modo a corrigir a segregação, foi adicionada areia fina no traço de referência (CAA_FREF) e para dos demais traços, um tipo de fino diferente, sendo no presente trabalho aqueles relacionados aos resíduos de construção e demolição (finos de concreto, argamassa e de tijolos cerâmicos). O teor de finos para cada família de concreto é decorrente da substituição parcial da areia natural. Logo, esta substituição foi variada de acordo com a necessidade observada durante a dosagem, devido à segregação e exsudação apresentada na mistura dos concretos.

Para a determinação do teor ideal de finos de cada mistura, partiu-se de 10 % de substituição de parte da areia, com adição de cinco em cinco por cento desses materiais durante a dosagem até que os concretos autoadensáveis estivessem fluidos, coesos e não apresentassem segregação, bem como atendessem os limites aceitáveis dos ensaios de caracterização no estado

fresco. O teor de finos adicionados nas misturas variou de 10 a 30% em substituição parcial do agregado miúdo natural. Os traços mais pobres, de modo geral, apresentaram maiores teores de materiais finos necessários aos concretos, conforme pode ser visto na tabela 12.

Tabela 12 - Teor ótimo de substituição de areia por finos em todas as configurações de CAA estudadas

Configuração	Substituição de areia por finos
CAA_REF_2,5	25%
CAA_REF_4	20%
CAA_REF_5,5	20%
CAA_REF_7	30%
CAA_FCON_2,5	15%
CAA_FCON_4	15%
CAA_FCON_5,5	10%
CAA_FCON_7	20%
CAA_FARG_2,5	20%
CAA_FARG_4	20%
CAA_FARG_5,5	20%
CAA_FARG_7	25%
CAA_FCER_2,5	15%
CAA_FCER_4	15%
CAA_FCER_5,5	15%
CAA_FCER_7	20%

Fonte: autor

O mesmo procedimento adotado para os finos foi realizado para a quantidade de água da mistura. Esta foi acrescentada aos poucos durante a dosagem à medida que os resultados de espalhamento não atingiam os valores pré-estabelecidos de 660 a 750 mm, tendo os devidos cuidados de forma a garantir que não apresentasse segregação dos agregados graúdos da pasta de cimento.

O espalhamento dos concretos foi, também, mantido o mesmo para todas as configurações, seguindo a classe de fluidez SF 2 da NBR 15823 (ABNT, 2010) (adequada para a maioria das aplicações correntes). A verificação do espalhamento em cada acréscimo de material foi realizada de forma rápida para que não houvesse o comprometimento no desempenho do aditivo superplastificante.

A apresentação de todos os traços de concretos realizados no estudo pode ser conferida mais adiante no capítulo “apresentação e análise dos resultados”.

Na sequência, foram moldados os corpos de provas para realização dos ensaios no estado endurecido, que será melhor explanado no item 3.6.2.2.

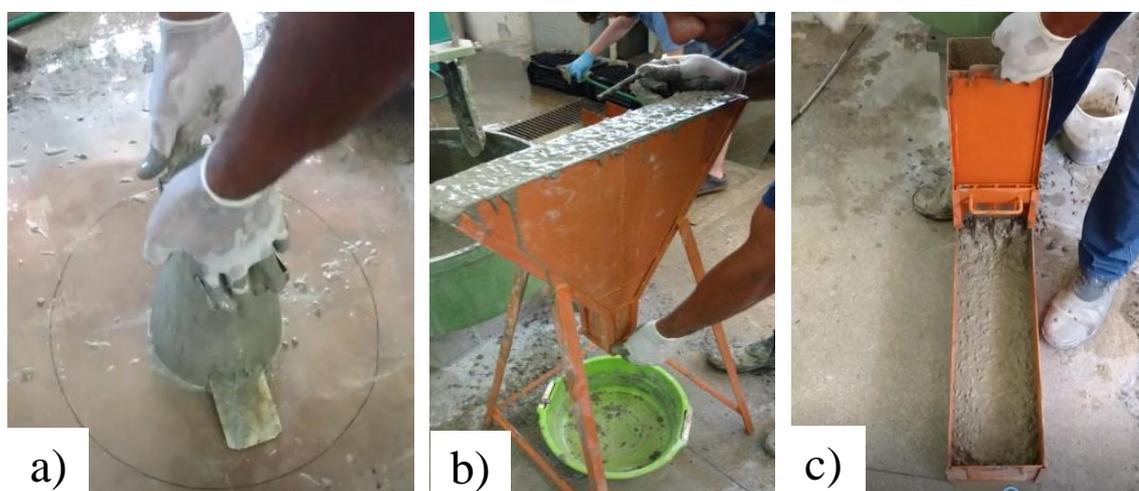
3.6.2 Ensaios

Os ensaios são divididos em duas partes distintas: ensaios para a verificação das propriedades dos concretos autoadensáveis no estado fresco e ensaios para a verificação das propriedades dos concretos no estado endurecido.

3.6.2.1 Ensaios no estado fresco

Os ensaios de caracterização dos concretos autoadensáveis no estado fresco foram realizados no Laboratório de materiais de construção (LAMTAC/NORIE) de acordo com a prescrição da NBR 15823 (ABNT, 2017). Para cada um dos traços das famílias de CAA pesquisadas neste trabalho foi avaliada a fluidez, a coesão e a habilidade passante, através dos seguintes ensaios (Figura 24): ensaio de espalhamento ou slump flow, Slump flow T₅₀ cm, caixa L e Funil V. Também foi feita a avaliação da capacidade de fluidez e a possibilidade de segregação do CAA, pelo aspecto do concreto imediatamente após a retirada do tronco de cone, no ensaio de espalhamento, através da análise do índice de estabilidade visual (IEV) o qual classifica o concreto em 4 níveis que variam de 0 a 3 de acordo com a NBR 15823 (ABNT, 2017).

Figura 24 - Ensaios realizados no estado fresco: a) Slump flow; b) Funil V e c) Caixa L



Fonte: autor

Os traços dos concretos autoadensáveis foram executados para alcançar o nível de fluidez exigida em norma, ao qual se caracteriza em um espalhamento na classe SF 2 – Slump Flow 660 a 750 mm, com classe de índice de estabilidade visual satisfatória sem evidência de segregação ou exsudação, de forma que a emprego desses concretos seja adequado para a maioria das aplicações correntes de engenharia. Para o ensaio de slump flow T₅₀ cm, o tempo que o concreto leva para atingir a marca de 50 cm de diâmetro deve se medido e situado na

classe de viscosidade plástica VS2, cujo tempo é maior que 2 segundos. Todos os resultados referentes aos ensaios de caracterização dos concretos autoadensáveis no estado fresco encontram-se na tabela 14, na seção 4.1 deste trabalho.

3.6.2.2 Ensaios no estado endurecido

No estado endurecido, os concretos foram avaliados quanto às propriedades mecânicas: resistência à compressão axial e módulo de elasticidade. É importante ressaltar que o comportamento mecânico não é a única característica importante a ser estudada nos concretos. A durabilidade destes é uma característica intimamente ligada à vida útil das estruturas de concreto armado, pois a absorção de água ou de agentes agressivos pode provocar danos na armadura. Portanto, a pesquisa também buscou avaliar o índice de absorção de água dos concretos, por meio do ensaio de absorção de água por capilaridade, conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012), a carga passante e resistência à penetração de íons cloreto através de uma relação de condutância elétrica em corpos de prova de concreto, conforme o método proposto pela ASTM C 1202 (2017).

Para esses ensaios supracitados, os corpos de prova foram moldados em conformidade com o preconizado pela NBR 5738 (ABNT, 2015), os quais ficaram mantidos em moldes metálicos por 24 horas. Após este período, os mesmos foram retirados dos moldes, identificados e acondicionados em câmara úmida durante o tempo estipulado para cada ensaio, à temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de 95%.

3.6.2.2.1 Resistência à compressão

O ensaio foi executado conforme descrito pela NBR 5739 (ABNT, 2007), para determinação da resistência à compressão de corpos de prova de concreto com dimensões, 10 x 20 cm, nas idades de 7 e 28 dias. Durante a dosagem dos concretos foram moldados de 2 a 4 corpos de prova para cada traço de concreto, os quais foram rompidos nas idades de cura adotadas. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC/NORIE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul utilizando uma prensa hidráulica, modelo EMIC DL20000, com capacidade máxima de 2000 kN.

Após cura e preparo da superfície, por meio da retificação dos corpos de prova, foram coletadas as dimensões (altura e diâmetro) dos corpos de prova utilizando um paquímetro

digital de resolução de 0,01 mm. Posteriormente, os corpos de provas foram posicionados, um a um, na prensa e deu início à aplicação do carregamento, contínuo, com a velocidade de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s até a ruptura do corpo de prova. A resistência à compressão foi determinada pela equação 02.

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \quad \text{Equação 02}$$

Onde:

f_c = resistência à compressão axial, em megapascal (MPa);

F = carga de ruptura, em Newton (N);

D = diâmetro do corpo de prova, em milímetro (mm).

3.6.2.2.2 Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade à compressão dos corpos de prova de concreto foi realizado conforme NBR 8522 (ABNT, 2008). Foram utilizados dois corpos de prova para cada traço, a fim de determinar o módulo de elasticidade aos 28 dias de idade com suas dimensões devidamente medidas com um paquímetro digital de resolução de 0,01 mm.

Os corpos de prova foram submetidos a séries de carregamentos e descarregamentos, com força de ruptura em torno de 30% da prevista, numa velocidade de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s, conforme prescrita pela norma vigente. As deformações foram medidas através de extensômetros com sensores em cada lado do corpo de prova, conforme mostra a figura 25.

Figura 25- Ensaio de módulo de Elasticidade



Fonte: o autor

3.6.2.2.3 Absorção de água por capilaridade

De modo a avaliar o comportamento dos concretos autoadensáveis estudados nesse trabalho quanto à durabilidade, foi realizado o ensaio de absorção de água por capilaridade, seguindo os padrões normativos estabelecidos pela NBR 9779 (ABNT, 2012).

Ao todo foram moldados 3 corpos de prova para cada traço realizado e esses exemplares colocados em câmara úmida. Após o período de cura, mais precisamente aos 27 dias, os corpos de prova foram colocados em uma estufa à temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ até que fosse atingida a constância de massa. Depois de retirados da estufa, os corpos de prova foram resfriados em temperatura ambiente de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e determinada sua massa seca com auxílio de uma balança, a qual foi utilizada em todo o ensaio.

Posteriormente ao processo mencionado acima, os corpos de prova foram impermeabilizados com uma tinta acrílica, de modo a evitar a molhagem de outras superfícies, a não ser aquela em que permanecerá o nível de água prescrito no ensaio, conforme ilustrado na figura 26-a. Os corpos de prova foram colocados em ambiente com temperatura e umidade controladas, posicionadas sobre um recipiente com uma grade suporte padrão, o qual foi preenchido com água de modo que o nível de água permanecesse constante em 5 ± 1 mm acima da face inferior.

O ensaio consistiu na leitura de massa dos corpos de prova nos tempos definidos pela norma de 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h, contadas a partir do instante em que a amostra é colocada em contato com a água.

Figura 26- (a) Impermeabilização e (b) colocação dos corpos de prova no recipiente como nível de água prescrito para o ensaio



(a)

(b)

Fonte: o autor

Por fim, calculou-se a absorção de água por capilaridade através da equação 03.

$$C = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{S} \quad \text{Equação 03}$$

onde;

C = é a absorção por capilaridade, expressa em gramas por centímetro quadrado (g/cm^2);

m_{sat} = é a massa saturada do corpo de prova que permanece com umas das faces em contato com a água durante o período de tempo especificado, expressa em gramas (g);

m_s = é a massa do corpo de prova seco, expressa em gramas (g);

S = é a área da seção transversal, expressa em centímetros quadrados (cm^2).

3.6.2.2.4 Avaliação da penetração acelerada de íons cloretos

O ensaio de avaliação da penetração acelerada de íons cloretos foi conduzido de acordo com a ASTM C 1202 (2017) - Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration - por se tratar de um ensaio bastante difundido no meio científico.

O método especificado pela ASTM C 1202 consiste em acoplar um corpo de prova cilíndrico de dimensões 10 x 5 cm entre duas meia-células acrílicas, sendo uma preenchida com uma solução aquosa de cloreto de sódio (NaCl) com 3% de concentração em relação à massa de cimento e outra com solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) com concentração de 0,3N.

A avaliação da penetração de íons cloretos é feita mediante a medição da carga passante na amostra de concreto, submetida a uma tensão de $60 \pm 0,1$ V durante um período de 6 horas. Entre as meias-células é gerada uma corrente elétrica que induz o ânion cloreto a se difundir através do concreto sob a ação de um campo elétrico. A leitura da corrente passante é registrada por um amperímetro, em intervalos de trinta minutos.

Para o estudo foram moldados de dois corpos de prova de dimensões 10 x 20 cm para cada traço e posteriormente dispostos em câmara úmida para processo de cura, sendo retirados deste ambiente para serem serrados em quatro partes perpendiculares ao eixo com dimensões de 5 x 10 cm cada. É importante salientar que foram utilizadas as partes centrais dos corpos de prova, sendo descartadas as partes superiores e inferiores, de modo a desconsiderar o efeito de qualquer segregação e/ou exsudação que pudesse distorcer os resultados. Devido à limitação da

quantidade de meia-células disponíveis no laboratório, foram avaliadas apenas três amostras para cada traço de concreto.

Posteriormente, as superfícies laterais das amostras foram impermeabilizadas com resina epóxi e no dia seguinte foram submetidas ao vácuo por quatro horas, sendo que, após decorridos três horas de vácuo, as mesmas foram submersas em água deionizada por um período de 18 horas, garantindo a saturação dos poros e depois seca superficialmente com pano. Após isso, estas foram acopladas às meia-células com selante PU à base de poliuretano, com os eletrodos devidamente ajustados para ocorrência da diferença de potencial prescrita em norma vigente, conforme mostram as figuras 27 a 30.

Figura 27- Impermeabilização da superfície lateral das amostras



Figura 28- Submissão das amostras ao vácuo



Figura 29- Acoplamento da amostra nas célula com selante PU à base de poliuretano



Figura 30- Ensaio em andamento



Fonte: o autor

Os ensaios foram realizados em sala climatizada com temperatura de 25° C e umidade relativa de 74 %. A carga total passante pode ser obtida através da equação 04.

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360})$$

Equação 04

Onde,

Q = carga total, em coulombs;

I₀ = corrente inicial, em ampere, imediatamente após a aplicação da voltagem;

I_t = corrente, em ampere, a t minutos após a aplicação da voltagem.

A partir disso, é possível estabelecer uma classificação dos concretos quanto à resistência à penetração de íons cloreto, de acordo com a intensidade da corrente, em Coulombs, medida durante o ensaio, conforme a tabela 13, prevista na ASTM C1202 (2017).

Tabela 13- Classificação de risco quanto à penetração de íons cloreto

Carga passante (Coulombs)	Penetração de íons cloreto
> 4000	Elevada
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baixa
100 - 1000	Muito baixa
< 100	Desprezível

Fonte: - ASTM C 1202 (2017) – adaptado pelo autor

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados de todos os ensaios realizados no estudo, tanto no estado fresco e quanto no estado endurecido.

4.1 Resultados e discussões dos concretos autoadensáveis no estado fresco

Os traços unitários dos concretos autoadensáveis dosados pelo método de Tutikian (2004) estão apresentados nas tabelas 14 a 18, sendo os apresentados na faixa cinza como os ideais para os materiais finos empregados no presente estudo.

Tabela 14 - Traços de concreto autoadensável de referência com areia fina

CAA_REF_2,5						
TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	AREIA FINA (kg)	BRITA (kg)	Água (kg)	
1: 0,93: 1,58	13,968	12,921	0,000	22,000	SP (%)	0,91
1: 0,09: 0,83: 1,57	15,435	12,921	1,357	23,100	C (kg/m³)	658,50
1: 0,14: 0,78: 1,57	16,283	12,921	2,142	24,310		
1: 0,18: 0,74: 1,57	17,225	12,921	3,012	25,647	H (%)	8,55
1: 0,23: 0,69: 1,57	18,274	12,921	3,983	27,129		
CAA_REF_4						
TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	AREIA FINA (kg)	BRITA (kg)	Água (kg)	
1: 1,75: 2,25	9,778	17,111	0,000	22,000	SP (%)	0,91
1: 0,18: 1,58: 2,25	10,804	17,111	1,797	23,100	C (kg/m³)	453,80
1: 0,26: 1,49: 2,25	11,398	17,111	2,836	24,310		
1: 0,35: 1,40: 2,25	12,057	17,111	3,989	25,647	H (%)	8,40
1: 0,44: 1,31: 2,25	12,792	17,111	5,275	27,129		
CAA_REF_5,5						
TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	AREIA FINA (kg)	BRITA (kg)	Água (kg)	
1: 2,58: 2,93	7,527	19,368	0,000	22,000	SP (%)	0,91
1: 0,26: 2,32: 2,93	8,311	19,368	2,034	23,100	C (kg/m³)	336,60
1: 0,39: 2,19: 2,93	8,768	19,368	3,210	24,310		
1: 0,52: 2,06: 2,93	9,275	19,368	4,516	25,647	H (%)	9,59
1: 0,64: 1,93: 2,93	9,840	19,368	5,971	27,129		
CAA_REF_7						
TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	AREIA FINA (kg)	BRITA (kg)	Água (kg)	
1: 3,4: 3,6	6,111	20,778	0,000	22,000	SP (%)	0,91
1: 0,34: 3,06: 3,60	6,753	20,778	2,182	23,100		
1: 0,51: 2,89: 3,60	7,124	20,778	3,444	24,310	C (kg/m³)	268,50
1: 0,68: 2,72: 3,60	7,536	20,778	4,844	25,647		
1: 0,85: 2,55: 3,60	7,995	20,778	6,406	27,129	H (%)	10,27
1: 1,02: 2,38: 3,60	8,510	20,778	8,155	30,635		

Fonte: o autor

Tabela 15- Traços de concreto autoadensável com finos de concreto

CAA_Fcon_2,5						
TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	FINOS CONCRETO (kg)	BRITA (kg)	Água (kg)	
1: 0,93: 1,58	12,698	11,746	0,000	20,000	SP (%)	5,78
1: 0,09: 0,83: 1,57	14,032	11,746	1,233	22,100	C (kg/m³)	620,70
1: 0,14: 0,78: 1,57	14,803	11,746	1,947	23,315		
1: 0,18: 0,74: 1,57	15,659	11,746	2,739	24,663	H (%)	11,20
1: 0,23: 0,69: 1,57	16,613	11,746	3,621	26,166		
CAA_Fcon_4						
TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	FINOS CONCRETO (kg)	BRITA (kg)	Água (kg)	
1: 1,75: 2,25	8,889	15,555	0,000	20,000	SP (%)	4,52
1: 0,17: 1,58: 2,25	9,822	15,555	1,633	22,100	C (kg/m³)	451,10
1: 0,26: 1,48: 2,25	10,362	15,555	2,578	23,315		
1: 0,35: 1,40: 2,25	10,961	15,555	3,627	24,663	H (%)	8,55
1: 0,44: 1,31: 2,25	11,629	15,555	4,796	26,166		
CAA_Fcon_5,5						
TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	FINOS CONCRETO (kg)	BRITA (kg)	Água (kg)	
1: 2,58: 2,93	6,838	17,606	0,000	20,000	SP (%)	4,18
1: 0,26: 2,32: 2,93	7,556	17,606	1,849	22,100	C (kg/m³)	344,70
1: 0,39: 2,19: 2,93	7,971	17,606	2,918	23,315		
1: 0,52: 2,06: 2,93	8,432	17,606	4,105	24,663	H (%)	8,55
1: 0,65: 1,93: 2,93	8,946	17,606	5,428	26,166		
CAA_Fcon_7						
TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	FINOS CONCRETO (kg)	BRITA (kg)	Água (kg)	
1: 3,4: 3,6	5,556	18,889	0,000	20,000	SP (%)	5,41
1: 0,34: 3,06: 3,6	6,139	18,889	1,983	22,100	C (kg/m³)	270,80
1: 0,51: 2,89: 3,6	6,476	18,889	3,131	23,315		
1: 0,68: 2,72: 3,6	6,851	18,889	4,404	24,663	H (%)	9,80
1: 0,85: 2,55: 3,6	7,268	18,889	5,823	26,166		

