

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALAN CESAPOLUCHA

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL UTILIZANDO  
AREIA 100% ARTIFICIAL E FÍLER CALCÁRIO COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL  
DO CIMENTO PORTLAND**

CURITIBA  
2016

ALAN CESAR POLUCHA

ESTUDO EXPERIMENTAL DE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL UTILIZANDO AREIA  
100% ARTIFICIAL E FÍLER CALCÁRIO COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO  
CIMENTO PORTLAND

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração em Materiais e Estruturas, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná – UFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Marques Filho

Coorientador: M.Sc. Jorge Christofolli

CURITIBA  
2016

Polucha, Alan Cesar

Estudo experimental de concreto auto-adensável utilizando areia 100% artificial e fíler calcário como substituição parcial do cimento portland / Alan Cesar Polucha. – Curitiba, 2016.

157 f. : il.; tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: José Marques Filho

Coorientador: Jorge Christofolli

1. Concreto auto-adensável. 2. Concreto de alta resistência. 3. Sustentabilidade. I. Marques Filho, José. II. Christofolli, Jorge. III. Título.

CDD 620.136

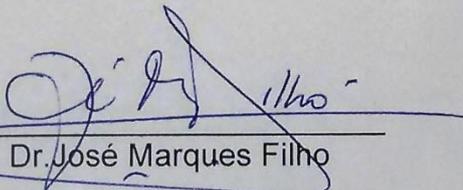


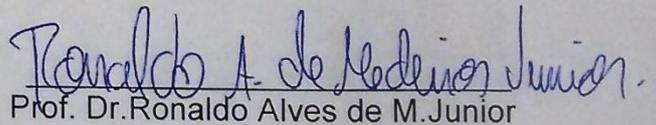
Ministério da Educação  
Universidade Federal do Paraná  
Setor de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil

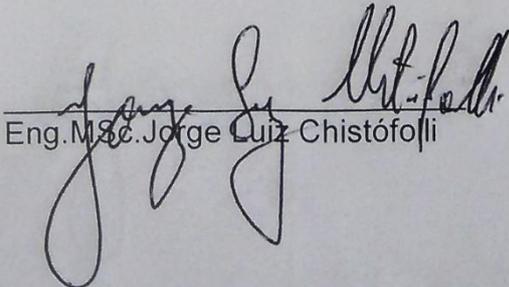
### ATA DE DEFESA DE MESTRADO

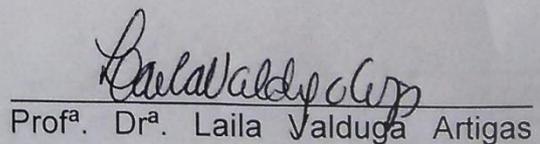
Aos vinte e sete dias do mês de junho de dois mil e dezesseis, no Auditório do CESEC – 1º Andar do Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, foi instalada pelo Professor Dr. José Marques Filho, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, a Banca Examinadora para a **ducentésima quinquagésima nona defesa de dissertação de Mestrado do PPGECC, área de concentração: Materiais e Estruturas**. Estiveram presentes no ato professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo determinação do Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, ficou constituída pelos professores: Prof. Dr. José Marques Filho (Orientador - Doutorado UFRGS) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR, Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior (Doutorado ITA – São Paulo) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR, Eng. M.Sc Jorge Luiz Christófolli (Coorientador - Aluno doutorado do PPGECC-UFPR) e Gerente Técnico da CONCREBRAS e a Profª Drª Laila Valduga Artigas (Doutorado UFRGS) do Departamento de Construção Civil da UFPR, às 09h30min, o Prof. José Marques Filho iniciou os trabalhos, convidando o **aluno Alan Cesar Polucha**, para fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada “Estudo Experimental de concreto auto-adensável utilizando areia 100% artificial e fíler clacário como substituição parcial do cimento Portland”. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Após a arguição, a banca reuniu-se para apreciação do desempenho do pós-graduando. Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca decidiu pela sua APROVAÇÃO de acordo com a Resolução nº. 65/2009-CEPE – UFPR.

Curitiba, 27 de junho de 2016.

  
Prof. Dr. José Marques Filho

  
Prof. Dr. Ronaldo Alves de M. Junior

  
Eng. M.Sc. Jorge Luiz Christófolli

  
Profª. Drª. Laila Valduga Artigas

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu ilustre orientador, Prof. Dr. José Marques Filho pelos ensinamentos, preocupação, entusiasmo, dedicação e motivação nos momentos difíceis, por acreditar na minha capacidade confiando-me esta pesquisa, pela admirável energia empreendida em formar não apenas engenheiros melhores, mas também pessoas críticas quanto à realidade, o meu muito obrigado.

Ao meu coorientador, Jorge Christofolli, pela orientação, disponibilidade em ajudar e contribuições fundamentais para a idealização e conclusão desta pesquisa.

Aos demais professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, que nestes dois anos muito me ensinaram e influenciaram com seu grande conhecimento

À minha namorada, Éri Bühner, pelo amor, dedicação, companheirismo, compreensão durante todos os momentos e pela ajuda fundamental nos momentos mais difíceis.

Ao meu amigo de longa data, colega de profissão, Noan Batista Kieras Teixeira pela parceria e altruísmo na ajuda para realização deste programa experimental e também ao meu amigo e colega de profissão Luis Carvalho, por me emprestar alguns materiais de estudo para a prova de admissão ao mestrado.

Meu especial agradecimento aos colegas do mestrado Heloisa Campos, Dayana Ruth, Leonardo Hoffmann, e Ícaro Santos e aos demais colegas Gabriel Molini e Lucas Aguiar, pela amizade, colaboração, contribuição na obtenção dos materiais e nos ensaios preliminares.

À todos os amigos e colegas da sala 28, em especial ao Darlan Amorim Pereira, Carolina Londero, Gabriel Jung, Andrés Gonzalez Sarah Honorato Lopes, Thaísa Rocha, Ana Paula Mikos, Jose Henrique F. Pretto, Marcelo Sakamori, Janderson Raisdorfer, pela ajuda, ideias e suporte e todos os momentos.

Aos técnicos de laboratório do LAME/DCC pela contribuição em todas as etapas deste trabalho, principalmente ajudando a contornar as dificuldades inerentes às nossas instalações.

À Betina Lepretti, Jeferson Bronholo, ao Bruno Ribeiro e toda à equipe do LACTEC, que contribuíram na produção do concreto auto adensável, principalmente aos que ajudaram na árdua etapa de caracterização no estado fresco.

A Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Nayara Klein e toda equipe do LAMIR, pela contribuição na execução dos ensaios para obtenção das curvas granulométricas calcário pulverizado e do cimento Portland.

Às empresas Companhia de Cimentos Itambé, Grace, e Caltec, que gentilmente forneceram todos os materiais necessários à esta pesquisa.

À concrebras, que forneceu os ensaios de resistência à compressão.

À UTFPR, nas pessoas do prof. Dr. Wellington Mazer, prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Eliane Betânia Carvalho Costa que com presteza viabilizaram a execução de ensaios e ao técnicos Gustavo Macioski e Felipe Perretto, pela ajuda nesta etapa final do programa experimental.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico – CNPq, pela bolsa de estudos concedida.

POLUCHA, A. C. **Estudo experimental de concreto auto-adensável utilizando areia 100% artificial e fíler calcário como substituição parcial do cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

## RESUMO

O emprego do concreto auto-adensável (CAA) de alta resistência propicia o melhor aproveitamento dos recursos naturais devido à menor necessidade de manutenção, maior durabilidade das estruturas de concreto e à redução do consumo de matérias primas nobres através da redução do consumo de concreto. Quando o CAA utiliza em sua composição areia artificial em detrimento da areia natural, os impactos ambientais decorrentes do método convencional da extração são reduzidos, bem como o custo de transportes, além de agregar menor variabilidade das características do agregado. Durante o processo de britagem dos agregados é gerado o fíler calcário, material que é removido dos produtos e é disposto em um bota fora, sem uso gerando danos ambientais. Em face deste panorama, este trabalho tem como objetivo estudar a influência da utilização do deste fíler calcário em substituição parcial ao cimento Portland na confecção de CAA de alta resistência utilizando agregados 100% artificiais. Os concretos produzidos tiveram sua validação de propriedades de auto adensabilidade no estado fresco e as seguintes propriedades no estado endurecido: Resistência à compressão e à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Foram produzidos concretos com quatro níveis de substituição de cimento Portland, 0%, 6%, 12% e 18%, e quatro faixas de resistência alvo: 60MPa, 70 MPa, 80 MPa e 90 MPa. Os resultados obtidos comprovaram que o CAA confeccionado utilizando areia artificial e fíler calcário gera moldagens como menos erros, sendo que o Coeficiente de Variação para a resistência à compressão aos 28 dias foi de 2,23% para CAA enquanto o concreto de alta resistência (CAR), produzido com os mesmos materiais, obteve CV igual à 9,09%. Os resultados também mostraram significativa redução do consumo de cimento, sendo a maior redução encontrada de 10,30%. Os maiores resultados para a resistência à compressão foram encontrados para o teor de substituição de 0%, entretanto 27% dos resultados encontrados, embora numericamente menores, foram considerados estatisticamente iguais, com a vantagem da grande redução do consumo de cimento. Comparado ao CAR produzido com os mesmos materiais, nos melhores resultados, o CAA alcançou 18,3% mais resistência à compressão com redução de 9,1 % no consumo de cimento, mesmo utilizando relações a/c maiores que o CAR. A resistência à tração mais alta foi encontrada para o teor de substituição de 6%, entretanto a análise de variância (ANOVA) revelou que a substituição de cimento Portland por fíler calcário não influenciou nos resultados. O valor mais alto de módulo de elasticidade foi encontrado para o teor de substituição de 12%, entretanto a ANOVA revelou que o teor de substituição de fíler não influi na variação deste parâmetro. Devido às reduções no consumo de cimento, foram percebidas reduções nos custos por unidade de resistência e por volume, bem como reduções de emissão de CO<sub>2</sub>.

Palavras-chave: Concreto auto-adensável (CAA), Concreto de alta resistência (CAR), fíler calcário, sustentabilidade.

POLUCHA, A. C. **Experimental study on self-compacting concrete produced with 100% manufactured sand and calcareous filler as partial replacement of Portland cement.** Thesis (Master Degree on Construction Engineering) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

### ABSTRACT

The use of high strength self-compacting concrete (SCC) leads to a better use of natural resources due to the need of less maintenance, increased durability of concrete structures while minimizing the consumption of noble raw material as a benefit from the reduction in concrete volume pieces. Whenever the SCC is produced using manufactured sand instead of natural sand, environmental impacts resulting from the conventional sand extracting methods are reduced, as well as the transportation costs, besides lowering aggregates characteristics variability. During the aggregates manufacturing processes, calcareous filler is generated, being this waste removed from the aggregates and disposed in dumps, causing environmental damage. In this scenario, the purpose of this study is to analyse the influence of the use of calcareous filler as partial replacement of Portland cement for manufacturing high strength SCC, using 100% of manufactured sand. Fresh concrete tests were performed on SCC to validate self-compacting properties and the following hardened properties were evaluated: Compressive strength, tensile strength by diametral compression and elastic modulus. The concretes were produced with four levels of cement replacement, 0%, 6%, 12% and 18%, and four resistance levels. Results show that SCC produced using manufactured sand and calcareous filler achieved better mould filling, as the Coefficient of Variation (CV) for compressive strength (28 days) resulted as 2,23%, while the high-strength concrete (HSC), composed by the same material, obtained CV equal to 9,09%. The results also show significant decrease in cement consumption, being 10,30% greater reduction. The higher values for compressive strength are observed for 0% calcareous filler replacement, however 27 % of the results although numerically smaller, were found statistically equal, with the advantage of greatly reduced cement consumption. The comparison between HSC and SCC produced with same materials reveals, at the best values, that the SCC developed 18,30% higher compressive strength with 9,10% reduced cement consumption, though the SCC was produced with higher water cement ratios. The higher value for tensile strength is observed for 6% level of replacement, although the analysis of variation (ANOVA) revealed that the replacement of Portland cement for calcareous filler doesn't effect this parameter. The greater value for elastic modulus is observed for 12% level of replacement, although ANOVA revealed that the replacement of Portland cement for calcareous filler doesn't effect this parameter. Due to the cement consumption lowering, reduction on the cost per unit strength and volume were observed, as well as CO<sub>2</sub> emission reduction.

Keywords: self-compacting concrete (SCC), high-strength concrete (HSC), calcareous filler, sustainability.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de espalhamento (slump-flow) .....	43
Tabela 2 - Classes de viscosidade plástica aparente t500 (sob fluxo livre).....	43
Tabela 3 - Classes de habilidade passante pelo anel J (sob fluxo livre) .....	45
Tabela 4 - Classes de habilidade passante na caixa L, sob fluxo confinado .....	47
Tabela 5- Classificação do CAA quanto viscosidade plástica aparente pelo funil V, sob fluxo confinado .....	49
Tabela 6 -Especificações técnicas do CP V-ARI .....	68
Tabela 7 - Granulometria do CP V-ARI.....	68
Tabela 8 - Granulometria da areia .....	69
Tabela 9 - Características físicas da areia.....	70
Tabela 10 - Granulometria do agregado graúdo.....	71
Tabela 11 - Características do agregado graúdo.....	72
Tabela 12 - Especificações técnica do aditivo plastificante .....	73
Tabela 13 - Especificações técnicas - Aditivo SP .....	73
Tabela 14 - Granulometria do fíler calcário - sem peneirar .....	75
Tabela 15 - Características - sílica ativa.....	76
Tabela 16 – Traços – argamassa de cimento Portland.....	78
Tabela 17 - Traços - Pasta de cimento Portland .....	83
Tabela 18 - Resistências esperadas.....	84
Tabela 19 - traços utilizados.....	86

Tabela 20 - Características do Strain Gage utilizado .....	90
Tabela 21 - Distribuição dos CP's .....	92
Tabela 22 - Escala de importância.....	94
Tabela 23 – Características de qualidade .....	94
Tabela 24 – Variáveis de resposta .....	95
Tabela 25 - Níveis dos fatores .....	95
Tabela 26 - Fatores de ruído .....	95
Tabela 27 - Espalhamento na mesa de consistência - Argamassa.....	96
Tabela 28 - Espalhamento - Minicone de Kantro.....	97
Tabela 29 - ANOVA -Compatibilidade aditivo/fíler calcário – Mesa de Consistência .....	99
Tabela 30 - ANOVA -Compatibilidade aditivo/fíler calcário – Minicone de Kantro.....	99
Tabela 31 - Resumo de comparação entre médias – mesa de consistência.....	101
Tabela 32 - Resumo de comparação entre médias – cone de Kantro .....	101
Tabela 33 - Resistência à compressão média das argamassas.....	102
Tabela 34 - ANOVA - Resistência à compressão - Argamassa .....	103
Tabela 35 - Espalhamento da pasta – Minicone de Kantro- média de 3 medições com fíler peneirado .....	104
Tabela 36 - ANOVA - Minicone de Kantro - Pasta .....	105
Tabela 37 – Espalhamento da pasta – Minicone de Kantro- média de 3 medições com fíler não peneirado .....	106
Tabela 38 - ANOVA - Comparação entre pastas .....	108
Tabela 39 - Determinação do esqueleto granular .....	110

Tabela 40 – Resultado e classificação do CAA no estado fresco – 70 MPa e 60 MPa.....	111
Tabela 41 – Resultado e Classificação do CAA no estado fresco - 90 MPa e 80 MPa.....	111
Tabela 42 - Resistência à compressão (MPa).....	113
Tabela 43 - ANOVA para resistência à compressão aos 28 dias. ....	115
Tabela 44 - Evolução da resistência em função do tempo.....	118
Tabela 45 - Resumo da CMM .....	119
Tabela 46 - Equações de ajuste e R <sup>2</sup> para resistência à compressão em função da relação a/c...	119
Tabela 47 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, em função do nível de resistência e teor de fíler .....	120
Tabela 48 - ANOVA para resistência à tração por compressão diametral .....	121
Tabela 49 - Resultado do ensaio de módulo de elasticidade .....	122
Tabela 50 - ANOVA para módulo de elasticidade dos concretos .....	124
Tabela 51 - Consumo de cimento e Emissão de CO <sub>2</sub> por MPa, para concretos produzidos em Curitiba .....	126
Tabela 52 - Consumo de cimento e emissão de CO <sub>2</sub> por MPa, para os concretos produzidos nesta pesquisa .....	127
Tabela 53 - Comparação da resistência à compressão aos 28 dias com a bibliografia .....	131
Tabela 54 - Custos dos Materiais .....	133
Tabela 55 - Custos do concreto por traço .....	133
Tabela 56 - Custo médio por MPa para CCV em Curitiba.....	134

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre a proporção dos materiais - CCV E CAA*.....	29
Figura 2 Grau de adensamento do agregado miúdo na argamassa e agregado graúdo no concreto .....	36
Figura 3 – Ensaio de espalhamento .....	42
Figura 4 - Medição do espalhamento .....	43
Figura 5 - Anel J - dimensões .....	44
Figura 6 - Anel J utilizado .....	45
Figura 7 - Caixa L.....	46
Figura 8 - Indicação das alturas $H_1$ e $H_2$ .....	47
Figura 9 – Ensaio funil V .....	48
Figura 10 – Funil V utilizado na pesquisa.....	49
Figura 11 – Ensaio da caixa U (U-box test) .....	50
Figura 12 – Mistura binária sem interação – fração graúda dominante .....	58
Figura 13 – Mistura binária sem interação – fração miúda dominante .....	58
Figura 14 Evolução do empacotamento de partículas em uma mistura binária sem interação. ....	60
Figura 15 – Mistura binária com interação total.....	60
Figura 16 - Evolução do empacotamento de partículas para mistura binária com interação total	61
Figura 17 - Mistura binária com interação parcial e efeito de afastamento .....	61
Figura 18 - Mistura binária com interação parcial e efeito parede .....	62

Figura 19 - Mistura binária - Comparativo entre tipos de interação .....	63
Figura 20 - Efeito parede em uma mistura monodispersiva .....	65
Figura 21 - Curva granulométrica - CPV-ARI .....	69
Figura 22 - Curva granulométrica da areia .....	70
Figura 23 - Curva granulométrica do agregado graúdo .....	72
Figura 24 - Curva granulométrica do fíler calcário - sem peneirar .....	76
Figura 25 - Mesa de Abatimento (flow table) - início do ensaio .....	80
Figura 26 - Mesa de abatimento (flow table) - término do ensaio .....	80
Figura 27 – Minicone de Kantro - Medição do espalhamento .....	80
Figura 28 - Corpos de prova - Argamassa .....	81
Figura 29 - Rompimento corpo de prova - Argamassa .....	81
Figura 30 – Determinação esqueleto granula - Medição do empacotamento .....	85
Figura 31 - Moldagem dos corpos de prova .....	87
Figura 32 - Corpos de prova cobertos com PVC .....	88
Figura 33 - Prensa hidráulica -PC200C .....	89
Figura 34 – Prensa hidráulica – DL 30.000 .....	89
Figura 35 - Corpo de prova com strain gage instalado .....	90
Figura 36 - CP com pratos metálicos .....	91
Figura 37 - CP e elastômetro .....	91
Figura 38 - Adaptador para ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	91
Figura 39 - Espalhamento – mesa de consistência- Teor de aditivo X teor de fíler calcário .....	97

Figura 40 - Espalhamento - minicone de Kantro - Teor de superplastificante X teor de fíler calcário .....	98
Figura 41 - Resistência à compressão média das argamassas .....	102
Figura 42 - Espalhamento - Minicone de Kantro – Pasta.....	105
Figura 43- Espalhamento - minicone de Kantro - Pasta com fíler calcário sem peneirar .....	107
Figura 44 - Comparação entre espalhamentos - Pasta com pó peneirado e não peneirado .....	108
Figura 45 - Índice de vazios - determinação do esqueleto granular .....	109
Figura 46 - Corpo de prova - Rompimento nos agregado graúdos .....	114
Figura 47 - Resistência à compressão X relação a/c - 3 dias.....	116
Figura 48 - Resistência à compressão X relação a/c - 7 dias.....	117
Figura 49 - Resistência à compressão X relação a/c - 28 dias.....	118
Figura 50 - Resistência à tração por compressão X relação a/c aos 28 dias, para cada teor de adição de fíler calcário .....	121
Figura 51 - Módulo de elasticidade X relação a/c, em função do teor de fíler.....	123
Figura 52 - Comparação entre o módulo de elasticidade real e o estimado pela NBR 6118:2014 .....	125
Figura 53 - Consumo de cimento por unidade de resistência em função da resistência à compressão .....	128
Figura 54 - Resistência à compressão e consumo de cimento versus fíler.....	129
Figura 55 - Emissão de CO2 em função da resistência à compressão .....	130
Figura 56- Comparação entre custo por MPa do CCV e CAA desta pesquisa .....	134

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

a/a – relação água/aglomerante

a/c – relação água/cimento

a/f – relação água finos

ANOVA – Análise de variância

C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF – Aluminatos

CAA – Concreto Auto Adensável

CCV – concreto convencional vibrado

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

COPPE/UFRJ – Coordenação de Programas de Pós-graduação de Engenharia/Universidade Federal do Rio de Janeiro

CMM – Comparação múltipla de médias

CP – Corpo de prova

CP “N” BC – Cimento Portland de baixo calor de hidratação

CP “N” RS – Cimento Portland resistente a sulfatos

CP I – Cimento Portland comum

CP II – Cimento Portland Composto

CP III – Cimento Portland de alto forno

CP IV – Cimento Portland pozolânicos

CP V – Cimento Portland de alta resistência inicial

CPB – Cimento Portland Branco

CV – Coeficiente de Variação

DMC – Dimensão Máxima Característica

DP – Desvio Padrão

Fc – Resistência à compressão

Fcj – Resistência de dosagem

Fck – Resistência característica à compressão

INMETRO – Instituto Nacional de Metodologia, Normatização e Qualidade Industrial.

LAME – Laboratório de Materiais e Estruturas

LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento

LS – Lignossulfonatos Modificados

MPa – Mega Pascal

MS – Melamina Sulfonato

MV – Modificadores de Viscosidade

NBR – Norma Brasileira

NOx – Nitrogênio

NS – Naftaleno Sulfonato

PC – Policarboxilatos

SOx – Enxofre

SP – Superplastificante

UFAL – Universidade Federal de Alagoas

UFG – Universidade Federal de Goiás

UFPR – Universidade Federal do Paraná

UFRS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

$V_p$  – Volume Perturbado

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	22
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA.....	22
1.2	HIPÓTESE .....	23
1.3	OBJETIVO.....	23
1.4	JUSTIFICATIVA.....	23
1.4.1	Justificativa ambiental.....	23
1.4.2	Justificativa social .....	24
1.4.3	Justificativa econômica .....	25
1.4.4	Justificativa tecnológica .....	26
2	CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL.....	27
2.1	HISTÓRICO DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL.....	27
2.2	MATERIAIS CONSTITUINTES .....	28
2.2.1	Cimento Portland.....	29
2.2.2	Adições.....	31
2.2.3	Aditivos .....	32
2.2.3.1	Superplastificantes .....	32
2.2.3.2	Modificadores de Viscosidade (MV) .....	33
2.2.4	Agregados.....	34
2.2.4.1	Propriedades .....	36
2.2.4.2	Agregado miúdo .....	38

2.2.4.3	Agregado graúdo .....	40
2.3	PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO .....	40
2.4	ENSAIOS DE AUTO-ADENSABILIDADE .....	41
2.4.1	Ensaio de espalhamento (NBR 15823-2:2010).....	41
2.4.2	Ensaio de determinação de habilidade passante – Método do anel Japonês (NBR 15823-3:2010) .....	44
2.4.3	Ensaio de determinação de habilidade passante – Método da caixa L (NBR 15823-4:2010).....	45
2.4.4	Ensaio Funil V (NBR 15823-5:2010) .....	47
2.4.5	Ensaio da caixa U ( EFNARC, 2005) .....	50
2.5	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO.....	51
2.5.1	Resistência à compressão .....	51
2.5.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	52
2.5.3	Módulo de elasticidade.....	53
2.6	MÉTODOS DE DOSAGEM .....	54
2.6.1	Método proposto por Okamura .....	54
2.6.2	Método proposto por (Tutikian B. F., 2007).....	54
2.7	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	56
2.7.1	Densidade de empacotamento virtual de uma mistura granular .....	57
2.7.2	Índice de compactação .....	63
2.7.3	Efeito parede .....	64
2.7.4	Segregação de misturas granulares .....	65

3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	66
3.1	MATERIAIS .....	67
3.1.1	Cimento .....	67
3.1.2	Agregado Miúdo .....	69
3.1.3	Agregado Graúdo .....	71
3.1.4	Aditivo plastificante .....	72
3.1.5	Aditivo Superplastificante.....	73
3.1.6	Fíler Calcário.....	74
3.1.7	Sílica ativa .....	76
3.2	METODOLOGIA .....	77
3.2.1	Argamassa .....	77
3.2.2	Pasta de cimento.....	81
3.2.3	Concreto .....	84
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	96
4.1	ARGAMASSA.....	96
4.1.1	Consistência .....	96
4.1.2	Resistência à Compressão .....	102
4.2	PASTA .....	104
4.2.1	Teor de superplastificante .....	104
4.2.2	Efeito do peneiramento do Fíler calcário .....	106
4.3	CONCRETO AUTO ADENSÁVEL .....	108

4.3.1	Esqueleto granular.....	109
4.3.2	Caracterização no estado fresco .....	111
4.3.3	Resistencia à compressão axial .....	112
4.3.4	Resistência à tração por compressão diametral.....	120
4.3.5	Módulo de elasticidade.....	122
4.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE CONSUMO DE CIMENTO E EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> .....	125
4.5	ANÁLISE DE CUSTO .....	132
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	136
6	SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS .....	139
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	140

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto auto adensável apresenta alta fluidez, e seu objetivo é conseguir adensamento adequado apenas com esforços oriundos de seu peso próprio. A formulação de concretos auto-adensáveis (CAA) resistentes à segregação é resultado de pesquisas com aditivos superplastificantes, aditivos modificadores de viscosidade e alto teor de finos, com avaliação rigorosa da granulometria.

Os agregados utilizados tradicionalmente em concretos convencionais têm baixo teor de finos, estes removidos durante os processos de britagem. Com o esgotamento de jazidas de areia natural próximas aos grandes centros, os custos de transporte aumentam significativamente, e a exploração de areia natural impacta negativamente sobre o meio ambiente. Sendo assim, a utilização de areia artificial em concretos torna-se uma alternativa economicamente atraente e ambientalmente mais adequada. Nas pedreiras, em geral, separa-se o agregado pulverizado das demais frações de agregados graúdos e da areia artificial, gerando resíduos pulverulentos sem destino final. Estes resíduos, quando não utilizados, também pressionam o meio ambiente, gerando necessidade de se estudar possíveis aplicações.

Sendo assim, pretende-se desenvolver rotinas para dosagem de CAA com elevados teores de finos, mantendo a eficiência do produto, para matérias primas disponíveis na região de Curitiba. A utilização de finos provenientes diretamente dos agregados tornará o CAA mais sustentável econômica, financeira e ambientalmente.