Fonte: o autor

Tabela 16- Traços de concreto autoadensável com finos de argamassa

CAA_Farg_2,5						
TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	FINOS ARGAMASSA (kg)	BRITA (kg)	Água (kg)	
1: 0,93: 1,58	13,968	12,921	0,000	22,000	SP (%)	5,88
1: 0,09: 0,83: 1,57	15,435	12,921	1,357	23,100	C (kg/m³)	637,45
1: 0,14: 0,78: 1,57	16,283	12,921	2,142	24,310		
1: 0,18: 0,74: 1,57	17,225	12,921	3,012	25,647	H (%)	9,78
1: 0,23: 0,69: 1,57	18,274	12,921	3,983	27,129		
CAA_Farg_4						
TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	FINOS ARGAMASSA (kg)	BRITA (kg)	Água (kg)	
1: 1,75: 2,25	9,778	17,111	0,000	22,000	SP (%)	5,60
1: 0,18: 1,58: 2,25	10,804	17,111	1,797	23,100	C (kg/m³)	442,09
1: 0,26: 1,49: 2,25	11,398	17,111	2,836	24,310		
1: 0,35: 1,40: 2,25	12,057	17,111	3,989	25,647	H (%)	9,29
1: 0,44: 1,31: 2,25	12,792	17,111	5,275	27,129		

Tabela 17- Traços de concreto autoadensável com finos de argamassa

CAA_Farg_5,5						
TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	FINOS ARGAMASSA (kg)	BRITA (kg)	Água (kg)	
1: 2,58: 2,93	7,527	19,368	0,000	22,000	SP (%)	6,26
1: 0,26: 2,32: 2,93	8,311	19,368	2,034	23,100	C (kg/m³)	328,72
1: 0,39: 2,19: 2,93	8,768	19,368	3,210	24,310		
1: 0,52: 2,06: 2,93	9,275	19,368	4,516	25,647	H (%)	10,37
1: 0,64: 1,93: 2,93	9,840	19,368	5,971	27,129		
CAA_Farg_7						
TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	FINOS ARGAMASSA (kg)	BRITA (kg)	Água (kg)	
1: 3,4: 3,6	6,111	20,778	0,000	22,000	SP (%)	7,20
1: 0,34: 3,06: 3,60	6,753	20,778	2,182	23,100	C (kg/m³)	260,68
1:0,51: 2,89: 3,60	7,124	20,778	3,444	24,310		
1: 0,68: 2,72: 3,60	7,536	20,778	4,844	25,647	H (%)	11,25
1: 0,85: 2,55: 3,60	7,995	20,778	6,406	27,129		

Fonte: o autor

Tabela 18- Traços de concreto autoadensável com finos cerâmicos

CAA_Fcer_2,5						
TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	FINOS CERÂMICO (kg)	BRITA (kg)	Água (kg)	
1: 0,93: 1,58	13,968	12,921	0,000	22,000	SP (%)	5,82
1: 0,09: 0,83: 1,57	15,435	12,921	1,357	23,100	C (kg/m³)	634,19
1: 0,14: 0,78: 1,57	16,283	12,921	2,142	24,310		
1: 0,18: 0,74: 1,57	17,225	12,921	3,012	25,647	H (%)	10,24
1: 0,23: 0,69: 1,57	18,274	12,921	3,983	27,129		
CAA_Fcer_4						
TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	FINOS CERÂMICO (kg)	BRITA (kg)	Água (kg)	
1: 1,75: 2,25	9,778	17,111	0,000	22,000	SP (%)	5,84
1: 0,18: 1,58: 2,25	10,804	17,111	1,797	23,100	C (kg/m³)	436,74
1: 0,26: 1,49: 2,25	11,398	17,111	2,836	24,310		
1: 0,35: 1,40: 2,25	12,057	17,111	3,989	25,647	H (%)	10,26
1:0,44: 1,31: 2,25	12,792	17,111	5,275	27,129		
CAA_Fcer_5,5						
TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	FINOS CERÂMICO (kg)	BRITA (kg)	Água (kg)	
1: 2,58: 2,93	7,527	19,368	0,000	22,000	SP (%)	7,27
1: 0,26: 2,32: 2,93	8,311	19,368	2,034	23,100	C (kg/m³)	315,14
1: 0,39: 2,19: 2,93	8,768	19,368	3,210	24,310		
1: 0,52: 2,06: 2,93	9,275	19,368	4,516	25,647	H (%)	12,74
1: 0,64: 1,93: 2,93	9,840	19,368	5,971	27,129		
CAA_Fcer_7						
TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	FINOS CERÂMICO (kg)	BRITA (kg)	Água (kg)	
1: 3,4: 3,6	6,111	20,778	0,000	22,000	SP (%)	7,56
1: 0,34: 3,06: 3,60	6,753	20,778	2,182	23,100	C (kg/m³)	256,37
1:0,51: 2,89: 3,60	7,124	20,778	3,444	24,310		
1: 0,68: 2,72: 3,60	7,536	20,778	4,844	25,647	H (%)	12,54
1: 0,85: 2,55: 3,60	7,995	20,778	6,406	27,129		

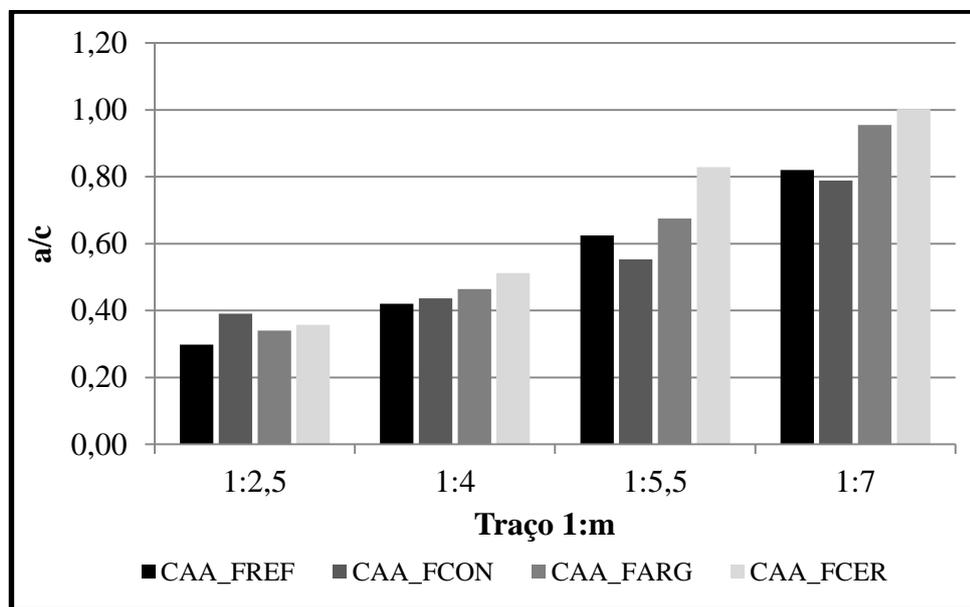
Fonte: o autor

Na dosagem realizada, percebe-se que o teor de finos adicionados à mistura foi superior para os traços mais pobres, com menor consumo de cimento. Isso é justificado pelo fato do

CAA necessitar de material fino em sua composição para alcançar todas as características de autoadensabilidade, principalmente o que tange à coesão e à resistência à segregação.

A figura 31 traz a relação água/cimento para cada traço de concreto realizado no estudo. Percebe-se que, nos traços mais ricos, os concretos de referência têm relação a/c menor que os concretos com finos de RCD. Tal resultado pode ser explicado pelo fato dos finos terem maiores superfícies específicas quando comparados a areia, justificando uma maior demanda de água, acarretando em uma maior relação água/cimento para a mistura.

Figura 31 - relação água/cimento dos traços executados no estudo



Fonte: o autor

De uma forma geral, é notado que os concretos de referência necessitam de maior teor de finos para alcançar as principais características de autoadensabilidade quando comparados aos concretos finos de RCD. Contudo, devido a maior granulometria e forma arredondada dos grãos de areia, há uma menor demanda de água para a mistura o que garante menor relação a/c para o concreto.

Dentre os finos de RCD, é perceptível que os finos de concreto e de argamassa têm aproximadamente o mesmo diâmetro máximo, porém os finos de concreto demandam menos material que o de areia e de argamassa. Já os finos cerâmicos, cujo dispõem de uma menor granulometria e maior superfície específica, necessitam de menos material para a mistura, porém observa-se uma maior demanda de água, ocasionando em uma maior relação a/c entre todas as configurações.

A tabela 19 apresenta os resultados que avaliam os parâmetros de autoadensabilidade dos concretos, como slump flow, slump flow T₅₀, caixa L e funil V, bem como as suas respectivas classes de enquadramento definidas pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017). Vale ressaltar que para o concreto ser considerado como autoadensável deve se enquadrar, no mínimo, na classificação prescrita para os ensaios de slump flow, slump flow T₅₀ ou funil V, anel J ou caixa L, com a comprovação das propriedades de fluidez, habilidade passante e viscosidade aparente.

Tabela 19- Resultados dos ensaios dos CAAs no estado fresco.

Configuração	a/c	SP (%)	Espalhamento		Estabilidade visual	Slump Flow T50		Caixa L		Funil V	
			(mm)	classe	classe	(s)	classe	(H2/H1)	classe	(s)	classe
CAA_REF_2,5	0,30	0,91	670	SF2	IEV 0	2,13	VS 2	0,90	PL 2	6,03	VF 1
CAA_REF_4	0,42	0,91	660	SF2	IEV 0	1,94	VS 1	0,87	PL 2	5,81	VF 1
CAA_REF_5,5	0,62	0,91	660	SF2	IEV 0	2,06	VS 2	0,90	PL 2	5,94	VF 1
CAA_REF_7	0,82	0,91	663	SF2	IEV 1	1,87	VS 1	0,88	PL 2	5,92	VF 1
CAA_Fcon_2,5	0,39	0,91	680	SF2	IEV 0	2,34	VS 2	1,00	PL 2	7,23	VF 1
CAA_Fcon_4	0,44	0,91	666	SF2	IEV 0	2,12	VS 2	0,95	PL 2	6,98	VF 1
CAA_Fcon_5,5	0,55	0,91	680	SF2	IEV 0	2,37	VS 2	0,90	PL 2	6,91	VF 1
CAA_Fcon_7	0,79	0,91	680	SF2	IEV 0	2,48	VS 2	0,90	PL 2	7,54	VF 1
CAA_Fcer_2,5	0,36	0,91	673	SF2	IEV 0	2,51	VS 2	0,90	PL 2	6,72	VF 1
CAA_Fcer_4	0,51	0,91	663	SF2	IEV 0	2,14	VS 2	1,00	PL 2	6,95	VF 1
CAA_Fcer_5,5	0,83	0,91	667	SF2	IEV 0	2,28	VS 2	0,91	PL 2	6,33	VF 1
CAA_Fcer_7	1,00	0,91	680	SF2	IEV 0	2,47	VS 2	0,89	PL 2	6,34	VF 1
CAA_Farg_2,5	0,34	0,91	680	SF2	IEV 1	2,18	VS 2	0,95	PL 2	7,03	VF 1
CAA_Farg_4	0,46	0,91	673	SF2	IEV 1	2,31	VS 2	0,93	PL 2	7,14	VF 1
CAA_Farg_5,5	0,67	0,91	660	SF2	IEV 0	2,06	VS 2	0,95	PL 2	6,23	VF 1
CAA_Farg_7	0,96	0,91	666	SF2	IEV 0	2,42	VS 2	0,92	PL 2	6,47	VF 1

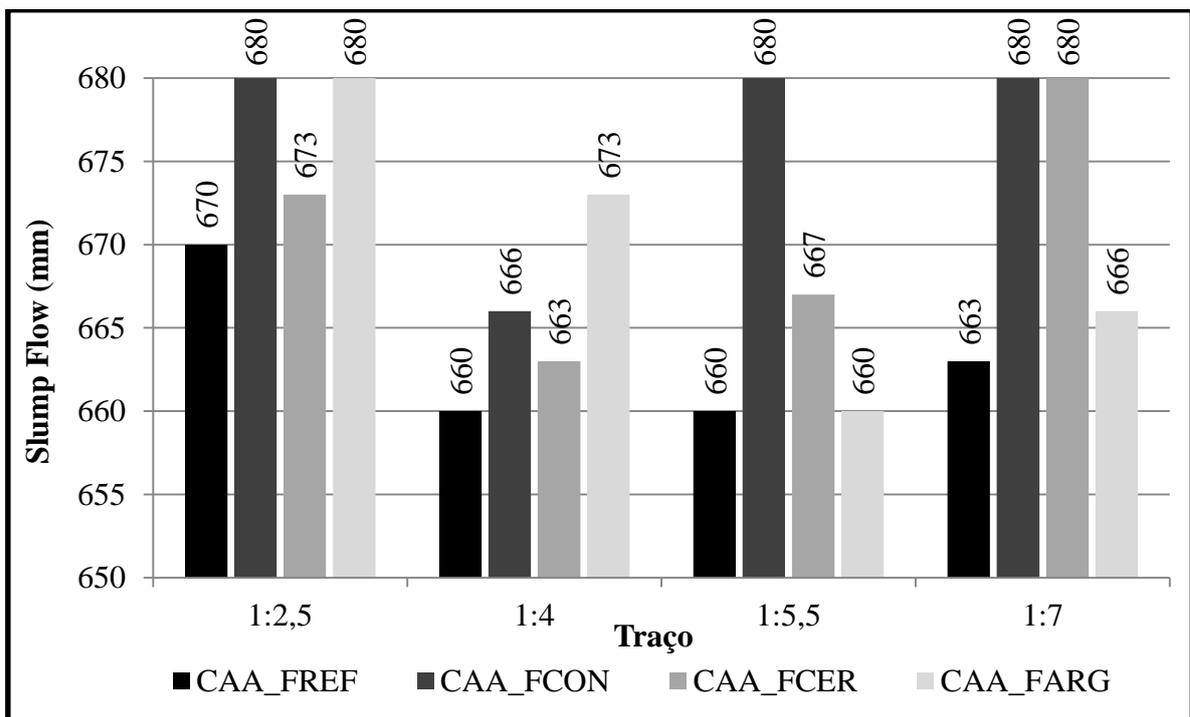
Fonte: autor

Os resultados mostram que todos os concretos produzidos no estudo são aceitáveis quanto aos critérios de autoadensabilidade estabelecidos pela ABNT NBR 15823-1 (2017). Dentre esses concretos, pode-se dizer que a substituição da areia por materiais finos de RCD confere boas características de autoadensabilidade, corroborando as constatações observadas por Hu, Wang e Kim (2016); Santos, da Silva e de Brito (2017) os quais afirmam que o emprego de finos de resíduos de construção garante condições satisfatórias de autoadensabilidade em CAA.

As dezesseis configurações de concreto podem ser classificadas, quanto ao espalhamento, na classe SF 2 (660 a 750 mm), sendo adequada para todas as aplicações correntes, conforme já exposto na metodologia de pesquisa.

Através dos resultados obtidos pode-se observar que houve um pequeno aumento no espalhamento (Figura 32), maior tempo de escoamento no funil V e uma maior habilidade passante para os concretos autoadensáveis com finos de RCD quando comparados aos concretos de referência. GÜNEYISI *et al.* (2016), utilizando agregados reciclados de concreto em substituição à areia natural, alcançaram resultados semelhantes quanto ao aumento do espalhamento e maior habilidade passante dos concretos autoadensáveis reciclados.

Figura 32 - Resultado de espalhamento - Slump Flow test



Fonte: o autor

De fato, apesar de se observar um ligeiro aumento do espalhamento dos concretos autoadensáveis com finos de RCD em comparação aos CAA com areia fina, não se pode afirmar com convicção de que estes valores representam fielmente um aumento de espalhamento ou se é apenas resultado do emprego de uma maior quantidade de água durante a mistura, pois a maior diferença foi de 20 mm.

A viscosidade do concreto é medida pelo tempo de escoamento, uma vez que quanto maior o tempo de escoamento do concreto, maior será a sua viscosidade. De acordo com os resultados, os concretos com agregados reciclados estão em conformidade com a norma ABNT NBR 15823:1 (2017) e foram classificados como VS2, pois atingiram um tempo superior a 2 segundos. Já o concreto de referência, apenas o traço mais rico em cimento e o traço 1:5,5 são

classificados como VS2, sendo os demais classificados como VS1, pois atingiram um tempo de escoamento inferior a 2 segundos.

Percebe-se que foi necessário aumentar a quantidade de água da mistura na maioria dos traços de concreto apresentados com finos de RCD, fato esse atribuído a maior superfície específica e a forma lamelar das partículas. Felekoglu (2007) estudou a demanda de água em concretos com diferentes microfinos e também percebeu que a superfície específica, a forma e superfície das partículas são importantes e afetam o comportamento dos CAAs, retendo maior quantidade de água de amassamento. Quanto mais arredondado ou cúbico for o grão do agregado, menor a demanda de água para um mesmo espalhamento e, conseqüentemente, menor a quantidade de pasta necessária para envolver os grãos e promover a mobilidade da mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Todos os concretos confeccionados no presente trabalho apresentaram aspecto coeso. Entretanto, visualmente foi mais evidente que os concretos com agregados reciclados apresentaram-se mais coesos que os concretos de referência, devido o seu menor diâmetro máximo, melhorando de forma considerável esta propriedade de autoadensabilidade do CAA.

O índice de estabilidade visual permite avaliar os concretos autoadensáveis de forma qualitativa, quanto à segregação e exsudação. Assim sendo, para as configurações CAA_FREF_7, CAA_FARG_2,5 e CAA_FARG_4 observa-se uma leve exsudação em volta do seu espalhamento, sendo classificadas como IEV 1 (sem presença de segregação e leve exsudação). Os demais concretos se mostram com estabilidade visual estável, sem presença de segregação e exsudação, sendo classificados como IEV 0. As Figuras 33 a 48 ilustram os aspectos de espalhamento dos concretos do estudo.

Figura 33- CAA_FREF_2,5



Figura 34- CAA_FREF_4



Figura 35- CAA_FREF_5,5



Figura 36-CAA_FREF_7



Figura 37-CAA_FCON_2,5



Figura 38- CAA_FCON_4



Figura 39- CAA_FCON_5,5



Figura 40-CAA_FCON_7



Figura 41-CAA_FARG_2,5



Figura 42-CAA_FARG_4



Figura 43-CAA_FARG_5,5



Figura 44- CAA_FARG_7



Figura 45-CAA_FCER_2,5



Figura 46-CAA_FCER_5,5



Figura 47- CAA_FCER_5,5



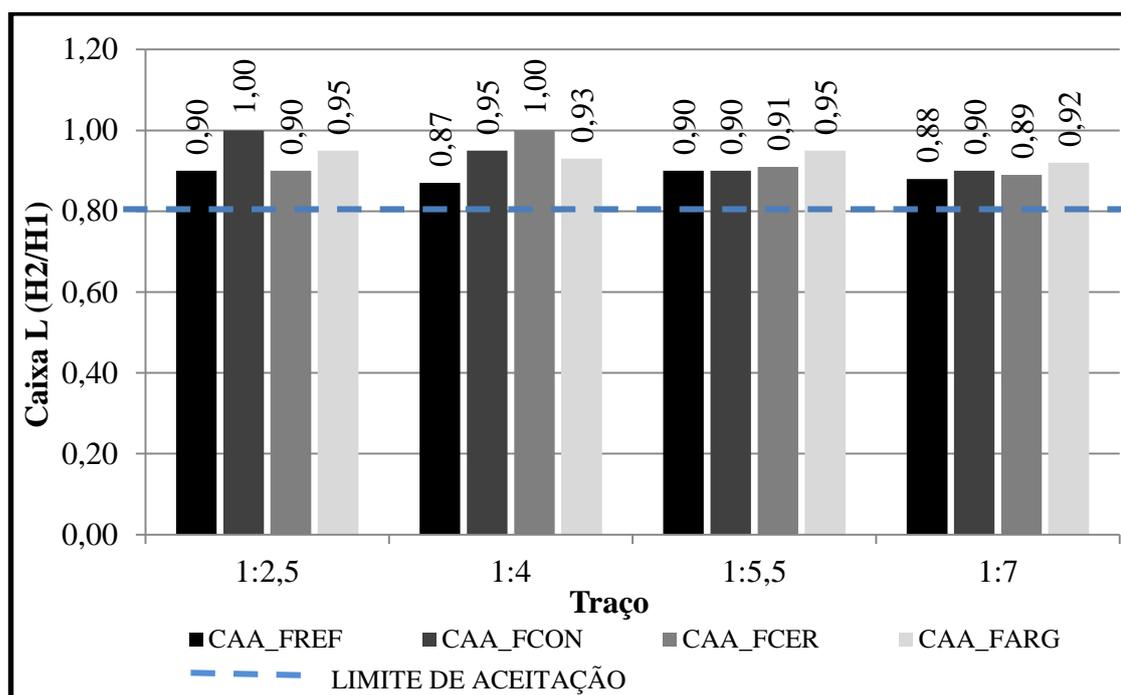
Figura 48- CAA_FCER_7



Fonte: o autor

Após verificar que os concretos se enquadravam dentro da classe de espalhamento satisfatória, partiu-se imediatamente para a verificação da habilidade passante por obstáculos através do ensaio da caixa L. Neste ensaio, foi perceptível que os concretos com agregados reciclados tiveram uma menor resistência à passagem pelas barras de aço da caixa L em comparação ao concreto de referência. Entretanto, o desempenho dos CAAs foi aceitável para todas as misturas, com razão entre as alturas da superfície do concreto nas extremidades da caixa L variando de 0,87 a 1,00, conforme observado na tabela 19 e figura 49, o que classifica os concretos na classe PL2, cuja aplicação é adequada para a maioria das aplicações correntes, com elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 a 80 mm.

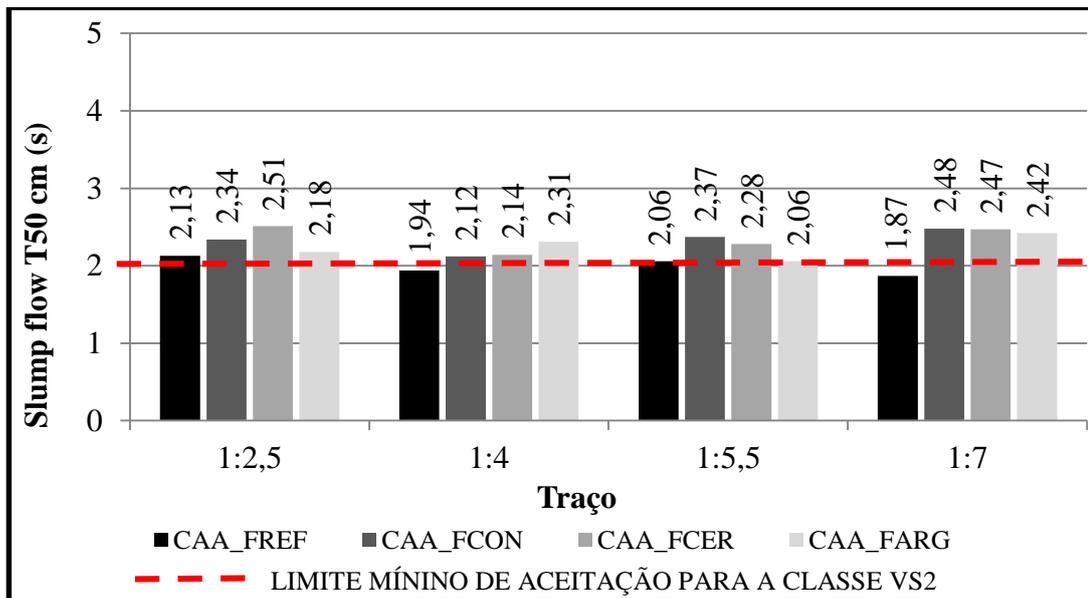
Figura 49 - Ensaio da caixa L dos concretos



Fonte: o autor

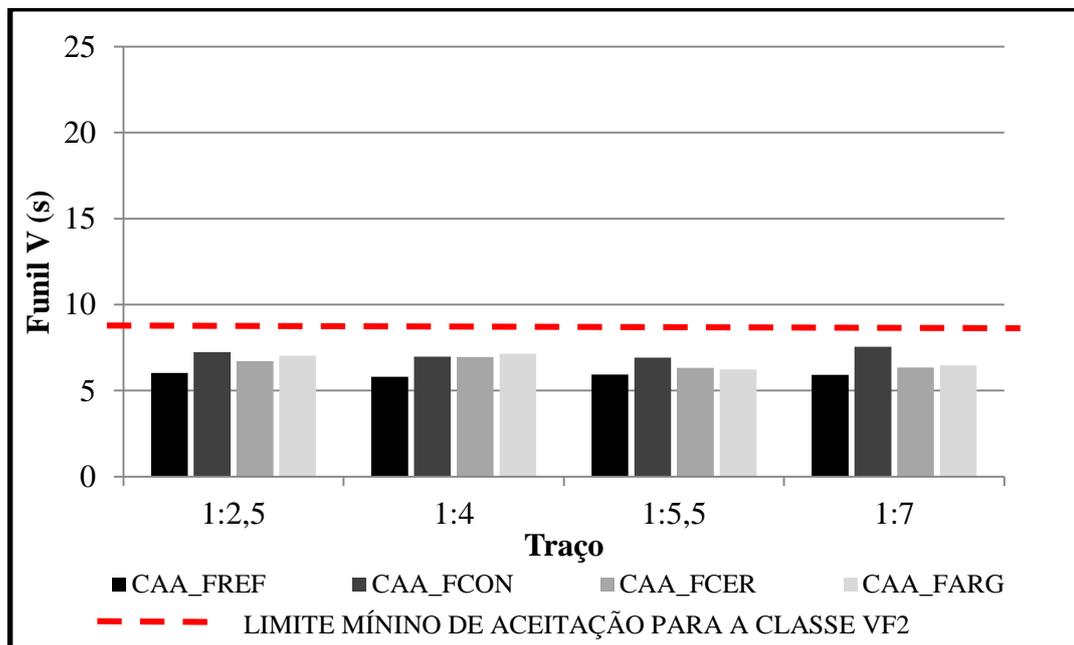
Em seguida, realizou-se o ensaio do funil V para verificação da fluidez e da viscosidade plástica do concreto. De acordo com a NBR 15853:1 (ABNT, 2017), o CAA com baixa viscosidade apresenta um rápido espalhamento. Por sua vez, o CAA com alta viscosidade pode continuar a se mover de forma lenta e progressiva por um tempo maior. Os resultados validam essa afirmação, pois se verificou que com o emprego de agregados finos reciclados houve um aumento da viscosidade do concreto e conseqüentemente, o tempo de escoamento foi maior que o do concreto de referência. Entretanto, percebe-se que os concretos apresentaram resultados satisfatórios, ficando dentro dos valores recomendados para o escoamento da mistura, conforme mostra a figura 50, porém, em alguns casos houve divergências nos resultados em relação à classe de viscosidade plástica aparente dos CAA em função da sua aplicação. O tempo de escoamento medido pelo slump flow T_{50} (Figura 50) para os concretos com finos de RCD apresentou-se na classe VS 2 e os concretos de referência se enquadraram na classe VS1 e VS2. Contudo, o tempo de escoamento pelo funil V assegura que todos os concretos estão na categoria VF 1, cujo uso é adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos e com concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com descolamento livre.

Figura 50- Resultado do ensaio slump flow T50 cm dos concretos



Fonte: o autor

Figura 51- Resultados dos ensaios do Funil V dos concretos



Fonte: o autor

O fato dos concretos com agregados reciclados escoarem mais lentamente que o concreto de referência pode está associado à forma e à rugosidade dos grãos. O processo de beneficiamento desses resíduos por meio da britagem confere aos agregados uma forma mais

lamelar, o que resulta num maior intertravamento das partículas, aumentando o tempo de escoamento da mistura.

4.2 Resultados e discussões dos concretos autoadensáveis no estado endurecido

4.2.1 Resistência à compressão

Conforme evidenciado no tópico “métodos” (item 3.6) deste trabalho, foram produzidos quatro traços de concreto para cada material fino adicionado à mistura, com teores de substituição que variou de 10 a 30% em massa do agregado miúdo natural. As tabelas 20 a 23 apresentam os valores da carga de ruptura em (KN), assim como a resistência à compressão axial média (MPa) dos vários tipos de concretos estudados, nas idades de ruptura de 7 e 28 dias, com suas respectivas análises de desvio padrão e coeficiente de variação, permitindo avaliar tecnicamente a possibilidade de uso dos finos de RCD em concreto, no que tange o quesito de resistência mecânica.

Tabela 20- Resistência à compressão dos concretos de referência

Tipo de CAA	Idade de ruptura	Traço	Nº amostras	F (kN)	Fc (MPa)	Fméd (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Coef. Variação	
CAA_FREF	7 dias	m=2,5	CP1	256,40	32,81	34,38	2,21	6,44%	
			CP2	280,30	35,94				
		m=4	CP1	182,30	23,43	23,17	0,37	1,59%	
			CP2	179,90	22,91				
		m=5,5	CP1	146,90	18,78	18,16	0,88	4,83%	
			CP2	136,50	17,54				
		m=7	CP1	99,10	12,70	13,03	0,47	3,58%	
			CP2	103,30	13,36				
		28 dias	m=2,5	CP1	320,10	41,07	40,72	0,90	2,20%
				CP2	310,40	39,70			
				CP3	325,05	41,39			
			m=4	CP1	199,40	25,55	25,58	0,18	0,71%
	CP2			199,00	25,42				
	CP3			202,50	25,78				
	m=5,5		CP1	159,00	20,48	21,72	1,23	5,65%	
			CP2	175,80	22,50				
			CP3	180,72	23,01				
			CP4	164,02	20,88				
m=7	CP1		115,30	14,71	14,75	0,81	5,46%		
	CP2		108,70	13,96					
	CP3	122,32	15,57						

Fonte: autor

Tabela 21 - Resistência à compressão dos concretos com finos de concreto

Tipo de CAA	Idade de ruptura	Traço	Nº amostras	F (kN)	Fc (MPa)	Fméd (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Coef. Variação	
CAA_FCON	7 dias	m=2,5	CP1	271,30	34,83	35,01	0,25	0,71%	
			CP2	272,40	35,18				
		m=4	CP1	262,10	33,51	33,48	0,04	0,13%	
			CP2	262,70	33,45				
		m=5,5	CP1	207,20	26,38	25,66	1,02	3,97%	
			CP2	192,00	24,94				
		m=7	CP1	152,30	19,47	20,22	1,05	5,21%	
			CP2	163,60	20,96				
		28 dias	m=2,5	CP1	293,40	37,69	38,78	1,57	4,06%
				CP2	296,20	38,06			
	CP3			318,69	40,58				
	m=4		CP1	304,90	39,10	38,51	1,97	5,12%	
			CP2	296,90	37,98				
			CP3	320,70	40,83				
	m=5,5		CP1	241,30	30,72	31,11	0,72	2,30%	
			CP2	250,87	31,94				
			CP3	240,90	30,68				
	m=7		CP1	202,50	26,00	26,04	0,06	0,22%	
		CP2	204,82	26,08					

Fonte: autor

Tabela 22 - Resistência à compressão dos concretos com finos cerâmicos

Tipo de CAA	Idade de ruptura	Traço	Nº amostras	F (kN)	Fc (MPa)	Fméd (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Coef. Variação	
CAA_FCER	7 dias	m=2,5	CP1	213,90	28,07	28,06	0,02	0,08%	
			CP2	218,10	28,04				
		m=4	CP1	172,50	22,06	21,60	0,66	3,05%	
			CP2	166,00	21,13				
		m=5,5	CP1	100,90	12,97	13,09	0,16	1,24%	
			CP2	103,20	13,20				
		m=7	CP1	95,70	12,26	12,11	0,21	1,75%	
			CP2	92,60	11,96				
		28 dias	m=2,5	CP1	282,00	36,33	35,67	1,10	2,70%
				CP2	289,50	36,86			
	CP3			274,80	34,99				
	CP4			271,10	34,51				
	m=4		CP1	229,10	29,35	29,82	1,48	4,95%	
			CP2	224,70	28,63				
			CP3	247,17	31,47				
	m=5,5		CP1	143,30	18,32	18,53	0,94	5,09%	
			CP2	138,80	17,71				
			CP3	153,40	19,56				
	m=7	CP1	133,80	17,20	17,60	0,51	2,88%		
		CP2	136,90	17,43					
CP3		142,71	18,17						

Fonte: autor

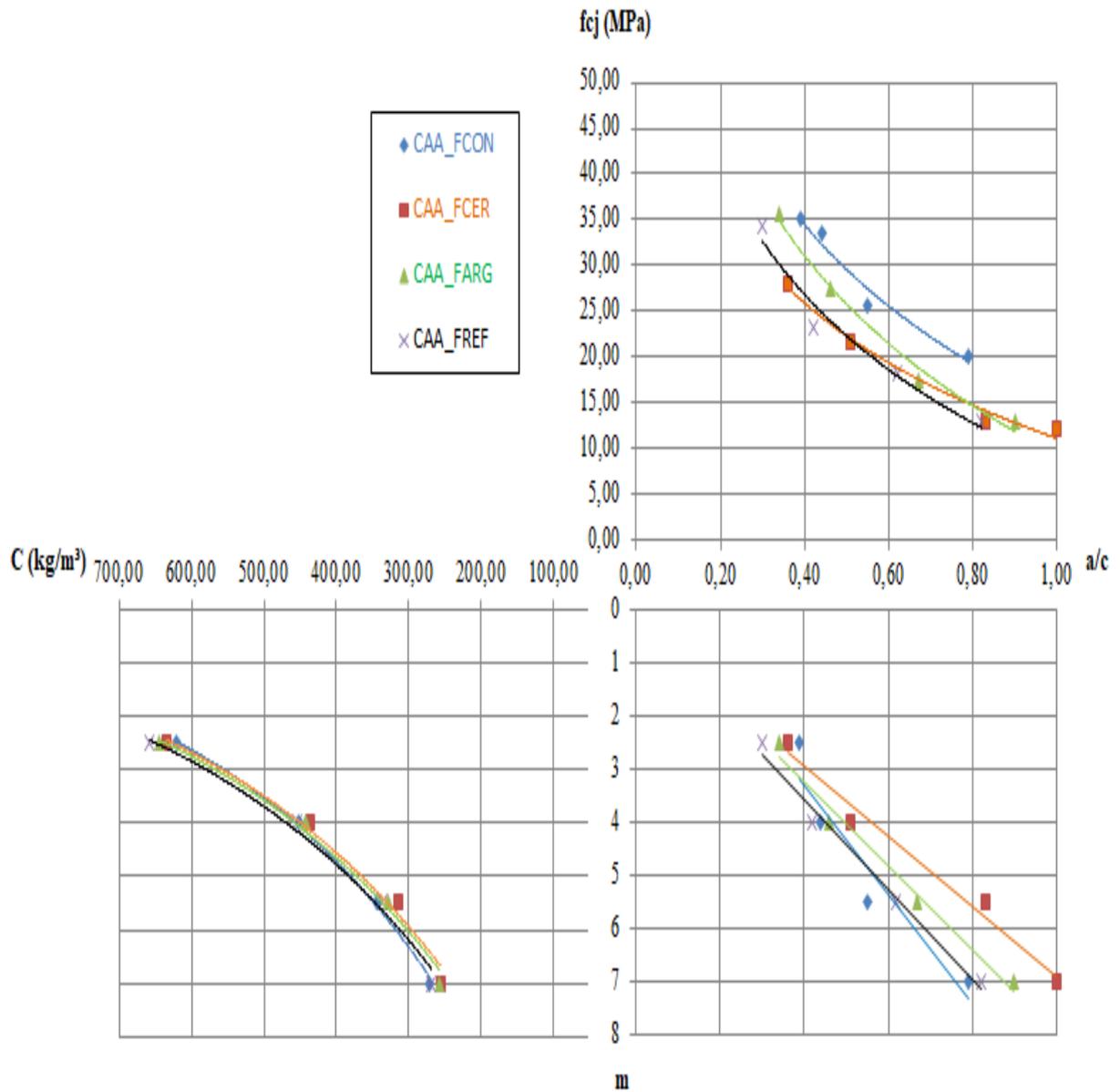
Tabela 23 - Resistência à compressão dos concretos com finos de argamassa

Tipo de CAA	Idade de ruptura	Traço	Nº amostras	F (kN)	Fc (MPa)	Fméd (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Coef. Variação
CAA_FARG	7 dias	m=2,5	CP1	278,70	35,55	35,62	0,00	0,00%
			CP2	278,60	35,62			
		m=4	CP1	223,30	28,66	27,40	1,78	6,50%
			CP2	204,50	26,14			
		m=5,5	CP1	138,80	17,85	17,32	0,76	4,37%
			CP2	131,30	16,78			
	m=7	CP1	101,30	12,98	13,06	0,11	0,81%	
		CP2	103,10	13,13				
	28 dias	m=2,5	CP1	404,30	51,63	50,08	2,20	4,39%
			CP2	381,05	48,52			
		m=4	CP1	265,40	33,99	35,54	1,34	3,77%
			CP2	283,70	36,26			
			CP3	285,20	36,36			
		m=5,5	CP1	184,90	23,68	22,78	0,78	3,41%
			CP2	173,60	22,31			
			CP3	175,58	22,36			
		m=7	CP1	123,36	15,71	15,91	0,28	1,78%
			CP2	126,54	16,11			

Fonte: autor

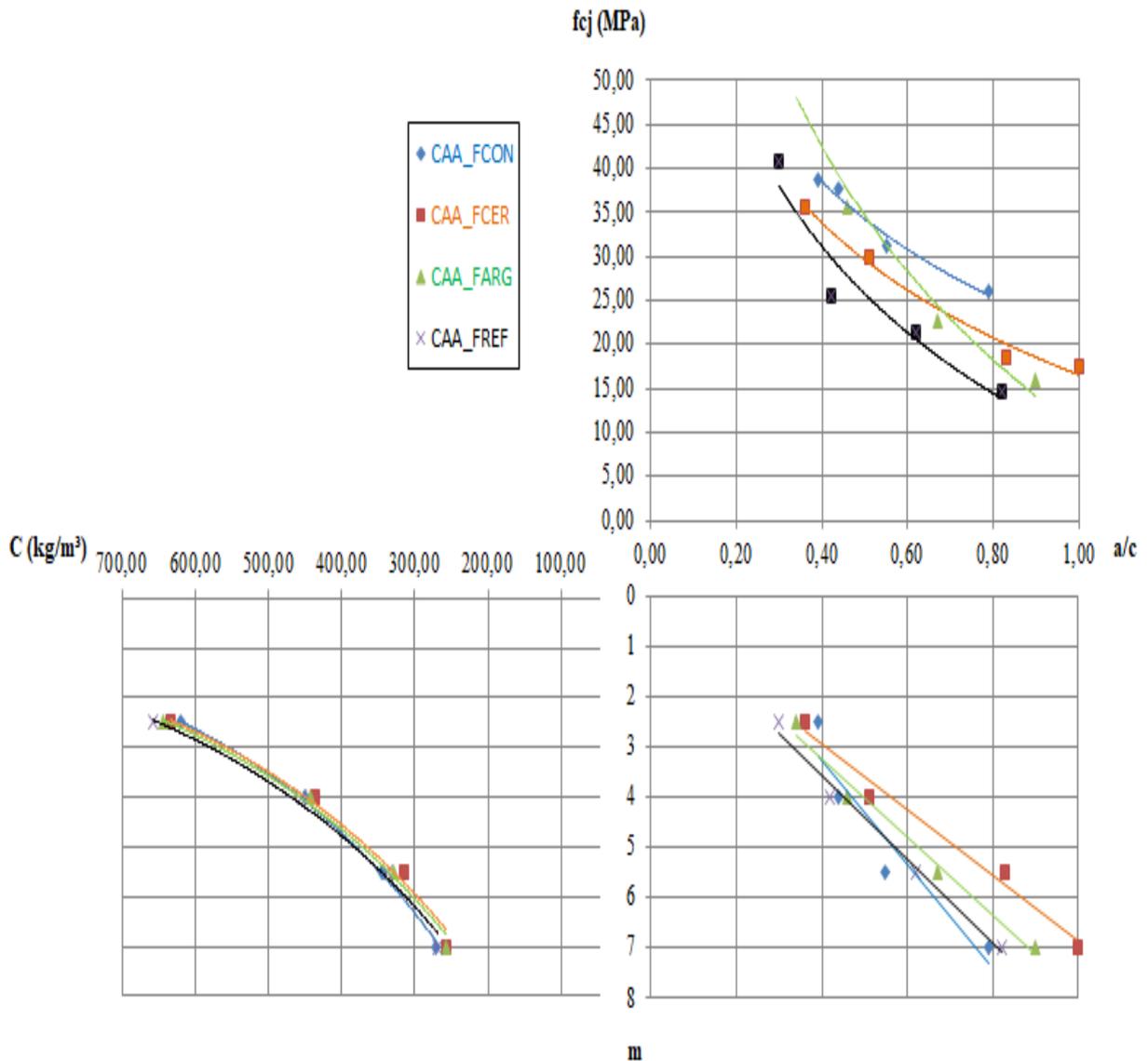
As curvas de dosagem apresentam uma relação direta da resistência à compressão, da relação água/cimento, do traço e do consumo de cimento dos concretos. No eixo y do diagrama estão representados a resistência à compressão, em MPa, e o traço “m” cimento/agregados secos, enquanto o eixo x representa a relação água/cimento e o consumo de cimento dos concretos. Assim sendo, a partir desse diagrama é possível obter possibilidades de escolhas de traços, o qual determinará, com base em critérios técnicos e econômicos, o melhor concreto a utilizar em uma situação real. Os diagramas de dosagem dos corpos de prova de concretos rompidos nas idades de 7 e 28 dias, considerando todos os finos avaliados, encontram-se apresentados nas figuras 52 e 53.

Figura 52- Diagrama de dosagem dos concretos aos 7 dias



Fonte: o autor

Figura 53- Diagrama de dosagem dos concretos aos 28 dias



Fonte: o autor

O método de dosagem proposto no trabalho, no que se refere à determinação do diagrama de dosagem, tem como referência às leis básicas de comportamento (Abrams, Lyse e Molinari). Assim sendo, o diagrama de dosagem deve ser utilizado apenas para aproximação de valores e para cálculos mais fidedignos à realidade são usadas as equações de comportamento. Posto isto, é possível extrair valores de resistência à compressão, a partir da relação água/cimento desejada, bem como o traço em massa e o consumo de cimento dos concretos. A tabela 24 apresenta as equações de comportamento e seus coeficientes, devidamente ajustados pelo método dos mínimos quadrados correspondentes a cada configuração de concreto. As planilhas de regressão das curvas de dosagem estão no anexo A.