### 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Os CAA são compostos por vários materiais, sendo o agregado graúdo britado e agregado miúdo com tendência crescente de utilização de areia artificial. O processo de britagem gera resíduos (pó) que ficam aderidos às partículas dos agregados. Embora estas partículas finas sejam desejadas na dosagem deste tipo de concreto, elas são retiradas quase que em sua totalidade no final do processo de britagem, pois, se não controladas, interferem negativamente na resistência e consistência do concreto. Por outro lado, se o material fino receber a devida atenção na dosagem, pode ser utilizado para substituir parcialmente o cimento e diminuir a tendência a exsudação, problema recorrente no CAA.

Porém, se os finos são desejados na dosagem e em alguns casos adicionados separadamente, é possível determinar um teor de pó oriundo de pedra da britagem, a ser utilizado na mistura, mantendo as resistências e consistências do concreto?

## 1.2 HIPÓTESE

Com a exaustão das fontes de areia natural, seja por implicações ambientais ou escasseamento das jazidas de areia, tem-se buscado alternativas para a substituição desta fração do concreto. A utilização de agregados britados é largamente empreendida, pois são facilmente encontrados próximos aos grandes centros urbanos. Estes agregados, inclusive a areia britada, apresentam benefícios ambientais e econômicos.

Estudos semelhantes a este foram realizados e mostraram a viabilidade da substituição de agregados naturais por agregados artificiais. Klein (2008), demonstrou ser possível a substituição de 30% de areia natural por areia britada. Também foi possível manter a auto adensabilidade do concreto, produzindo CAA, mantendo o consumo de cimento entre 300 e 380 kg/m<sup>3</sup>. Portanto, este trabalho toma como hipótese ser possível produzir CAA composto com 100% de areia artificial e determinar o teor de pó necessário para que a mistura seja estável à exsudação e mantenha sua característica de auto-adensabilidade.

## 1.3 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo estudar experimentalmente a confecção de concreto auto adensável, utilizando 100% de areia artificial na mistura e fíler calcário obtido durante a britagem dos agregados, para a indústria da região de Curitiba. Para isso, serão estudadas as propriedades no estado fresco e endurecido deste concreto, através da moldagem de corpos de prova.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

### 1.4.1 Justificativa ambiental

O uso de cimento é responsável por 5% das emissões mundiais de CO<sub>2</sub> oriundos da atividade humana. Deste total, 40% são referentes à energia necessária para aquecimento da

matéria prima até 1450°C e para o processo de clínquerização, 50% é oriunda da liberação química durante o processo de clínquerização e os 10% restante são devidos à outros processos com transporte (CSI, 2016). O processo produtivo do cimento gera impactos à saúde humana e ao meio ambiente, desde a extração de matéria-prima, que gera degradação e contaminação da água e solo, passando pela emissão de material particulado, causador de problemas respiratórios.

A utilização de agregados com fíler calcário na produção de concreto gera uma série de benefícios, pois o pó contido nos agregados pode substituir parcialmente o cimento, um material mais nobre, no fechamento granular das misturas. Com a redução do consumo de cimento, diminui-se a utilização de recursos naturais na produção do cimento bem como a utilização de energia no processo, e, diminui-se também a geração de gases do efeito estufa. A simples utilização de areia artificial já traz benefícios, pois a extração de areia natural, que é obtida de leitos de rios, é responsável pela retirada da cobertura vegetal, pela degradação dos cursos d'água e por consideráveis prejuízos ao meio ambiente. Estas ações ajudam a atenuar o impacto ambiental gerado pela atividade humana e a reduzir custos para a indústria da construção civil.

Durante a execução de concretos com areia artificial, em geral, retira-se a parcela de agregados pulverizados que é um rejeito a ser tratado ambientalmente. O agregado pulverizado é retirado porque quando não controlado, provoca ações deletérias no concreto, como perda de consistência, aumento na demanda de água com conseqüente aumento da relação a/c. A utilização deste material pulverulento na confecção de concretos auto-adensáveis mitigaria este tipo de impacto ambiental.

#### 1.4.2 Justificativa social

A indústria da construção civil brasileira é uma das maiores consumidoras de recursos naturais renováveis e não renováveis, sendo a produção do concreto responsável pelo consumo de cimento e agregados. A atividade industrial e mineradora necessária para produção de cimento e concreto gera gases de enxofre e nitrogênio (SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub>), estes nocivos para os seres humanos. Também são gerados gases causadores do efeito estufa (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, etc.) e gases que degradam a camada de ozônio (Spence & Mulligan, 1995). A extração de recursos naturais gera poluição do meio físico e gases que colaboram com as mudanças climáticas, com resultados que podem ser danosos aos seres humanos.

A população brasileira em 2014 era estimada em 202 milhões de habitantes e com as taxas de crescimento atuais, as projeções preveem uma população de 228 milhões de habitantes em 2040 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2014). Esse crescimento esperado está próximo de 13% em um período de 25 anos. O crescimento populacional e o desenvolvimento da sociedade demandam construções de todos os níveis, desde obras de infraestrutura até residências para a população. Estas construções utilizam concreto em sua composição, o qual é produzido a partir de matérias primas não renováveis.

Tendo em vista o crescimento populacional e o fato que as atividades da construção civil utilizam recursos naturais e geram poluição, no que tange a esfera social, este estudo contribui para redução de geração de poluição nociva aos humanos e ao meio ambiente e economia de recursos naturais, além de tentar diminuir as emissões dos gases do efeito estufa, vetores do aquecimento global e mudanças climáticas que podem afetar o fornecimento de água, alimentos e energia à população. Ainda, este trabalho fornece material que pode permitir a diminuição de trabalhos penosos de adensamento e execução de reparos em estruturas de concreto.

#### 1.4.3 Justificativa econômica

O consumo de concreto no Brasil vem crescendo ano a ano. Em 2004, a produção de cimento foi de 36 milhões de toneladas e em 2014, 71,3 milhões de toneladas, um aumento de quase 98% em 10 anos (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2014). O crescimento do consumo de agregados também mostra índices de crescimento. O consumo estimado de areia em 2001 foi de 244,4 milhões de toneladas e em 2014 chegou a 391,8 milhões de toneladas (DNPM, 2014). O agregado miúdo natural (areia), que é extraída de leitos de rios, é responsável pela retirada da cobertura vegetal, pela degradação dos cursos d'água e por consideráveis prejuízos ao meio ambiente. Órgãos responsáveis pela fiscalização do meio ambiente vêm coibindo essa extração. Desta maneira os mineradores são forçados a extrair esses agregados em locais cada vez mais distantes do mercado consumidor, o que aumenta o preço final do produto (BARBOSA *et al*, 2008).

Frente a esta realidade, este trabalho contribui para a redução do custo do CAA, pois a incorporação de fíler calcário em sua composição diminui o consumo de cimento, um material mais caro e a utilização de areia artificial evita a busca por jazidas de areia natural em lugares mais distantes, o que diminui o custo do produto final.

#### 1.4.4 Justificativa tecnológica

O CAA é um tipo de concreto mais fluido, o que gera algumas vantagens na execução da obra. A etapa de vibração do concreto é eliminada, economizando energia e contribuindo para redução de ruídos, diminuindo a insalubridade e periculosidade para os trabalhadores envolvidos. A redução desta etapa propicia ganho de tempo e cronogramas mais curtos. Este concreto também é adequado para obras complexas, com formas não convencionais e com altas taxas de armadura, pois como não precisam de adensamento tem uma capacidade de preenchimento maior do que o concreto convencional. Esta característica lhe confere uma menor suscetibilidade a falhas (HOPPE FILHO *et al.*, 2007), diminuindo, portanto, a probabilidade de ocorrência de não conformidades executivas, e em consequência, a quantidade de reparos e de resíduos. A simples utilização de areia artificial já traz benefícios frente a utilização da areia natural. A areia artificial é mais uniforme, o que contribui com o empacotamento e distribuição granulométrica (ALMEIDA, 2005).

## 2 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

Neste capítulo, se apresenta a revisão bibliográfica e o histórico de utilização do concreto auto adensável no Brasil e no mundo, através do estudo de sua literatura relevante. Também são apresentados os conceitos, histórico de utilização e características técnicas do concreto auto adensável no estado fresco e endurecido, bem como os métodos de dosagem para este tipo de concreto.

### 2.1 HISTÓRICO DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

O concreto auto adensável foi o resultado da preocupação com a durabilidade das estruturas de concreto armado no Japão. A partir do ano de 1983, a durabilidade do concreto se tornou um foco de atenção neste país, tendo em vista que o crescente escasseamento da mão de obra qualificada levou à redução da qualidade das construções. Uma das facetas relacionadas à durabilidade do concreto é a sua capacidade de preencher todas as formas e espaços sem deixar vazios e falhas na concretagem. Uma maneira pressuposta de conseguir estes requisitos independentemente da habilidade da mão de obra é através de um concreto fluido, que possa preencher qualquer forma proposta de construção simplesmente pela ação do seu peso próprio, sem a necessidade da etapa de vibração (OKAMURA *et al*, 2000).

A necessidade deste tipo de concreto e a proposição de seu uso foram feitas pela primeira vez no ano de 1986 por Okamura, no Japão. As pesquisas referentes ao desenvolvimento do concreto auto adensável, inclusive quanto à trabalhabilidade, foram conduzidas por Ozawa e Maekawa na Universidade de Tokyo. Dois anos após a primeira proposição deste tipo de concreto, em 1988, foi apresentado o primeiro protótipo de CAA, compostos com materiais correntes no mercado e que atendia os requisitos de performance para os estados fresco e endurecido (OKAMURA *et al*, 2000).

A primeira aplicação em obra do CAA ocorreu no Japão em junho de 1990, na construção de um edifício. Após, ainda no Japão no ano de 1991, CAA foi empregado na construção das torres de uma ponte estaiada em concreto protendido. No ano de 1992, o CAA foi utilizado na viga principal de uma ponte estaiada. A partir deste mesmo ano, no Canadá, estudos sobre CAA foram desenvolvidos, com ênfase de aplicação em pavimentação e reparos. Nos países baixos, no ano de 1997, o CAA foi utilizado na construção de uma edificação,

resultando na formação de um grupo de estudos e pesquisa com o intuito de estudar as questões relacionadas a utilização desta tecnologia em produtos de concreto. Em 1998, na Suécia, o CAA foi aplicado com sucesso em pontes. Ainda na década de noventa, há diversas aplicações e registros de pesquisas sobre o CAA nos EUA, diversos países da Europa e Ásia. Nesta década, mais de trinta relatos são encontrados apenas no Japão (OKAMURA *et al*, 2000; OKAMURA e OUCHI, 2003; DOMONE, 2006).

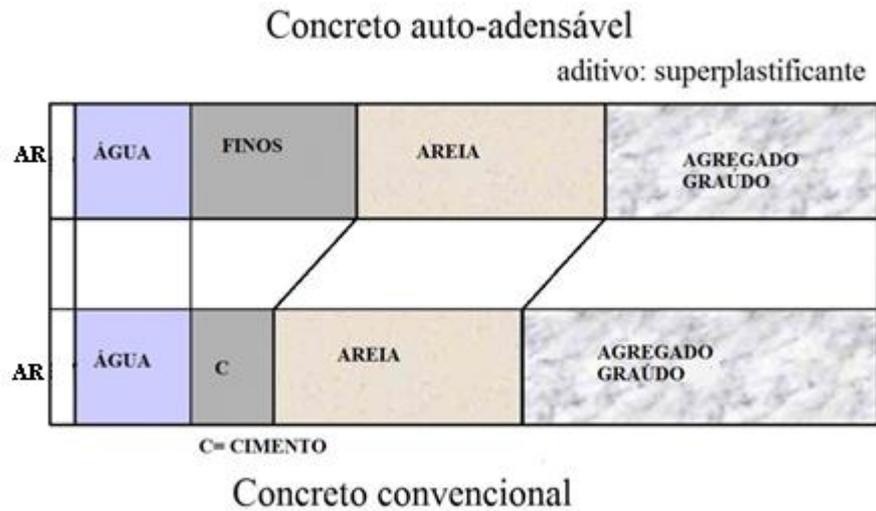
Os primeiros registros de utilização de CAA na América do sul, na Argentina, datam de 2002, onde o material foi empregado na concretagem de pilares de um arranha-céu, atingindo resistência à compressão de 59 MPa aos 28 dias (DOMONE, 2006). No Brasil, a primeira aplicação de CAA em um edifício residencial ocorreu apenas no ano de 2004 na cidade de Goiânia, Goiás (Geyer, 2005). Outras obras de destaque empregando este material, monitorados através da Comunidade da Construção, ocorreram em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul. Ainda, a maioria das aplicações do CAA em território nacional, até 2007, ocorreu por iniciativa ou com acompanhamento dos profissionais do meio acadêmico (Tutikian, 2007).

Nos últimos anos, o CAA tem sido foco de várias pesquisas no Brasil. Estas iniciativas estão desempenhando um papel fundamental em prol do teste e da aprovação para uso de deste material em diversas empresas. Dentre as várias universidades que conduzem pesquisas com CAA, pode-se destacar a Coordenação de Programas de Pós-graduação de Engenharia (COPPE/UFRJ), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS), Universidade Federal de Goiás (UFG), Universidade Federal de Alagoas (UFAL), (Tutikian B. F., 2007), Universidade Federal do Paraná (UFPR).

## 2.2 MATERIAIS CONSTITUINTES

Os materiais constituintes do CAA são os mesmos do concreto convencional, sendo a principal diferença entre estes dois tipos de concreto a proporção dos materiais na dosagem e, em alguns casos, o aditivo utilizado. A Figura 1 apresenta a comparação entre os materiais componentes do concreto convencional (CCV) e concreto auto adensável (CAA).

Figura 1 - Comparação entre a proporção dos materiais - CCV E CAA\*



**Fonte:** (Okamura & Ouchi, 2003)

\*Finos: Cimento e adições minerais.

A seguir serão apresentadas as principais características e propriedades dos materiais constituintes do CAA.

### 2.2.1 Cimento Portland

No Brasil, a produção de peças de concreto e argamassa em quase sua totalidade emprega o cimento Portland. No mercado de construção civil existem diversos tipos de cimentos, cada qual com vantagens e desvantagens para cada uso, e deve-se ser escolhido o mais apropriado dependendo das características que se pretende alcançar. Entre os cimentos mais usuais, pode-se citar o Cimento Portland Composto (CPII – NBR 11578:1991), Cimento Portland de alto forno (CP III -NBR 5735:1991), Cimento Portland pozolânicos (CP IV – NBR 5736:1991), Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI – NBR 5733:1991), Cimento Portland resistente à sulfatos (CP “N” RS – NBR 5737)<sup>1</sup>, Cimento Portland de baixo calor de hidratação (CP “N” BC – NBR 13116)<sup>1</sup>, e Cimento Portland branco (CPB – NBR 12989).

<sup>1</sup> As siglas dos cimentos resistentes aos sulfatos (RS) e de baixo calor de hidratação (BC) são compostas pelo número do cimento original acrescida dos sufixos RS e BC, ex. CP III – BC.

Durante a escolha do tipo de cimento mais adequado, deve-se estar atento às variações que ocorrem nos cimentos de mesmo tipo, pois as normas nacionais para este material permitem variações em sua composição, havendo diferenças de constituição em diferentes fábricas, lotes e épocas. Estas variações são originadas nas diferenças entre as jazidas utilizadas como fonte para matéria prima, diferenças nos processos de fabricação e principalmente nas diferentes adições e teores utilizados. O CP I é o único cimento que não utiliza adições, mas este cimento, desde 2008, não chega a 1% do total de cimento comercializado no Brasil, sendo que o mais consumido em 2012 foi o CP II, responsável por 67% do total (SNIC, 2014). A tendência de utilizar adições nos cimentos é crescente e o CP II, o mais utilizado no país, chega a ter 44% de adição e o CP III tem até 75% de adição total.

O cimento Portland é classificado como sendo um aglomerante hidráulico, ou seja, o produto final é estável em meio aquoso. A reação de hidratação consiste no endurecimento do cimento, e está se dá por reações químicas quando o material entra em contato com água (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O módulo de finura do cimento e dos demais finos é uma característica importante para a produção de CAA. Quanto maior for área específica do cimento, maior será o número de partículas e a interação entre elas, gerando uma maior viscosidade (Nunes, 2001).

A confecção de CAA demanda um elevado teor de finos, visando a obtenção da viscosidade adequada. O cimento é o material que fornece grande parte dos finos necessários, porém altas taxas de consumo de cimento geram efeitos negativos no concreto, no estado fresco e endurecido, como aumento de liberação de calor proveniente da hidratação e retração plástica. Uma solução possível para minimizar a influência negativa causada pelo excesso de cimento é a utilização de adições minerais em sua substituição.

A quantidade de cimento na dosagem do CAA está entre 200 a 450 kg/m<sup>3</sup>, dependendo da utilização e eventuais adições minerais. Para dosagens com menos de 300 kg/m<sup>3</sup>, deve-se assegurar a utilização de outro material fino, tais como cinza volante, escória de alto forno, material pozolânicos, entre outros (Meireles, 2010).

### 2.2.2 Adições

As adições são materiais de origem mineral, em geral silicosos e sílico aluminosos, que após serem moídas finamente, podem ser adicionadas à composição do concreto visando obter características específicas. Podem ser utilizadas em substituição ao cimento para fechamento granular e com reações químicas secundárias ou simples adição ao concreto, com efeito fíler. No caso de substituição ao cimento, no CCV o teor usual é de 30% em relação à massa. Quando se trata de adição em complemento ao cimento, pode alcançar 100% em relação à massa do cimento Portland (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

As adições minerais são classificadas de acordo com sua influência no concreto, podendo ser divididas em dois grupos:

- Inertes: Promovem apenas ações físicas, promovendo maior compacidade e viscosidade. Este tipo de material é exemplificado pelo fíler calcário e pó de quartzo.
- Reativas: Contribuem para formação de hidratos, sendo classificadas em pozolânicas e cimentantes.

O material pozolânico é definido como sendo silicoso ou sílico-aluminoso e, quando finamente dividido e na presença de umidade, reage com hidróxido de cálcio, formando produtos com propriedades aglomerantes (NBR 12653:1992).

Conforme preconizado, as adições inertes como as reativas podem ser utilizadas na confecção de CAA (EFNARC, 2005)<sup>2</sup>.

A incorporação de adições minerais na composição do concreto traz uma série de benefícios. Além dos benefícios citados anteriormente nos itens 1.4.1, 1.4.2, 1.4.3, 1.4.4, (Malhotra & Mehta, 1996) destacam-se:

---

<sup>2</sup> EFNARC (European Federation of National Associations Representing for Concrete) é a sigla para, em tradução livre, Federação Europeia das Associações Nacionais dos Representantes de Concreto, e hoje consiste de uma entidade sem fins lucrativos para representar empreiteiros, produtores, fornecedores de matéria prima e consultores da indústria de construção especializada e sistemas construtivos em concreto.

- Benefícios no estado fresco: Melhora-se a fluidez e viscosidade com aumento da resistência à exsudação e à segregação.
- Benefícios no estado endurecido: Melhoram-se a resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade, estas causadas pelo refinamento dos poros. Também há vantagens no quesito resistência à fissuração térmica, resultado do baixo calor de hidratação causado pelas adições.

Deve-se ressaltar que com utilização de adições reativa há uma diminuição na velocidade de ganho de resistência, sem perdas a longo prazo (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

### 2.2.3 Aditivos

Atualmente é comum o uso de diversos aditivos para diversas finalidades nos concretos. No CAA, são dois os mais utilizados: os aditivos superplastificantes e os modificadores de viscosidade. O aditivo superplastificante é indispensável na produção de CAA, pois ele é responsável por uma das principais qualidades no estado fresco, a fluidez, compensando a mistura com grande quantidade de finos. No mercado nacional de construção civil, existem diversas opções destes aditivos, alguns direcionados especificamente à confecção de CAA.

#### 2.2.3.1 Superplastificantes

Os aditivos superplastificantes permitem diminuir a água de amassamento do concreto e manter a fluidez ou aumentar a fluidez sem que seja necessário aumentar a quantidade de água na composição. Segundo relatos de Sakai *et al*, (2003) é possível atingir uma redução de até 40% na água de amassamento necessária, mantendo a consistência. Os aditivos superplastificantes podem ser divididos em quatro grupos (Hartmann, 2002):

- a) Lignossulfonatos ou Lignossulfonatos Modificados (LS);
- b) Sais sulfonatos de policondensado de naftaleno e formaldeído, comumente denominados como naftaleno sulfonato ou somente naftaleno (NS);
- c) Sais sulfonatos de policondensado de melamina e formaldeído, comumente denominados de melamina sulfonato ou apenas de melamina (MS)

#### d) Policarboxilatos ou poliacrilatos (PC)

Os primeiros aditivos a surgirem no mercado foram Lignossulfonatos ou Lignossulfonatos Modificados (LS), também conhecidos apenas como plastificantes, que são um subproduto da lignina gerada na indústria de celulose e papel. São de baixo custo, processamento simples e promovem uma redução de água de até 10%. Eventualmente apresentam impurezas como açúcares que causam retardo de pega (AÏTCIN *et al.*1994).

Os aditivos NS, que são um subproduto da indústria petrolífera, e os MS, que são gerados a partir da melamina, também chamados de aditivos de segunda geração, são caracterizados por suas cadeias moleculares compostas por grupos funcionais mais homogêneos que os aditivos LS e por seu modo de ação na mistura, que gera repulsão eletrostática induzida nos grãos de cimento. Quando diluídos na mistura, libera-se íons empregados para sua neutralização, os quais envolvem os grãos de cimento, conferindo-lhes carga elétrica negativa, que resulta em sua repulsão. Os aditivos de segunda geração podem promover uma redução de até 25% na quantidade de água necessária para o amassamento (HARTMANN, 2002; SAKAI *et al.*, 2003; RONCERO, 2002).

Os aditivos PC, também conhecidos como superplastificantes de terceira geração, superplastificantes de alta eficiência ou hiperplastificantes, são compostos por moléculas poliméricas de cadeia muito longa, sendo mais eficientes em promover o efeito de repulsão entre as partículas de cimento que os aditivos LS, MS e NS. O seu mecanismo de funcionamento se dá através de repulsão elétrica, impedindo o contato entre os grãos de cimento e sua consequente floculação. Estes superplastificantes são capazes de reduzir em até 40% a água de amassamento (RONCERO, 2002; SAKAI *et al.*, 2003; REPETTE, 2005). Os superplastificantes policarboxilatos são os mais indicados para a produção de CAA, pois são os que permitem maior redução de água, maiores resistências iniciais, e manter o concreto fluido por maior período de tempo (Nunes, 2001).

#### 2.2.3.2 Modificadores de Viscosidade (MV)

Os aditivos modificadores de viscosidade são outra classe de aditivo que tem importância de aplicação na confecção de CAA. Geralmente empregados quando o teor de finos é limitado, ajudando a suscitar a viscosidade necessária para garantir níveis adequados de

resistência à segregação. Também contribui para a homogeneidade da mistura. Sua ação se dá por dois mecanismos: Adsorção na superfície das partículas finas ou dispersão em água. Quando sua atuação é por adsorção no cimento há uma redução na ação dos aditivos superplastificantes. Neste caso, o ganho de viscosidade gera perdas na fluidez do concreto. Quando dispersos em água, as moléculas deste polímero capturam a água livre, gerando o aumento de viscosidade. Desta maneira, os aditivos que tem sua ação na água livre se mostram mais adequados às aplicações no CAA (Nunes, 2001; Coppola, 2001)

Quanto a sua composição química, os aditivos MV podem ser divididos em três grupos (Khayat & Guizani, 1997).

- a) Sintéticos solúveis em água e polímeros orgânicos naturais (éter celulósico, celulose metílica, óxido polietileno, vinil carboxílico, polímeros, álcool polivinílico, entre outros.)
- b) Emulsões acrílicas;
- c) Aditivos à base de polissacarídeos naturais solúveis em água (Xanthan Gum, Guar gum, Welan gum, etc.) e copolímeros de estireno com grupos carboxílicos e poli eletrolítico sintéticos.

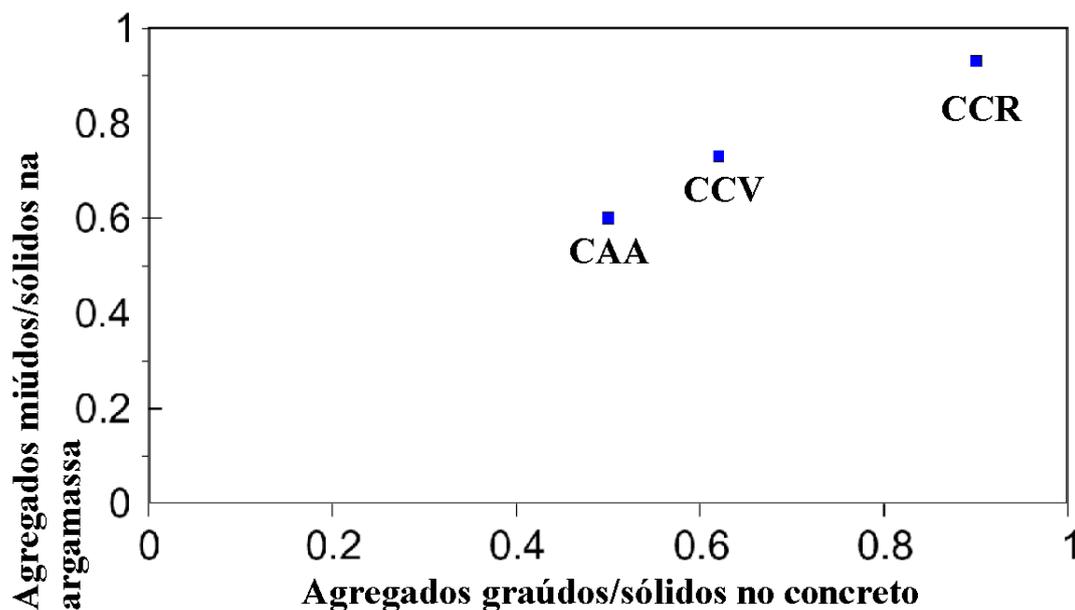
#### 2.2.4 Agregados

Os agregados são uma parcela de grande importância na constituição dos concretos convencionais vibrados (CCV) e também do CAA. Em um concreto sem aditivos, de  $f_{ck}$  igual a 15MPa, os agregados são responsáveis por aproximadamente 80% da massa e 20% do custo (ALBUQUERQUE e BAUER, 2003). Por muito tempo, os agregados foram tratados apenas como material de enchimento, devido à ausência de reações químicas complexas quando em contato com a água. Este tratamento marginal dado aos agregados se mostrou errado em face das descobertas a respeito da influência exercida sobre a trabalhabilidade, resistência à compressão, estabilidade dimensional, e durabilidade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Os agregados podem ser divididos em agregados miúdos e agregados graúdos, ambos devem ser inertes e de petrografia conhecida. Recomenda-se que tenham o menor diâmetro máximo característico e curvas granulométricas contínuas.

Para se atingir os níveis de adensabilidade necessários ao CAA, é fundamental um tratamento adequado aos agregados, no sentido de redução da quantidade de agregado graúdo devido ao necessário aumento de partículas finas. O CAA demanda um alto teor de partículas finas para atingir a coesão necessária para a estabilidade da mistura. O consumo de cimento por m<sup>3</sup> é fixado em função da resistência desejada, bem como o consumo de água. Desta maneira, a utilização de agregados para aumentar a quantidade de finos é necessária (TUTIKIAN, 2007).