Tabela 24- Equações de dosagem – Resistência à compressão (MPa) em função da relação a/c (kg/kg), teor de agregados secos (m) em função da relação a/c (kg/kg); consumo de cimento em relação ao teor de agregados secos (m)

EQUAÇÕES DE COMPORTAMENTO				
CONCRETO	LEI DE ABRAMS		LEI DE LYSE	LEI DE MOLINARI
	7 dias	28 dias		
CAA_FREF	$f_{c7} = \frac{53,787}{5,790 \text{ a/c}}$	$f_{c28} = \frac{62,818}{5,979 \text{ a/c}}$	$m = 0,204 + 8,418 * a/c$	$C = \frac{1000}{0,266 + 0,492 * m}$
	$r^2 = 0,964$	$r^2 = 0,937$	$r^2 = 0,987$	$r^2 = 0,999$
CAA_FCON	$f_{c7} = \frac{59,858}{4,077 \text{ a/c}}$	$f_{c28} = \frac{57,537}{2,786 \text{ a/c}}$	$m = -0,856 + 10,334 * a/c$	$C = \frac{1000}{0,411 + 0,462 * m}$
	$r^2 = 0,960$	$r^2 = 0,9634$	$r^2 = 0,902$	$r^2 = 0,996$
CAA_FARG	$f_{c7} = \frac{63,961}{6,169 \text{ a/c}}$	$f_{c28} = \frac{94,861}{7,624 \text{ a/c}}$	$m = 0,132 + 7,793 * a/c$	$C = \frac{1000}{0,276 + 0,505 * m}$
	$r^2 = 0,983$	$r^2 = 0,968$	$r^2 = 0,982$	$r^2 = 0,999$
CAA_FCER	$f_{c7} = \frac{44,069}{3,893 \text{ a/c}}$	$f_{c28} = \frac{53,729}{3,246 \text{ a/c}}$	$m = 0,322 + 6,559 * a/c$	$C = \frac{1000}{0,247 + 0,523 * m}$
	$r^2 = 0,9717$	$r^2 = 0,968$	$r^2 = 0,979$	$r^2 = 0,998$

Fonte: o autor.

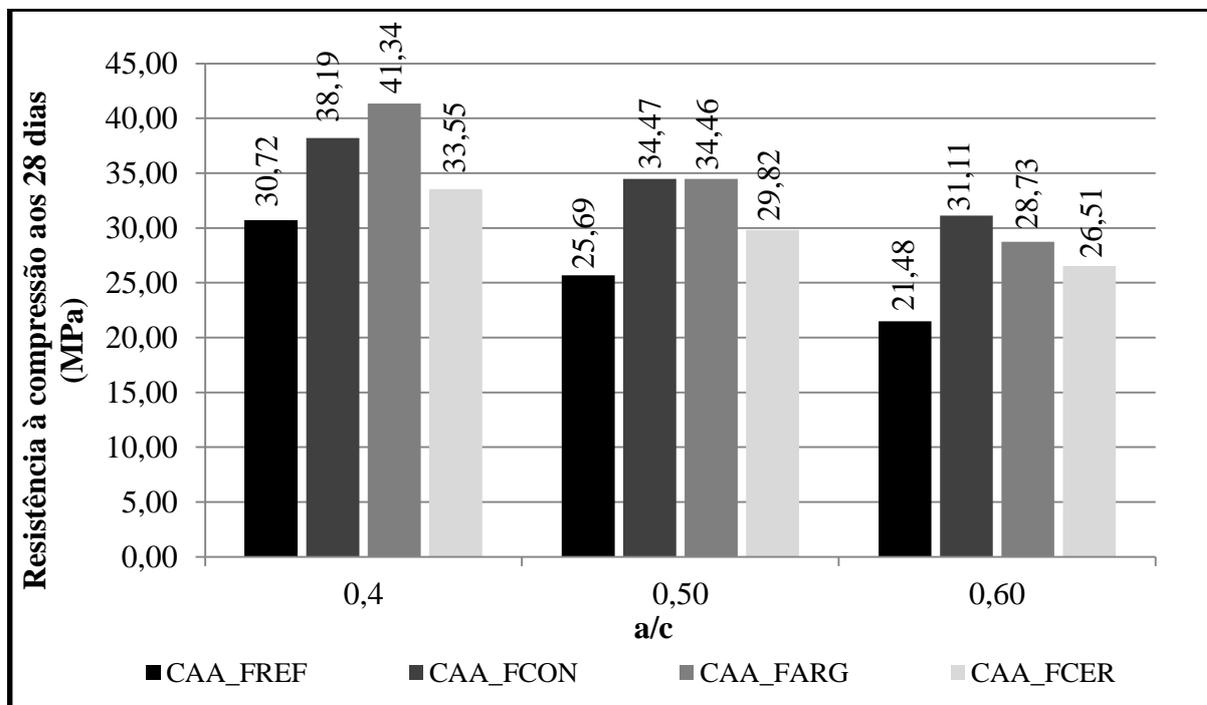
Com os diagramas plotados, é possível perceber que em ambos os casos (7 e 28 dias) os gráficos estão bem ajustados e com um r^2 considerado alto. Ainda, observa-se que houve um pequeno ganho de resistência à compressão de 7 para 28 dias, contudo esse resultado já era esperado, uma vez que utilizou-se um cimento CP-V ARI. Também é possível perceber que as curvas referentes aos concretos com finos reciclados apresentaram-se superiores àquelas referentes aos concretos de referência, caracterizando maiores resultados de resistência à compressão para um mesmo traço de concreto

Através da dosagem experimental dos CAAs fixou-se apenas o teor de aditivo em 0,91%, deixando livre a quantidade de água necessária para cada mistura de modo a obter a classe de espalhamento SF2, conforme já mencionado anteriormente, variando assim a relação água/cimento em todos os traços, tornando-se impossível a comparação de resultados de resistência à compressão sem a fixação de algum parâmetro do diagrama de dosagem.

Diante do exposto, fixou-se a relação a/c nos valores 0,4; 0,5 e 0,6 e calculou-se quais seriam as resistências obtidas, com base nas equações que representam o comportamento das

curvas dos gráficos de dosagem. A figura 54 apresenta o comparativo dos resultados de resistência à compressão dos concretos na idade de 28 dias.

Figura 54- Comparativo de resistência à compressão fixando a/c



Fonte: o autor

A partir do gráfico apresentado acima, percebe-se que os concretos que tiveram adição de finos de RCD em sua composição obtiveram resultados mais elevados de resistência à compressão quando comparado aos concretos de referência, alcançando um incremento de até 31%, como por exemplo, para o CAA_FCON. De forma geral, a literatura aponta redução na resistência à compressão dos concretos autoadensáveis produzidos com substituição da areia por agregados reciclados. López *et al* (2015), por exemplo, verificaram queda de 8 a 47% na resistência à compressão de CAA's produzido com agregado miúdo reciclado em teores de substituição de 20 a 100%. Em contraponto, mais recentemente, Kumar *et al.* (2017) observaram um ligeiro aumento de 5% na resistência à compressão de concretos autoadensáveis produzidos com 20% de agregados miúdos reciclados, e atribuíram tal fato à cura interna, propiciada pelas partículas de cimento anidro presentes nos agregados reciclados.

As misturas dos concretos com finos reciclados demandaram maiores quantidades de água. Entretanto, quando estabelecidos níveis de relação a/c comum a todos os concretos, foi possível verificar que as resistências são maiores para esses concretos que para os de referência.

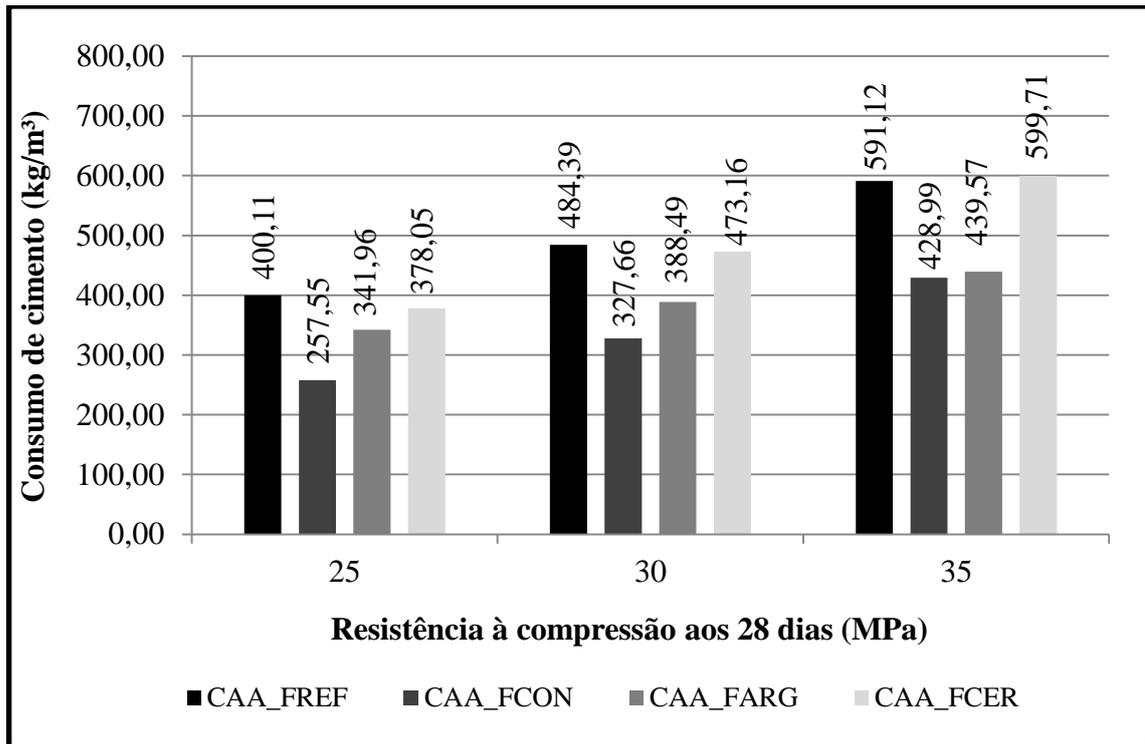
Além da possibilidade da cura interna das partículas de cimento anidro dos agregados oriundos de matriz cimentícia e, também, da reação pozolânica do material cerâmicos, tem-se que considerar o efeito da densidade de empacotamento dos grãos na mistura, uma vez que o diâmetro máximo dos finos de RCD utilizados é menor que a da areia utilizada no concreto de referência, preenchendo os vazios menores (efeito fíler).

A presença de partículas mais finas é capaz de preencher de forma mais efetiva o espaço entre os grãos de agregado, garantindo um melhor empacotamento da matriz, resultando na diminuição da porosidade do concreto, o que conduz a uma redução do espaço para a água livre e a uma maior dispersão das partículas de cimento. Isso assegura melhores condições de hidratação e maior quantidade de pontos de nucleação, propiciando um aumento da compacidade e da resistência mecânica do concreto (GHANNAM; NAJM; VASCONEZ, 2016; SINGH et.al., 2016; SCHANKOSKI, 2017).

Além disso, dentre os concretos com agregados reciclados, aqueles com finos cerâmicos apresentaram resultados inferiores de resistência à compressão em comparação aos de origem cimentícia (concreto e argamassa), com redução de aproximadamente 19%. Este resultado está ligado provavelmente à porosidade da estrutura do material cerâmico, com superfície específica mais elevada e, conseqüentemente, ocasionando uma maior absorção de água por parte do agregado reciclado, prejudicando deste modo a resistência mecânica do concreto (ZEGA; DI MAIO, 2011).

Normalmente, quando um concreto é dosado tem-se como parâmetro inicial a resistência à compressão. Assim, foi calculado o consumo de cimento dos concretos, a partir de comparações fixando três níveis de resistência à compressão. Para evitar extrapolação da curva de dosagem, adotou-se os valores de 25, 30 e 35 MPa, cujas rupturas ocorreram aos 28 dias de cura. A figura 55 mostra o consumo de cimento em kg/m³ dos concretos autoadensáveis estudados.

Figura 55- Comparativo de consumo de cimento fixando resistência



Fonte: o autor

Percebe-se que os concretos com agregados reciclados, de um modo geral, têm um consumo de cimento inferior ao concreto de referência. Entretanto em nível de resistência maior, neste caso em 35 MPa, o concreto com agregado fino cerâmico teve um ligeiro acréscimo de consumo de cimento, em relação ao concreto de referência. Dentre os concretos com agregados reciclados, os com finos cerâmicos têm um consumo de cimento mais elevado e o de concreto é o mais baixo em todos os níveis de resistência.

No estudo é possível constatar que para alcançar uma resistência mais alta, o consumo de cimento já se torna bastante elevado, dificultando a produção de concreto. Ao estabelecer nível de resistência de 35 MPa e fazendo as projeções nas curvas de dosagem, bem como utilizando as equações de comportamento de cada concreto produzido, verifica-se valores de consumo de cimento acima de 500 kg/m³, o que segundo a EFNARC, 2002; Tutikian, 2004; Domone, 2007, podem resultar no aumento da retração térmica, e conseqüentemente, levarem ao aparecimento de fissuras, comprometendo no quesito de durabilidade do concreto.

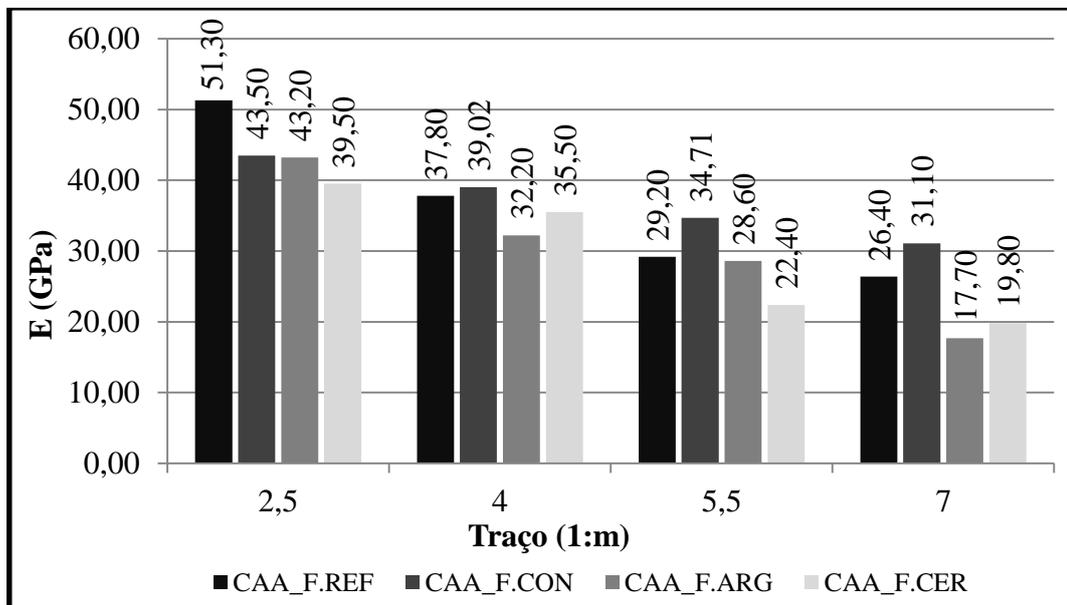
4.3 Módulo de elasticidade

O conhecimento do módulo de elasticidade auxilia na previsão de deformações, no conhecimento das tensões entre o concreto e o aço das estruturas de concreto armado e protendido, além de contribuir para o cálculo das tensões resultantes de retração (SOUZA *et.al.*, 2015). O módulo de elasticidade do concreto é dependente de vários fatores, tais como: a pasta de cimento hidratada, a granulometria, a dimensão máxima, a textura, a forma e a composição dos agregados utilizados, cujo módulo está intimamente ligado a sua porosidade, regendo a capacidade de restrição de deformação da matriz do concreto (LEITE, 2001).

O módulo de elasticidade dos concretos é uma das propriedades que tende a decrescer com a substituição de agregados naturais pelos agregados reciclados, devido ao fato desse material ser mais poroso, influenciando a rigidez do concreto. Assim, a figura 56 apresenta os resultados obtidos para o módulo de elasticidade de cada família de CAA.

É possível perceber que os valores de módulo de elasticidade sofreram uma redução à medida que os traços ficavam mais pobres, com resistências mais baixas e com maiores relações água/cimento, como era de se esperar.

Figura 56- Resultado de módulo de elasticidade dos CAA em função do traço 1: m



Fonte: o autor

A maior demanda de finos de RCD para o concreto, em relação a areia fina, justifica as relações a/c das misturas mais elevadas, contribuindo, de maneira geral, para menores valores de módulo de elasticidade. De Brito e Robles (2010) perceberam que a presença de vazios

SANTOS, I. L. Uso de Finos de Resíduos de Construção e Demolição em concreto autoadensável. Dissertação de Mestrado- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI). Porto Alegre, 2018.

devido o excesso de água após a hidratação, reduz a rigidez da fase da argamassa e esta provoca a redução do módulo de elasticidade do concreto com o aumento da relação água/cimento.

Os resultados obtidos comprovam que ao adicionar agregados reciclados oriundos de argamassa e bloco cerâmicos ocorre uma redução do módulo de elasticidade dos concretos. Entretanto para os concretos com agregados reciclados de concreto, o módulo de elasticidade foi superior aos demais, exceto aqueles com traço mais rico em cimento.

A tabela 25 mostra os resultados obtidos no estudo em termos percentuais. É possível observar que apenas os concretos produzidos com finos reciclados de concreto obtiveram resultados maiores para o módulo de elasticidade em relação ao concreto de referência, com aumento de até 18,9%. Já os concretos com finos reciclados de argamassa e bloco cerâmico apresentaram uma redução do módulo de elasticidade que chegou a 32,9 e 25%, respectivamente. De modo geral, os resultados na literatura apontam para a redução no módulo de elasticidade em concretos que empregam agregados reciclados. Gesoglu *et al.* (2015) verificaram redução de até 52% nas composições onde foi empregado agregado miúdo reciclado em substituição a areia natural.

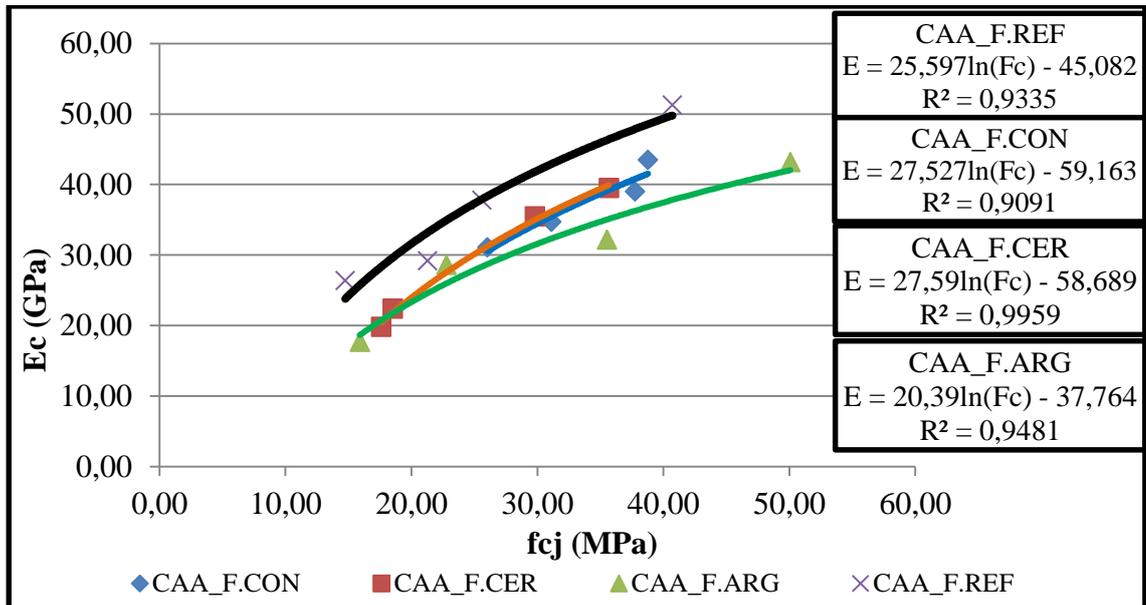
Tabela 25- Comparação dos resultados de módulo de elasticidade dos CAA com finos de RCD em relação ao concreto de referência, em termos percentuais.

Tipo de concreto	Traço	%
Concreto com agregado fino reciclado de concreto	1:2,5	- 15,2
	1:4	+ 3,2
	1:5,5	+ 18,9
	1:7	+ 17,8
Concreto com agregado reciclado de argamassa	1:2,5	- 15,8
	1:4	- 14,8
	1:5,5	- 2,1
	1:7	-32,9
Concreto com agregado reciclado de tijolo cerâmico	1:2,5	-23,0
	1:4	- 6,1
	1:5,5	- 23,3
	1:7	- 25,0

Fonte: o autor

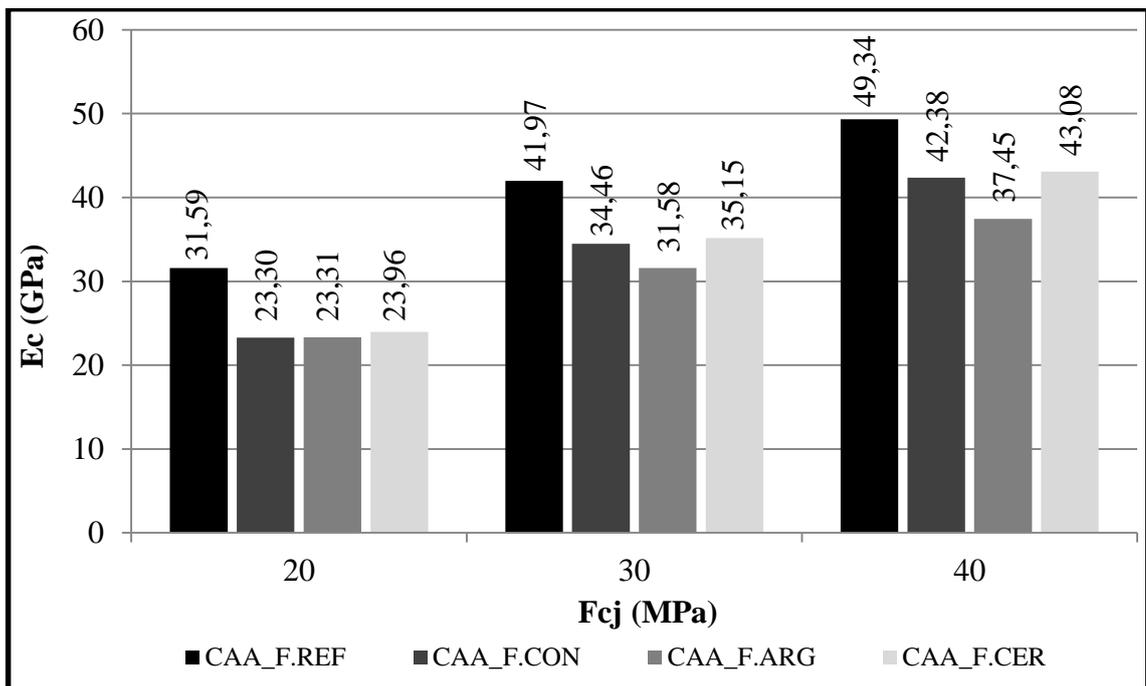
De modo a comparar os resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias, foram traçadas as curvas de correlação (Figura 57) e calculadas as equações de comportamento resistência mecânica por módulo de elasticidade, com seus devidos ajustes de regressão e, por fim, foram extraídos os valores de módulo para os níveis de resistência de 20, 30 e 40 MPa, os quais podem ser conferidos na figura 58.

Figura 57- Curvas de correlação - Módulo de elasticidade X resistência à compressão



Fonte: o autor

Figura 58 - Resultados de módulo de elasticidade para os CAA aos 28 dias.



Fonte: o autor

Observa-se que para um mesmo nível de resistência estabelecido, os concretos com agregados reciclados apresentaram uma significativa redução do módulo de elasticidade em relação ao concreto de referência. Entretanto, esses concretos com finos de RCD apresentam módulos bem semelhantes, com um valor ligeiramente maior para os concretos com agregados finos cerâmicos.

Para resistência à compressão de 20 MPa, tem-se que o concreto de referência apresenta valores de módulo em torno de 26% superior aos concretos com finos de RCD. Já para resistência de 30 MPa, esses valores chegaram a 24% para o CAA_FARG, 17% para o CAA_FCON e 16% para o CAA_FCER. Por fim, para faixa de resistência de 40 MPa, os concretos de referência apresentam um incremento do módulo em 12% em relação ao CAA_FCER, 14% para o CAA_FCON e 24% para o CAA_FARG.

4.4 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água em concreto está relacionada ao total de poros permeáveis de sua estrutura. Assim, o conhecimento desta estrutura de poros permite prever a durabilidade de um concreto, uma vez que possibilita o conhecimento da forma pela qual os agentes agressivos se difundirão ou penetrarão através do interior da massa de concreto (LEVY, 2001). Um material com baixos valores de absorvidade pode-se dizer que possui uma melhor qualidade que os demais (GONÇALVES, 2005). Deste modo, a absorção de água por capilaridade foi avaliada após os corpos de provas estarem 3, 6, 24, 48 e 72 horas em contato com água. A tabela 26 traz os resultados obtidos e referem-se às médias apresentadas por três corpos de prova e seus respectivos desvios padrão, ensaiados aos 28 dias de idade.

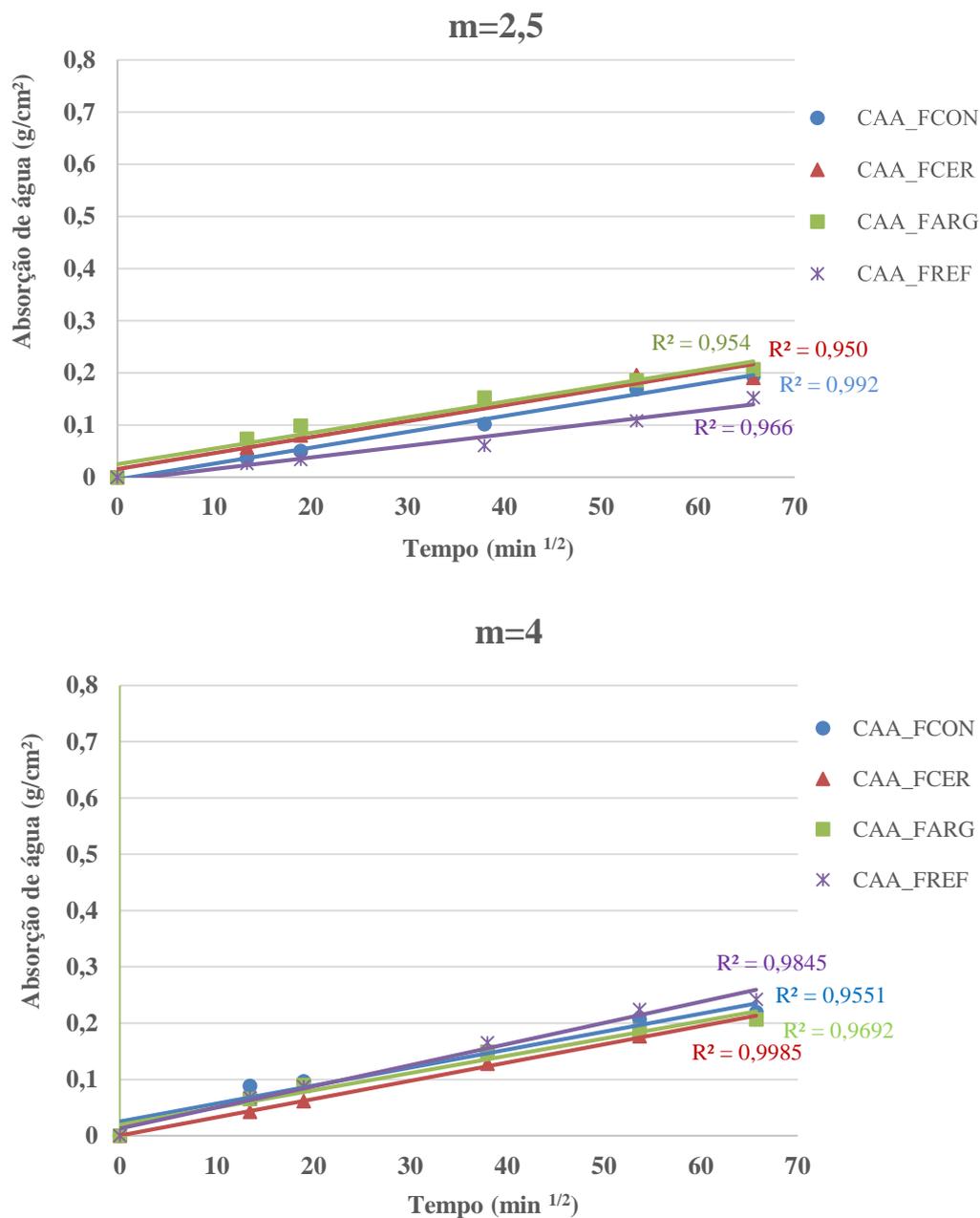
Tabela 26- Absorção de água por capilaridade dos concretos

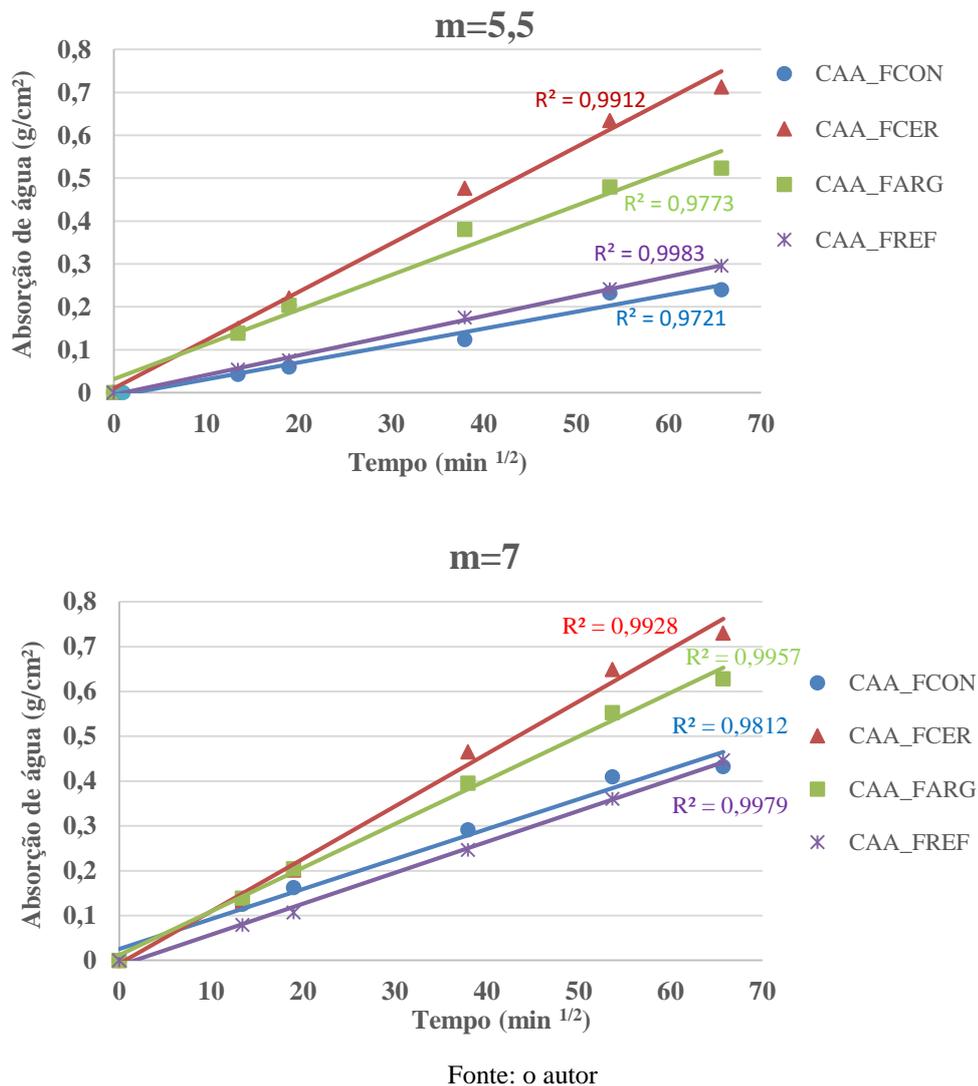
Configuração	Absorção capilar \pm desvio padrão (g/ cm ²)				
	3 h	6 h	24 h	48 h	72 h
CAA_FCON_2,5	0,036 \pm 0,009	0,050 \pm 0,011	0,102 \pm 0,018	0,169 \pm 0,020	0,194 \pm 0,018
CAA_FCER_2,5	0,057 \pm 0,003	0,080 \pm 0,007	0,150 \pm 0,013	0,196 \pm 0,007	0,223 \pm 0,008
CAA_FARG_2,5	0,073 \pm 0,008	0,098 \pm 0,008	0,152 \pm 0,004	0,186 \pm 0,006	0,207 \pm 0,001
CAA_FREF_2,5	0,026 \pm 0,001	0,034 \pm 0,004	0,061 \pm 0,028	0,108 \pm 0,004	0,152 \pm 0,001
CAA_FCON_4	0,088 \pm 0,001	0,097 \pm 0,003	0,146 \pm 0,002	0,207 \pm 0,004	0,220 \pm 0,001
CAA_FCER_4	0,042 \pm 0,005	0,061 \pm 0,007	0,128 \pm 0,012	0,177 \pm 0,016	0,209 \pm 0,016
CAA_FARG_4	0,065 \pm 0,004	0,090 \pm 0,008	0,149 \pm 0,013	0,187 \pm 0,011	0,206 \pm 0,025
CAA_FREF_4	0,068 \pm 0,008	0,087 \pm 0,010	0,166 \pm 0,018	0,225 \pm 0,025	0,242 \pm 0,030
CAA_FCON_5,5	0,043 \pm 0,088	0,059 \pm 0,115	0,124 \pm 0,018	0,232 \pm 0,022	0,239 \pm 0,024
CAA_FCER_5,5	0,150 \pm 0,097	0,220 \pm 0,151	0,477 \pm 0,031	0,634 \pm 0,027	0,713 \pm 0,043
CAA_FARG_5,5	0,138 \pm 0,086	0,203 \pm 0,122	0,380 \pm 0,022	0,479 \pm 0,025	0,523 \pm 0,027
CAA_FREF_5,5	0,053 \pm 0,015	0,076 \pm 0,024	0,175 \pm 0,073	0,241 \pm 0,010	0,295 \pm 0,130
CAA_FCON_7	0,125 \pm 0,003	0,162 \pm 0,003	0,292 \pm 0,003	0,410 \pm 0,014	0,432 \pm 0,020
CAA_FCER_7	0,132 \pm 0,030	0,202 \pm 0,047	0,465 \pm 0,093	0,649 \pm 0,010	0,730 \pm 0,011
CAA_FARG_7	0,139 \pm 0,042	0,205 \pm 0,073	0,396 \pm 0,016	0,553 \pm 0,027	0,629 \pm 0,029
CAA_FREF_7	0,079 \pm 0,018	0,107 \pm 0,02	0,247 \pm 0,062	0,360 \pm 0,086	0,447 \pm 0,089

Fonte: o autor

A figura 59 mostra as evoluções das absorções de água por capilaridade dos concretos estudados ao longo do tempo. Percebe-se que os concretos com agregados reciclados com traço mais pobre absorveram mais água que os mais ricos. Esta tendência de aumento do índice de absorção de água por capilaridade está diretamente relacionada com a porosidade da matriz cimentícia.

Figura 59 – Índice de absorção de água por capilaridade dos concretos





A partir dos gráficos apresentados pode-se extrair algumas informações pertinentes ao estudo. Em alguns casos, o uso de agregados finos em concretos pode apresentar uma microestrutura mais homogênea, com uma menor porosidade quando comparada a concretos convencionais, podendo garantir boas características de durabilidade, por exemplo, absorção. Todavia, de modo geral, os resultados encontrados de índices de absorção de água por capilaridade para os concretos com agregados finos reciclados foram maiores que os dos concretos de referência.

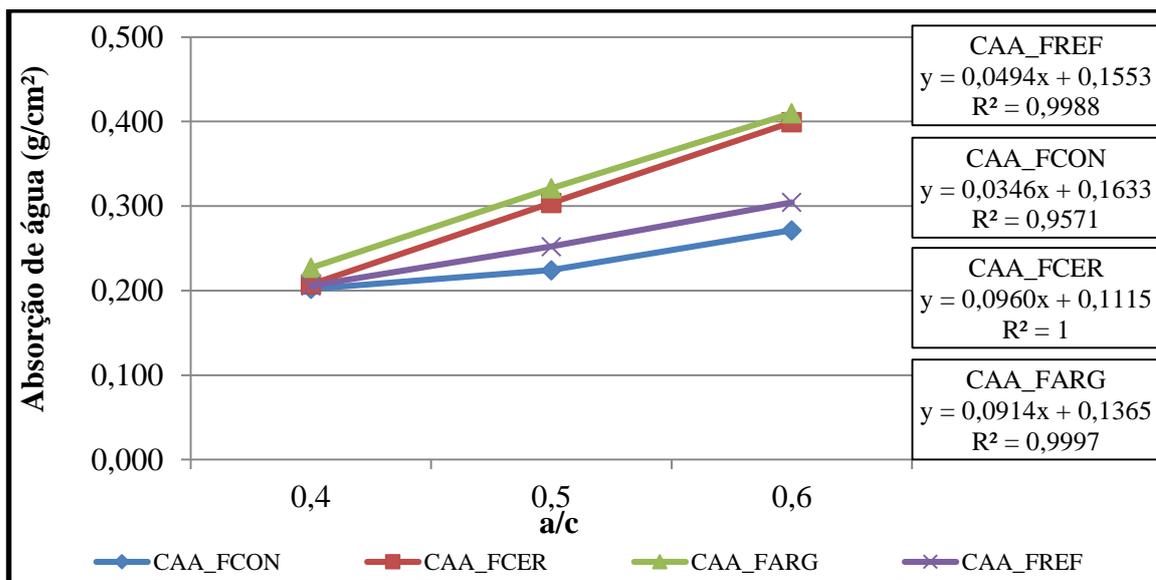
Nota-se que dentre as configurações estudadas, aquelas que utilizaram agregados reciclados cerâmicos obtiveram absorção mais elevada que as demais, exceto para o traço intermediário 1:4. Para o traço com menor teor de cimento, observa-se que para concretos com agregados cerâmicos houve um incremento de aproximadamente 39% de absorção de água em relação ao concreto de referência. Leite *et. al.* (2011) dizem que o RCD composto em sua

SANTOS, I. L. Uso de Finos de Resíduos de Construção e Demolição em concreto autoadensável. Dissertação de Mestrado- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI). Porto Alegre, 2018.

maioria por materiais cerâmicos resulta em um aumento na absorção de água quando comparado ao RCD de origem de concreto, influenciando diretamente as propriedades dos concretos. Conforme já bem consolidado no meio científico, associa-se este comportamento a estrutura interna destes materiais cerâmicos, uma vez que o seu processo produtivo confere uma maior porosidade, e conseqüentemente, interferem na demanda de água no estado fresco e aumentam a porosidade do concreto no estado endurecido, favorecendo a formação de poros capilares, contribuindo para maior absorção de água.

O espalhamento do concreto durante a sua dosagem foi controlado a partir do acréscimo de água, assim sendo, com relações água/cimento diferentes para cada traço. Entretanto, para efetiva comparação dos resultados, foi analisada a absorção de água por capilaridade fixando três relações a/c (0,4; 0,5 e 0,6) e três níveis de resistências (25, 35 e 45 MPa), conforme observado nas figuras 61 e 62.

Figura 60- Comparativo de absorção de água por capilaridade fixando a/c

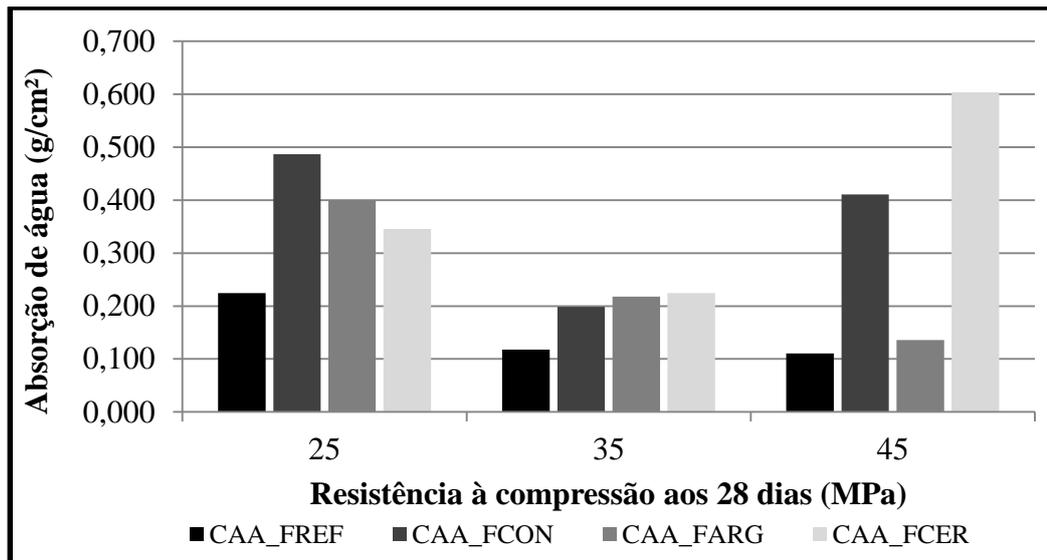


Fonte: o autor

Percebe-se que a absorção de água por capilaridade dos concretos é maior quando se aumenta o valor da relação água/cimento da mistura. Os concretos com agregados reciclados de argamassa e cerâmico apresentaram resultados mais elevados de absorção para as relações a/c igual a 0,5 e 0,6, em relação ao concreto com fino de concreto e areia fina. Observa-se que para relação a/c igual a 0,5 resulta em uma absorção de 17% para o CAA_FCER e 21% para o CAA_FARG, e para relação a/c igual a 0,6, esses valores são superiores, com aproximadamente

24% para O CAA_FCER e 26% para o CAA_FARG. Este comportamento pode estar vinculado à maior porosidade desses finos cerâmicos e de argamassa, em relação ao fino de concreto e a areia fina. Contudo, nota-se que para a relação a/c igual a 0,4, os resultados de absorção estão muito próximos, não podendo afirmar que são diferentes entre si.