A proporção entre agregado graúdo e miúdo e o volume total de ambos estão entre os principais fatores que podem influenciar na reologia do concreto. O grau de adensamento (ou empacotamento) dos agregados pode ser definido como a razão do volume de agregado miúdo e graúdo pelo volume total de sólidos na argamassa e concreto, respectivamente. A Figura 2 mostra a comparação entre três tipos de concreto e o resultado para o CAA, onde para o agregado miúdo o grau de adensamento é de aproximadamente 60% e para o agregado graúdo o índice é próximo de 50% (OKAMURA e OUCHI, 2003). Percebe-se que para produzir CAA é necessário ter uma menor quantidade de agregados na mistura em comparação com o CCV. Para se produzir concreto compactado com rolo (CCR), a quantidade de agregados na mistura é maior do que no CCV, chegando a cerca de 90% do total de material. Desta maneira, quanto aos agregados, quanto mais fluido for o concreto, menor será a quantidade de agregados e, quanto mais seca for a mistura, maior será a quantidade de agregados.

Figura 2 Grau de adensamento do agregado miúdo na argamassa e agregado graúdo no concreto



Fonte: Adaptado de Okamura e Ouchi (2003)

#### 2.2.4.1 Propriedades

Os agregados possuem diversas propriedades relevantes no que tange a influência sobre o concreto no estado fresco e endurecido. Estas características variam de acordo com a fonte (natural ou artificial), petrografia, equipamentos utilizados em sua produção, entre outros. Na literatura, encontra-se uma série de relatos quanto a estas propriedades, sendo as mais relevantes listadas abaixo:

- Absorção;
- Forma e textura;
- Granulometria;
- Área superficial;
- Dimensão média e distância entre partículas;
- Massa específica;

- Características da rocha matriz.

A forma e a textura dos agregados são características fundamentais que influenciam de maneira relevante as propriedades do concreto no estado fresco. A forma pode variar de acordo com a composição da rocha fonte e os processos de extração. A utilização de partículas arredondadas é limitada pela oferta de material naturalmente disponível em rios (seixos rolados). Em geral, partículas arredondadas ocasionam a redução nos vazios e melhoria na fluidez. Por isso, é preconizado que as partículas lamelares, se possível, sejam limitadas de 10 a 15% do total dos agregados, haja vista que partículas alongadas e lamelares demandam uma maior quantidade de pasta para se alcançar misturas trabalháveis, aumentando o custo do concreto e o consumo de cimento, o que pode ocasionar outros malefícios de ordem técnica já discutidos. As partículas ditas regulares (cúbicas), onde não há diferença notável entre as três dimensões, porém há arestas vivas, são as mais adequadas à confecção do concreto, pois trazem poucas perdas da fluidez e promovem o inter-travamento da interface agregados-pasta (MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997).

A granulometria é uma propriedade importante a ser delimitada aos agregados utilizados na produção de CAA. Diversos relatos apontam que agregados com curvas granulométricas descontínuas apresentam uma série de desvantagens frente a agregados bem distribuídos, estando os principais inconvenientes ao concreto, devido a utilização de agregados descontínuos, listados abaixo:

- Maior consumo de cimento, redução na fluidez, aumento dos vazios entre grãos agregados (CHEN *et al*, 2003) *apud* (Melo, 2005);
- Volume relativo ocupado pelas partículas, perda de trabalhabilidade, aumento da tendência de segregação (Neville, 1997);
- Perda de trabalhabilidade, aumento da quantidade de poros no concreto endurecido, perda de resistência mecânica (MEHTA & MONTEIRO, 1994);

A área superficial dos agregados é um dos fatores principais para a definição da quantidade de água necessária para molhar os sólidos da mistura. Quanto menor a área superficial, maior será a quantidade de água e pasta necessária para obter concretos mais fluidos (Neville, 1997).

O diâmetro médio das partículas dos agregados e a distância entre elas impactam no volume necessário para preencher os vazios e envolver cada grão. Agregados maiores e próximos tendem a gerar concretos que consomem menos pasta, assim como agregados que tem o diâmetro médio menor tendem a consumir mais cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Relatos da literatura indicam que o valor da massa específica dos agregados comuns varia entre 2,6 kg/dm<sup>3</sup> e 3 kg/dm<sup>3</sup>. Agregados com massa específica inferior a este intervalo são considerados leves e acima, são considerados pesados. Concretos fluidos que empregam agregados leves são mais propensos a sofrerem segregação devido a flutuação das partículas. Ainda, em geral, estes agregados apresentam elevada e rápida absorção de água, fazendo com que parte da água de amassamento não contribua para a fluidez da mistura, gerando perda na consistência. Do outro lado do intervalo, agregados pesados tendem a segregar com facilidade (NEVILLE, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2008). Desta maneira, é indicado utilizar agregados com massa específica dentro do intervalo acima, já que tanto os agregados leves quanto os pesados tendem a segregar.

A resistência mecânica da rocha matriz e a integridade dos grãos são fatores relevantes para as propriedades mecânicas de concretos com maior resistência à compressão (CAMPOS, 2015).

#### 2.2.4.2 Agregado miúdo

Para se assegurar a qualidade do CAA, é necessário um controle rigoroso na umidade do agregado miúdo. A variação da umidade nos agregados miúdos é uma das principais causas de alteração de fluidez da mistura (YURUGI & SAKAI, 1998). Um estudo conduzido por Aarre e Domone (2003) demonstrou que a diferença de 0,5% na estimativa de umidade dos agregados pode alterar o consumo de água em 8 kg/m<sup>3</sup> de concreto e modificar o resultado do ensaio de espalhamento (*slump flow*) em 45mm.

Entre os trabalhos encontrados na literatura, recomenda-se baixos volumes de agregados, sendo que o agregado miúdo de ser limitado entre 40 a 50% em relação à argamassa. Altos volumes de agregado miúdo geram uma maior interação física entre as partículas, o que pode ocasionar redução na deformabilidade do CAA no estado fresco, mesmo que a pasta apresente uma viscosidade adequada (OKAMURA, 1997).

A forma e a textura dos agregados miúdos influenciam significativamente a fluidez do concreto e, conseqüentemente, a demanda de água de amassamento e o consumo de cimento. Quanto maior for a angulosidade das partículas, maior é a resistência ao cisalhamento da argamassa, dificultando a deformabilidade da mistura. As areias que contêm grãos mais arredondados se mostram com melhor desempenho no que tange a produção de concretos mais fluidos, e estas em geral são provenientes de depósitos eólicos e leito de rios, sendo denominadas areias naturais. Por outro lado, as areias provenientes de britagem, as areias artificiais, geram concretos mais ásperos, que demandam mais pasta para se atingir a mesma fluidez e deformabilidade (OKAMURA e OUCHI, 2003; MEHTA e MONTEIRO, 2008). Sendo assim, as areias naturais se mostram mais adequadas à confecção de CAA, porém como já discutido no item 1, o uso de areias naturais está se tornando inviável nos grandes centros devido o escasamento destas fontes e as imposições ambientais dos órgãos competentes para a exploração de novas fontes naturais, sendo necessário estudar sua aplicação em CAA, e atualizando dados com os modernos aditivos.

Segundo a NBR 9935:2011, a areia de britagem é um material pétreo, proveniente de processos de cominuição mecânica de rochas já britadas, com granulometria entre 4,75 mm e 150 µm.

As partículas de areia britada em geral são angulosas, devido às superfícies recém-criadas pelo processo de britagem. As areias naturais não apresentam tais superfícies por ficarem expostas ao intemperismo, que gera o desgaste superficial. Quando produzidas por via seca, as areias artificiais apresentam grande quantidade de material pulverulento, com dimensão inferior a 75 µm. Estes fatores, se não controlados, influenciam negativamente na plasticidade do concreto, demandando maior quantidade de água e cimento (ALMEIDA I. , 2005; CHAVES, 2005). Estes aspectos são ainda mais relevantes quando o objeto de interesse é o CAA, pois este demanda uma elevada fluidez. No caso de produção de areia por via úmida, a maior parte do pó é removida no processo.

Almeida (2005) relata que uma das maneiras de contornar os inconvenientes de uso da areia artificial é através do emprego de aditivos superplastificantes. Ainda, há a possibilidade de uso combinado de areia artificial e areia natural, não sendo este o foco deste trabalho.

Quando as características técnicas das areias de britagem são controladas, este tipo de agregado miúdo pode ter desempenho semelhante ao atingido quando a areia natural é empregada (ALMEIDA *et al.*, 2005).

#### 2.2.4.3 Agregado graúdo

A influência que o agregado graúdo exerce na fluidez do CAA está diretamente relacionada ao espaço entre armaduras e pela distância entre armadura e face das formas, dependendo diretamente de sua granulometria (Okamura & Ouchi, 2003). Para atingir a auto-adsensibilidade do concreto, é necessário que a sua quantidade bem como seu tamanho seja diminuído, em relação ao CCV. Usualmente, tamanho máximo característico do agregado empregado no CAA é de 20 mm, porém diâmetros máximos de 40mm já foram utilizados. No Brasil, a dimensão máxima característica do agregado graúdo (DMC) é definida pela NBR NM 248 : 2003 e esta é limitada pela seção com maior dificuldade de passagem na peça a ser concretada.

### 2.3 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

As propriedades no estado fresco são fundamentais para a utilização e caracterização do CAA, haja vista seu nome ser derivado de sua qualidade neste estado. As duas principais propriedades a serem mensuradas e controladas no estado fresco são a fluidez e a capacidade de fluir íntegro e coeso entre obstáculo. Pode-se encontrar na literatura diversos equipamentos para ensaios que determinam estas características, sendo alguns deles mais indicados para mensurar uma qualidade que outra.

Neste trabalho, foi escolhido um conjunto de testes capazes de medir todas estas qualidades. O Ensaio de espalhamento (NBR 15823-2) é mais indicado para medir a fluidez da CAA. O ensaio do anel J (NBR 15823-3) é indicado para avaliar a habilidade passante em fluxo livre do CAA. O ensaio da caixa L (NBR 15823-4) é recomendado para avaliar a capacidade do CAA de fluir íntegro entre obstáculos, em fluxo confinado. O ensaio do funil V (NBR 15823-5) é indicado para se determinar a viscosidade do CAA. O ensaio de caixa U (EFNARC, 2005) é recomendado para avaliar a capacidade do CAA de fluir íntegro entre obstáculos, em fluxo confinado.

## 2.4 ENSAIOS DE AUTO-ADENSABILIDADE

Os ensaios deste trabalho seguem as recomendações encontradas nas referências bibliográficas mais relevantes, bem como os procedimentos preconizados pelas normas nacionais e, na sua ausência, normas internacionais.

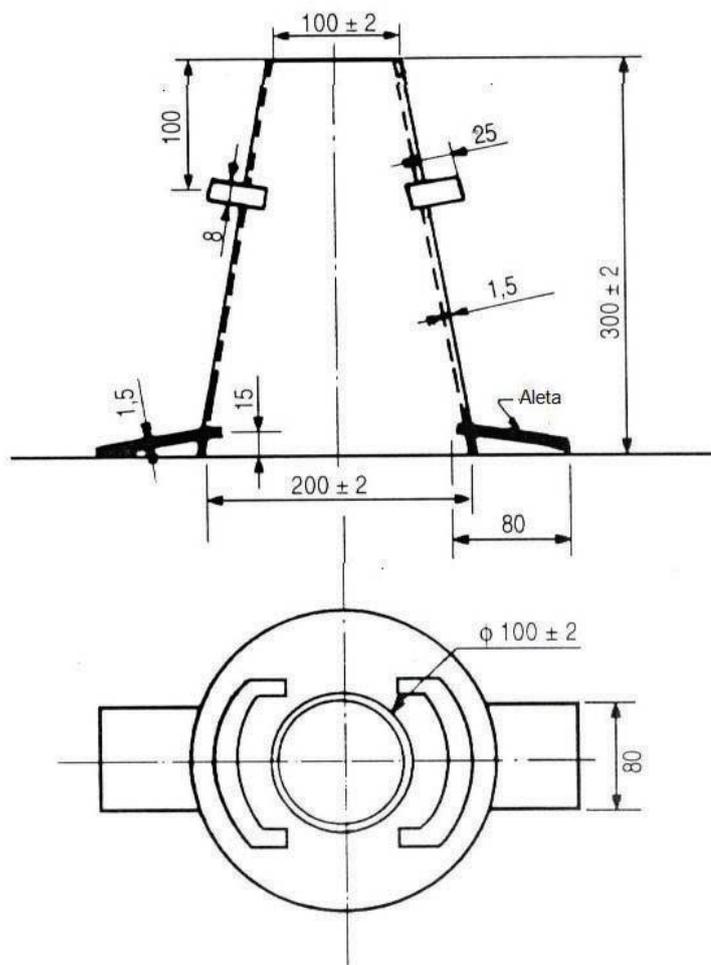
### 2.4.1 Ensaio de espalhamento (NBR 15823-2:2010)

O *slump flow test* ou ensaio de espalhamento é um teste que indica a distância entre as partículas da mistura, em situação de deformação não restringida, determinando sua deformabilidade e capacidade de preenchimento sob seu próprio peso (SUGAMATA *et al.*, 2003).

Este ensaio permite visualizar se há ou não segregação do concreto, sendo que, ao segregar o concreto, forma-se uma pilha de agregado graúdo ao centro e a argamassa junto à água fluem para as extremidades, formando uma auréola.

Para a execução deste ensaio é necessária uma base de 1000x1000 milímetros que não absorva água nem provoque atrito com o concreto. Esta deve ser posicionada em chão firme e nivelado. Então coloca-se um tronco de cone, de mesmo material que a base, em seu centro. Segura-se firmemente o cone, que deve ter 300 milímetros de altura, diâmetro interno menor de 100mm e maior de 200mm, sobre um círculo previamente marcado na base com 200 milímetros de diâmetro (Figura 3).

**Figura 3 – Ensaio de espalhamento**



Fonte: NBR 15823-2:2010

Coleta-se aproximadamente 6 litros de concreto para o ensaio, sendo a coleta feita de acordo com a NBR NM 33: 1998, seguindo o seguinte procedimento:

O preenchimento deve ser feito de maneira contínua e uniforme, removendo-se o excesso do topo do cone com uma colher de pedreiro. Não deve ser feito qualquer tipo de compactação. Remover qualquer excesso de concreto da placa e então retirar o cone verticalmente para que o concreto flua livremente. Enfim mede-se o diâmetro do espalhamento em duas direções perpendiculares e faz-se a média para concluir o valor do espalhamento (NBR 15823-2:2010). A Figura 4 mostra o CAA logo após a realização do ensaio e a Tabela 1 apresenta a classificação da medida de espalhamento segundo NBR 15823-1:2010.

**Tabela 1 - Classes de espalhamento (slump-flow)**

Classe	Espalhamento (mm)
SF1	550-650
SF2	660-750
SF3	760-850

Fonte: NBR 15823-1:2010

**Figura 4 - Medição do espalhamento**



Fonte: O autor (2016)

Ainda neste ensaio, pode-se realizar a medição do intervalo de tempo que o concreto leva para percorrer o espaço entre a marcação na placa base de diâmetro 200mm até a marca de 500mm. Este teste é chamado de  $t_{500}$  e é utilizado para avaliar a viscosidade plástica aparente sob fluxo livre e a Tabela 2 apresenta a classificação do CAA em função do seu tempo de escoamento.

**Tabela 2 - Classes de viscosidade plástica aparente  $t_{500}$  (sob fluxo livre)**

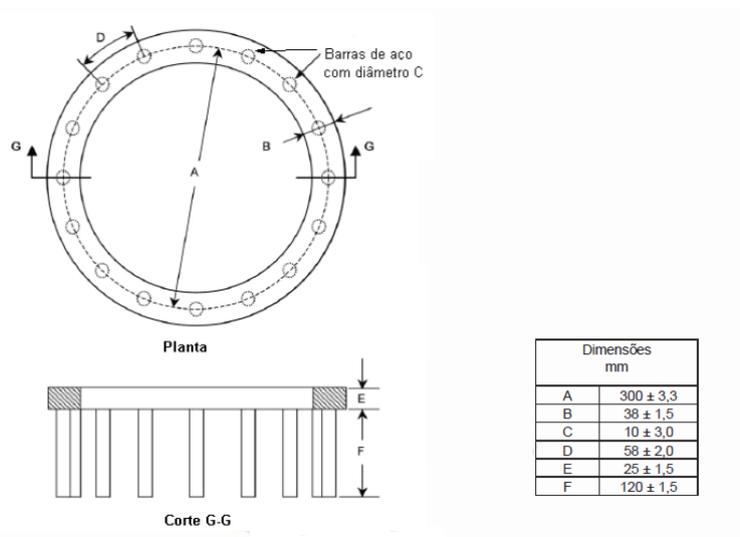
Classe	$t_{500}$ (s)
VS 1	$\leq 2$
VS 2	$> 2$

Fonte: NBR 15823-1:2010

#### 2.4.2 Ensaio de determinação de habilidade passante – Método do anel Japonês (NBR 15823-3:2010)

O *J-Ring test* ou ensaio do anel J, tem como objetivo a determinação da habilidade passante do concreto auto-adensável em fluxo livre, ou seja, sua capacidade de preencher formas mesmo com presença de armaduras, submetido somente ao seu peso próprio, como ocorre em lajes. Este equipamento é composto por um anel metálico com diâmetro médio de 300mm e altura de 120mm, contando ainda na sua verticalidade, perpendicularmente ao plano do anel, com 16 barras de 10mm de espessura, distribuídas radialmente de maneira equidistantes ao longo do desenvolvimento da circunferência do anel. Em casos especiais, o diâmetro e espaçamento podem ser determinados em função das necessidades de aplicação do concreto. A Figura 5 apresenta as dimensões do anel J, conforme preconizado na norma NBR 15823-3:2010 e a Figura 6 mostra o anel J utilizado nesta pesquisa.

**Figura 5 - Anel J - dimensões**



Fonte: NBR 15823-3: 2010

O ensaio consiste na mediação do diâmetro final alcançado pela massa de concreto, sendo o resultado a média aritmética de duas medidas realizadas em direções perpendiculares. Ainda, é feita a classificação do CAA em função da sua habilidade passante, sendo que esta classificação é feita em função da diferença entre o diâmetro médio do espalhamento obtido sem o anel J e com o anel J. A Tabela 3 apresenta a classificação do CAA no teste do anel J de acordo com sua habilidade passante, sob fluxo livre, segundo a NBR 15823-1:2010.

**Tabela 3 - Classes de habilidade passante pelo anel J (sob fluxo livre)**

Classe	Anel J (mm)
PJ1	0 a 25 com 16 barras de aço
PJ2	25 a 50 com 16 barras de aço

Fonte: NBR 15823-1:2010

**Figura 6 - Anel J utilizado**

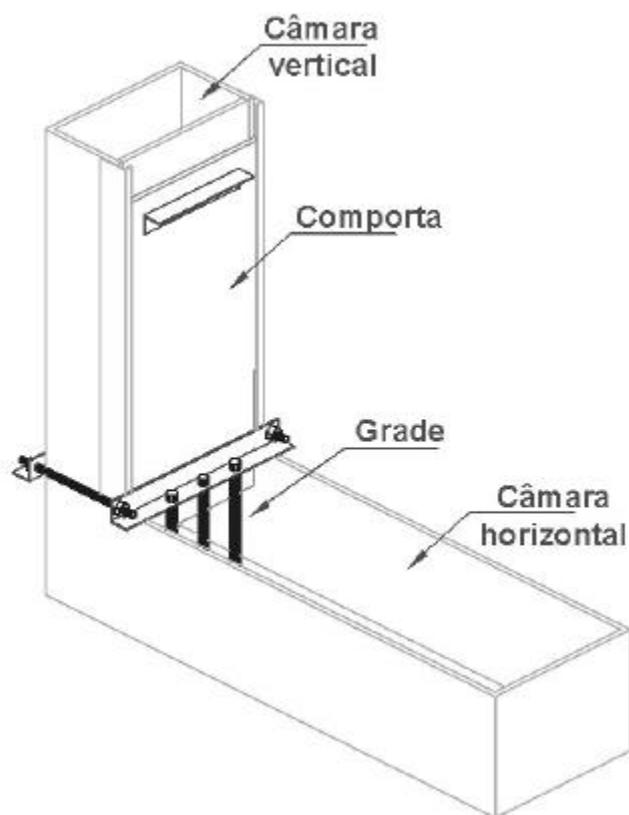


Fonte: O autor (2016)

#### 2.4.3 Ensaio de determinação de habilidade passante – Método da caixa L (NBR 15823-4:2010)

O *L-Box test* ou ensaio da caixa L é utilizado para determinar a habilidade passante do concreto em fluxo confinado, ou seja, sua capacidade de preencher formas mais complexas e com presença de armaduras, como é o caso de pilares, especialmente sua porção mais inferior. O equipamento utilizado é composto por uma caixa em formato de L, que conta com duas câmaras, uma vertical, onde o concreto é depositado, e outra horizontal, para onde o concreto flui após a abertura da comporta na câmara vertical. Ainda, esta caixa conta com grades na junção da câmara vertical e horizontal. A grade deve ser composta por duas ou três barras metálicas lisas, com diâmetro de 12,5mm. A Figura 7 apresenta o arranjo geral do equipamento.

Figura 7 - Caixa L

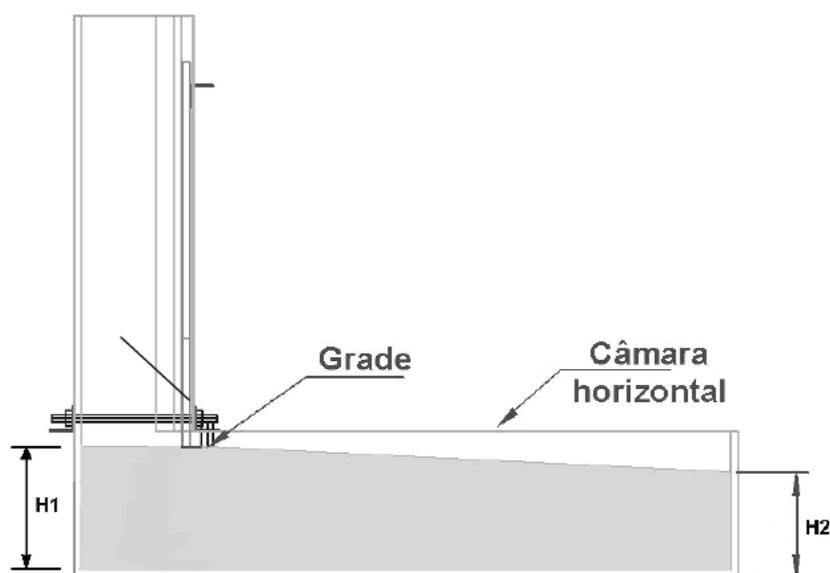


Fonte: (NBR 15823-4:2010)

Para a realização do ensaio, a caixa L deve ser limpa com água e suas superfícies internas umedecidas ou deve-se proceder a aplicação de desmoldante em uma camada fina e homogênea. Em seguida, coloca-se a caixa L em uma superfície plana e a câmara vertical deve ser preenchida de concreto, sem adensamento, em tempo não superior a dois minutos após sua coleta. Enfim, em tempo entre 30-60s do preenchimento, levanta-se a comporta de forma rápida, uniforme e sem interrupção e após a completa estabilização da massa, mede-se a altura  $H_1$  e  $H_2$  e calcula-se a habilidade passante conforme Figura 8 e classificação o CAA de acordo com a Tabela 4 .

Figura 8 - Indicação das alturas H<sub>1</sub> e H<sub>2</sub>

$$HP = \frac{H_2}{H_1}$$



Fonte: NBR 12853-4:2010

Tabela 4 - Classes de habilidade passante na caixa L, sob fluxo confinado

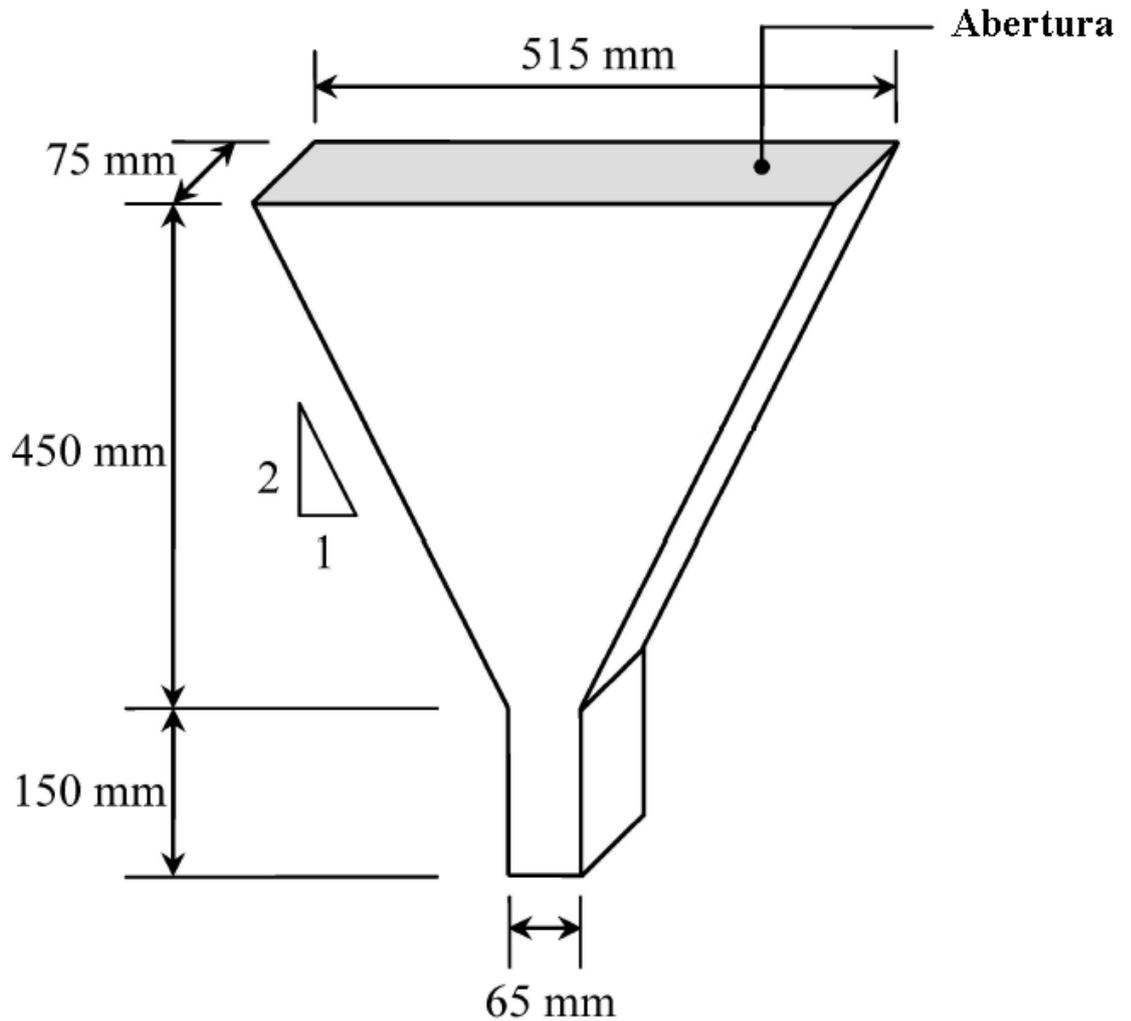
Classe	Caixa L (H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> )
PL1	≥ 0,80, com duas barras de aço
PL2	≥ 0,80, com três barras de aço

Fonte: NBR 15823-1:2010

#### 2.4.4 Ensaio Funil V (NBR 15823-5:2010)

O *V-Funnel test* ou ensaio do funil V é utilizado para determinar o tempo de escoamento da mistura através de um funil de seções retangulares preenchido de CAA. Avalia-se assim sua viscosidade e capacidade de fluir por seções estreitas e pode também indicar o contato de partículas quando submetidas às restrições (SUGAMATA *et al.*, 2003). As dimensões do equipamento são mostradas na Figura 9.