Figura 61- Comparação de absorção de água por capilaridade fixando níveis de resistência à compressão



Fonte: o autor

A partir dos resultados obtidos, percebe-se que mantendo níveis de resistência iguais, de maneira geral, os concretos de referência apresentaram os melhores resultados de absorção de água por capilaridade em relação aos concretos com agregados reciclados, como já era esperado devido a maior porosidade dos agregados reciclados. De forma geral, observa-se uma tendência de redução da absorção a medida que se aumenta a resistência à compressão dos concretos. Contudo, para o nível de resistência analisado de 45 MPa, o comportamento do CAA_FCON e do CAA_FCER mostrou-se contrário ao esperado, com valores superiores às resistências mais baixas.

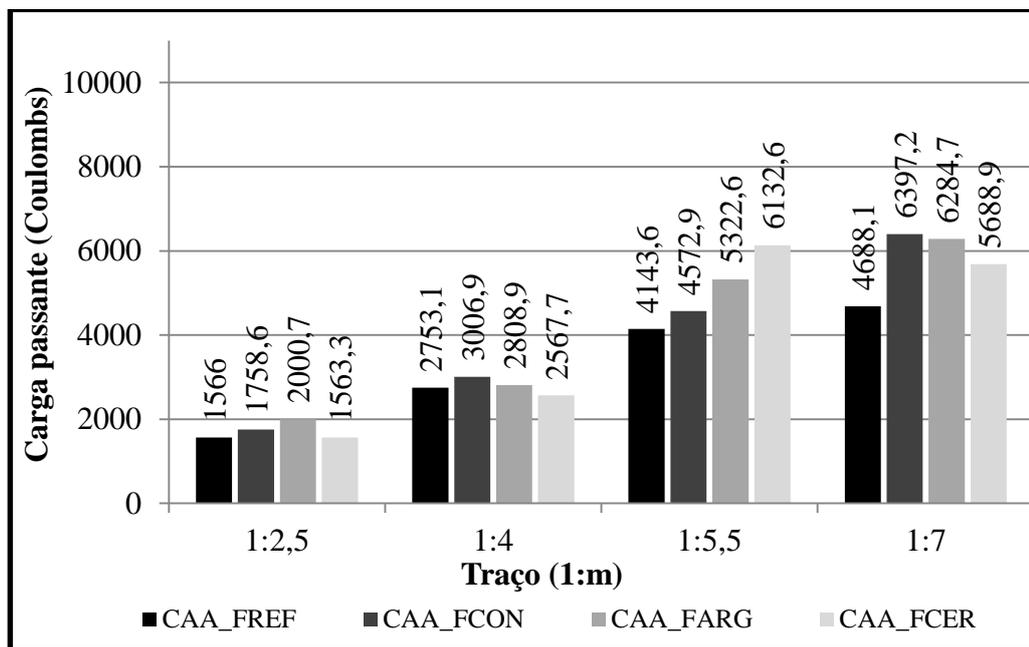
4.5 Penetração de íons cloretos

Após a realização dos ensaios pertinentes às amostras de concretos em período de cura de 56 dias, puderam ser identificados os resultados de penetração de íons cloretos, a fim de cumprir o recomendado pela ASTM C1202 (2017), relacionando os valores encontrados à

fórmula proposta pela norma e identificando os valores de cargas passantes totais em coulombs, conforme é apresentada na figura 62.

Percebe-se que há uma tendência de aumento de carga passante a medida que o traço vai ficando mais pobre em cimento. Desta forma, a penetração de íons cloretos para os concretos com traço mais rico (1:2,5) é classificada como baixa, moderada para os concretos com traço intermediário (1:4) e para os traços mais pobres (1:5,5 e 1:7), a penetração de cloretos é considerada elevada, de acordo com a norma ASTM C 1202 (2017).

Figura 62- Penetração de cloretos - Carga total passante em 56 dias



Fonte: o autor

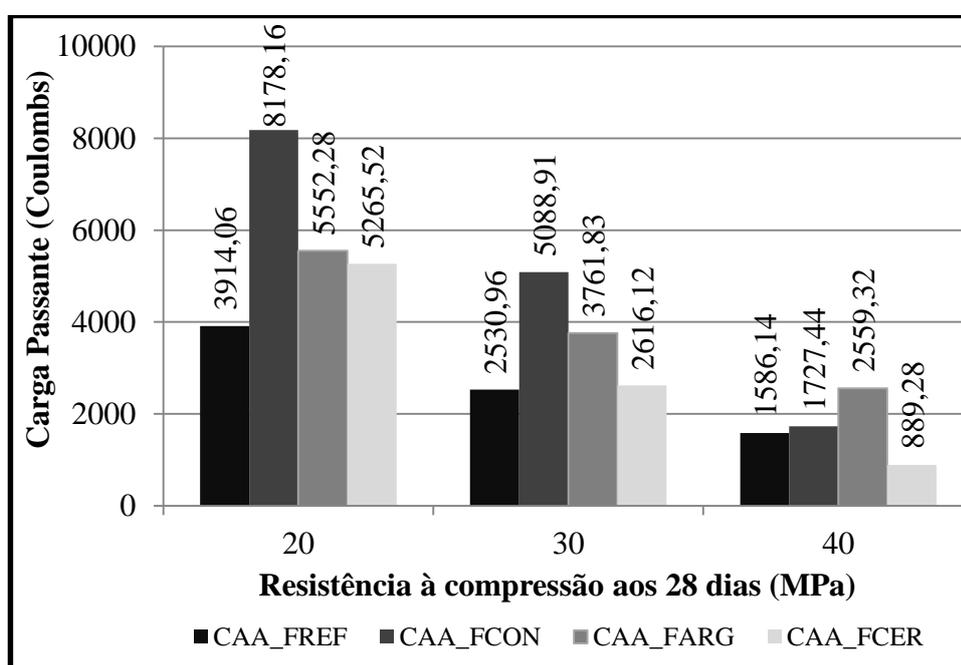
Analisando os resultados obtidos para este ensaio, nota-se que os concretos com agregados reciclados são mais suscetíveis à penetração de íons cloretos que os concretos de referência. Pode-se atribuir que a diminuição da resistência à penetração de cloretos em concretos com agregados finos reciclados está associada a sua estrutura interna, atrelada à porosidade inerente deste material, a superfície específica e a forma dos grãos. Esses três fatores contribuíram para o aumento da relação água/cimento nos traços que empregaram agregados reciclados.

Percebe-se que para traços ricos em que foi necessária uma maior relação água/cimento para manutenção das propriedades de autoadensabilidade no estado fresco, houve uma diminuição da resistência à penetração de cloretos para concretos com agregados finos

reciclados, com valores em torno de 48% para os CAA_FCER, 36% para os CAA_FCON e 34% para os CAA_FARG, em relação ao CAA_FREF. Poon e Kou (2006) tiveram resultados semelhantes em suas pesquisas com agregados reciclados e atribuíram tal resultado ao aumento da relação a/c, uma vez que o volume de poros aumenta e assim torna o concreto mais permeável, contribuindo para a passagem de agentes agressivos como os íons cloretos.

De modo a melhor comparação dos resultados, foi avaliada a carga passante de íons cloretos, a partir de três níveis de resistências: 20, 30 e 40 MPa, conforme mostra a figura 63.

Figura 63- carga passante de íons cloretos



Fonte: o autor

Percebe-se que, de modo geral, os concretos com finos de RCD possuem os piores resultados quanto à carga passante de íons cloretos, em relação ao concreto com areia fina. Em resistências mais baixas, observa-se que a carga passante de íons cloretos é majorada. Para resistência à compressão de 20 MPa, nota-se que a carga passante para o CAA_FREF é 52% inferior ao CAA_FCON, 29% em relação ao CAA_FARG e 25% ao CAA_FCER. Assim, os concretos de referência foram classificados como moderada, enquanto os concretos finos de RCD podem ser classificados com carga passante elevada. Contudo, para resistências mais elevadas, de maneira geral, apresentam classe de risco baixa e moderada para penetração de cloretos.

Dentre os concretos produzidos com agregados reciclados, observa-se que aqueles que fizeram uso de finos de concreto apresentaram resultados inferiores de carga passante, em relação aos demais, para níveis de resistência de 20 e 30 MPa, porém, para a resistência à 40 MPa, os concretos com finos de argamassa tiveram os piores resultados. Já os concretos com finos cerâmicos apresentaram os melhores resultados para penetração de cloretos em todos os níveis de resistência.

4.6 Análise de Custo

Para avaliação dos custos dos CAAs foram adotados para os preços dos insumos os valores do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), referentes à data de março de 2018, com exceção do valor do cimento CPV-ARI, em que foi adotado o valor do fornecedor. A tabela 27 traz os preços dos materiais utilizados para a produção dos CAA, em R\$/kg.

Tabela 27 - Custo de materiais utilizados para produção dos CAA, em R\$/kg.

Material	Preço (R\$/kg)
CPV-ARI	0,625
Brita	0,028
Areia natural	0,026
Finos de concreto	0,012
Finos de argamassa	0,013
Finos cerâmicos	0,011
Aditivo superplastificante	8,97

Fonte: (SINAPI, 2018)

Os custos dos concretos foram calculados com base no consumo de materiais utilizados para cada configuração existente, através da equação 05.

$$Cu = C * \$c + C * f * \$f + C * a * \$a + C * p * \$p + C * SP\% * \$SP \quad \text{Equação 05}$$

Onde:

Cu: custo de concreto por metro cúbico;

C: consumo de cimento por metro cúbico, em Kg/m³

a: relação agregado miúdo seco/cimento;

f: relação finos/cimento;

p: relação agregado miúdo/cimento

SP%: dosagem de aditivo por metro cúbico;

\$c: custo unitário do kg de cimento;

\$f: custo unitário do kg de finos;

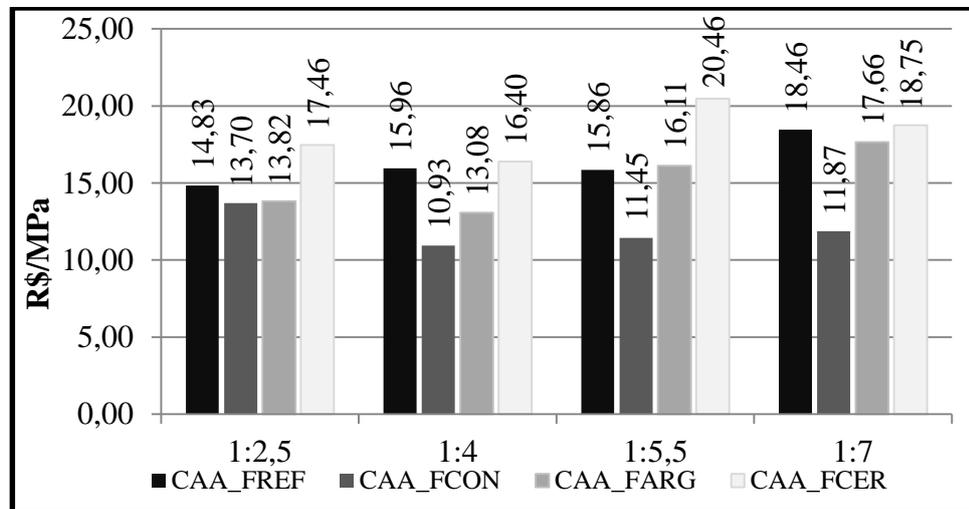
\$a: custo unitário do kg do agregado miúdo;

\$p: custo unitário do kg do agregado graúdo;

\$SP: custo unitário do kg de aditivo superplastificante

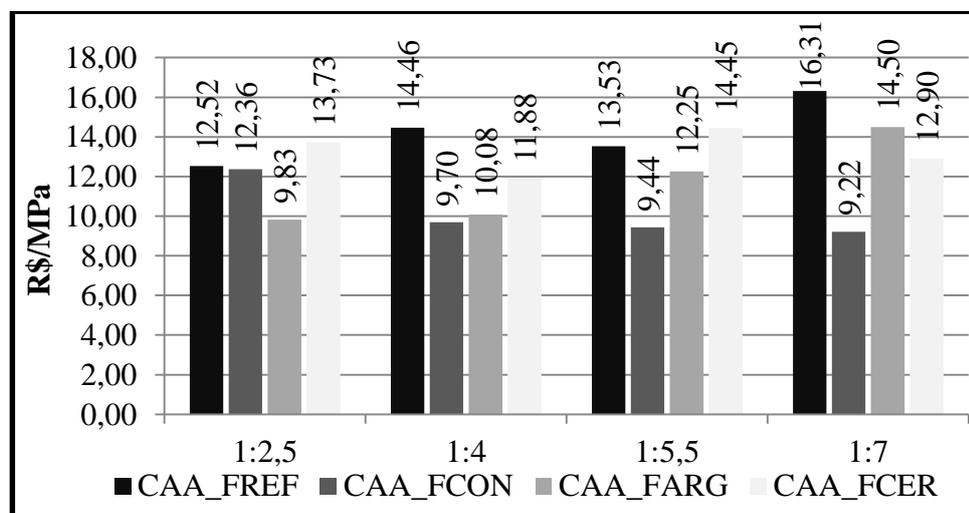
As figuras 64-65 comparam os valores de R\$/MPa dos CAAs produzidos no estudo, nas idades de 7 e 28 dias.

Figura 64- Custo unitário dos CAAs por MPa aos 7 dias



Fonte: o autor

Figura 65- Custo unitário dos CAAs por MPa aos 28 dias



Fonte: o autor

Percebe-se que para a idade de 7 dias, os concretos com finos de concreto são mais econômicos que todas as demais configurações. Além disso, quando utilizado esse tipo de material, pode-se dizer que o traço 1:4 é aquele com o melhor custo/benefício, com preço de 10,93 reais por MPa. Os finos de origem cerâmica apresentaram custos bastante superiores quando comparados aos de origem cimentícia, superando até os concretos de referência, o que torna antieconômica a sua utilização. Tal fato pode ser atribuído a sua menor resistência mecânica, devido à alta absorção de água dos finos cerâmicos em relação aos demais.

Para a idade de 28 dias, novamente os finos de concreto apresentaram os melhores resultados em relação ao custo do concreto, em R\$ por MPa. Entretanto, diferentemente do evidenciado na idade de 7 dias, os traços mais pobres são mais viáveis que os traços mais ricos, sendo o traço 1:7 o melhor entre todos. Os concretos com agregados finos de RCD apresentaram resultados mais favoráveis que os concretos de referência, exceto para o traço mais rico (1:2,5) que teve um ligeiro aumento do custo para os concretos produzidos com finos cerâmicos. No traço 1:7, cujos resultados foram mais favoráveis ao uso de finos de RCD, percebe-se uma expressiva redução de 43,4% no custo do concreto, em R\$/MPa, em comparação ao concreto de referência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo sobre o emprego de areia fina e de finos oriundos do beneficiamento de resíduos de construção e demolição em concretos autoadensáveis, com a finalidade de avaliar as suas potencialidades como substituição de parte do agregado miúdo natural, de modo a conferir sua viabilidade de uso, e assim, tentar encontrar um novo destino a esses materiais, que favoreça tanto o meio ambiente como a sociedade, com soluções mais sustentáveis, identificando o uso com os melhores benefícios. Ainda existem várias dificuldades atinentes à sua confiabilidade de utilização em concretos, devido a sua grande variabilidade, devendo ser ainda objeto de estudo por parte da comunidade acadêmica por longos anos. Assim, é necessário, ainda, ser realizadas outras pesquisas sobre finos de RCD, de modo confirmar e complementar os resultados da pesquisa, tornando mais confiável a sua utilização em estruturas de concreto.

A partir da dosagem experimental, verificou-se que a quantidade de material fino de RCD empregado nos concretos autoadensáveis não ultrapassou 30% de substituição do agregado miúdo natural. Assim, percebe-se que não são necessários teores tão elevados de agregados finos reciclados para alcançar as características fundamentais de autoadensabilidade, o que garante uma facilidade de destinação deste material.

Os resultados dos ensaios no estado fresco dos CAAs com finos de RCD atenderam todos os requisitos de aceitação estabelecidos pela norma vigente, quanto à fluidez, à habilidade de passagem por obstáculos e à resistência à segregação dos agregados. Os ensaios de espalhamento alcançaram níveis de aceitação à classe SF2, com diâmetros que variaram de 660 a 680 mm. Entretanto, verificou-se que os concretos com agregados reciclados obtiveram valores maiores no tempo de escoamento, com aspectos mais coesos, porém com uma menor resistência à passagem pelas barras de aço da caixa L, em comparação aos concretos com agregados naturais. De modo geral, uso de materiais finos reciclados acarretou em melhorias nas propriedades de autoadensabilidade do concreto, com comportamentos semelhantes entre os três tipos de finos de RCD avaliados no estudo.

Os resultados apontaram que é possível o emprego de finos de RCD em concreto autoadensável, em substituição ao agregado miúdo natural, sem prejuízo nas resistências à compressão dos concretos aos 28 dias. Todavia, percebe-se que a resistência dos concretos é influenciada pela origem do material, sendo de fundamental importância a escolha adequada de seus constituintes. Notou-se que os concretos autoadensáveis com finos cerâmicos

apresentaram menores valores de resistência à compressão em relação aos concretos com finos cimentícios (concreto e argamassa), com redução de aproximadamente 19% para os concretos com finos de concreto.

Ainda retratando sobre as propriedades mecânicas dos concretos, percebeu-se que a adição de finos resultou em valores mais baixos para o módulo de elasticidade quando comparados aos concretos cujo em sua composição é utilizado somente agregados naturais. O maior teor de finos de RCD nos CAA, conferem maior relação a/c à mistura, devido demandarem mais água, ocasionando a redução do módulo de elasticidade dos concretos.

Os concretos com agregados reciclados apresentaram menor consumo de cimento para todas as resistências avaliadas, exceto para resistência de 35 MPa que obteve um consumo maior para os concretos com finos cerâmicos em sua composição. Através das curvas de dosagem e das equações de comportamento dos concretos estudados, observou-se o elevado consumo de cimento para concretos com resistência maior que 35 MPa, tornando antieconômica a sua utilização, além do concreto produzido poder sofrer possíveis danos associados a retração, prejudicando a sua durabilidade.

A análise de custo dos concretos autoadensáveis mostrou que é viável a utilização de agregados finos reciclados de concreto, uma vez que se obtiveram valores expressivos de redução de 43,4% em relação ao concreto de referência. Todavia, o estudo mostrou que os outros tipos de materiais finos utilizados não são vantajosos do ponto de vista econômico, principalmente aqueles de origem cerâmica.

No estudo verificou-se que ao utilizar agregados finos de resíduos de construção e demolição, que apresentam forma lamelar, maior superfície específica, além de ser bem mais porosos que os agregados naturais, obtêm-se concretos com uma maior demanda de água durante a dosagem para obter a mesma trabalhabilidade que os concretos com agregados naturais.

Os ensaios de absorção de água por capilaridade e penetração de íons cloretos dos concretos com finos de RCD apresentaram resultados maiores que os concretos de referência. Dentre os agregados reciclados analisados percebe-se que os de origem cerâmica são os que apresentam resultados mais negativos em relação ao uso em concreto, pois estes possuem uma maior porosidade, o que contribui para uma maior quantidade de água de amassamento, elevando a relação água/cimento nos traços estabelecidos, aumentando a porosidade do concreto, conseqüentemente, ficando mais vulnerável à absorção de água e ataque de cloretos.