Figura 9 – Ensaio funil V



Fonte: Safiuddin et al., 2015

Também é possível avaliar a resistência à segregação quando repetido o ensaio após 5 minutos, verificando a alteração de tempo do segundo para o primeiro ensaio, sendo esta diferença limitada até 3 segundos (EFNARC, 2005). A Figura 10 mostra o equipamento utilizado nesta pesquisa.

**Figura 10 – Funil V utilizado na pesquisa**



Fonte: O Autor (2016)

Após a realização do ensaio e medição do tempo  $T_{30\text{seg}}$  e  $T_{5\text{min}}$ , CAA deve ser classificado de acordo com a Tabela 5.

**Tabela 5- Classificação do CAA quanto viscosidade plástica aparente pelo funil V, sob fluxo confinado**

Classe	Funil V (s)
VF 1	< 9
VF 2	9 a 25

Fonte: NBR 12823-1:2010

#### 2.4.5 Ensaio da caixa U (EFNARC, 2005)

O Ensaio da caixa U (*U-box Test*) é feito em uma caixa com dois compartimentos distintos separados por uma comporta. Um dos lados é preenchido de concreto e deve ficar em repouso por 1 minuto e então a comporta é aberta, assim o concreto é exposto a obstáculos similares a armaduras. Este teste avalia tanto a auto-compactabilidade quanto a viscosidade do concreto ao verificar a altura atingida por este em ambos os lados da caixa de forma que, para melhores resultados, os lados tenham uma altura de concreto semelhante e seu limite máximo de diferença deve ser de no máximo 30mm (EFNARC, 2005). Ainda, outros limites são admitidos, podendo variar de 24,2mm até 80mm, tendo ainda como média de tempo ideal para a estabilização da mistura 5 a 10 segundos (Coppola, 2001). A Figura 11 mostra o equipamento do *U-box test*.

**Figura 11 – Ensaio da caixa U (*U-box test*)**



Fonte: Meireles, 2010

## 2.5 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

Várias facetas da trabalhabilidade do CAA no estado fresco vêm sendo estudadas com muito interesse, mas o uso estrutural do concreto depende de suas propriedades no estado endurecido, o que exige o estudo de sua previsão (Domone, 2006). Desta maneira, para os CAAs produzidos nesta pesquisa, no estado endurecido, foram estudadas a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

### 2.5.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é a principal propriedade utilizada para classificação de concretos no estado endurecido, no que toca a propriedades mecânicas, sendo que no Brasil a norma que define o método e procedimentos é a NBR 5739:2007.

A relação  $a/c$  é o principal fator que influencia a resistência à compressão, alterando também a porosidade da pasta e da zona de transição. De maneira geral, o aumento da relação  $a/c$  diminui a resistência à compressão, aumentando a porosidade, sendo que a diminuição da relação  $a/c$  causa o efeito contrário, aumentando a resistência e diminuindo a porosidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A determinação da resistência à compressão do concreto varia não somente com as propriedades internas do material, mas é influenciada pela combinação de diversos fatores internos e externos ao material concreto, sendo os principais listados abaixo (MEHTA e MONTEIRO, 2008):

- Parâmetros da amostra:
  - Estado de umidade;
  - Qualidade da moldagem;
  - Dimensões;
  - Geometria;
- Parâmetros do ensaio:
  - Tipo de tensão;
  - Velocidade de aplicação;
- Porosidade da matriz:

- Relação a/c;
- Grau de hidratação;
- Tempo de cura
- Adições minerais;
- Teor de ar;
- Porosidade da Zona de Transição:
  - Relação a/c;
  - Grau de compactação;
  - Grau de hidratação;
  - Adições minerais;
  - Propriedades dos agregados;
- Resistência das fases do concreto;
- Porosidade e resistência dos agregados.

No Brasil, a resistência à compressão é determinada através da ruptura de corpos de prova de formato cilíndrico, sendo as dimensões usuais 10x20cm (diâmetro x altura) e 15 x 30 cm, sendo que estas dimensões são função do DMC do agregado gráudo utilizado, para que a amostra seja representativa do lote. Como já citado anteriormente, as dimensões e geometria do corpo de prova influenciam no resultado do ensaio, sendo que para o formato cilíndrico a relação padrão entre altura/diâmetro é igual a dois. Outras relações podem ser utilizadas, mas a resistência deverá ser recalculada para esta relação (MEHTA e MONTEIRO, 2008). O formato e dimensões padrão mais utilizadas em normas internacionais, principalmente na Europa, é o cúbico 15x15x15cm (ALMEIDA, 1990) *apud* (BUEST NETO, 2006). Analisando os formatos dos corpos de prova, se percebe que o formato cúbico possui a vantagem de ter pelo menos dois pares de faces paralelas, minimizando a necessidade de tratamento das faces quanto a irregularidades, o que não acontece no formato cilíndrico.

### 2.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração é utilizada como parâmetro para análise de estimativa de carga em que se inicia a formação de fissuras no concreto, conseqüentemente é utilizada para análise de durabilidade e vida útil da estrutura. Ainda, a resistência à tração é utilizada na análise da aderência entre a armadura e o concreto (MENDES,2002).

O ensaio para determinação da resistência à tração pelo método de tração direta raramente é utilizado, porque os dispositivos fixadores utilizados no corpo de prova introduzem tensões secundárias, o que introduz mais uma variável no ensaio. Os ensaios mais utilizados para determinação da resistência à tração são o ensaio de resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Nesta pesquisa optou-se por determinar a resistência à tração através da compressão diametral porque este ensaio utiliza corpos de prova do mesmo formato e dimensões dos utilizados no ensaio de resistência à compressão e por este ensaio apresentar resultados com menor dispersão que no ensaio de tração direta (NEVILLE, 1997). No Brasil, a NBR 7222:2011 normaliza os procedimentos de ensaio.

A relação entre resistência à compressão e resistência à tração aparentemente é influenciada pela combinação de vários fatores, entre eles propriedades zona de transição e interface pasta/agregado, idade da cura, relação a/c, tipo de agregado, aditivos e adições. De maneira geral, após um mês de cura, a resistência à tração do concreto aumenta de maneira menos acentuada que a resistência à compressão. Ainda, para uma mesma idade de cura, a razão tração/compressão diminui com a redução da relação a/c (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

### 2.5.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto é uma informação para análise das estruturas de concreto, sendo que os elementos estruturais devem ser projetados para desenvolver pequenas deformações, compatíveis com seu uso (BEER e JOHNSTON, 1995). Do ponto de vista do cálculo estrutural, para estruturas convencionais, o maior desafio quando no lançamento do arcabouço estrutural, é encontrar um arranjo que não permita grandes deformações, já que com as dimensões usuais das peças de concreto a resistência facilmente supera os carregamentos.

Ainda, o módulo de elasticidade é definido como a relação entre a tensão aplicada e a deformação elástica para um limite de proporcionalidade adotado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Quando não se tem disponível dados sobre o módulo de elasticidade, a NBR 6118:2014 preve que o módulo de elasticidade pode ser estimado usando as seguintes relações:

$$E_{ci} = \alpha E . 5600 f_{ck}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 20 \text{ MPa a } 50 \text{ MPa};$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha E \cdot (f_{ck}/10 + 1,25)^{1/3}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 55 \text{ MPa a } 90 \text{ MPa.}$$

Sendo  $\alpha E$  assume os seguintes valores:

- $\alpha E = 1,2$  para basalto e diabásio;
- $\alpha E = 1,0$  para granito e gnaiss;
- $\alpha E = 0,9$  para calcário;
- $\alpha E = 0,7$  para arenito,

E  $E_{ci}$  e  $f_{ck}$  são expressos em MPa.

## 2.6 MÉTODOS DE DOSAGEM

A dosagem dos concretos consiste em proporcionar adequadamente e de maneira econômica, os diversos materiais constituintes do concreto. No Brasil há poucos métodos efetivos de dosagem, sendo o mais recente aquele proposto por TUTIKIAN (2007).

### 2.6.1 Método proposto por Okamura

O método Okamura foi um dos primeiros desenvolvidos para o CAA no Brasil. Existem três requisitos da auto-adensabilidade a serem cumpridos para dosar o concreto, sendo esses baseados na limitação da quantidade de agregados, a baixas relações água/cimento e altas dosagens de aditivo superplastificante. Os agregados graúdos são limitados à 50% do volume total de sólidos e os agregados miúdos são limitados à no máximo 40% do volume total da argamassa, a relação água/cimento deve variar entre 0,90 e 1,00 em volume (relação 0,3-0,33 em massa), dependendo dos finos, e o aditivo é variável sendo acrescentado até atingir as características esperadas (Okamura & Ouchi, 2003).

### 2.6.2 Método proposto por (Tutikian B. F., 2007)

O método Tutikian consiste em adaptar a dosagem do CCV para CAA, ou seja, sua dosagem parte da escolha dos materiais considerando tamanho máximo do agregado graúdo, aditivos e adições minerais. Este método é considerado semi-experimental, pois leva em

consideração as propriedades dos materiais e a interação das partículas de diferentes diâmetros pelo método analítico de empacotamento de partículas de De Larrard (1999). A dosagem é composta dos seguintes passos:

1. Escolha dos materiais;
2. Determinação do esqueleto granular;
3. Determinação da relação a/c e teor de aditivo SP;
4. Mistura dos traços: rico, intermediário e pobre;
5. Determinação das propriedades mecânicas e de durabilidade nas idades requeridas;
6. Desenho dos diagramas de dosagem e desempenho;

Para a confecção de CAA utilizando este método, pode-se utilizar os mesmos materiais componentes do CCV, utilizando agregado graúdo com o menor DMC possível, sendo que a DMC deve ser limitada à 19mm. Ainda não há consenso entre se utilizar o preconizado por De Larrard (1999), que são agregados com diâmetros espaçados ou seguir a abordagem tradicional da tecnologia dos materiais, ao especificar agregados com curvas granulométricas contínuas.

O ajuste do esqueleto granular visa determinar a proporção entre dois materiais que possua a menor quantidade de vazios, ou seja, o máximo empacotamento de partículas. Deve-se empacotar todos os componentes do CAA, dois a dois, em ordem crescente de diâmetro. Após, empacota-se sucessivamente a mistura o próximo componente, devendo-se empacotar, inclusive, os materiais finos, bem como as pozolanas.

A determinação da relação a/c e teor de aditivo SP, que é parte do processo experimental, deve ser feita antes da mistura dos materiais, em função do traço intermediário. Pode-se fixar os consumos iniciais em função de outros concretos similares ou em função das tabelas da NBR 6118:2014.

Recomenda-se fixar o abatimento inicial para a mistura sem a utilização de aditivos. Se não for possível atingir o abatimento preconizado, recomenda-se a adição de um aditivo plastificante menos eficiente. Este procedimento visa obter o máximo de aproveitamento do aditivo SP, o que não é possível quando este é adicionado em misturas muito secas, durante o desenvolvimento dos trabalhos. O slump inicial é fixado entre o intervalo de 60 a 90mm.

Uma vez determinado o esqueleto granular, o teor de aditivos e a relação a/c, estes parâmetros são mantidos constantes para todos os traços. O próximo passo é a mistura de no mínimo três traços para a determinação das equações de comportamento e coeficientes de correlação, para posterior confecção de curvas de dosagem. O teor de argamassa seca não será constante, o que permitirá considerar que todos os pontos sejam da mesma família e possam ser plotados no mesmo gráfico em função do teor de aditivo e proporção entre todos materiais. Nesta abordagem, materiais pozolânicos são considerados agregados. Desta maneira, pode-se calcular todos os traços da família previamente. Como o aditivo já está determinado, a única variável que sobra é a relação a/c, que possui apenas uma aproximação para o traço intermediário. A água será dosada afim de deixar o concreto mais ou menos fluido, porém a resistência à segregação e a habilidade passante já estão garantidas em função da compacidade dos agregados. Durante o processo de dosagem é necessário realizar ensaios especiais para medir a trabalhabilidade dos concretos. No Brasil, a NBR 15823:2010, que é dividida em seis partes, normaliza o concreto auto adensável, bem como especifica os ensaios e parâmetros para controle tecnológico.

## 2.7 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

O empacotamento de partículas é a propriedade que associa a distribuição granulométrica e a forma dos grãos à sua interação, gerando maior ou menor volume de vazios por unidade de volume. Esta propriedade também depende da natureza do método empregado para sua determinação, podendo ser analítico (numérico) ou experimental, e se os materiais foram submetidos à alguma forma de compactação. Sendo assim, esta propriedade sofre influência do método de medição (DE LARRARD, 1999). Numericamente, a densidade de empacotamento ( $\pi$ ) pode ser definida como o volume de sólidos ( $\Phi$ ) em uma unidade de volume, como na equação 1 abaixo:

$$\pi = 1 - \Phi \quad (1)$$

Ou pelo índice de vazios (e):

$$e = \frac{\pi}{\phi} = \frac{1}{\phi} - 1 \quad (2)$$

Considerando que o concreto consiste de uma mistura granular preenchida por pasta de cimento, o aprimoramento do empacotamento de partículas traz uma série de benefícios. Primeiramente, o consumo de pasta de cimento é reduzido, já que mais espaço é preenchido por agregados, sobrando menos espaço para pasta. Isto reduz o consumo de cimento e de superplastificante, trazendo redução de custo para o material (de Larrard, 1999). Quando as partículas estão melhor empacotadas, mais água fica disponível para agir como lubrificante entre as partículas, melhorando a trabalhabilidade mantendo a relação água/finos (a/f) e o consumo de aditivo SP. Ainda, além do fator econômico, os agregados oferecem grande contribuição a resistência à compressão, redução de fluência e redução de retrações (MEHTA e MONTEIRO, 2008), justificando a procura por soluções com maior empacotamento de partículas.

O modelo de empacotamento compressivo CPM<sup>3</sup>, proposto por De Larrard, em 1999, é aplicável para qualquer número de frações de agregados, independentemente do tipo do tamanho da distribuição. Esta característica lhe confere uma vantagem frente aos métodos que consideram hipóteses simplificadoras como número limitado de frações granulométricas ou assumem que a distribuição granulométrica de cada fração ocorre de maneira simplificada.

### 2.7.1 Densidade de empacotamento virtual de uma mistura granular

A densidade de empacotamento virtual de uma mistura é definida como a máxima densidade de empacotamento possível para uma dada granulometria, considerando que as partículas não sofrem deformação e são dispostas uma a uma.

Quando se efetua o empacotamento de uma mistura binária, de diâmetros  $d_1$  e  $d_2$ , três situações são possíveis: Mistura sem interação, mistura com interação parcial e mistura com interação total.

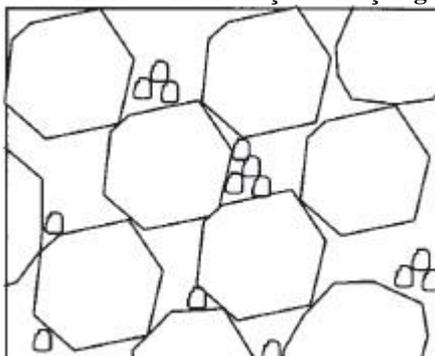
Mistura sem interação ocorre quando o diâmetro ( $d_1$ ) de uma fração é muito maior do que o diâmetro ( $d_2$ ) de outra, e o arranjo de uma fração granulométrica não perturba o arranjo da outra fração, sendo que a fração predominante pode ser a de maior ou de menor diâmetro.

---

<sup>3</sup> Em inglês, *Compressible Packing Model*.

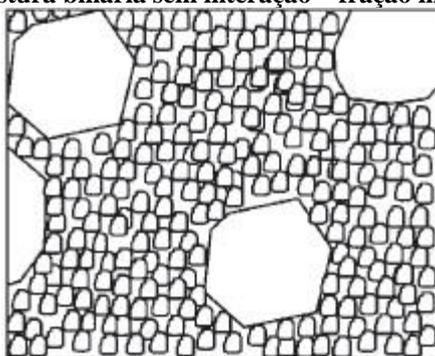
A Figura 12 mostra o arranjo entre partículas quando a fração maior é dominante e a Figura 13 mostra o arranjo quando a fração miúda é dominante, sendo que nestas duas situações não ocorre interação.

**Figura 12 – Mistura binária sem interação – fração graúda dominante**



Fonte: De Larrard (1999)

**Figura 13 – Mistura binária sem interação – fração miúda dominante**



Fonte: De Larrard (1999)

Para se calcular a densidade de empacotamento de uma mistura desses grãos, primeiramente deve-se calcular o empacotamento de cada fração separadamente. A densidade de empacotamento de cada fração é denotada por  $\beta_1$  e  $\beta_2$ ; quando misturadas, o volume de cada fração é definido como  $y_1$  e  $y_2$ , sendo que:

$$y_1 + y_2 = 1 \quad (3)$$

O volume parcial ocupado por cada fração em uma mistura é definido como  $\Phi_1$  e  $\Phi_2$ . Então, o volume de uma mistura  $i$  destas duas frações é dada por:

$$y_i = \frac{\Phi_i}{\Phi_1 + \Phi_2} \quad (4)$$

E a densidade de empacotamento é dada por:

$$\gamma = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (5)$$

No caso do agregado graúdo ser dominante (Figura 12), estes ocupam os espaços como se não houvessem agregados miúdos, então  $\Phi_1 = \beta_1$  e a densidade de empacotamento é dada pela equação abaixo:

$$\gamma = \gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - y_2} \quad (6)$$

Da mesma maneira, quando o agregado miúdo é dominante, a densidade de empacotamento é obtida através da equação 7:

$$\gamma = \gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - (1 - \beta_2)y_1} \quad (7)$$

Na Figura 14 pode-se observar a evolução do empacotamento de partículas de uma mistura binária sem interação, quando um das frações tem diâmetro muito maior do que a outra, onde:

$\beta_1$ : Empacotamento do agregado graúdo

$\beta_2$ : Empacotamento do agregado miúdo

$\gamma_1$ : Empacotamento da mistura quando o agregado graúdo é dominante

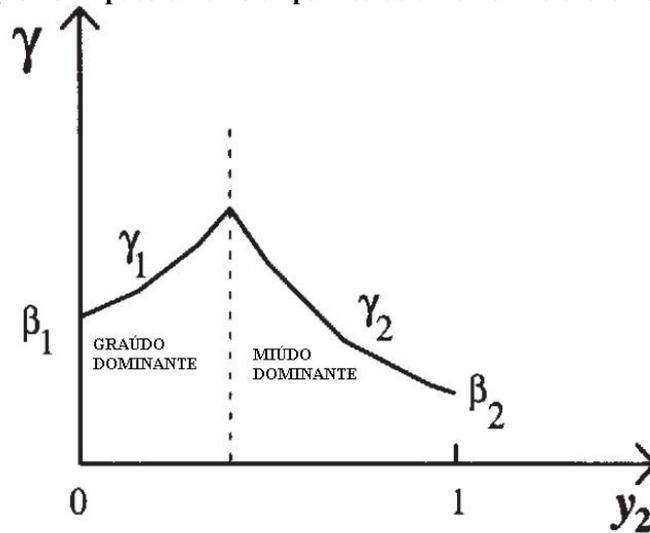
$\gamma_2$ : Empacotamento da mistura quando o agregado miúdo é dominante.

$\gamma$ : Empacotamento de partículas

$y_2$ : Teor de agregado miúdo.

Quando  $\gamma = \beta_1$  e  $Y_2 = 0$ , a mistura é composta somente por agregado graúdo. Quando o valor de  $y_2$  aumenta, o empacotamento de partículas também aumenta pois o agregado miúdo preenche os vazios entre as partículas de agregados graúdos. Isto ocorre até certo valor de  $Y_2$ , quando todos os vazios estão preenchidos e, para estas duas frações, o máximo valor de empacotamento de partículas foi alcançado. Para valores maiores de  $Y_2$ , o agregado miúdo substitui o agregado graúdo, mantendo o mesmo volume porém com massa menor, conseqüentemente menor empacotamento, até o limite que  $Y_2 = 1$ , ou seja, toda a mistura é composta pela menor fração. Neste ponto, temos que o valor do empacotamento é igual à  $\beta_2$  e sempre  $\beta_2 < \beta_1$ .

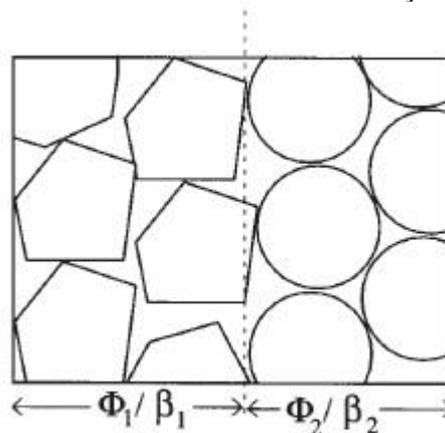
Figura 14 Evolução do empacotamento de partículas em uma mistura binária sem interação.



Fonte: De Larrard (1999)

Mistura com interação total é dita quando a mistura é composta por duas frações de diâmetro igual,  $d_1 = d_2$ , mesmo que o empacotamento de cada fração separada seja diferente,  $\beta_1 \neq \beta_2$ , já que o empacotamento não depende apenas do diâmetro da fração. Se estas duas frações forem separadas completamente, porém ocupando o mesmo volume inicial, o empacotamento de cada fração será diferente, mas o empacotamento médio será o mesmo, como mostrado na Figura 15.

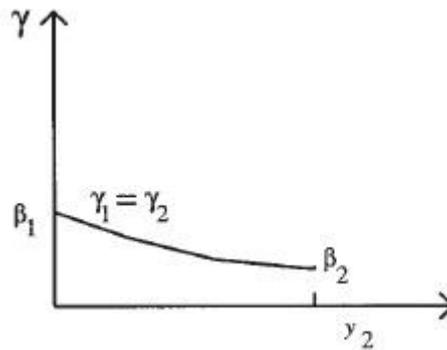
Figura 15 – Mistura binária com interação total.



Fonte: De Larrard (1999)

Considerando que  $\beta_1 > \beta_2$ , o valor do empacotamento de partículas  $\gamma$  varia em função do teor de cada fração, como exposto no Figura 16.

Figura 16 - Evolução do empacotamento de partículas para mistura binária com interação total

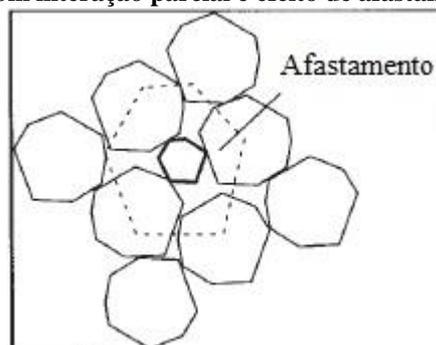


Fonte: De Larrard (1999)

- $\beta_1$ : Empacotamento da fração com maior densidade de empacotamento
- $\beta_2$ : Empacotamento da fração com menor densidade empacotamento
- $\gamma$ : Empacotamento de partículas
- $y_2$ : Teor da fração de menor empacotamento

Existem dois efeitos físicos que podem ser encontrados em mistura binárias, causando interação de uma classe de partículas em outra, sendo definida como  $\lambda_{i \rightarrow j}$ , uma constante que varia em função das duas classes de grãos. Quando uma parcela de agregados miudos é inserida nos vazios dos agregados graúdos, o empacotamento aumenta até o ponto em que não há mais espaço para ser preenchido, gerando a partir daí uma diminuição localizada de volume do agregado graúdo, chamado de efeito de afastamento. Este efeito físico de interação parcial também ocorre quando o diâmetro da fração dominante é maior do que o diâmetro da fração secundária, porém a diferença não é grande. Neste caso, quando uma partícula de menor diâmetro é colocada no vazio entre as partículas de maior diâmetro, mas o diâmetro do vazio é menor do que o diâmetro da partícula acomodada, ocorre um fenômeno denominado efeito de afastamento, que causa a diminuição da densidade de empacotamento através do distanciamento entre as partículas. A Figura 17 ilustra o fenômeno.

Figura 17 - Mistura binária com interação parcial e efeito de afastamento



Fonte: (DE LARRARD 1999)

Desta maneira, o empacotamento de partículas é dado pela equação 7:

$$\gamma = \beta_1 + \gamma (1 - \beta_1 \lambda_{2 \rightarrow 1}) y_2 \quad (7)$$

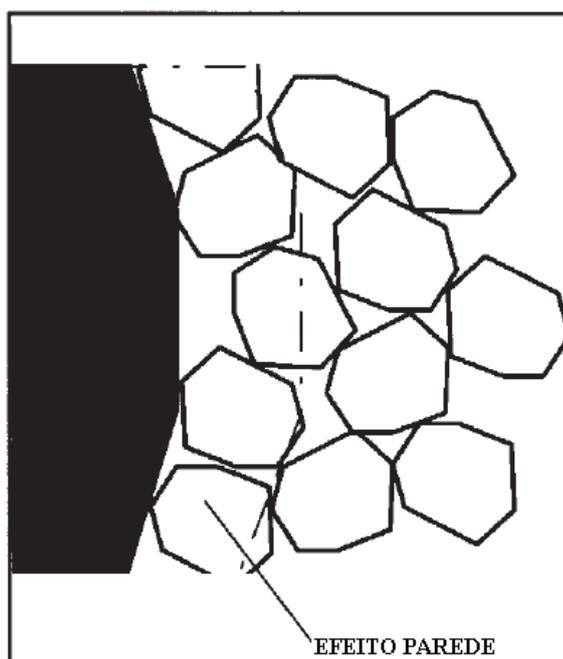
Que também pode ser expressa como:

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - (1 - a_{12} \beta_1 / \beta_2) y_2} \quad (8)$$

Onde  $a_{12}$  é o coeficiente do efeito de afastamento, assumindo valor zero quando não há interação e um quando a interação é total.

Quando se coloca grãos isolados de agregado graúdo em uma quantidade maior de agregados miúdos, ocorre um fenômeno físico denominado efeito parede. Este fenômeno diminui o empacotamento através do travamento interarticular, impedindo que os grãos de agregado miúdo se aproximem e gerando vazios próximo à interface agregado graúdo/agregado miúdo, como mostrado na Figura 18.

**Figura 18 - Mistura binária com interação parcial e efeito parede**



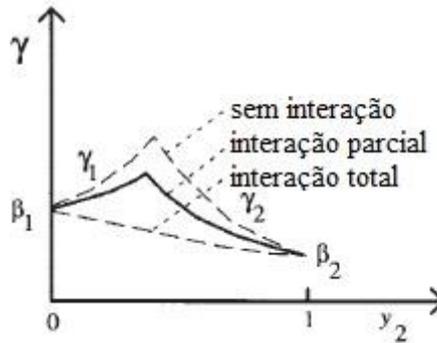
Fonte: De Larrard, (1999)

Já a consideração do efeito parede no cálculo do empacotamento é dado pela equação (9), onde  $b_{21}$  é o coeficiente do efeito parede, que assume valor igual à zero quando não há interação e valor de um quando a interação é total.

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - (1 - \beta_2 + b_{12}\beta_2(1 + 1/\beta_1))y_1} \quad (9)$$

De maneira geral, o empacotamento de partículas depende da forma de interação que ocorre entre as partículas e, quanto menor a interação entre as partículas, maior será a densidade de empacotamento. A Figura 19 mostra a influência do tipo de interação na densidade de empacotamento  $\gamma$ .

Figura 19 - Mistura binária - Comparativo entre tipos de interação



De Larrard (1999)

Em aplicações reais, com  $n$  classes de materiais granulares, ocorrem os dois tipos de interações, sendo que a equação 10 abaixo descreve o comportamento geral considerando todas as classes de materiais e interações.

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} (1 + \beta_i + b_{ij}\beta_i(1 - \frac{1}{\beta_j}))y_j - \sum_{j=i+1}^n (1 - a_{ij}\beta_i/\beta_j)y_j} \quad (10)$$

### 2.7.2 Índice de compactação

O índice de compactação é um valor escalar que depende somente do método de construção do pacote granular, considerando a energia utilizada para aproximar as partículas na mistura, para uma dada granulometria. Em geral, o pacote granular de uma mistura de partículas aumenta conforme o diâmetro médio destas partículas aumenta. Isto se dá porque a compactação manual é mais efetiva com elementos maiores e porque o contato entre partículas,

por unidade de volume, é menor para um diâmetro médio maior, assim como partículas arredondadas podem ser empacotadas mais eficazmente do que partículas lamelares.

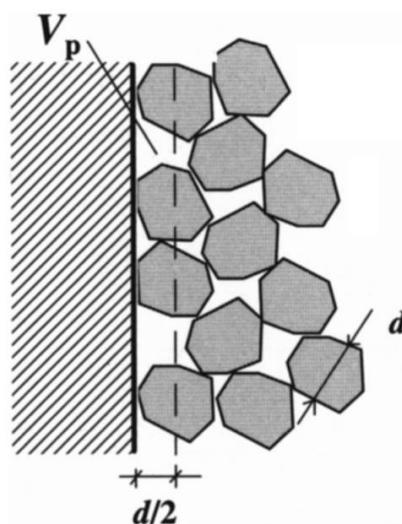
Fisicamente, este índice representa a quantidade de vazios em uma mistura granular, podendo também ser interpretado, para uma mesma composição, a quantidade de energia utilizada para se efetuar a compactação ou também, para a mesma energia de compactação, o quão bem ajustado está a proporção entre as diversas granulometrias de partículas de uma mistura.

### 2.7.3 Efeito parede

As misturas estudadas anteriormente eram consideradas dispostas em um ambiente infinito, não considerando o efeito de um recipiente que as contenha. Porém, na realidade da engenharia, esta situação é idealizada e na maioria das vezes não corresponde à realidade, onde se faz necessário utilizar peças de pequena dimensão e com altas taxas de armadura, aumentando o confinamento dos agregados. Muitas normas prescrevem relações entre o diâmetro máximo do agregado e a dimensão das peças, bem como em relação a distância entre as barras de aço no concreto armado. A nível nacional, a NBR 6118:2014 normaliza estas dimensões.

O efeito parede consiste na existência de um volume perturbado  $V_p$ , no qual a distância da parede até o final da região influenciada é igual a metade do diâmetro das partículas, considerando uma mistura monodispersiva. A Figura 20 ilustra o efeito parede em uma mistura monodispersiva.

Figura 20 - Efeito parede em uma mistura monodispersiva



Fonte: De Larrard (1999)

Quando o diâmetro do recipiente é pelo menos cinco vezes maior do que o diâmetro das partículas, o efeito de parede se torna desprezível no cálculo do empacotamento de partículas (DE LARRARD, 1999).

#### 2.7.4 Segregação de misturas granulares

A segregação dos materiais é um fenômeno importante na tecnologia dos materiais, podendo comprometer a qualidade final do concreto. Durante a aplicação das misturas granulares, o material é submetido a acelerações oriundas da gravidade, impactos externos e vibrações, o que pode levar a separação das frações granulométricas da mistura, prejudicando a aparência, resistência mecânica, módulo de elasticidade e retração. A retração pode causar fissuras, o que é incompatível com a durabilidade das estruturas.

A distribuição granulométrica e o empacotamento de partículas são fundamentais para evitar segregação. Quanto maior for o empacotamento de partículas, maior será a probabilidade de que cada partícula encontre uma posição de equilíbrio com as partículas que a circundam, diminuindo a tendência a segregação. O mesmo ocorre ao se eliminar a interação entre as partículas. Quando não há interação entre as diferentes classes, ocorre o bloqueio das partículas pertencentes a uma classe isolada. Ainda, deve-se evitar curvas granulométricas descontínuas (DE LARRARD, 1999).

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

As estratégias de investigação adotadas nesta pesquisa a classificam como experimental, pois são selecionadas variáveis independentes (entrada), que influenciam no resultado final do objeto em estudo e podem ser controladas, observando as influências de sua variação, nas variáveis dependentes (saída).

Este método é denominado fixo, pois os procedimentos a serem adotados têm que ser conhecidos e planejados em detalhe antes que a pesquisa aconteça.

Porém, o concreto é um material largamente estudado, inclusive o CAA, bem como os materiais constituintes, procedimentos, ensaios, entre outros. Deste ponto de vista, este estudo tem como propósito ser explicativo (Robson, 2002).

Em suma, a classificação da pesquisa é a que segue:

- Natureza: Aplicada
- Abordagem: Quantitativa
- Propósito: Explicativo
- Procedimento: Experimental.

Desde que bem planejados e executados, os experimentos oferecem alto grau de confiabilidade na observação da influência da variação da variável independente sobre a variação da variável dependente, se comparado com qualquer outro delineamento de pesquisa possível (Gil, 2002).

Desta maneira, foram moldados corpos de prova (amostras) que foram estudados em seus diversos parâmetros, descritos nesta pesquisa, sendo seus resultados analisados estatisticamente através de amostras representativas da população. Destarte, pode-se realizar a inferência estatística, que tem como objetivo fazer observações, análises e afirmações sobre os dados obtidos nas amostras e que essas afirmações sejam estatisticamente válidas para o universo. Nesta pesquisa, o objeto de estudo (amostras) são corpos de prova moldados com concreto auto adensável (CAA), no estado fresco e endurecido.

Esta metodologia tem como objetivo encontrar os valores ótimos de ajuste dos diversos parâmetros do processo, minimizando custos, maximizando o desempenho, detectando ruídos e diminuindo sua influência sobre o processo.

Este programa experimental foi desenvolvido nos laboratórios do DCC/UFPR – Departamento de Construção Civil da UFPR e LAME/LACTEC – Laboratório de Materiais e Estruturas, que é conveniado à UFPR e certificado pelo INMETRO - Instituto Nacional de Metodologia, Normatização e Qualidade Industrial.

### 3.1 MATERIAIS

Neste estudo optou-se por utilizar materiais disponíveis na região metropolitana de Curitiba e que já são utilizados ou com potencial de utilização. Esta decisão tem objetivo de aplicação prática dos resultados desta pesquisa. Todos os agregados, incluindo o fíler calcário, foram secos em estufa à temperatura de  $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

#### 3.1.1 Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP V-ARI. Este cimento foi escolhido por ter superfície específica maior em comparação com outros cimentos e também por baixos teores de adições minerais, no máximo 5% de adição de fíler calcário. Para comparação, o CP IV-RS pode possuir até 50% de adição de material pozzolânico. Para a produção de CAA, é desejável que o cimento tenha a maior superfície específica possível, já que para a estabilização da mistura é necessário um alto teor de finos. As especificações técnicas do cimento empregado estão apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6 -Especificações técnicas do CP V-ARI**

FÍSICAS			QUÍMICAS		
Característica (Unidade)			Característica (unidade)		
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )		3,09	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)		4,19
Expansão quente (mm)		0,50	SiO <sub>2</sub> (%)		18,76
Tempo de pega (h)	Início	3:15	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)		2,71
	Fim	4:00	CaO (%)		60,44
Consistência normal (%)		30,2	MgO (%)		4,18
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		4310	SO <sub>3</sub> (%)		2,94
#200 (%)		0,03	CaO Livre (%)		0,81
#325 (%)		0,5	Perda ao fogo (%)		3,41
Resistência à Compressão (MPa)	1 (dia)	22,9	Resíduo Insolúvel (%)		0,52
	3 (dias)	37,9	Equivalente alcalino (%)		0,70
	7 (dias)	44,9	Adições permitidas (%)	Escória	0
	28 (dias)	51,7		Filer calc.	0-5
				Mat. Poz.	0

Fonte: Fabricante (2016)

A Tabela 7 apresenta a granulometria do cimento CP V-ARI, obtida por tecnologia laser, realizada no equipamento modelo CILAS 1064.

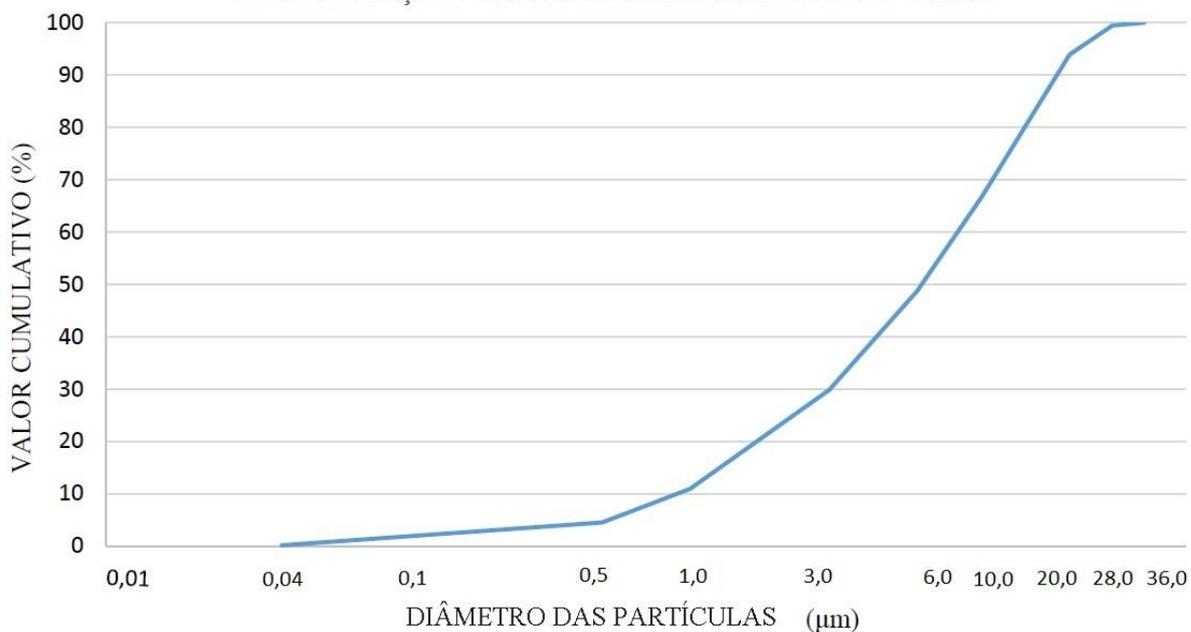
**Tabela 7 - Granulometria do CP V-ARI**

DIÂMETRO (µm)	VALOR CUMULATIVO (%)
0,04	0,18
0,5	4,51
1	10,98
3	29,88
6	48,76
10	66,72
20	93,92
28	99,46
36	100
FINOS - MICRÔMETROS	
Diâmetro a 10%	0,93
Diâmetro a 50%	6,24
Diâmetro a 90%	17,72
Diâmetro médio	7,97

Fonte: O autor (2016)

A Figura 21 apresenta a curva granulométrica do cimento CP V-ARI.

**Figura 21 - Curva granulométrica - CPV-ARI**  
**DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CP V-ARI**



Fonte: O autor (2016)

### 3.1.2 Agregado Miúdo

Neste trabalho fixou-se o uso de areia 100% artificial em consonância com a tendência de mercado frente às restrições ambientais do uso de areia natural. A areia utilizada nesta pesquisa é proveniente de fonte calcária. A Tabela 8 apresenta a granulometria da areia utilizada.

**Tabela 8 - Granulometria da areia**

GRANULOMETRIA - AREIA - (NBR NM 248, 2003)		
Peneira (mm)	% média retida	% média acumulada
4,8	0,4	0,4%
2,4	1,0	1,4%
1,2	2,6	4,0%
0,6	12,5	16,5%
0,3	24,8	41,3%
0,15	48,8	90,1%
0,075	9,2	99,4%
fundo	0,6	100,0%

Fonte: O autor (2016)

A massa específica, massas unitárias e material pulverulento da areia artificial estão apresentados na Tabela 9.

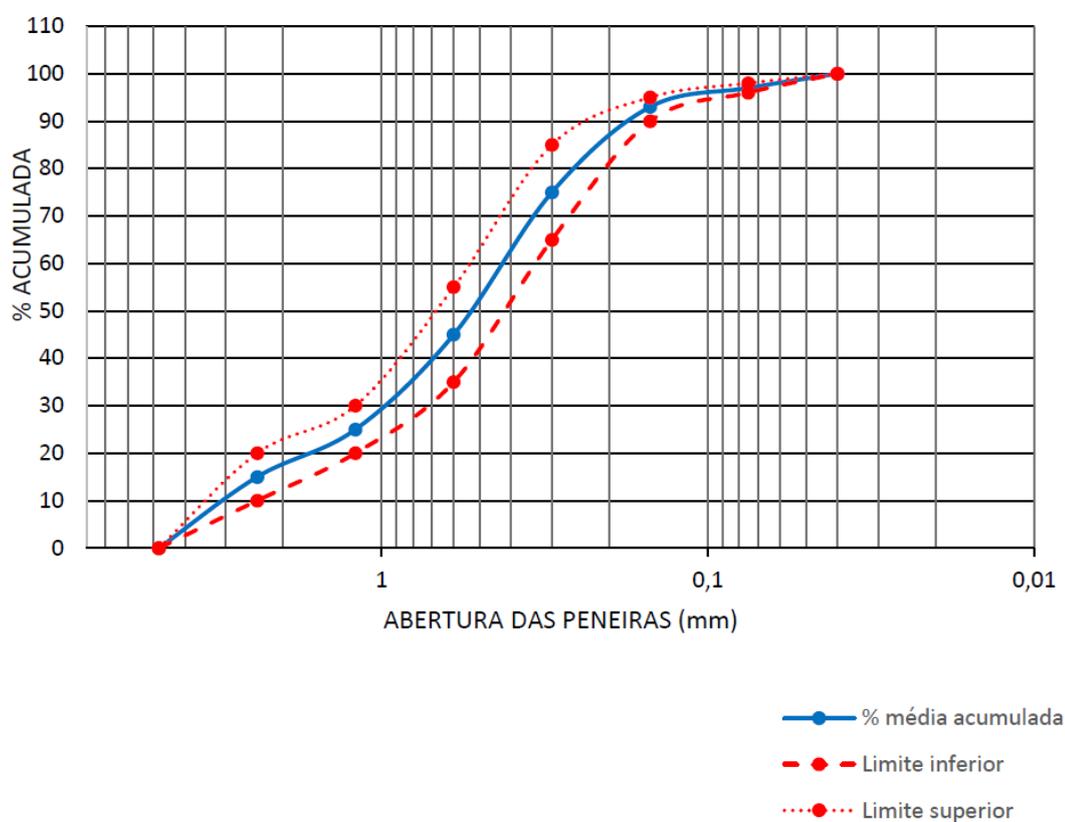
**Tabela 9 - Características físicas da areia**

CARACTERIZAÇÃO AREIA - (NBR 7211:2009)			
MASSA ESPECÍFICA NBR NM 52:2009 (g/cm <sup>3</sup> )	MASSA UNITÁRIA (NBR NM 45:2006) (g/cm <sup>3</sup> )		MATERIAL PULVERULENTO (NBR NM 46:2003 (%))
	COMPACTADO	SOLTO	
2,758	1,792	1,612	2,1

Fonte: O autor (2016)

A Figura 22 apresenta a curva granulométrica da areia e sua posição relativa aos limites ótimos superiores e inferiores da zona ótima da norma NBR 7211:2009.

**Figura 22 - Curva granulométrica da areia**  
**GRANULOMETRIA - AREIA - NBR 7211:2009**



Fonte: O autor (2016)

É possível observar na Figura 22 que a curva granulométrica da areia se trata do tipo bem graduada e se situa dentro da zona ótima da NBR 7211:2009. Isto ocorre porque a areia utilizada nesta pesquisa é do tipo artificial, então a granulometria pode ser ajustada conforme necessidade durante o peneiramento após a britagem.

### 3.1.3 Agregado Graúdo

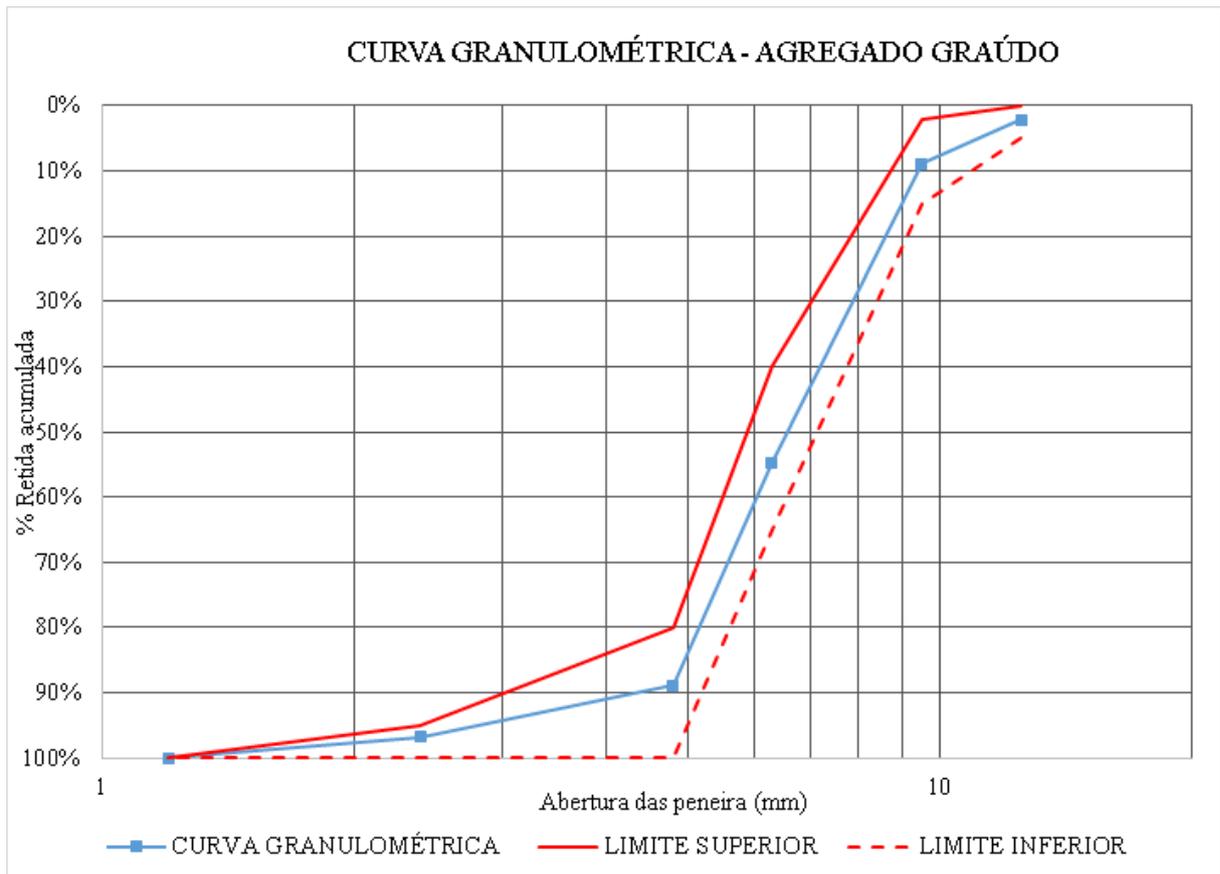
O agregado graúdo utilizado nesta pesquisa é proveniente de uma jazida de calcário e apresenta DMC de 12,5 mm. A Tabela 10 apresenta a granulometria do agregado graúdo, a Figura 23 a sua curva granulométrica e Tabela 11 as massas específica e unitária e material pulverulento do agregado graúdo utilizado.

**Tabela 10 - Granulometria do agregado graúdo**  
**GRANULOMETRIA - AGREGADO GRAÚDO - NBR 7211:2009**

PENEIRAS	PESO RETIDO	%RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
mm	(g)		
12,5	47,03	2,14%	2,14%
9,5	147,23	6,69%	8,83%
6,3	1009,51	45,89%	54,72%
4,8	751,10	34,14%	88,86%
2,4	175,79	7,99%	96,85%
1,2	69,33	3,15%	100,00%
	2199,99	100,00%	

Fonte: O autor (2016)

**Figura 23 - Curva granulométrica do agregado graúdo**



Fonte: O autor (2016)

**Tabela 11 - Características do agregado graúdo**

CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO		
MASSA ESPECÍFICA NBR NM 53:2009 (g/cm <sup>3</sup> )	MASSA UNITÁRIA (NBR NM 45:2006) (g/cm <sup>3</sup> )	MATERIAL PULVERULENTO (NBR NM 46:2003 (%))
2,81	1,45	1,3

Fonte: O autor (2016)

### 3.1.4 Aditivo plastificante

O aditivo plastificante foi utilizado para atingir o abatimento inicial do concreto, fixado em 60mm, e otimizar a ação do aditivo superplastificante. Foi escolhido abatimento inicial de 60mm, porque com misturas mais secas, o aditivo superplastificante demora mais para dispersar

no concreto. O produto utilizado foi o MIRA 94 da Grace, que atende os requisitos determinados pela NBR 11768:2011. As principais características técnicas estão apresentadas na Tabela 12.

**Tabela 12 - Especificações técnica do aditivo plastificante**

Recomendações técnicas para aplicação:		Melhoria de resistência final, prolongada manutenção do abatimento, formulado para cimentos com alto teor de adições.
pH (ABNT 10908:2008)		5,5 ± 1,0
Massa específica (ABNT 10908:2008)		1, 190 ± 0,03 g/cm <sup>3</sup>
Teor de sólidos	Mín.	44,35%
	Máx.	49,01%

Fonte: O fabricante (2016)

Este aditivo Mira é classificado como sendo polifuncional, com poder de redução de água e destinado a aplicações múltiplas no concreto, sendo isento de cloretos. Atende aos tipos PR, PA, PN da NBR 11768:2011.

### 3.1.5 Aditivo Superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado foi o Tec Flow 8000, da Grace, de terceira geração, composto por polímeros de éteres carboxílicos modificados, atendendo os requisitos da NBR 11768:2011, sendo compatível com todos os tipos de cimento Portland. A Tabela 13 apresenta as especificações técnicas deste material.

**Tabela 13 - Especificações técnicas - Aditivo SP**

Recomendações técnicas para aplicação:		Aditivo desenvolvido para a obtenção de concretos de alto desempenho.
pH (ABNT 10908:2008)		5,5 ± 1,0
Massa específica (ABNT 10908:2008)		1, 100 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>
Teor de sólidos	Mín.	44,35%
	Máx.	49,01%

Fonte: O fabricante (2016)

Este aditivo é classificado, segundo a NBR 11768:2011, como tipo SP II N, A, R, sendo compatível com toda a linha Mira, também utilizada nesta pesquisa.

### 3.1.6 Fíler Calcário

O fíler calcário utilizado nesta pesquisa é proveniente da mesma fonte do agregado miúdo utilizado nesta pesquisa. Esse material é considerado rejeito do processo de britagem da areia artificial e é retirado durante o processo através de lavagem em água. Após a retirada do pó da areia, esta água contendo o pó é conduzida para um tanque de decantação para acúmulo, porém não há utilidade para este material pelo produtor, sendo aplicado o descarte em local apropriado.

Para aplicação de fíler calcário na confecção dos concretos desta pesquisa, o material coletado no campo foi seco a 60°C durante 24h e destorroado manualmente, um processo penoso que só se justifica para quantidades necessárias à experimentos laboratoriais, sendo que o processo equivalente na indústria seria a etapa de moinho de esferas. A Tabela 14 apresenta a granulometria do fíler calcário e a Figura 24 a respectiva curva granulométrica. A granulometria do fíler calcário foi obtida por tecnologia laser, realizada no equipamento modelo CILAS 1064.

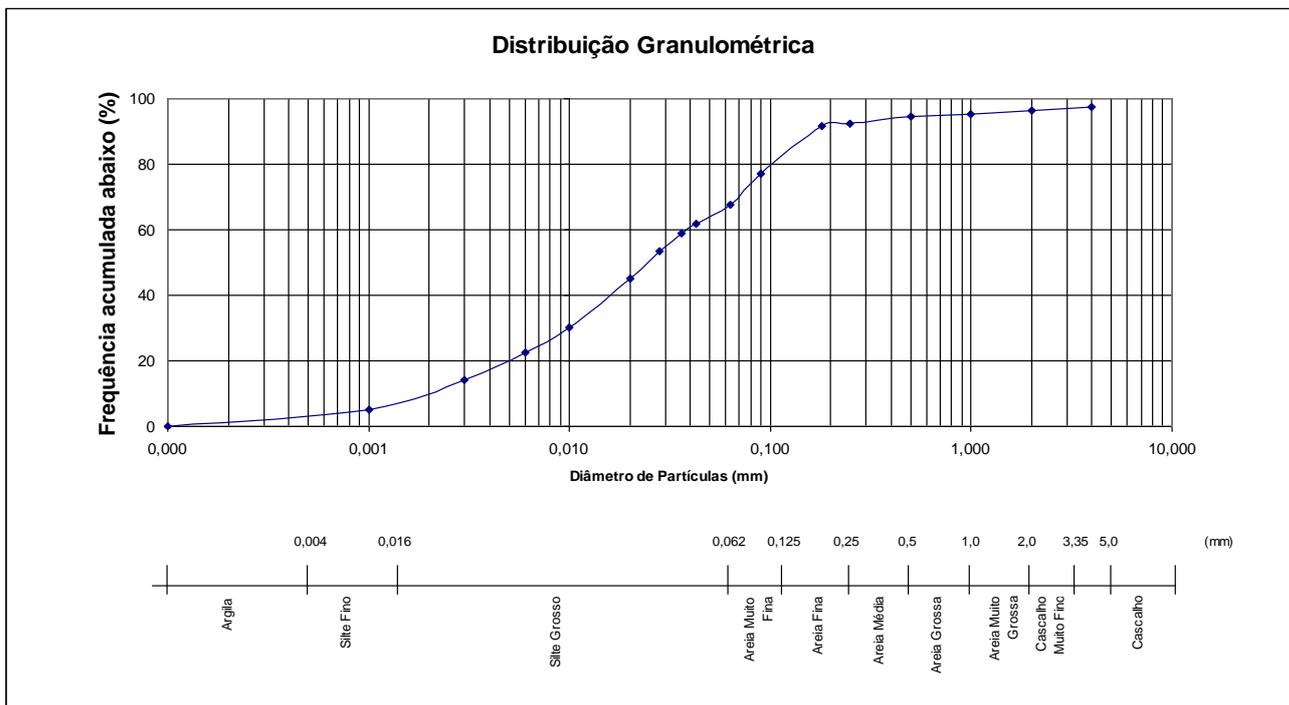
Como pode ser observado na Tabela 14 e Figura 24, o fíler calcário possui aproximadamente 10% de material retido na peneira de abertura 0,150mm, ou seja, segundo a NBR 9935:2011, este material retido é classificado como agregado miúdo e não fíler. Nesta pesquisa, o fíler foi utilizado sem peneirar e esta decisão foi tomada com base em resultados do programa experimental, obtidos conforme item 3.2.2 e apresentados no item 4.2.2.