Assim sendo, este trabalho foi de grande importância para uma melhor avaliação do uso de agregados finos oriundos do processo de britagem dos resíduos de construção e demolição, nos critérios técnicos de aceitação quanto às propriedades de autoadensabilidade, mecânicas e de durabilidade dos concretos autoadensáveis, acreditando na sua possível introdução no mercado da construção civil.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, têm-se:

- realizar dosagens, seguindo outros métodos já consolidados na literatura, visando a obtenção de um concreto com melhor custo/benefício;
- analisar as propriedades reológicas do concreto autoadensável produzidas com finos de RCD, através da reometria;
- verificar a influência da forma e da textura dos finos de RCD nas propriedades reológicas dos CAA;
- avaliar a microestrutura dos CAA produzidos com finos de RCD;
- avaliar a durabilidade dos CAA dosados com finos de RCD quanto à carbonatação e retração;
- avaliar o comportamento estrutural de CAA com finos de RCD.
- avaliar a fluidez do CAA com finos de RCD ao longo tempo.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2015**. São Paulo, 2015.

AÏTCIN, P. C.; JOLICOEUR, C.; MACGREGOR, J. Superplasticized: how they work and why they occasionally don't. **In: Concrete international**, 1994.

ALMEIDA FILHO, F. M. **Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos auto-adensáveis**. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2006.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. Tese (doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo. 2005. p. 236. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-18112005-155825/>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 14: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 18. Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo**. Rio de Janeiro, 2012.

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

_____. **NBR NM 52: Agregado miúdo . Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

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

____. NBR NM 248: **Agregados - determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

____. NBR 5733: **Cimento Portland de alta resistência inicial.** Rio de Janeiro, 1991

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

____. NBR 5739: **Concreto - ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.

____. NBR 5752: **Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro, 2014.

____. NBR 7211: **Agregado para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

____. NBR 7215: **Cimento Portland - determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1997.

____. NBR 7809: **Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2006.

____. NBR 8522: **Concreto - determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro, 2008.

____. NBR 9779: **Argamassa e concreto endurecidos — determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 2012.

____. NBR 9935: **Agregados - Terminologia.** Rio de Janeiro, 2011.

____. NBR 12653: **Materiais pozolânicos — Requisitos.** Rio de Janeiro, 2014.

____. NBR 15116: **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - requisitos.** Rio de Janeiro, 2004.

____. NBR 15823: **Concreto auto-adensável - parte 1: classificação, controle e aceitação no estado fresco.** Rio de Janeiro, 2017.

____. NBR 15823: **Concreto auto-adensável - parte 2: determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - método do cone de abrams.** Rio de Janeiro, 2017.

____. NBR 15823: **Concreto auto-adensável - parte 4: determinação da habilidade passante - método da caixa I.** Rio de Janeiro, 2017.

____. NBR 15823: **Concreto auto-adensável - parte 5: determinação da viscosidade - método do Funil V.** Rio de Janeiro, 2017.

____. NBR 15823: **Concreto auto-adensável - parte 6: determinação da resistência à segregação - método da coluna de segregação.** Rio de Janeiro, 2017.

____. NBR 16372: **Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de blaine).** Rio de Janeiro, 2015.

____. NBR 16605: **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

____. NBR 16607: **Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C125-16. **Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

_____. **ASTM C1202-17. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

BENETTI, J. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS. 2012.

BOSILJKOV, V. B. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. **Cement and Concrete Research**, 2003. v. 33, n. 9, p. 1279–1286.

BRANCO, P. R. **Utilização de resíduos de concreto em concreto auto-adensável**. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil). Universidade Estadual Paulista UNESP. São Paulo. 2012.

BRASIL. **Lei Federal Nº 12.305**, Publicada no Diário Oficial da União em 02 de maio de 2010.

BUTTLER, A. M.; MACHADO JUNIOR, E. F. Agregados reciclados de concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades físicas dos agregados. **In: Seminário de desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil**, 6. 2003, São Paulo: IBRACON, 2003.

CABRAL, A, E, B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2007.

CABRAL, A. E. B.; MOREIRA, K. M. V. **Manual sobre os Resíduos Sólidos da Construção Civil**. SINDUSCON-CE. Fortaleza. 2011.

CALMON, J. L.; MORATTI, M; MORATTI, M; SOUZA, F. L. S. Estudo de finos e pastas para produção de concreto auto-adensável de alta resistência com fíler de escória de aciaria e

SANTOS, I. L. Uso de Finos de Resíduos de Construção e Demolição em concreto autoadensável. Dissertação de Mestrado- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI). Porto Alegre, 2018.

outras adições. In: **49º. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (CBC)**. Bento Gonçalves-RS, 2007.

CARNEIRO, A. P.; QUADROS, B. E. C.; OLIVEIRA, A. M. V.; BRUM, I. A. S.; SAMPAIO, T. S.; ALBERTE, E. P. V.; COSTA, D. B. Características do entulho e do agregado reciclado. **Entulho Bom**, Salvador, n. 1, p. 142 – 187, 2001

CARRIJO, P. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005. p. 129.

CASTRO, A. L., PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. *Cerâmica*, 55, p. 18–32. 2009. <http://doi.org/10.1590/S0366-69132009000100003>

CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2006.

CINCOTTO, M. A.; HOPPE, J. F., CARDOSO, F. A., PILEGGI, R. G. Técnicas de caracterização reológica de concretos. **Revista concreto**, São Paulo, n. 47, p. 108-123, jul./set. 2007.

CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, n. 136, p.95, 2002

CONTRERAS, M.; TEIXEIRA, S. R.; LUCAS, M.C.; LIMA, L.C.N.; CARDOSO, D.S.L., DA SILVA, G.A.C.; GREGÓRIO, G.C.; DE SOUZA, A.E.; DOS SANTOS, A. Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). **Construction and Building Materials**, 2016. v. 123, p. 594–600. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.044>>.

COUTINHO, B. S. **Propriedades e Comportamento Estrutural do Concreto Auto-Adensável**. Dissertação de Mestrado– UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro 2011.

DACZKO, J. A. *Self-Consolidating Concrete: applying what we know*. **CRC Press**. NW, 2012. P. 290. <http://doi.org/10.1201/b11721>

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural**. *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realização*. Edição G. C. Isaia. São Paulo: Ibracon, v 1, 2005. p. 345-379.

DAMINELLI, B. L. **Estudo de Métodos para Caracterização de Propriedades Físicas de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo. 2007.

DAMINELLI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumos de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. Tese (doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo. 2013.

DE BRITO, J.; ROBLES, R. Recycled aggregate concrete (RAC) methodology for estimating its long-term properties, *Concrete with fine recycled aggregates: A review*, **Indian J. Eng. Mater. Sci.** 2010. v,12. p, 449-462.

DE BRITO, J.; SAIKIA, N., *Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste*. **Springer Science & Business Media**, London, 2012.

DHIR, R. K.; PAINE, K. A.; HALLIDAY, J. E. *Facilitating the wider use of coarse and fine recycled aggregates from washing plants – Final report. WRAP Project N*. Dundee: University of Dundee. 2008. AGG 105-003, p. 47.

DINAKAR, P., KARTIK, R. M.; SHARMA, M. Behaviour of self-compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash. **Materials and Design**, n. 46. 2013. P. 609–616. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.015>

DING, Z; AN, X. A method for real-time moisture estimation based on self-compacting concrete workability detected during the mixing process. **Construction and Building Materials**, v. 139. 2017. p. 123-131.

DINIZ, F. E. G. **Utilização de resíduo cerâmico moído e adições industriais em compósitos cimentícios auto-adensáveis**. Tese de doutorado - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica- Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2005.

DOMONE, P. L. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. **Cement & concrete composites**. London, July, 2007.

EFNARC. EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. Specification and guidelines for self-compacting concrete. In: **EFNARC**, fevereiro, 2002.

EFNARC. The European Guidelines for Self Compacting Concrete. **EFNARC**, 2005. n. May, p. 63. Disponível em: <<http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>>.

ESPING, O. Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, 2008. v. 38, n. 7, p. 938–944.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, 2007. v. 29, n. 5, p. 397–401.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. DE . Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, 2010. v. 32, n. 1, p. 9–14. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005>>.

FACHINI, D. **Aglomerante alternativo para construção civil**. Dissertação (Mestrado) - Pós-graduação em engenharia mecânica e de materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2010. p. 108.

FELEKOGLU, B. Effects of PSD and surface morphology of micro-aggregates on admixture requirement and mechanical performance of micro-concrete. **Cement and Concrete Composites**, Volume 29, Issue 6, 2007. p. 481-489.

FELEKOGLU, B. A new approach to the characterization of particle shape and surface properties of powders employed in concrete industry. **Construction and Building Materials**, v. 23, Issue 2, p. 1154-1162, 2009.

FUMOTO, T.; YAMADA, M.. Influence of the quality of recycled fine aggregate on properties of concrete. **Memoirs of the Faculty of Engineering**, Osaka: Osaka City University. 2002. Vol. 43, pp. 97–103

FUNG, W. W. **Role of water film thickness in rheology of mortar and concrete**. Tese (Doutorado) – Universidade de Hong Kong, Hong Kong. 2010. p. 201.

GESOGLU, M.; GÜNEYISI, E.; OZ, H.O.; TAHA, I.; YASEMIN, M. T. Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 98, pp. 334-344, 2015.

GETTU, R; ZERBINO, R. L.; BARRAGÁN, B. E.; AGULLÓ, L. **Propuesta de Procedimientos experimentales para la Evaluación de La Autocompactabilidad Del Hormigón Fresco**. Informe C4745/2, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2004.

GHANNAM, S.; NAJM, H.; VASCONEZ, R. Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand. **Sustainable Materials and Technologies**, Volume 9, September 2016, Pages 1-9.

GIRARDI, R; **Estudo da variabilidade do cimento Portland que abasteceu o mercado do Rio Grande do Sul no período de 1992 a 2012.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2014.

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

GOMES, P. C. C; GETTU, R.; AGULLÓ, L.; TENÓRIO, J.J.L. Concreto auto-adensável um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto. **In: 45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, Vitória, 2003.

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

GONÇALVES, J. P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial.** Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

GÜNEYISI, E.; GESOGLU, M.; ALGIN, Z.; YAZICI, H. Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, 2016. v. 113. p. 622 - 630.

GURSEL, P.; MASANET, E.; HORVATH, A.; STADEL, A. Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. **Cement and Concrete Composites**, 2014. v. 51, June, p. 38–48. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005>>.

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

HELENE, P.; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto. **PINI**. São Paulo, 1992. 349p.

HOLSCHEMACHER, K. Hardened material properties of self-compacting concrete. **Journal of Civil Engineering and Management**, 2004. v. 10, n. 4, p. 261–266. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13923730.2004.9636318>>.

HUDA, S.B.; ALAM, M. S. Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. Volume 5. , 2014. p. 574-582.

HU, J.; WANG, Z.; KIM, Y. Feasibility Study of Using Fine Recycled Concrete Aggregate in Self-Consolidation Concrete. **International Concrete Sustainability Conference**, 2011.

JOHN, V. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. **Entulho bom**, Salvador, n.1, p. 26 – 43, 2001.

JSCE- F503. **Method of Test for Slump Flow of Concrete**. Tokyo: Standards of Japan Society of Civil Engineers; 1990.

KABIR, S.; AL-SHAYEB, A.; KHAN, I. M. Recycled Construction Debris as Concrete Aggregate for Sustainable Construction Materials. **Procedia Engineering**, 2016. v. 145, p. 1518–1525. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.191>>.

KARPINSKI, L.A.; PANDOLFO, A; PANDOLFO, L. M.; REINEHER, R.; GUIMARÃES, J. C. B; KUREK, J. **Gestão diferenciada de resíduos de construção civil- Uma abordagem ambiental**. Dados eletrônicos. – Porto Alegre : Edipucrs, 2009. p. 163.

KHALAF, F. M.; DEVENNY, A. S. Recycling of Demolished Masonry Rubble as Coarse Aggregate in Concrete: Review. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2004. v. 16, n. 4, p. 331–340.

KHATIB, J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**, April 2005. v. 35, p. 763–769.

KHATIB, J. M. Performance of self-compacting concrete containing fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 22, n.9, 2008. p.1963–1971.
<http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.011>

KOSMATKA, S. H.; WILSON, M. L. **Design and Control of Concrete Mixtures**. EB001, 15th edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2011, p. 460.

KUMAR, B. M. V., ANANTHAN, H., BALAJI, K. V. A., “Experimental studies on utilization of coarse and finer fractions of recycled concrete aggregates in self-compacting concrete mixes”. **Journal of Building Engineering**, v. 9, pp. 100-108, 2017.

LEITE, F. C. M. **Influência do tipo de adição mineral e da dimensão máxima do agregado graúdo no comportamento do concreto auto-adensável**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2007

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. p. 290

LEITE, F. C. M.; MOTTA, R. S., VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 6, 2011. p. 2972-2979.

LEVY, S.M. **Contribuição ao estudo da durabilidade e concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. São Paulo-SP, 2001. 194 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

LIMA, A. S.; CABRAL, A. E. B. Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). **Artigo técnico. Engenharia Sanitária e Ambiental**. Fortaleza, 2013. v. 18, n. 2, p. 169–176.

LIN Y. H; TYAN, Y. Y; CHANG, T. P; CHANG, C, Y. An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 34, p. 1373- 1380, 2004.

LÓPEZ, D. C., FONTEBOA, B. G., DE BRITO, J., ABELLA, F. M., TABOADA, I. G., SILVA, P. Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 96, pp. 491-501, 2015.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre. 2007. p. 180.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedade e materiais**. São Paulo. **PINI**, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª Edição. São Paulo. **IBRACON**, 2014. 728 p.

MELO, K. A. **Proposição de método de dosagem de concreto auto-adensável com adição de filler calcáreo**. Dissertação de Mestrado, UFSC, 2005.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S. CDW recycled aggregate renderings: Part II - Analysis of the effect of materials finer than 75 µm under accelerated aging performance. **Construction and Building Materials**, 2006. v. 20, n. 9, p. 625–633.

MIRANDA, L. F.; ANGULO, S. C.; CARELI, É. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído** ,2009, 57-71 p.

MOLUGARAM, K.; SHANKER, J. S.; RAMESH, A. A study on influence of shape of aggregate on strength and quality of concrete for buildings and pavements. **Advanced Materials Research**, v. 941-944, 2014. p. 776-779.

MURTAZAEV, S. A. Y; MINTSAEV, M. S.; SAYDUMOV, M. S.; ALIEV, S. A. Strength and strain properties of concrete, comprising filler, produced by screening of waste crushed concrete. **Modern Applied Science**, 2015. v. 9, n. 4, p. 32–44.

MYMRIN, V.; CORREA, S. M. New construction material from concrete production and demolition wastes and lime production waste. **Construction and Building Materials**, 2007. v. 21, n. 3, p. 578–582.

NENO, C.; BRITO, J.; VEIGA, R. Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. **Materials Research**, v. 17, n. 1, 2014, p. 168-177.

NGUYEN, T. L. H.; ROUSSEL, N.; COUSSOT, P. Correlation between L-box test and rheological parameters of a homogeneous yield stress fluid. **Cement and Concrete Research**, 36(10), 2006. p. 1789–1796. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.001>

NUNES, S. C. B. **Betão auto-compactável: Tecnologia e Propriedades**. Dissertação (mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2001.

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

PATEL, R.; HOSSAIN, K. M. A; SHEHATA, M; BOUZOUBAA, N; LACHEMI, M. Development of statistical models for mixture design of high-volume fly ash self-consolidating concrete. **ACI Materials Journal**, 2004. v. 101, n. 4, p. 294–302.

PEDROZO, R. F. E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2008.

SANTOS, I. L. Uso de Finos de Resíduos de Construção e Demolição em concreto autoadensável. Dissertação de Mestrado- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI). Porto Alegre, 2018.

(POON, C. S.; KOU, S. C. Compressive strength, pore size distribution and chloride ion penetration of recycled aggregate concrete incorporating class-fly ash. *Journal of Wuhan University of Technology Materials Science*, Vol 21, N4, 2006.)

REPETTE, W.L. Concretos de última geração: presente e futuro. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ed. G.C. Isaia, IBRACON, 2005. p.1510-1529

REPETTE, W. L. Concreto Autoadensável. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Vol. 2, 1a ed. São Paulo, IBRACON, 2011.

RONCERO, J. **Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states: implications for high performance concretes**. Tese de Doutorado, Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior D' Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Barcelona, Spain. 2000. p. 189.

SANTOS, S. A.; DA SILVA, P.R.; DE BRITO, J. Mechanical Performance Evaluation of Self-Compacting Concrete with Fine and Coarse Recycled Aggregates from the Precast Industry. **Materials**, August, 2017, 10, 904; doi:10.3390/ma10080904

SKARENDAHL, Å.; PETERSSON, Ö. State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee 174-SCC, Self-Compacting Concrete, **RILEM Publications**, Cachan Cedex, 2000.

SCHANKOSKI, R. A. **Estudo de concreto auto-adensável contendo fíler de britagem: características das partículas, floculação e reologia**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

SHI, C. Effect of different mineral powders on properties of fresh and hardened self-consolidating concrete. **ACI Special Publication**, vol. 233. 2006. p. 65–76.

SIDDIQUE, R.; KUNAL, E. Design and development of self-compacting concrete made with coal bottom ash. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, 2015. v. 373, October, p.

SANTOS, I. L. Uso de Finos de Resíduos de Construção e Demolição em concreto autoadensável. Dissertação de Mestrado- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI). Porto Alegre, 2018.

1–13. Disponível em:
<<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21650373.2015.1004138>>.

SILVA, R. V.; BRITO, J. D; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, 2014. v. 65, p. 201–217. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>>.

SINGH, S; KHAN, S.; KHANDELWAL, R.; CHUGH, A.; NAGAR, R. Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. **Journal of Cleaner Production**, Volume 119, April 2016, Pages 86-98.

SOROKA, I. **Concrete in Hot Enviroments**. Modern concrete technology series. E & FN Spon, a Boundary Row, London, UK. (2004).

SOUZA, P.S.L., DAL MOLIN, D.C.C., PICANÇO, M.S., SOUZA, J.V.B. Avaliação do módulo de elasticidade em concreto com metacaulim de alta reatividade, proveniente de rejeito industrial”. **Revista Matéria**, v. 20, n. 4, pp. 982-991. Rio Janeiro, 2015.

STEWART, J.; NORVELL, J.; JUENGER, M.; FOWLER, D. W. ICAR Report 107-1 **ICAR 107** Characterizing minus N° 200 Fine aggregate for performance in concrete. International Center for Aggregates Research The University of Texas at Austin, 2003.

SUBAŞI, S.; ÖZTÜRK, H.; EMIROĞLU, M. Utilizing of waste ceramic powders as filler material in self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, 2017. v. 149, p. 567–574.

TREGGER, N.; GREGORI, A.; FERRARA, L.; SHAH, S. Correlating dynamic segregation of self-consolidating concrete to the slump-flow test. **Construction and Building Materials**, v. 28 (1), 2012. p. 499–505. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.052>

TU, T. Y.; CHEN, Y. Y.; HWANG, C. L. Properties of HPC with recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 36, p. 943-950, 2006.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos Auto-adensáveis**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre. 2004. p.148.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre. 2007.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. Concreto autoadensável. 2ª ed. São Paulo. **PINI**, 2015.

ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. p. 222.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons de cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

WANG, Z. B. S. **The effects of aggregate moisture conditions on rheological behaviors of high-workability mortar prepared with fine recycled-concrete aggregate**. Thesis (Master of Science)-Graduate Council of Texas State University, San Marcos. 2012.

XIE, Y.; LIU, B.; YIN, J.; ZHOU, S. Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash. **Cement and Concrete Research**, 2002. v. 32, n. 3, p. 477–480.

YAHIA, A.; TANIMURA, M.; SHIMOYAMA, Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio. **Cement and Concrete Research**, 2005. v. 35, n. 3, p. 532–539.

ZEGA, C. J.; MAIO, Á. A. DI. Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. **Waste Management**, 2011. v. 31, n. 11, p. 2336–2340. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.011>>.