**Tabela 14 - Granulometria do fíler calcário - sem peneirar**

FÍLER CALCÁRIO SEM PENEIRAR					
Massa inicial (g):	80,00		Data:	10/10/2014	
MALHAS (TYLER)	ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (g)	PESO (%)	ACUMULADA ACIMA (%)	ACUMULADA ABAIXO (%)
5,00	4,00	1,94	2,43	2,43	97,58
9,00	2,00	1,03	1,29	3,71	96,29
16,00	1,00	0,68	0,85	4,56	95,44
32,00	0,50	0,71	0,89	5,45	94,55
60,00	0,25	1,73	2,16	7,61	92,39
Laser	0,18	0,46	0,57	8,19	91,81
Laser	0,09	11,87	14,84	23,02	76,98
Laser	0,06	7,38	9,22	32,24	67,76
Laser	0,04	4,72	5,89	38,14	61,86
Laser	0,04	2,44	3,05	41,19	58,81
Laser	0,03	4,41	5,51	46,69	53,31
Laser	0,02	6,59	8,24	54,93	45,07
Laser	0,01	11,80	14,75	69,68	30,32
Laser	0,01	6,33	7,91	77,59	22,41
Laser	0,00	6,58	8,22	85,81	14,19
Laser	0,00	7,23	9,04	94,84	5,16
Laser	0,00	4,12	5,16	100,00	0,00
MASSA FINAL (g):		80,00		Finos abaixo #60 - Micrômetros	
				Diâmetro 10%	1,81
				Diâmetro 50%	20,98
				Diâmetro 90%	110,31
				Diâmetro médio	40,43

Fonte: O autor (2016)

Figura 24 - Curva granulométrica do filler calcário - sem peneirar



Fonte: O autor (2016)

### 3.1.7 Sílica ativa

A sílica ativa utilizada neste trabalho é resíduo do processo de fabricação do sílico metálico ou do ferro sílico e é capturada por filtros instalados na chaminé dos fornos elétricos. A Tabela 15 apresenta as principais características físicas e químicas da sílica ativa utilizada.

Tabela 15 - Características - sílica ativa

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DA SÍLICA ATIVA	
Massa específica	2,2 kg/dm <sup>3</sup>
Superfície específica	20000 m <sup>3</sup> /kg
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio	0,2 µm
Teor de SiO <sub>2</sub>	Mínimo 85%
Umidade	Máximo 3%

Fonte: O fabricante (2015)

## 3.2 METODOLOGIA

Nos itens que seguem será apresentada a metodologia de realização dos ensaios para argamassa, pasta de cimento e CAA. Os resultados obtidos neste programa experimental foram apreciados através de análise de variância (ANOVA), com nível de significância de 95%.

### 3.2.1 Argamassa

Após a caracterização dos materiais, o programa experimental contemplou a confecção de argamassas de cimento Portland com a finalidade de análise da perda de consistência com a utilização de agregado pulverizado e aditivos. Estas argamassas foram produzidas a partir de um traço pré-determinado, inicialmente sem fíler e traços com adição incremental de fíler calcário passante na peneira de abertura de 0,075mm (#200). O índice de consistência da argamassa foi determinado segundo a norma NBR 13276:2005. As argamassas dosadas utilizando aditivo superplastificante tem limite de medição impostos pela extensão da superfície da Flow-table. Ainda, a argamassa deve ser coesa o suficiente para que não ocorra segregação devido ao uso do aditivo superplastificante. Esta avaliação de estabilidade da mistura é realizada visualmente.

A determinação do traço inicial se deu empiricamente a partir da escolha de uma argamassa de consistência seca, através de argamassas utilizadas em centrais de concreto e tentativas preliminares em laboratório. Após a determinação do traço base, foram dosadas quatro famílias de argamassa, variando o teor de pó de 0 a 18%, em incrementos de 6%, em substituição ao agregado miúdo. Ainda, para cada teor de pó, variou-se o teor de aditivo superplastificante em cinco concentrações diferentes, de 0 a 1,2% (em relação aos finos totais, cimento, fíler calcário e sílica ativa), com incrementos de 0,3%. O teor de pó foi adicionado a mistura em substituição parcial do agregado miúdo. A Tabela 16 apresenta os traços utilizados.

Tabela 16 – Traços – argamassa de cimento Portland

TRAÇOS ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND - (consumos por m³)								
% Fíler	% SP	Fíler (Kg)	SP (Kg)	AREIA (Kg)	CIMENTO (Kg)	ÁGUA (Kg)	SÍLICA ATIVA (Kg)	RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE
0	0	x	0,00	1408,00	490	300	35	0,57
	0,3	0	1,58	1408,00	490	300	35	0,57
	0,6	0	3,15	1408,00	490	300	35	0,57
	0,9	0	4,73	1408,00	490	300	35	0,57
	1,2	0	6,30	1408,00	490	300	35	0,57
6	0	84,48	0,00	1323,52	490	300	35	0,57
	0,3	84,48	1,83	1323,52	490	300	35	0,57
	0,6	84,48	3,66	1323,52	490	300	35	0,57
	0,9	84,48	5,49	1323,52	490	300	35	0,57
	1,2	84,48	7,31	1323,52	490	300	35	0,57
12	0	168,96	0,00	1239,04	490	300	35	0,57
	0,3	168,96	2,08	1239,04	490	300	35	0,57
	0,6	168,96	4,16	1239,04	490	300	35	0,57
	0,9	168,96	6,25	1239,04	490	300	35	0,57
	1,2	168,96	8,33	1239,04	490	300	35	0,57
18	0	253,44	0,00	1154,56	490	300	35	0,57
	0,3	253,44	2,34	1154,56	490	300	35	0,57
	0,6	253,44	4,67	1154,56	490	300	35	0,57
	0,9	253,44	7,01	1154,56	490	300	35	0,57
	1,2	253,44	9,34	1154,56	490	300	35	0,57

Fonte: O Autor (2016)

Neste experimento, as variáveis de entrada são o teor de fíler calcário e o teor de aditivo superplastificante e a variável de saída é o espalhamento da argamassa. Desta maneira, este experimento é classificado como fatorial cruzado 2x2.

O teor de superplastificante foi definido em 0,0, 0,3, 0,6, 0,9 e 1,2%. O teor máximo foi definido em 1,2% porque ensaios preliminares com valores superiores a 1,2% levaram a segregação da mistura. O teor de substituição de fíler calcário foi fixado em 0, 6, 12 e 18 % porque valores de substituição acima de 20% aumentam demasiadamente o consumo de água (Bonavetti & IRASSAR, 1994)

A sequência de mistura dos materiais na argamassadeira foi constante para todos os traços, sendo utilizado a velocidade 1, mais lenta, conforme segue:

1. Todo material seco foi colocado na argamassadeira e misturado por 30s;
2. Raspagem do material aderido à cuba e misturador utilizando espátula e mais 30s de mistura de todos materiais secos;
3. Adiciona-se 90% da água e procede mistura por 30s;
4. Adiciona-se aditivo superplastificante, juntamente com o restante da água e mistura-se por mais 30s;
5. Raspagem do material aderido a cuba e misturados utilizado espátula e então procede-se mistura por mais 60s;

Imediatamente após o período de mistura, foram realizados os ensaios de mesa de consistência (flow table) e abatimento do minicone (cone de Kantro) para determinar a influência da variação do teor de fíler calcário na consistência da argamassa. O ensaio de mesa de consistência foi realizado segundo o preconizado pela NBR 13276:2005 e consiste em medir o espalhamento da argamassa moldada na forma de um tronco de cone padrão, onde, logo após a retirada do cone, o material é submetido a impactos sequenciais sobre a superfície do equipamento e então, após os golpes, mede-se o diâmetro, utilizando régua e precisão decimal, em três direções diferentes. A Figura 25 mostra o instante antes da remoção do tronco de cone e a Figura 26 o instante logo após as aplicações dos golpes. O abatimento de minicone foi realizado como descrito em (CASTRO, 2007) e consiste na determinação do abatimento da pasta de cimento através do minicone. Este ensaio foi originalmente proposto para ser utilizado em estudos reológico de pastas. No presente estudo buscou-se a avaliação da aplicação deste ensaio em argamassas, já que este ensaio requer pequenas quantidades de material e equipamentos simples (MENDES, 2002). A Figura 27 explicita o momento da medição do espalhamento no ensaio de abatimento de mini cone, imediatamente após a elevação do molde.

**Figura 25 - Mesa de Abatimento (flow table) - início do ensaio**



**Fonte: O autor (2016)**

**Figura 26 - Mesa de abatimento (flow table) - término do ensaio**



**Fonte: O autor (2016)**

**Figura 27 – Minicone de Kantro - Medição do espalhamento**



**Fonte: O autor (2016)**

Com os mesmos traços ensaiados na mesa de abatimento e abatimento de mini cone, foram moldados corpos de prova de 5x10cm para avaliar o comportamento da resistência à compressão frente a variação do teor de fíler calcário. O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a norma (NBR 5739, 2007) aos 28 dias. Foram moldados dois corpos de prova para cada traço, em formas lubrificadas com desmoldante, sendo empregada compactação manual, quando necessário, e cura em condições do ambiente do laboratório (Figura 28), que é mantido em temperatura de  $21^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$  e umidade relativa de  $55\% \pm 5\%$ . Para a ruptura dos corpos de prova foi utilizado prensa marca EMIC, modelo DL- 10000, de capacidade máxima de 100 kN. Este equipamento possui prato inferior fixo e superior com cabeça esférica, como mostrado na Figura 29.

**Figura 28 - Corpos de prova - Argamassa**



**Fonte: O autor (2016)**

**Figura 29 - Rompimento corpo de prova - Argamassa**



**Fonte: O autor (2016)**

### 3.2.2 Pasta de cimento

O teor ideal de superplastificante foi definido experimentalmente em laboratório e é um fator determinante para se alcançar a auto adensabilidade do concreto sem prejudicar as características no estado fresco. A quantidade de superplastificante foi definida em função da quantidade total de finos (cimento, fíler calcário, sílica ativa). Os finos reduzem a fluidez e trabalhabilidade do concreto devido a sua alta superfície específica, o que demanda mais água

para molhar todas as partículas, diminuindo a quantidade de água disponível para contribuição à trabalhabilidade, conforme discutido anteriormente. Para não aumentar a quantidade de água total da mistura e assim, aumentar a relação a/c, é possível lançar mão da utilização de superplastificantes. Em uma primeira etapa, estudou-se a pasta de cimento Portland confeccionada com pó peneirado na peneira de abertura 0,075mm (#200) e em um segundo momento utilizou-se pó não peneirado, ou seja, em seu estado natural, submetendo-o somente a secagem para controle da quantidade de água. A Tabela 17 é a mesma para as duas etapas (pó peneirado e pó natural) e apresenta os traços utilizados, teores de superplastificante, teores de substituição de fíler calcário e demais constituintes.

Para análise de consistência da pasta de cimento Portland foi escolhido utilizar o método do minicone de Kantro. A mesa de consistência não foi utilizada nestas etapas devido à alta fluidez do material e a maior quantidade de material em relação ao método de Kantro, o que resulta em espalhamentos maiores que o diâmetro da mesa, inviabilizando a medição e a aplicação deste método.

**Tabela 17 - Traços - Pasta de cimento Portland**

TRAÇOS PASTA DE CIMENTO PORTLAND							
% PÓ	% SP	PÓ (Kg)	SP (Kg)	CIMENTO (Kg)	ÁGUA (Kg)	SÍLICA ATIVA (Kg)	Relação água/aglomerante
0	0	0	0,00	980	600	70	0,57
	0,3	0	3,15	980	600	70	0,57
	0,6	0	6,30	980	600	70	0,57
	0,9	0	9,45	980	600	70	0,57
	1,2	0	12,60	980	600	70	0,57
	1,6	0	16,80	980	600	70	0,57
6	0	58,8	0,00	921,2	600	70	0,61
	0,3	58,8	3,15	921,2	600	70	0,61
	0,6	58,8	6,30	921,2	600	70	0,61
	0,9	58,8	9,45	921,2	600	70	0,61
	1,2	58,8	12,60	921,2	600	70	0,61
	1,6	58,8	16,80	921,2	600	70	0,61
12	0	117,6	0,00	862,4	600	70	0,64
	0,3	117,6	3,15	862,4	600	70	0,64
	0,6	117,6	6,30	862,4	600	70	0,64
	0,9	117,6	9,45	862,4	600	70	0,64
	1,2	117,6	12,60	862,4	600	70	0,64
	1,6	117,6	16,80	862,4	600	70	0,64
18	0	176,4	0,00	803,6	600	70	0,69
	0,3	176,4	3,15	803,6	600	70	0,69
	0,6	176,4	6,30	803,6	600	70	0,69
	0,9	176,4	9,45	803,6	600	70	0,69
	1,2	176,4	12,60	803,6	600	70	0,69
	1,6	176,4	16,80	803,6	600	70	0,69

Fonte: O autor (2016)

Deve-se notar que inicialmente a relação a/c é a mesma utilizada nos ensaios com argamassa (Tabela 16), porém como o cimento é substituído por fíler calcário, a relação a/c aumenta após cada incremento de substituição. Ainda, como um dos objetivos desta rodada de ensaios foi a compatibilização do aditivo SP com os materiais finos, foi determinado o teor de 1,6% para se determinar a saturação deste aditivo, já que não foi possível concluir esta relação com os ensaios com argamassa.

### 3.2.3 Concreto

Os ensaios anteriores permitiram avaliar o efeito da adição do pó em argamassas e pastas e sua interação com os aditivos plastificantes e superplastificante. Esses resultados fornecem subsídio para a definição da matriz experimental da pesquisa de CAA.

A fim de se obter os dados necessários, foram dosadas misturas de concreto com diferentes combinações dos fatores envolvidos, utilizando o método de dosagem proposto por Tutikian (2007), explanado em detalhes na subseção 2.6.2. Estas misturas foram dosadas e testadas sucessivamente até que o material atinja espalhamento compatível para ser classificado como auto adensável. Após os testes no estado fresco, foram moldados corpos de prova segundo as recomendações da NBR 5738:2015. A resistência à compressão foi obtida seguindo os procedimentos preconizados pela norma NBR 5739:2007, através de corpos de prova com formato 10x20cm; A resistência à compressão diametral foi ensaiada pelo método prescritos na NBR 7222, 2011; O módulo de elasticidade foi determinado através do ensaio indicado na NBR 8522:2008.

Para estudar o efeito da substituição parcial do Cimento Portland por fíler calcário, foram definidos quatro níveis de resistência (Tabela 18), sendo que cada nível de resistência teve quatro teores distintos de substituição de cimento Portland por fíler calcário: 0%, 6%, 12%, 18%.

**Tabela 18 - Resistências esperadas**

FAIXA DE RESISTÊNCIA	MPa	Relação a/c
1	90	0,35
2	80	0,38
3	70	0,42
4	60	0,47

Fonte: O autor (2016)

O próximo passo, conforme preconizado pelo método de dosagem escolhido, foi a determinação do esqueleto granular. Para tal, o agregado graúdo e miúdo foram empacotados de maneira a se descobrir a combinação que proporcione o menor índice de vazios possível, através de sucessivas misturas de agregado miúdo e graúdo. A seguir se realizou a pesagem

destas misturas. Foi utilizado um copo de Becker confeccionado de aço inox, com diâmetro de 8,0 cm e altura de 9,0 cm, totalizando volume de 400cm<sup>3</sup>, como mostrado na Figura 30.

**Figura 30 – Determinação esqueleto granula - Medição do empacotamento**



Fonte: O autor (2016)

Em seguida, os traços foram calculados e, experimentalmente, o teor de finos foi ajustado afim de conseguir uma mistura coesa e estável, mitigando a ocorrência de segregação e exsudação. A Tabela 19 apresenta os traços utilizados. A relação água/finos é igual à 0,27 e constante para todos os traços. Conforme observado por Okamura e Ouchi (2003), a relação entre agregado miúdo/sólidos na argamassa é aproximadamente 60% e a relação agregado graúdo/sólidos no concreto é próximo à 50%. Nesta pesquisa, para contribuir com sua validação externa, foram encontrados índices iguais 53% e 42%, respectivamente.

**Tabela 19 - traços utilizados**

TRAÇO		CONSUMOS (kg/m <sup>3</sup> )									a/c	α
Faixa de resistência	% pó	Cimento	Fíler (s) <sup>1</sup>	Fíler (a) <sup>2</sup>	Areia	Brita #0	Água	Plast. <sup>3</sup>	Sp <sup>4</sup>			
1	1	0%	509,0	0,0	150,0	683,62	972,09	177,0	5,80	5,14	0,35	58%
	2	6%	478,5	30,5	150,0	681,79	969,49	177,0	5,80	5,14	0,37	58%
	3	12%	447,9	61,1	150,0	679,96	966,89	177,0	5,80	5,14	0,40	58%
	4	18%	417,4	91,6	150,0	678,13	964,29	177,0	5,80	5,14	0,42	58%
2	1	0%	467,0	0,0	190,0	682,01	969,79	177,0	5,78	5,12	0,38	58%
	2	6%	439,0	28,0	190,0	680,33	967,41	177,0	5,78	5,12	0,40	58%
	3	12%	411,0	56,0	190,0	678,65	965,02	177,0	5,78	5,12	0,43	58%
	4	18%	382,9	84,1	190,0	676,97	962,63	177,0	5,78	5,12	0,46	58%
3	1	0%	418,0	0,0	239,0	679,07	965,62	177,0	5,78	5,12	0,42	58%
	2	6%	392,9	25,1	239,0	677,57	963,48	177,0	5,78	5,12	0,45	58%
	3	12%	367,8	50,2	239,0	676,06	961,34	177,0	5,78	5,12	0,48	58%
	4	18%	342,8	75,2	239,0	674,56	959,21	177,0	5,78	5,12	0,52	58%
4	1	0%	375,0	0,0	280,0	677,39	963,23	177,0	5,76	5,11	0,47	58%
	2	6%	352,5	22,5	280,0	676,04	961,32	177,0	5,76	5,11	0,50	58%
	3	12%	330,0	45,0	280,0	674,70	959,40	177,0	5,76	5,11	0,54	58%
	4	18%	307,5	67,5	280,0	673,35	957,48	177,0	5,76	5,11	0,58	58%

Fonte: O autor (2016)

- 1- Fíler em substituição ao Cimento Portland;
- 2- Fíler adicionado para estabilização da mistura;
- 3- Aditivo plastificante;
- 4- Aditivo superplastificante;

A determinação da ordem de mistura dos materiais foi definida em laboratório durante ensaios piloto, visando o melhor aproveitamento do aditivo superplastificante. Foram testadas várias sequências de misturas, incluindo a praticada pela indústria, mas como a mistura inicialmente tem consistência muito seca, escolheu-se manter os materiais saturados de água e aditivo, resultando assim em um menor tempo para a obtenção do espalhamento projetado. A sequência utilizada foi a seguinte:

1. 100% da brita, 100% do aditivo plastificante em 50% da água, mistura-se por 1min;
2. 25% da água, 100% da areia e 100% do pó, mistura-se por 1 min;
3. 100% do aditivo superplastificante em 25% da água, mistura por 1min;
4. 100% do cimento, mistura por 10 minutos.

Como o teor de materiais finos é elevado e a relação água finos é baixa, esta sequência de mistura procura manter os materiais da betoneira saturados de água e com maior dispersão do aditivo superplastificante. Assim, quando a parcela de cimento é adicionada, a mistura se torna seca, porém como a água e o aditivo SP estão bem misturados nos materiais já adicionados, a dispersão do cimento na mistura e do aditivo SP no cimento ocorre de maneira mais rápida do que quando comparado com a colocação de todos os materiais finos antes do acréscimo da totalidade de água.

Após a mistura de cada traço, foram executados os ensaios no estado fresco e em seguida, moldados 14 CP's cilíndricos, utilizando formas metálicas de 100mm x 200mm, de acordo com a NBR 5738:2015. As formas foram lubrificadas com desmoldante e não foi aplicado adensamento, simulando as condições de aplicação em obra. O preenchimento foi realizado de maneira uniforme e contínua, vertendo-se o concreto de um balde para as formas, conforme Figura 31.

**Figura 31 - Moldagem dos corpos de prova**



Fonte: O autor (2016)

Após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos por filme de PVC, evitando a perda de água do concreto, e mantidos no laboratório por 24h, como mostrado na Figura 32.

**Figura 32 - Corpos de prova cobertos com PVC**



Fonte: O autor (2016)

Após as 24h iniciais, os CPs foram desformados e armazenados em câmara úmida com umidade relativa superior à 95% e temperatura de  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  até a data da ruptura.

Para os ensaios mecânicos foram utilizadas prensas hidráulicas de acionamento elétrico e módulo eletrônico de leitura. Nos ensaios de resistência à compressão foi utilizada a prensa PC200C, com capacidade de carga de até 200tf, da marca EMIC (Figura 33) e para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade foi utilizada a prensa modelo DL 30.000, com capacidade de carga de até 30tf (Figura 34).

**Figura 33 - Prensa hidráulica -PC200C**



Fonte: O autor (2016)

**Figura 34 – Prensa hidráulica – DL 30.000**



Fonte: O autor (2016)

Ainda para o ensaio de resistência à compressão, foi escolhida a preparação dos topos de corpo de prova através de sistema não aderente composto por pratos metálico com revestimento elastomérico de neoprene de dureza 70 shore A, conforme Figura 36 e Figura 37.

Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, foi utilizado adaptador como mostrado na Figura 38.

O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado utilizando strain gages modelo BE120-10AA, da marca Pantec, e cabo para eletrônica de bitola 28 AWG, e os topos foram tratados utilizando pratos metálicos e borracha neoprene dureza 70 shore A. As características do Strain Gage estão apresentadas na Tabela 20.

A preparação dos corpos de prova para o ensaio de módulo de elasticidade foi realizada da seguinte maneira:

1. Limpeza geral;
2. Lixamento da área de instalação até se obter uma superfície plana;
3. Limpeza com acetona, com completa remoção de material pulverulento;

4. Fixação do strain gage utilizando cola de metacrilato com auxílio de filme plástico não reativo à cola;

A Figura 35 apresenta um corpo de prova com strain gage instalado.

**Tabela 20 - Características do Strain Gage utilizado**

Modelo	BE120-10AA(11)
Resistência	$120.2 \pm 0.1 \Omega$
Gage Factor	$2.15 \pm 1\%$
Grade	A
Comprimento grade	9.8mm
Configuração	Uniaxial
Largura da grade	3.0mm
Nível de deformação	$\pm 1500 \times 10^{-6}$
Resistência à deformação	2% (temperatura ambiente)
Temperatura de operação	-30° a 80°C
Coefficiente de dilatação térmica	$10,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Fonte: O fabricante.

**Figura 35 - Corpo de prova com strain gage instalado**



Fonte: O autor (2016)

**Figura 36 - CP com pratos metálicos**



Fonte: O autor (2016)

**Figura 37 - CP e elastômetro**



Fonte: O autor (2016)

**Figura 38 - Adaptador para ensaio de resistência à tração por compressão diametral**



Fonte: O autor (2016)

A definição das quantidades dos CP's foi determinada da seguinte maneira, para cada traço:

- 3 CP's para ensaio de compressão aos 3 dias;
- 3 CP's para ensaio de compressão aos 7 dias;
- 3 CP's para ensaio de compressão aos 28 dias;
- 3 CP's para ensaio de tração por compressão diametral aos 28 dias;
- 2 CP's para ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias.
- Total: 14 CP's por traço.

A Tabela 21 apresenta a distribuição dos CP's em função da faixa de resistência e % de substituição do fíler calcário.

**Tabela 21 - Distribuição dos CP's**

		NÚMERO DE CP's											
		Fíler calcário											
		0%			6%			12%			18%		
Faixa de resistência	Idade (dias)	3	7	28	3	7	28	3	7	28	3	7	28
	1		3	3	8	3	3	8	3	3	8	3	3
2		3	3	8	3	3	8	3	3	8	3	3	8
3		3	3	8	3	3	8	3	3	8	3	3	8
4		3	3	8	3	3	8	3	3	8	3	3	8
Total		224											

Fonte: O autor (2016)

Desta maneira, esta pesquisa é caracterizada como um projeto de experimento denominado fatorial cruzado com dois fatores ou também conhecidos como *TWO-WAY ANOVA* (Ribeiro & Caten, 2003). Os experimentos fatoriais têm como vantagem serem econômicos, haja vista que permitem a avaliação de interações entre os fatores.

Para a aplicação do método fatorial cruzado, é necessário definir as variáveis dependentes e independentes e quais serão mantidas constantes e variáveis.

- Fatores constantes: são aqueles que influenciam diretamente nos experimentos, entretanto são mantidos constantes, pois não são o foco do interesse da pesquisa.

Serão mantidos constantes os seguintes fatores:

- Tipo de cimento;
  - Tipo e fonte dos agregados;
  - Tipo de adição (fíler calcário);
  - Tipo de aditivo;
  - Tempo de cura;
- Fatores variáveis: são os fatores que influenciam diretamente as propriedades do concreto e são alterados em níveis escolhidos, pois se deseja observar o efeito da sua variação nas variáveis dependentes.

Serão estudadas as seguintes variáveis independentes:

- Relação a/c;
- Consumo de Cimento Portland;
- Teor de substituição do Cimento Portland por fíler calcário;

Haja vista o procedimento experimental adotado nesta pesquisa, foi elaborada uma matriz experimental visando o planejamento e identificação das variáveis, parâmetros de processo e impacto dos mesmo na pesquisa. A matriz experimental é dividida em: Análise da Escala de Importância, Características de Qualidade, Variáveis de resposta, Parâmetros de Processo, Definição dos níveis dos fatores.

A análise de escala de importância dos fatores segue a classificação da Tabela 22 abaixo.

**Tabela 22 - Escala de importância**

ESCALA DE IMPORTÂNCIA	SIGNIFICÂNCIA
1	Muito pouco importante
2	Pouco importante
3	Importância moderada
4	Importante
5	Muito importante

Fonte: O autor (2016)

As características de qualidade são representadas pelos aspectos relacionados à qualidade do produto, geralmente sendo o foco do interesse do cliente, muitas vezes não sendo possível mensurar do ponto de vista da engenharia. A Tabela 23 apresenta as principais características de qualidade consideradas nesta pesquisa.

**Tabela 23 – Características de qualidade**

DESIGNAÇÃO	TIPO	IMPORTÂNCIA
Auto-adensabilidade	Maior-é-melhor	5
Resistência à compressão	Maior-é-melhor	4
Resistência à tração por compressão	Maior-é-melhor	3
Módulo de elasticidade	Maior-é-melhor	4

Fonte: O autor (2016)

As variáveis de resposta são a tradução das características de qualidade em variáveis possíveis de serem medidas e controladas do ponto de vista da engenharia. A Tabela 24 apresenta as variáveis de resposta que serão estudadas neste trabalho.

Os parâmetros de processo são os fatores que são variados em função de se observar modificações nas variáveis de resposta. A Tabela 25 apresenta os níveis dos fatores que serão estudados nesta pesquisa e os fatores de ruídos na Tabela 26.

**Tabela 24 – Variáveis de resposta**

DESIGNAÇÃO	TIPO	IMPORTÂNCIA
Espalhamento	Maior-é-melhor	5
T500 espalhamento	Menor-é-melhor	3
Espalhamento Anel J	Maior-é-melhor	4
T500 J	Menor-é-melhor	3
Diferença h1/H2 Caixa U	Menor-é-melhor	5
Tempo Funil V	Menor-é-melhor	3
Diferença h1/H2 Caixa l	Menor-é-melhor	3
Resistência à compressão	Maior-é-melhor	5
Resistência à tração por compressão	Maior-é-melhor	3
Módulo de elasticidade	Maior-é-melhor	4

Fonte: O autor (2016)

**Tabela 25 - Níveis dos fatores**

FATOR	INTERVALO DE PESQUISA	NÍVEIS	UNIDADE
Relação a/c	0,35 - 0,5	0,35; 0,38; 0,42; 0,47;	-----
Consumo de Cimento	375-509	375; 418; 467; 509	Kg/m <sup>3</sup>
Teor de fíler calcário	0% a 18%	0%; 6%; 12%; 18%;	Peso do CP

Fonte: O autor (2016)

**Tabela 26 - Fatores de ruído**

FATORES DE RUÍDO
Erro do operador
Diferenças devidas à calibração dos equipamentos
Tempo para execução dos ensaios
Temperatura ambiente

Fonte: O autor (2016)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados da argamassa de cimento Portland e pasta de cimento Portland obtidos através deste programa experimental.

### 4.1 ARGAMASSA

#### 4.1.1 Consistência

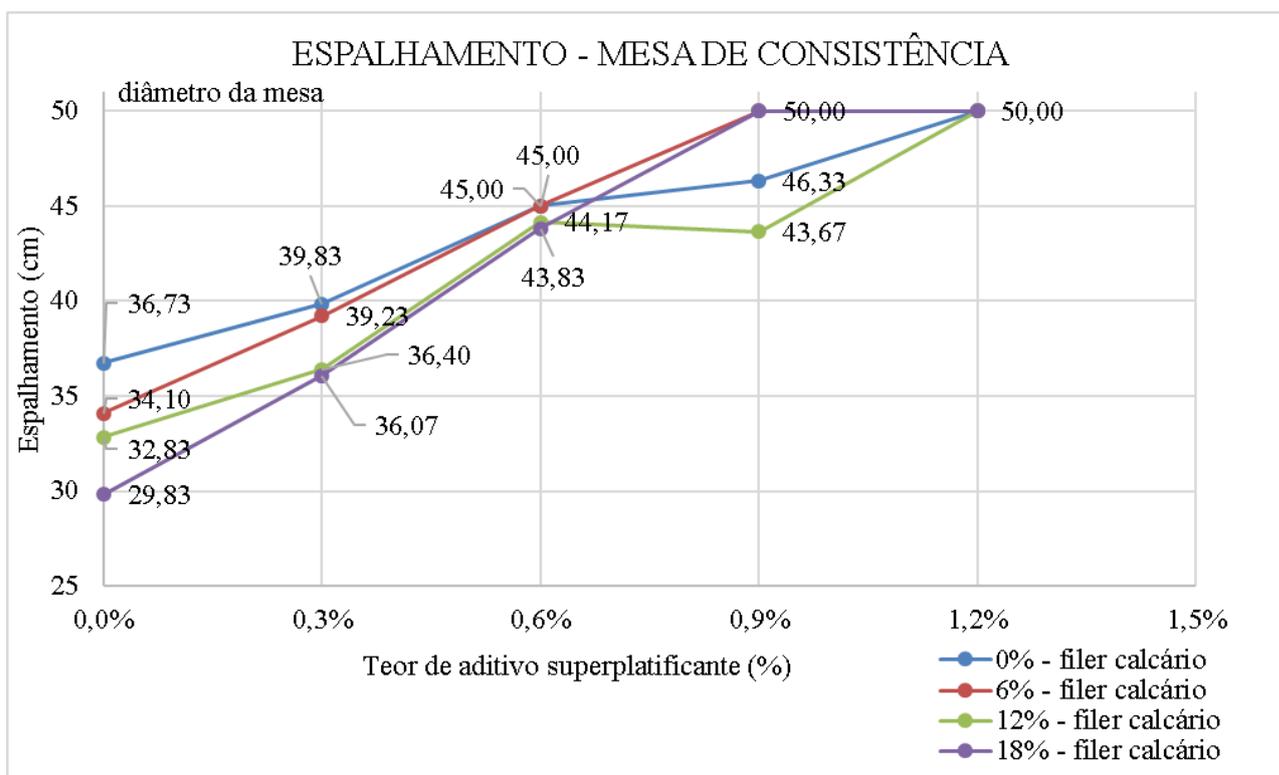
A Tabela 27 e a Figura 39 apresentam o resultado da média de três medições de espalhamento na mesa de consistência (Flow table) e a Tabela 28 e Figura 40 apresentam o resultado da média de três medições para o minicone de Kantro. Os resultados de cada ensaio estão expostos no Anexo A. Na Figura 39 e na Figura 40 é possível observar a diminuição da consistência da argamassa conforme o teor de fíler calcário aumenta. Este fenômeno está associado ao aumento da superfície específica da mistura, já que o teor de finos total aumenta em relação ao traço base.

**Tabela 27 - Espalhamento na mesa de consistência - Argamassa**

Teor de fíler	Teor de aditivo				
	0,0%	0,3%	0,6%	0,9%	1,2%
0%	36,73	39,83	45,00	46,33	50,00
6%	34,10	39,23	45,00	50,00	50,00
12%	32,83	36,40	44,17	43,67	50,00
18%	29,83	36,07	43,83	50,00	50,00

Fonte: O autor (2016)

Figura 39 - Espalhamento – mesa de consistência- Teor de aditivo X teor de filer calcário



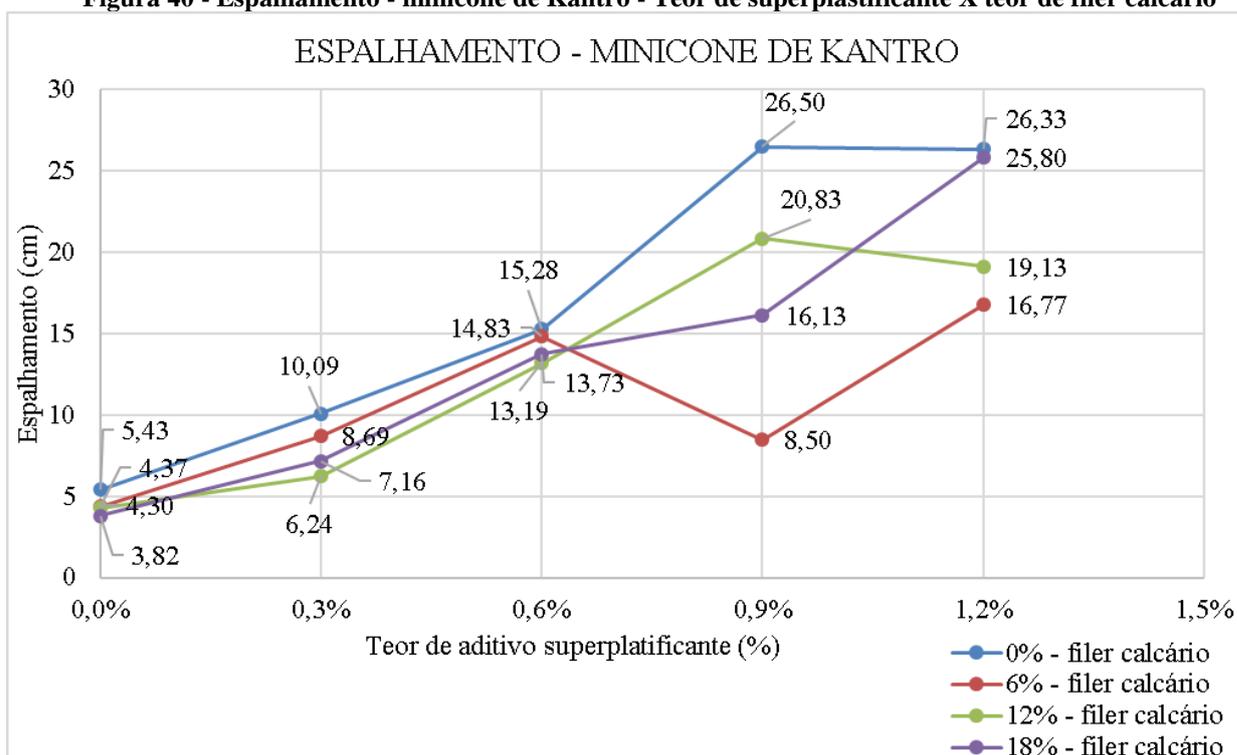
Fonte: O autor (2016)

Tabela 28 - Espalhamento - Minicone de Kantro

Teor de filer	Teor de Superplastificante				
	0,0%	0,3%	0,6%	0,9%	1,2%
0%	5,43	10,09	15,28	26,50	26,33
6%	4,37	8,69	14,83	8,50	16,77
12%	4,30	6,24	13,19	20,83	19,13
18%	3,82	7,16	13,73	16,13	25,80

Fonte: O autor (2016)

Figura 40 - Espalhamento - minicone de Kantro - Teor de superplastificante X teor de filer calcário



Fonte: O autor (2016)

Para estudar estatisticamente a influência da variação do teor de filer calcário e teor de superplastificante, foi realizada a análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 95%, exposta na Tabela 29 para a mesa de consistência e na Tabela 30 para o minicone de Kantro. A influência é dita significativa se as variáveis de entrada, no caso o teor de filer calcário e teor de superplastificante, influenciam na variável de saída, a consistência da argamassa. Ainda na Figura 39 deve-se observar que o diâmetro da mesa de consistência é igual à 50cm, então quando o espalhamento atinge este valor não é possível observar a influência do aumento do teor de aditivo superplastificante.

**Tabela 29 - ANOVA -Compatibilidade aditivo/fíler calcário – Mesa de Consistência**

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	Resultado
% Fíler calcário (A)	58,54	3	19,61	87,49	2,84	Efeito é significativo
% Superplastificante (B)	2276,57	4	569,14	2538,93	2,61	Efeito é significativo
AB	137,29	12	11,44	51,04	2	Efeito é significativo
Erro	8,97	40	0,22	-	-	-
Total	2481,67	59	-	-	-	-

SQ: Soma dos quadrados

GDL: Graus de liberdade

MQ: Médias quadradas

Teste F: Valor da distribuição F de Snedecor

F Tab: Valor tabelado de Correspondente ao F de Snedecor

Fonte: O autor (2016)

**Tabela 30 - ANOVA -Compatibilidade aditivo/fíler calcário – Minicone de Kantro**

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	Resultado
% Fíler calcário (A)	287,54	3	95,85	36,37	2,84	Efeito é significativo
% Superplastificante (B)	2450,02	4	612,5	232,4	2,61	Efeito é significativo
AB	479,59	12	39,97	15,16	2	Efeito é significativo
Erro	105,42	40	2,64	-	-	-
Total	3322,56	59	-	-	-	-

SQ: Soma dos quadrados

GDL: Graus de liberdade

MQ: Médias quadradas

Teste F: Valor da distribuição F de Snedecor

F Tab: Valor tabelado de Correspondente ao F de Snedecor

Fonte: O autor (2016)

O espalhamento no minicone de Kantro correspondente ao ponto 6% de fíler calcário e 0,9% de aditivo superplastificante mostra-se fora do padrão esperado. Este comportamento inesperado provavelmente ocorreu por erro de medição ou execução do ensaio, já que o mesmo teor no ensaio de mesa de consistência apresentou espalhamento conforme o esperado.

Fica demonstrado que o aditivo superplastificante age sobre o fíler calcário já que o aumento da fluidez da argamassa é proporcional ao acréscimo do teor de aditivo. Observa-se na Figura 40 anteriormente apresentada, que o valor do espalhamento aumenta conforme o teor de aditivo aumenta até o valor de 0,9%. A partir desta concentração de aditivo, o valor do espalhamento se estabiliza. Isto se deve provavelmente porque o valor de 0,9% de aditivo está próximo do valor de saturação de concentração para esta substância, aplicada nestes materiais e nestas condições. Até a concentração de 0,6% de aditivo o comportamento da fluidez da argamassa é aproximadamente linear e, a partir deste valor, sofre variações inesperadas. Para estudar estas variações necessita-se avaliar o comportamento reológico destas misturas, não sendo o objetivo deste trabalho tratar de tal interesse. Este comportamento do espalhamento frente à ação do aditivo superplastificante não pode ser observado integralmente na mesa de consistência (Figura 39), já que com teor de 0,9% de aditivo algumas misturas atingem espalhamento igual ao diâmetro total da mesa (50cm) e todas as curvas, para 1,2% de aditivo. Sendo assim, para avaliar o efeito do aditivo superplastificante, entre as concentrações de 0,9 a 1,2% de aditivo, o ensaio do minicone de Kantro deve ser observado, na Figura 40.

Aplicando-se a análise de variância, ANOVA, foi possível observar, com nível de confiança de 95%, o efeito significativo da variação do teor de fíler calcário e concentração de aditivo superplastificante tanto sobre o resultado da mesa de consistência quanto sobre o minicone de Kantro.

Na mesa de consistência a comparação múltipla de médias (CMM) encontrou diferença significativa para todas as comparações sem superplastificante. Com teor de superplastificante de 0,3%, somente a comparação entre 18% e 12% foi considerada como não significativa e para 0,6%, apenas as comparações entre 18% e 12% de pó e entre 6% e 0% de pó não foram significativas. Ou seja, para estas concentrações de aditivo, estatisticamente não há diferença, sobre a consistência, entre usar 12% ou 18% (ou 0% e 6%) de pó. Sem avaliar o efeito sobre a resistência, a escolha é utilizar o maior teor de pó, o que leva a um consumo menor de cimento, material mais caro. No teor de aditivo de 0,9%, apenas a comparação entre 18% e 6% de pó apresentou diferença não significativa. Já o teor de 1,2% de aditivo resultou em espalhamento igual o diâmetro da mesa, desta maneira não sendo possível avaliar a influência do aditivo nesta concentração. De todas as comparações realizadas com os resultados da mesa de consistência, apenas 16,70% não apresentaram diferença significativa, o que indica grande influência da substituição da areia artificial pelo fíler calcário sobre a consistência das argamassas medidas

na mesa de consistência. Esta afirmação também é verdadeira para a ação do aditivo superplastificante sobre o fíler calcário. A Tabela 31 apresenta o resumo das comparações das médias, onde DS significa diferença significativa, e DNS, diferença não significativa.

**Tabela 31 - Resumo de comparação entre médias – mesa de consistência**

Comparação	SP				
	0,0%	0,3%	0,6%	0,9%	1,2%
18%-12%	DS	<b>DNS</b>	<b>DNS</b>	DS	<b>DNS</b>
18%-6%	DS	DS	DS	<b>DNS</b>	<b>DNS</b>
18%-0%	DS	DS	DS	DS	<b>DNS</b>
12%-6%	DS	DS	DS	DS	<b>DNS</b>
12%-0%	DS	DS	DS	DS	<b>DNS</b>
6%-0%	DS	DS	<b>DNS</b>	DS	<b>DNS</b>

Fonte: O autor (2016)

A ANOVA também foi aplicada sobre os resultados de fluidez da argamassa no ensaio de minicone de Kantro. Diferentemente do encontrado na análise feita para a mesa de consistência, a comparação entre os resultados de todos teores de pó sem utilização de aditivo superplastificante, com exceção da comparação entre 18% e 0%, resultaram como não significativa, ou seja, estatisticamente não há diferença entre utilizar 0%, 6% ou 12%, bem como não há diferença entre 12% e 18%. Para 0,3% de aditivo SP, as comparações entre 12% e 18% e entre 6% e 0% resultaram como DNS. Para 0,6 de aditivo SP, as comparações entre 12% e 18%, 18% e 6% e entre 6% e 0% resultaram como DNS. Para 0,9% de aditivo SP, todas as diferenças foram consideradas significativas e para 1,2% de aditivo SP, apenas a comparação entre 18% e 0% resultaram como DNS. A Tabela 32 apresenta o resumo da comparação entre as médias para o ensaio de espalhamento com o cone de Kantro.

**Tabela 32 - Resumo de comparação entre médias – cone de Kantro**

Comparação	Aditivo - SP				
	0,0%	0,3%	0,6%	0,9%	1,2%
18%-12%	<b>DNS</b>	<b>DNS</b>	<b>DNS</b>	DS	DS
18%-6%	<b>DNS</b>	DS	<b>DNS</b>	DS	DS
18%-0%	DS	DS	DS	DS	<b>DNS</b>
12%-6%	<b>DNS</b>	DS	DS	DS	DS
12%-0%	<b>DNS</b>	DS	DS	DS	DS
6%-0%	<b>DNS</b>	<b>DNS</b>	<b>DNS</b>	DS	DS

Fonte: O autor (2016)

#### 4.1.2 Resistência à Compressão

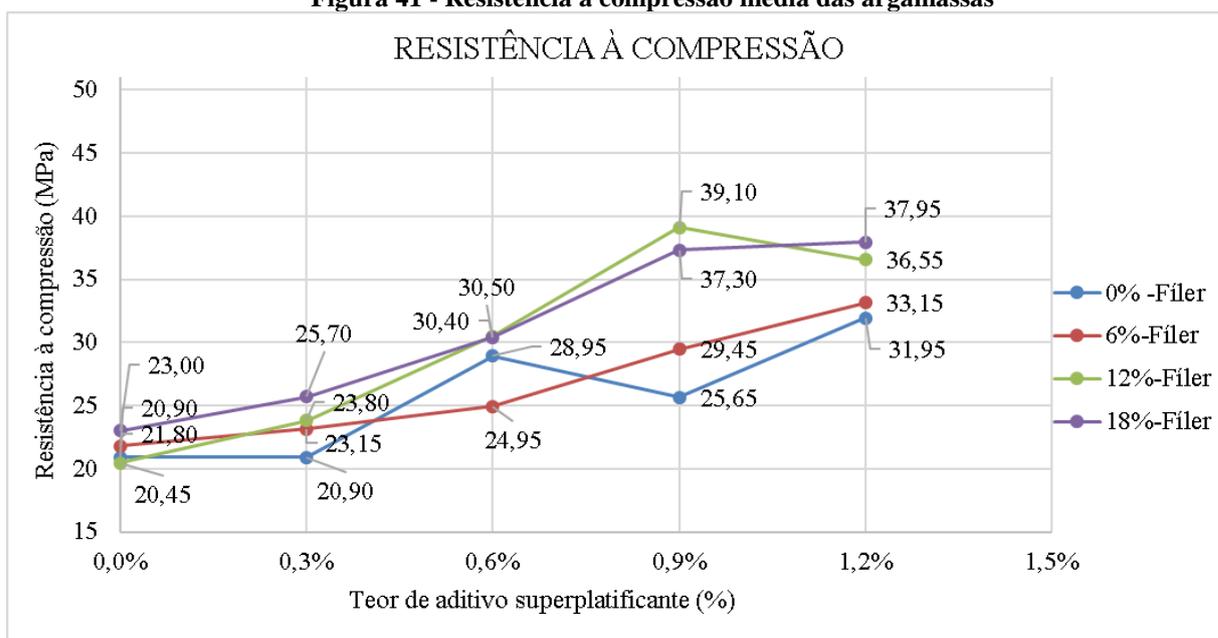
Os resultados da ruptura dos corpos de prova de argamassa no ensaio de resistência à compressão estão apresentados no Anexo B. A Tabela 33 e Figura 41 apresenta a resistência à compressão média em função do teor de aditivo e teor de fíler calcário.

**Tabela 33 - Resistência à compressão média das argamassas**

Teor de fíler	Teor de aditivo				
	0,0%	0,3%	0,6%	0,9%	1,2%
0%	20,90	20,90	28,95	25,65	31,95
6%	21,80	23,15	24,95	29,45	33,15
12%	20,45	23,80	30,50	39,10	36,55
18%	23,00	25,70	30,40	37,30	37,95

Fonte: O autor (2016)

**Figura 41 - Resistência à compressão média das argamassas**



Fonte: O autor (2016)

A Tabela 34 abaixo apresenta a ANOVA para resistência compressão da argamassa, com nível de significância de 95%.

**Tabela 34 - ANOVA - Resistência à compressão - Argamassa**

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	Resultado
% Fíler calcário (A)	199,32	3	66,44	7,24	3,01	Efeito é significativo
% Superplastificante (B)	1076,17	3	358,71	39,09	3,01	Efeito é significativo
AB	164,43	9	18,27	1,99	2,3	Efeito é significativo
Erro	220,22	24	9,18	-	-	-
Total	1660,13	39	-	-	-	-

SQ: Soma dos quadrados

GDL: Graus de liberdade

MQ: Médias quadradas

Teste F: Valor da distribuição F de Snedecor

F Tab: Valor tabelado de Correspondente ao F de Snedecor

Fonte: O autor (2016)

Os resultados apresentados na Figura 41 aparentemente demonstram que o acréscimo do teor de fíler calcário aumenta a resistência à compressão até certo limite. Este acréscimo de resistência provavelmente ocorre pelo efeito físico de microfíler do pó (GOLDMAN; BENTUR, 1993), aumentando o empacotamento das partículas sólidas.

Observa-se que a resistência à compressão aumenta progressivamente conforme o teor de fíler calcário cresce, até o limite de 12%. Com 18% de fíler calcário, a resistência à compressão ficou 3,7% menor do que com 12%, porém esta diferença é considerada como não significativa.

A ANOVA demonstrou o efeito significativo do fíler calcário e do superplastificante sobre a resistência à compressão da argamassa. A comparação múltipla de médias apresentou diferença significativa apenas para o teor de 0,9% de superplastificante na comparação entre 18% e 0%, entre 12% e 6% e entre 12% e 0%.

Não foi observado interação estatística significativa entre o fíler calcário e o aditivo superplastificante. Isso ocorre porque estas duas variáveis de entrada influenciam a variável de saída, resistência à compressão, no mesmo sentido.

## 4.2 PASTA

A seguir serão apresentados os resultados de compatibilização do aditivo superplastificante com a pasta de cimento Portland com adição de fíler calcário e o efeito do peneiramento do fíler calcário. No item 4.2.1 foi utilizado fíler calcário peneirado através da peneira de abertura 0,075mm (#200) e no item 4.2.2, a comparação dos resultados entre usar pó peneirado nesta peneira e pó conforme obtido no local.

### 4.2.1 Teor de superplastificante

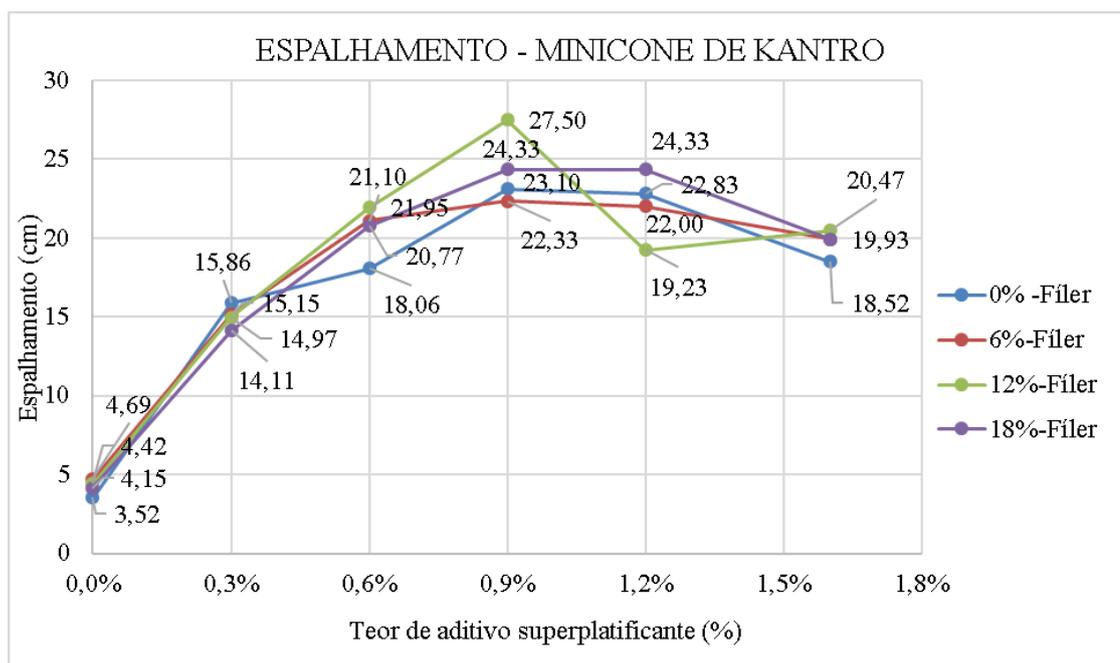
Os resultados do espalhamento no ensaio de minicone de Kantro estão apresentados no Anexo C. A Tabela 35 apresenta a média de três medições de espalhamento no ensaio de minicone de Kantro em função do teor de fíler calcário e aditivo superplastificante e a Figura 42 apresenta o gráfico destes resultados. Pode-se observar que o valor do espalhamento aumenta até o teor de 0,9% de aditivo superplastificante. A partir deste valor, o espalhamento diminui. Isto leva a concluir que o teor de 0,9% está próximo do ponto de saturação e a partir deste valor o aditivo perde seu efeito de dispersar as partículas.

**Tabela 35 - Espalhamento da pasta – Minicone de Kantro- média de 3 medições com fíler peneirado**

% Fíler calcário	% SUPERPLASTIFICANTE					
	0,0%	0,3%	0,6%	0,9%	1,2%	1,6%
0%	3,52	15,86	18,06	23,10	18,52	22,83
6%	4,69	15,15	21,10	22,33	19,93	22,00
12%	4,42	14,97	21,95	27,50	20,47	19,23
18%	4,15	14,11	20,77	24,33	19,93	20,73

Fonte: O autor (2016)

**Figura 42 - Espalhamento - Minicone de Kantro – Pasta**



Fonte: O autor (2016)

Ainda, foi feito a ANOVA com nível de significância de 95%, como apresentado na Tabela 36.