ANEXO A

A.1 Planilha de regressão das curvas de dosagem

A.1.1 Regressão para os concretos autoadensáveis de referência

REGRESSÃO LINEAR - Mínimos Quadrados

CURVA DE ABRAMS

PONTOS		04		REGRESSÃO		
	DADOS		y'	x ²	y ²	x.y'
	x (a/c)	y (f _{c3})				
1	0,300	34,38	1,536242707	0,09	2,360041654	0,46087281
2	0,420	23,17	1,364926034	0,1764	1,863023078	0,57326893
3	0,620	18,16	1,259115844	0,3844	1,585372709	0,78065182
4	0,820	13,03	1,114944416	0,6724	1,24310105	0,91425442
SOMATÓRIOS	2,16	88,735	5,275229001	1,3232	7,051538491	2,72904799
Sxx =	0,1568		b' = Sxy/Sxx =			-0,76259993
Sy'y =	0,094528239		a' = (soma y'/n) - b'.(soma x/n) =			1,73061121
Sxy' =	-0,11957567		Se = (SQR/(n-2)) ^{1/2} =			0,04086466
SQR =	0,003339841		Sa = {(soma x ²)/(n.Sxx)} ^{1/2} .Se =			0,05935504
			Sb = Se/(Sxx) ^{1/2} =			0,10319886
A =	53,77881332		r = Sxy'/(Sxx.Sy'y) ^{1/2}			-0,982175301
B =	5,788951815		r ² =	0,964668322		

$$f_{c7} = \frac{53,7788}{5,7890}^{a/c}$$

$$r^2 = 0,9646$$

CURVA DE ABRAMS

PONTOS		04		REGRESSÃO		
	DADOS		y'	x ²	y ²	x.y'
	x (a/c)	y (f _{c3})				
1	0,300	40,72	1,609807769	0,09	2,591481054	0,48294233
2	0,420	25,58	1,40790054	0,1764	1,982183931	0,59131823
3	0,620	21,29	1,328175661	0,3844	1,764050588	0,82346891
4	0,820	14,75	1,16879202	0,6724	1,366074787	0,95840946
SOMATÓRIOS	2,16	102,34	5,514675991	1,3232	7,70379036	2,85613892
Sxx =	0,1568		b' = Sxy/Sxx =			-0,77669714
Sy'y =	0,100877537		a' = (soma y'/n) - b'.(soma x/n) =			1,79808545
Sxy' =	-0,121786111		Se = (SQR/(n-2)) ^{1/2} =			0,05606520
SQR =	0,006286614		Sa = {(soma x ²)/(n.Sxx)} ^{1/2} .Se =			0,08143350
			Sb = Se/(Sxx) ^{1/2} =			0,14158602
A =	62,81819466		r = Sxy'/(Sxx.Sy'y) ^{1/2}			-0,968339163
B =	5,979944255		r ² =	0,937680735		

$$f_{c28} = \frac{62,8182}{5,9799}^{a/c}$$

$$r^2 = 0,9376$$

LEI DE LYSE

PONTOS	DADOS		REGRESSÃO		
	x (a/c)	y (m)	x ²	y ²	x.y
1	0,300	2,500	0,090	6,250	0,75
2	0,420	4,000	0,176	16,000	1,68
3	0,620	5,500	0,384	30,250	3,41
4	0,820	7,000	0,672	49,000	5,74
SOMATÓRIOS	2,160	19,000	1,323	101,500	11,580
Sxx =	0,1568	b=Sxy/Sxx=			8,418367347
Syy =	11,25	a=(soma y/n) - b.(soma x/n)=			0,204081633
Sxy =	1,32	Se= (SQR/(n-2)) ^{1/2} =			0,26244533
SQR=	0,137755102	Sa = {[(soma x ²) / (n.Sxx)] ^{1/2} } .Se=			3,338634254
		Sb=Se/(Sxx) ^{1/2} =			0,662774544
A=	0,204081633	r= Sxy/(Sxx.Sy'y') ^{1/2}			0,993858693
B=	8,418367347	r ² =	0,987755102		

m = 0,2041 + 8,4184 *a/c

r² = 0,9877

LEI DE MOLINARY

PONTOS	DADOS		REGRESSÃO			
	x (m)	y (Cons)	y'	x ²	y ²	x.y'
1	7,000	268,50	0,003724395	49	1,38711E-05	0,02607076
2	5,500	336,55	0,002971327	30,25	8,82878E-06	0,01634230
3	4,000	453,77	0,00220376	16	4,85656E-06	0,00881504
4	2,500	658,45	0,001518718	6,25	2,3065E-06	0,00379680
SOMATÓRIOS	19	1717,27	0,010418199	101,5	2,9863E-05	0,05502489
Sxx =	11,25	b'=Sxy'/Sxx=			0,00049231	
Sy'y' =	2,72824E-06	a'=(soma y'/n) - b'.(soma x/n)=			0,00026609	
Sxy' =	0,005538448	Se= (SQR/(n-2)) ^{1/2} =			0,00002853	
SQR =	1,6276E-09	Sa = {[(soma x ²) / (n.Sxx)] ^{1/2} } .Se=			0,00004284	
		Sb=Se/(Sxx) ^{1/2} =			0,00000851	
A=	0,26609416	r= Sxy'/(Sxx.Sy'y') ^{1/2}			0,999701669	
B=	0,492306456	r ² =	0,999403426			

C = $\frac{1000}{0,2661 + 0,4923 * m}$

r² = 0,9994

A.1.2 Regressão para os concretos autoadensáveis com finos de concreto

CURVA DE ABRAMS

PONTOS		04		REGRESSÃO		
	DADOS		y'	x ²	y' ²	x.y'
	x (a/c)	y (f _{c3})				
1	0,39	35,01	1,544192111	0,1521	2,384529275	0,60223492
2	0,44	33,48	1,524785449	0,1936	2,324970666	0,67090560
3	0,55	25,66	1,409256652	0,3025	1,986004311	0,77509116
4	0,79	20,22	1,305781151	0,6241	1,705064415	1,03156711
SOMATÓRIOS	2,17	114,37	5,784015363	1,2723	8,400568668	3,07979879
S _{xx} =	0,095075		b' = S _{xy} /S _{xx} =			-0,61035546
S _{y'y} =	0,036860237		a' = (soma y'/n) - b'.(soma x/n) =			1,77712168
S _{xy} =	-0,058029546		Se = (SQR/(n-2)) ^{1/2} =			0,02684759
SQR =	0,001441587		Sa = {[(soma x ²)/(n.S _{xx})] ^{1/2} }.Se =			0,04910627
			Sb = Se/(S _{xx}) ^{1/2} =			0,08707073
A =	59,85792798		r = S _{xy} /(S _{xx} .S _{y'y}) ^{1/2}			-0,980250207
B =	4,077138482		r ² =		0,960890469	

$$f_{c7} = \frac{59,8579}{4,0771} a/c$$

$$r^2 = 0,9608$$

CURVA DE ABRAMS

PONTOS		04		REGRESSÃO		
	DADOS		y'	x ²	y' ²	x.y'
	x (a/c)	y (f _{c3})				
1	0,39	38,78	1,588607805	0,1521	2,523674757	0,61955704
2	0,44	37,74	1,576801896	0,1936	2,486304219	0,69379283
3	0,55	31,11	1,492900011	0,3025	2,228750443	0,82109501
4	0,79	26,04	1,41564098	0,6241	2,004039384	1,11835637
SOMATÓRIOS	2,17	133,67	6,073950692	1,2723	9,242768803	3,25280126
S _{xx} =	0,095075		b' = S _{xy} /S _{xx} =			-0,44509063
S _{y'y} =	0,019549552		a' = (soma y'/n) - b'.(soma x/n) =			1,75994934
S _{xy} =	-0,042316992		Se = (SQR/(n-2)) ^{1/2} =			0,01890311
SQR =	0,000714655		Sa = {[(soma x ²)/(n.S _{xx})] ^{1/2} }.Se =			0,03457522
			Sb = Se/(S _{xx}) ^{1/2} =			0,06130561
A =	57,53728185		r = S _{xy} /(S _{xx} .S _{y'y}) ^{1/2}			-0,98155178
B =	2,786702666		r ² =		0,963443897	

$$f_{c28} = \frac{57,5373}{2,7867} a/c$$

$$r^2 = 0,9634$$

LEI DE LYSE

PONTOS	DADOS		REGRESSÃO		
	x (a/c)	y (m)	x ²	y ²	x.y
1	0,39	2,500	0,152	6,250	0,975
2	0,44	4,000	0,194	16,000	1,76
3	0,55	5,500	0,303	30,250	3,025
4	0,79	7,000	0,624	49,000	5,53
SOMATÓRIOS	2,170	19,000	1,272	101,500	11,290
Sxx =	0,095075		b=Sxy/Sxx=		10,33394688
Syy =	11,25		a=(soma y/n) - b.(soma x/n)=		-0,856166185
Sxy =	0,9825		Se= (SQR/(n-2)) ^{1/2} =		0,740573152
SQR=	1,096897186		Sa = {[(soma x ²)/(n.Sxx)] ^{1/2} }.Se=		12,09867531
			Sb=Se/(Sxx) ^{1/2} =		2,401788695
A=	-0,856166185		r= Sxy'/(Sxx.Sy'y') ^{1/2}		0,949998962
B=	10,33394688		r ² =	0,902498028	

m = -0,8562 + 10,3339 *a/c

r² = 0,9024

LEI DE MOLINARY

PONTOS	DADOS		REGRESSÃO			
	x (m)	y (Cons)	y'	x ²	y ²	x.y'
1	7,000	270,76	0,003693308	49	1,36405E-05	0,02585315
2	5,500	344,71	0,002900989	30,25	8,41574E-06	0,01595544
3	4,000	452,12	0,002211802	16	4,89207E-06	0,00884721
4	2,500	620,66	0,001611188	6,25	2,59593E-06	0,00402797
SOMATÓRIOS	19	1688,25	0,010417287	101,5	2,95443E-05	0,05468377
Sxx =	11,25		b'=Sxy'/Sxx=			0,00046237
Sy'y' =	2,41429E-06		a'=(soma y'/n) - b'.(soma x/n)=			0,00040807
Sxy' =	0,005201659		Se= (SQR/(n-2)) ^{1/2} =			0,00006782
SQR =	9,19824E-09		Sa = {[(soma x ²)/(n.Sxx)] ^{1/2} }.Se=			0,00010185
			Sb=Se/(Sxx) ^{1/2} =			0,00002022
A=	0,408065584		r= Sxy'/(Sxx.Sy'y') ^{1/2}		0,998093223	
B=	0,462369731		r ² =	0,996190081		

C = $\frac{1000}{0,4081} + 0,4624 * m$

r² = 0,9961

A.1.3 Regressão para os concretos autoadensáveis com finos de Argamassa

CURVA DE ABRAMS

PONTOS		04		REGRESSÃO		
	x (a/c)	y (f _{c3})	y'	x ²	y ²	x.y'
1	0,34	35,62	1,551693915	0,116281	2,407754006	0,52912763
2	0,46	27,40	1,437750563	0,215296	2,067126681	0,66711626
3	0,67	17,32	1,238422496	0,454276	1,533690278	0,83469676
4	0,90	13,06	1,115776876	0,81	1,244958037	1,00419919
SOMATÓRIOS	2,379	93,39	5,34364385	1,595853	7,253529003	3,03513984
Sxx =	0,18094275		b' = Sxy/Sxx =			-0,79026290
Sy'y' =	0,114896604		a' = (soma y'/n) - b'.(soma x/n) =			1,80591982
Sxy' =	-0,142992343		Se = (SQR/(n-2)) ^{1/2} =			0,03078198
SQR =	0,00189506		Sa = {[(soma x ²)/(n.Sxx)] ^{1/2} }.Se =			0,04570801
			Sb = Se/(Sxx) ^{1/2} =			0,07236456
A =	63,96167433		r = Sxy'/(Sxx.Sy'y') ^{1/2}			-0,991718905
B =	6,16968374		r ² =	0,983506387		

$$f_{c7} = \frac{63,9617}{6,1697} \text{ a/c}$$

$$r^2 = 0,9835$$

CURVA DE ABRAMS

PONTOS		04		REGRESSÃO		
	x (a/c)	y (f _{c3})	y'	x ²	y ²	x.y'
1	0,34	50,08	1,699620958	0,116281	2,888711401	0,57957075
2	0,46	35,54	1,550680762	0,215296	2,404610827	0,71951587
3	0,67	22,78	1,35761091	0,454276	1,843107383	0,91502975
4	0,90	15,91	1,20167018	0,81	1,444011221	1,08150316
SOMATÓRIOS	2,379	124,305	5,80958281	1,595853	8,580440831	3,29561954
Sxx =	0,18094275		b' = Sxy/Sxx =			-0,88221186
Sy'y' =	0,142627725		a' = (soma y'/n) - b'.(soma x/n) =			1,97709121
Sxy' =	-0,159629841		Se = (SQR/(n-2)) ^{1/2} =			0,03000321
SQR =	0,001800385		Sa = {[(soma x ²)/(n.Sxx)] ^{1/2} }.Se =			0,04455163
			Sb = Se/(Sxx) ^{1/2} =			0,07053377
A =	94,86176671		r = Sxy'/(Sxx.Sy'y') ^{1/2}			-0,993668472
B =	7,624508697		r ² =	0,987377032		

$$f_{c28} = \frac{94,8618}{7,6245} \text{ a/c}$$

$$r^2 = 0,9873$$

LEI DE LYSE

PONTOS	DADOS		REGRESSÃO												
	x (a/c)	y (m)	x ²	y ²	x.y										
1	0,34	2,500	0,116	6,250	0,85										
2	0,46	4,000	0,212	16,000	1,84										
3	0,67	5,500	0,449	30,250	3,685										
4	0,90	7,000	0,810	49,000	6,3										
SOMATÓRIOS	2,370	19,000	1,586	101,500	12,675										
Sxx =	0,181875	b=Sxy/Sxx=			7,793814433										
Syy =	11,25	a=(soma y/n) - b.(soma x/n)=			0,132164948										
Sxy =	1,4175	Se= (SQR/(n-2)) ^{1/2} =			0,318015755										
SQR=	0,202268041	Sa ={[(soma x ²)/(n.Sxx)] ^{1/2} }.Se=			3,756342283										
		Sb=Se/(Sxx) ^{1/2} =			0,745696549										
A=	0,132164948	r= Sxy'/(Sxx.Sy'y') ^{1/2}			0,990969535										
B=	7,793814433	r ² =	0,982020619												
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>m =</td> <td>0,1322</td> <td>+</td> <td>7,7938</td> <td>*a/c</td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">r² = 0,9820</td> </tr> </table>						m =	0,1322	+	7,7938	*a/c	r ² = 0,9820				
m =	0,1322	+	7,7938	*a/c											
r ² = 0,9820															

LEI DE MOLINARY

PONTOS	DADOS		REGRESSÃO												
	x (m)	y (Cons)	y'	x ²	y ²	x.y'									
1	7,000	260,68	0,003836121	49	1,47158E-05	0,02685285									
2	5,500	328,72	0,003042103	30,25	9,25439E-06	0,01673156									
3	4,000	442,08	0,002262034	16	5,1168E-06	0,00904814									
4	2,500	637,45	0,00156875	6,25	2,46098E-06	0,00392188									
SOMATÓRIOS	19	1668,93	0,010709008	101,5	3,1548E-05	0,05655442									
Sxx =	11,25	b'=Sxy'/Sxx=			0,00050548										
Sy'y' =	2,87727E-06	a'=(soma y'/n) - b'.(soma x/n)=			0,00027623										
Sxy' =	0,005686635	Se= (SQR/(n-2)) ^{1/2} =			0,00003743										
SQR =	2,80212E-09	Sa ={[(soma x ²)/(n.Sxx)] ^{1/2} }.Se=			0,00005622										
		Sb=Se/(Sxx) ^{1/2} =			0,00001116										
A=	0,27622838	r= Sxy'/(Sxx.Sy'y') ^{1/2}			0,999512941										
B=	0,505478664	r ² =	0,99902612												
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>C =</td> <td>0,2762</td> <td>+</td> <td>1000</td> <td>* m</td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">r² = 0,9990</td> </tr> </table>						C =	0,2762	+	1000	* m	r ² = 0,9990				
C =	0,2762	+	1000	* m											
r ² = 0,9990															

A.1.4 Regressão para os concretos autoadensáveis com finos cerâmicos

CURVA DE ABRAMS

PONTOS		04		REGRESSÃO		
	DADOS		y'	x ²	y' ²	x.y'
	x (a/c)	y (f _{c3})				
1	0,36	28,06	1,448087667	0,1296	2,09695789	0,52131156
2	0,51	21,60	1,334453751	0,2601	1,780766814	0,68057141
3	0,83	13,10	1,117271296	0,6889	1,248295148	0,92733518
4	1,00	12,10	1,08278537	1	1,172424158	1,08278537
SOMATÓRIOS	2,7	74,86	4,982598084	2,0786	6,298444011	3,21200352
Sxx =	0,2561		b' = Sxy/Sxx =			-0,59059035
Sy'y' =	0,091873094		a' = (soma y'/n) - b'.(soma x/n) =			1,64429800
Sxy' =	-0,151250188		Se = (SQR/(n-2)) ^{1/2} =			0,03568048
SQR =	0,002546194		Sa = {[(soma x ²)/(n.Sxx)] ^{1/2} }.Se =			0,05082547
			Sb = Se/(Sxx) ^{1/2} =			0,07050598
A =	44,08572679		r = Sxy'/(Sxx.Sy'y') ^{1/2}			-0,986045513
B =	3,895743427		r ² =		0,972285753	

$$f_{c7} = \frac{44,0857}{3,8957} a/c$$

$$r^2 = 0,9722$$

CURVA DE ABRAMS

PONTOS		04		REGRESSÃO		
	DADOS		y'	x ²	y' ²	x.y'
	x (a/c)	y (f _{c3})				
1	0,36	35,67	1,552303109	0,1296	2,409644943	0,55882912
2	0,51	29,81	1,474361976	0,2601	2,173743236	0,75192461
3	0,83	18,53	1,267875419	0,6889	1,607508079	1,05233660
4	1,00	17,60	1,245512668	1	1,551301806	1,24551267
SOMATÓRIOS	2,7	101,61	5,540053173	2,0786	7,742198064	3,60860299
Sxx =	0,2561		b' = Sxy/Sxx =			-0,51125692
Sy'y' =	0,069150776		a' = (soma y'/n) - b'.(soma x/n) =			1,73011172
Sxy' =	-0,130932898		Se = (SQR/(n-2)) ^{1/2} =			0,03324473
SQR =	0,002210425		Sa = {[(soma x ²)/(n.Sxx)] ^{1/2} }.Se =			0,04735584
			Sb = Se/(Sxx) ^{1/2} =			0,06569285
A =	53,71699596		r = Sxy'/(Sxx.Sy'y') ^{1/2}			-0,983887549
B =	3,245315506		r ² =		0,968034709	

$$f_{c28} = \frac{53,7170}{3,2453} a/c$$

$$r^2 = 0,9680$$

LEI DE LYSE

PONTOS	DADOS		REGRESSÃO												
	x (a/c)	y (m)	x ²	y ²	x.y										
1	0,36	2,500	0,130	6,250	0,9										
2	0,51	4,000	0,260	16,000	2,04										
3	0,83	5,500	0,689	30,250	4,565										
4	1,00	7,000	1,000	49,000	7										
SOMATÓRIOS	2,700	19,000	2,079	101,500	14,505										
Sxx =	0,2561	b=Sxy/Sxx=			6,559937524										
Syy =	11,25	a=(soma y/n) - b.(soma x/n)=			0,322042171										
Sxy =	1,68	Se= (SQR/(n-2)) ^{1/2} =			0,33860372										
SQR=	0,229304959	Sa = {[(soma x ²) / (n.Sxx)] ^{1/2} }.Se=			3,370466088										
		Sb=Se/(Sxx) ^{1/2} =			0,669093693										
A=	0,322042171	r= Sxy'/(Sxx.Sy'y') ^{1/2}			0,989756201										
B=	6,559937524	r ² =			0,979617337										
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 30%;">m =</td> <td style="width: 30%;">0,3220</td> <td style="width: 10%; text-align: center;">+</td> <td style="width: 30%;">6,5599</td> <td style="width: 10%; text-align: right;">*a/c</td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">r² = 0,9796</td> </tr> </table>						m =	0,3220	+	6,5599	*a/c	r ² = 0,9796				
m =	0,3220	+	6,5599	*a/c											
r ² = 0,9796															

LEI DE MOLINARY

PONTOS	DADOS		REGRESSÃO												
	x (m)	y (Cons)	y'	x ²	y ²	x.y'									
1	7,000	256,36	0,003900765	49	1,5216E-05	0,02730535									
2	5,500	315,14	0,003173193	30,25	1,00692E-05	0,01745256									
3	4,000	436,74	0,002289692	16	5,24269E-06	0,00915877									
4	2,500	634,19	0,001576815	6,25	2,48634E-06	0,00394204									
SOMATÓRIOS	19	1642,43	0,010940464	101,5	3,30141E-05	0,05785872									
Sxx =	11,25	b'=Sxy'/Sxx=			0,00052369										
Sy'y' =	3,09071E-06	a'=(soma y'/n) - b'.(soma x/n)=			0,00024759										
Sxy' =	0,005891513	Se= (SQR/(n-2)) ^{1/2} =			0,00005189										
SQR=	5,38583E-09	Sa = {[(soma x ²) / (n.Sxx)] ^{1/2} }.Se=			0,00007794										
		Sb=Se/(Sxx) ^{1/2} =			0,00001547										
A=	0,247588071	r= Sxy'/(Sxx.Sy'y') ^{1/2}			0,999128328										
B=	0,523690077	r ² =			0,998257415										
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 30%;">C =</td> <td style="width: 30%;">0,2476</td> <td style="width: 10%; text-align: center;">+</td> <td style="width: 30%;">1000</td> <td style="width: 10%; text-align: right;">* m</td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">r² = 0,9982</td> </tr> </table>						C =	0,2476	+	1000	* m	r ² = 0,9982				
C =	0,2476	+	1000	* m											
r ² = 0,9982															