**Tabela 36 - ANOVA - Minicone de Kantro - Pasta**

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	Resultado
% Fíler calcário (A)	11,55	3	3,85	2,99	2,8	Efeito é significativo
% Superplastificante (B)	3084,23	5	616,85	478,56	2,41	Efeito é significativo
AB	95,91	15	6,39	4,96	1,88	Efeito é significativo
Erro	61,84	48	1,29	-	-	-
Total	3253,55	71	-	-	-	-

SQ: Soma dos quadrados

GDL: Graus de liberdade

MQ: Médias quadradas

Teste F: Valor da distribuição F de Snedecor

F Tab: Valor tabelado de Correspondente ao F de Snedecor

Fonte: O autor (2016)

A ANOVA demonstrou como significativo o efeito do fíler calcário e do superplastificante sobre o espalhamento da pasta no ensaio de minicone de Kantro, bem como da interação entre estas duas variáveis de entrada, ou seja, o pó atua diminuindo o espalhamento da mistura e o superplastificante atua na direção oposta, aumentando o espalhamento mesmo com a utilização simultânea com o fíler calcário.

A comparação múltipla de médias mostrou como não significativas as comparações entre todos os teores de fíler calcário para os teores de aditivo superplastificante de 0%, 0,3%, e 1,6%. Para o teor de 0,6% de aditivo SP, as comparações entre 18% e 0% de pó, entre 12% e 0% e entre 6% e 0% foram significativas. Para o teor de 0,9% de aditivo SP, valor próximo do ponto de saturação do aditivo, todas as comparações foram significativas, exceto entre 18% e 0% de fíler calcário e entre 6% e 0%.

#### 4.2.2 Efeito do peneiramento do Fíler calcário

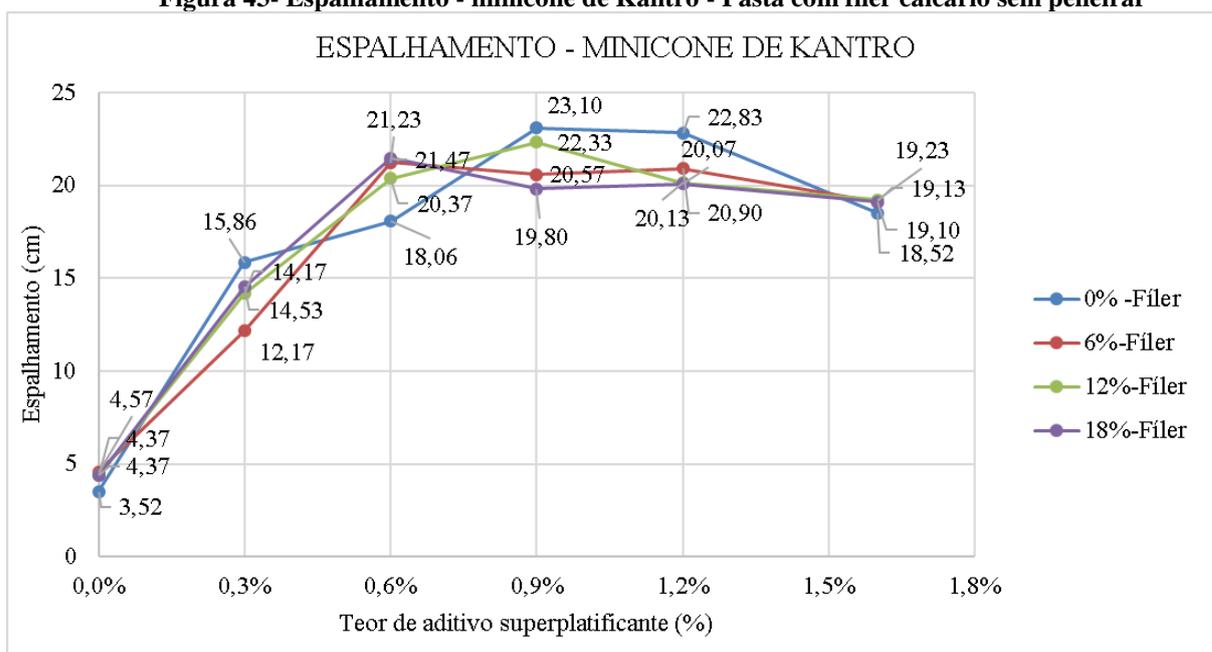
A Tabela 37 apresenta a média de três medições do espalhamento da pasta para cada combinação de teor de fíler calcário e concentração de aditivo superplastificante e a Figura 43 apresenta o gráfico destes resultados, sendo que nesta etapa, o fíler calcário não foi submetido ao peneiramento através da peneira de abertura 0,075mm (#20).

**Tabela 37 – Espalhamento da pasta – Minicone de Kantro- média de 3 medições com fíler não peneirado**

% Fíler calcário	% SUPERPLASTIFICANTE					
	0,0%	0,3%	0,6%	0,9%	1,2%	1,6%
0%	3,52	15,86	18,06	23,10	22,83	18,52
6%	4,57	12,17	21,23	20,57	20,90	19,13
12%	4,37	14,17	20,37	22,33	20,13	19,23
18%	4,37	14,53	21,47	19,80	20,07	19,10

Fonte: O autor (2016)

**Figura 43- Espalhamento - minicone de Kantro - Pasta com fíler calcário sem peneirar**



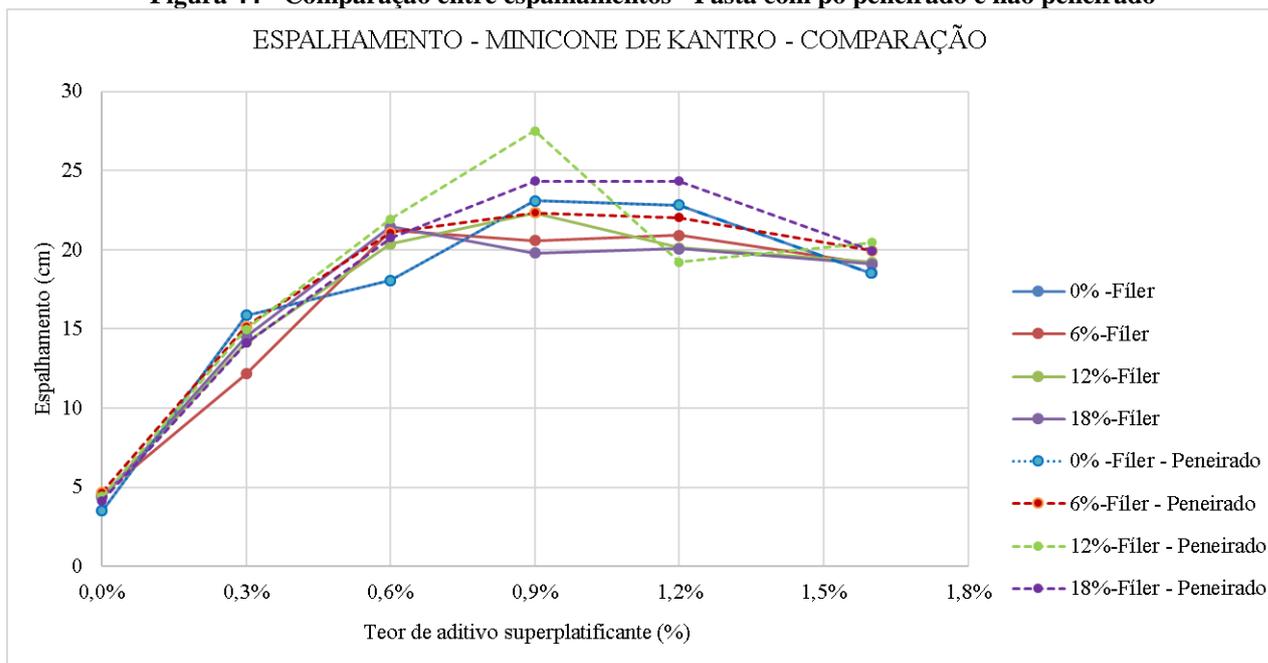
Fonte: O autor (2016).

A perda de espalhamento da pasta de cimento confeccionada com fíler calcário não peneirado, em relação à pasta produzida com adição de pó peneirado, foi em média de 4,59%. Este resultado possibilita que o fíler calcário seja utilizado como encontrado nas pedreiras, sem necessidade de tratamento preliminar e assim, não agregando custo ao material. A Figura 44 apresenta a comparação entre o espalhamento das pastas confeccionadas com pó peneirado e pó não peneirado.

Para se comprovar estatisticamente a hipótese de que o peneiramento não é necessário, foi feito o teste ANOVA com 95% de significância entre os resultados obtidos nos ensaios de espalhamento de pasta confeccionada com fíler calcário peneirado na peneira de abertura 0,075mm (#200) e da pasta confeccionada utilizando pó não peneirado. A Tabela 38 apresenta os resultados. O efeito encontrado foi considerado estatisticamente não significativo, ou seja, não há diferença entre os resultados obtidos com pasta confeccionada com pó peneirado e pasta produzida com pó não peneirado. Os dados tabulados estão apresentados no Anexo D.

A importância de não ser necessário peneirar o fíler calcário se reflete na economia de energia, trabalho e tempo, já que o peneiramento seria mais uma etapa do beneficiamento deste material. Essa economia contribui para a facilidade de aplicação do material, intensificando a justificativa ecológica e técnica de sua utilização na confecção de CAA.

**Figura 44 - Comparação entre espalhamentos - Pasta com pó peneirado e não peneirado**



Fonte: O autor (2016)

**Tabela 38 - ANOVA - Comparação entre pastas**

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	Resultado
% Fíler calcário (A)	12,65	3	4,22	0,01	3,01	Efeito não significativo
% Superplastificante (B)	1890,87	5	378,17	0,65	2,62	Efeito não significativo
AB	81,23	15	5,42	0,01	2,11	Efeito não significativo
Erro	14010,24	24	583,76	-	-	-
Total	15995,03	47	-	-	-	-

SQ: Soma dos quadrados

GDL: Graus de liberdade

MQ: Médias quadradas

Teste F: Valor da distribuição F de Snedecor

F Tab: Valor tabelado de Correspondente ao F de Snedecor

Fonte: O Autor (2016)

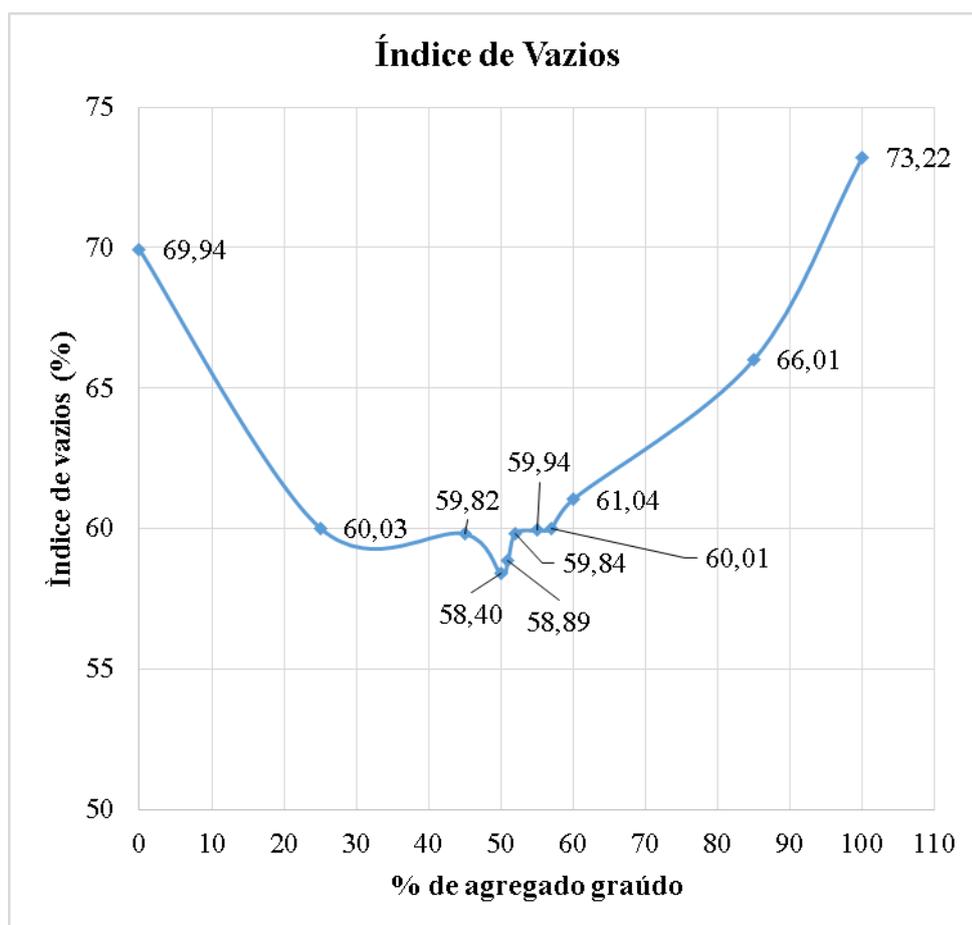
#### 4.3 CONCRETO AUTO ADENSÁVEL

Os dados referentes aos ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e caracterização no estado fresco estão apresentados no anexo E. Os resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido estão apresentados nos itens a seguir.

### 4.3.1 Esqueleto granular

A Tabela 39 apresenta a média de três medições e a Figura 45 o gráfico do índice de vazios. Diferentemente do proposto no método, foi medida a massa unitária solta, pois os resultados para massa unitária compactada geraram maior dispersão entre os valores e resultaram na mesma proporção entre os materiais.

Figura 45 - Índice de vazios - determinação do esqueleto granular



Fonte: O autor (2016)

**Tabela 39 - Determinação do esqueleto granular**

Areia	Brita #0	Massa da mistura	Massa Unitária	Massa específica	Índice de Vazios
%	%	kg	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%
100	0	0,648	1622,96	2758,00	69,94
95	5	0,000	0,00	2761,10	
90	10	0,000	0,00	2764,20	
85	15	0,000	0,00	2767,30	
80	20	0,000	0,00	2770,40	
75	25	0,692	1733,16	2773,50	60,03
70	30	0,000	0,00	2776,60	
65	35	0,000	0,00	2779,70	
60	40	0,000	0,00	2782,80	
55	45	0,696	1743,18	2785,90	59,82
50	50	0,703	1760,71	2789,00	58,40
49	51	0,701	1755,70	2789,62	58,89
48	52	0,697	1745,69	2790,24	59,84
47	53	0,000	0,00	2790,86	
46	54	0,000	0,00	2791,48	
45	55	0,697	1745,69	2792,10	59,94
44	56	0,000	0,00	2792,72	
43	57	0,697	1745,69	2793,34	60,01
42	58	0,000	0,00	2793,96	
41	59	0,000	0,00	2794,58	
40	60	0,693	1735,67	2795,20	61,04
35	65	0,000	0,00	2798,30	
30	70	0,000	0,00	2801,40	
25	75	0,000	0,00	2804,50	
20	80	0,000	0,00	2807,60	
15	85	0,676	1693,09	2810,70	66,01
10	90	0,000	0,00	2813,80	
5	95	0,000	0,00	2816,90	
0	100	0,650	1627,97	2820,00	73,22

Fonte: O autor (2016)

### 4.3.2 Caracterização no estado fresco

A Tabela 40 apresenta os resultados da caracterização dos CAAs no estado fresco para cada teste realizado, em função da classe de resistência e teor de substituição de Cimento Portland por fíler calcário, para as faixas de resistência de 70 MPa e 60 MPa, e a Tabela 41 apresenta a classificação para os concretos das faixas de resistência de 90 MPa e 80 MPa.

**Tabela 40 – Resultado e classificação do CAA no estado fresco – 70 MPa e 60 MPa**

Ensaio	un. / %	FAIXA DE RESISTÊNCIA															
		70 MPa								60 MPa							
		0		6		12		18		0		6		12		18	
T500	s	12,6	VS2	10,0	VS2	10,3	VS2	8,6	VS2	9,5	VS2	16,2	VS2	15,2	VS2	9,0	VS2
Espalhamento	mm	753	SF3	755	SF3	750	SF2	755	SF3	765	SF3	725	SF2	755	SF3	755	SF3
J-RING	mm	755	SF3	758	SF3	755	SF3	755	SF3	775	SF3	735	SF2	760	SF3	765	SF3
Δ Espalhamento	(mm)	2,5	PJ1	5,5	PJ1	5,0	PJ1	0,0	PJ1	10,0	PJ1	10,0	PJ1	5,0	PJ1	10,0	PJ1
J T500	s	17,0	VS2	12,3	VS2	12,2	VS2	15,8	VS2	12,5	VS2	19,2	VS2	18,5	VS2	12,8	VS2
Funil-V	t30 (s)	9,0	VF2	35,0		54,0		57,0		31,0		76,0		75,0		34,0	
	t5min (s)	95		54		64		95		55		109		110		55	
Caixa-U	h2-h1 (mm)	0	ok	0	ok	0	ok	0	ok	0	ok	0	ok	0	ok	0	ok
Caixa-L	HP=H2/H1	0,91	PL2	0,91	PL2	0,91	PL2	0,91	PL2	0,91	PL2	0,91	PL2	1,00	PL2	1,00	PL2

Fonte: O Autor (2016)

**Tabela 41 – Resultado e Classificação do CAA no estado fresco - 90 MPa e 80 MPa**

Ensaio	un. / %	FAIXA DE RESISTÊNCIA															
		90 MPa								80 MPa							
		0		6		12		18		0		6		12		18	
T500	s	13,5	VS2	5,3	VS2	7,4	VS2	7,3	VS2	11,5	VS2	5,2	VS2	11,7	VS2	7,6	VS2
Espalhamento	mm	755	SF3	750	SF2	745	SF2	773	SF3	740	SF2	760	SF3	753	SF3	763	SF3
J-RING	mm	745	SF2	755	SF3	755	SF3	780	SF3	740	SF2	755	SF3	755	SF3	750	SF2
Δ Espalhamento	(mm)	-10,0	PJ1	5,0	PJ1	10,0	PJ1	7,0	PJ1	0,0	PJ1	-5,0	PJ1	2,5	PJ1	-13,0	PJ1
J T500	s	15,0	VS2	11,3	VS2	10,8	VS2	8,9	VS2	9,6	VS2	8,4	VS2	12,6	VS2	10,1	VS2
Funil-V	t30 (s)	27,0		39,0		49,0		37,0		27,0		23,7		26,5		37,0	
	t5min (s)	53		59		70		46		41		31		53		43	
Caixa-U	h2-h1 (mm)	0	ok	0	ok	0	ok	0	ok	0	ok	0	ok	0	ok	0	ok
Caixa-L	HP=H2/H1	0,91	PL2	0,91	PL2	0,91	PL2	0,91	PL2	0,91	PL2	1,00	PL2	1,00	PL2	0,91	PL2

Fonte: O Autor (2016)

É possível observar na Tabela 40 e Tabela 41 que todos os concretos atingiram os requisitos de auto adensabilidade conforme requisitado pela NBR 15823-1:2010, com exceção do ensaio no Funil- V. Este ensaio se mostrou muito influenciável pelo tempo entre a coleta da amostra e a realização do ensaio, mesmo trabalhando em tempos inferiores ao requisitado pela norma. O tempo medido no Funil-V ajuda a avaliar o CAA quanto a sua viscosidade plástica aparente sob fluxo confinado, sendo que tempos superiores ao recomendado pela norma, 25s, podem indicar possibilidade de não conformidade durante concretagens. Entretanto, quando se avalia juntamente os resultados da Caixa-U e Caixa – L, que avaliam a habilidade passante sob fluxo confinado, utilizando três barras de aço simulando vergalhões, todos os concretos foram aprovados, não indicando possibilidade de falha de preenchimento e escoamento do CAA. Ainda, o ensaio do Anel Japonês por muitas vezes alcançou resultados superiores ao do espalhamento sem a utilização do anel. Isso leva a conclusão de que mesmo que o CAA apresente algum parâmetro com medições fora dos intervalos das normas, todos os ensaios devem ser realizados para a decisão de aprovação ou rejeição do material.

O CAA mostrou-se um material para o qual a determinação de sua trabalhabilidade deve ser mais criteriosa do que a determinação no CCV, que usualmente se utiliza apenas o cone de Abrams. Isso é natural já que o CAA é um material mais tecnológico, que utiliza dosagem mais precisa e sua avaliação no estado fresco não se limita a inferência da trabalhabilidade através da medição do abatimento, mas é feita se avaliando propriedades como viscosidade, fluidez, capacidade de fluir em situação análoga à uma concretagem e sua resistência à segregação.

#### 4.3.3 Resistência à compressão axial

A Tabela 42 apresenta os resultados para resistência à compressão axial para os concretos produzidos, em função da classe de resistência, idade e teor de substituição de fíler calcário.

**Tabela 42 - Resistência à compressão (MPa)**

%FÍLER		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)											
		60MPa			70MPa			80MPa			90MPa		
		IDADES (dias)			IDADES (dias)			IDADES (dias)			IDADES (dias)		
		3	7	28	3	7	28	3	7	28	3	7	28
0	CP1	43,57	54,32	78,97	53,74	59,56	81,40	44,54	64,55	82,93	57,24	72,01	87,78
	CP2	44,73	53,74	75,95	56,53	63,22	78,93	44,58	69,20	86,48	55,12	68,74	88,59
	CP3	41,67	59,36	74,66	51,64	58,33	80,66	45,23	63,65	81,88	59,54	69,44	92,67
	MÉDIA	<b>43,32</b>	<b>55,81</b>	<b>76,52</b>	<b>53,97</b>	<b>60,37</b>	<b>80,33</b>	<b>44,78</b>	<b>65,80</b>	<b>83,76</b>	<b>57,30</b>	<b>70,07</b>	<b>89,68</b>
	DP	1,54	3,09	2,21	2,45	2,54	1,27	0,39	2,98	2,41	2,21	1,72	2,62
	CV (%)	3,56%	5,54%	2,89%	4,54%	4,21%	1,58%	0,86%	4,53%	2,88%	3,86%	2,46%	2,92%
6	CP1	32,68	51,26	76,26	36,13	59,09	74,87	25,55	63,97	80,11	49,50	69,95	84,99
	CP2	35,22	51,48	77,74	33,02	60,98	74,75	27,82	60,64	78,18	50,18	63,80	87,79
	CP3	31,77	54,00	72,50	30,55	59,07	76,55	27,97	59,36	76,22	50,92	71,30	83,23
	MÉDIA	<b>33,22</b>	<b>52,25</b>	<b>75,50</b>	<b>33,23</b>	<b>59,71</b>	<b>75,39</b>	<b>27,12</b>	<b>61,32</b>	<b>78,17</b>	<b>50,20</b>	<b>68,35</b>	<b>85,34</b>
	DP	1,79	1,52	2,70	2,80	1,10	1,01	1,35	2,38	1,95	0,71	4,00	2,30
	CV (%)	5,38%	2,91%	3,58%	8,43%	1,83%	1,33%	5,00%	3,88%	2,49%	1,41%	5,85%	2,69%
12	CP1	24,73	51,08	76,82	31,08	55,84	75,67	25,73	58,17	74,03	32,82	62,86	83,73
	CP2	23,13	48,29	75,18	28,03	50,37	72,89	26,91	60,85	73,84	32,95	65,52	81,58
	CP3	23,67	51,66	73,31	31,33	56,30	71,70	25,30	57,21	76,03	34,72	61,76	82,60
	MÉDIA	<b>23,84</b>	<b>50,34</b>	<b>75,11</b>	<b>30,15</b>	<b>54,17</b>	<b>73,42</b>	<b>25,98</b>	<b>58,74</b>	<b>74,63</b>	<b>33,50</b>	<b>63,38</b>	<b>82,63</b>
	DP	0,81	1,80	1,75	1,84	3,30	2,04	0,83	1,89	1,21	1,06	1,93	1,08
	CV (%)	3,40%	3,57%	2,33%	6,09%	6,09%	2,78%	3,21%	3,21%	1,63%	3,17%	3,05%	1,30%
18	CP1	22,99	45,87	68,37	30,40	54,63	72,09	44,88	61,70	74,55	37,01	57,50	82,77
	CP2	24,27	44,86	68,09	29,43	52,88	71,82	45,10	56,65	72,07	38,72	58,77	78,37
	CP3	24,89	43,86	68,31	30,21	54,28	70,51	44,14	56,37	76,52	38,08	62,04	81,47
	MÉDIA	<b>24,05</b>	<b>44,86</b>	<b>68,25</b>	<b>30,01</b>	<b>53,93</b>	<b>71,47</b>	<b>44,71</b>	<b>58,24</b>	<b>74,38</b>	<b>37,94</b>	<b>59,44</b>	<b>80,87</b>
	DP	0,97	1,01	0,15	0,51	0,93	0,85	0,50	3,00	2,23	0,86	2,34	2,26
	CV (%)	4,02%	2,24%	0,22%	1,71%	1,72%	1,18%	1,12%	5,16%	3,00%	2,27%	3,94%	2,80%

Fonte: O Autor (2016)

Observando a Tabela 42, percebe-se que os concretos do nível de resistência 90 MPa somente alcançaram a resistência alvo com 0% de substituição de pó de pedra, se considerada a resistência potencial. Quando se considera a resistência média, nenhum dos concretos atingiu a resistência alvo, sendo que a resistência média alcançada para 0% de substituição ficou apenas 0,36% abaixo da resistência alvo. Para o nível de resistência de 80 MPa, somente os concretos com 0% de substituição alcançaram na média a resistência alvo e, considerando a resistência potencial, os concretos com 0% e 6% de substituição alcançaram a resistência desejada. Observa-se também que todos os concretos para os níveis de resistência de 60 MPa e 70 MPa alcançaram a resistência à compressão alvo, tanto na média quanto na resistência potencial. Um fator que certamente contribuiu para que os concretos não alcançassem a resistência alvo para

nos níveis 80 MPa e 90 Mpa foi o fato de que houve ruptura nos agregados graúdos, como mostra a Figura 46, e também o elevado teor de finos, o que pode gerar o efeito de afastamento entre as partículas de cimento.

**Figura 46 - Corpo de prova - Rompimento nos agregados graúdos**



Fonte: O Autor (2016)

Ainda na Tabela 42, percebe-se que dos dezesseis traços produzidos, quinze resultaram com coeficiente de variação (CV) aos 28 dias menor que 3,0%, o que representa quase 94% dos resultados classificados como Nível 1 de acordo com a NBR 5739:2007, numa escala que varia de Nível 1 (excelente) a Nível 5 (deficiente). O único resultado com CV acima de 3,0% está classificado como Nível 2, demonstrando a tendência do CAA a gerar concretos com menor suscetibilidade a falhas de concretagem, aumentando a durabilidade das estruturas e diminuindo o consumo de cimento quando se trabalha com  $f_{ck}$  e não apenas  $f_{cj}$ .

Em geral, concretos de alta resistência apresentam maior dispersão entre resultados obtidos com CP's moldados de uma mesma betonada, em comparação com concretos

convencionais. Isto ocorre devido à grande influência dos processos de ensaio, pois pequenas variações nestes geram grandes variações na resistência à compressão, sendo difícil replicar os valores máximos obtidos (BINCHINI, 2010). Nesta pesquisa foi possível observar que a confecção de concretos fluidos contribuiu para a diminuição destas variações, já que o CAA gera moldagens mais uniformes e menos suscetíveis a falhas, alcançando-se resistência à compressão de 90 MPa e auto-adensabilidade. Estes resultados só foram atingidos através da utilização de um método de dosagem adequado e empregando-se alto teor de material fino combinado com aditivo superplastificante de alta eficiência. O CV médio aos 28 dias foi de 2,23% para CAA, enquanto Campos (2015) encontrou CV médio aos 28 dias de 9,09% para o CAR confeccionado utilizando os mesmos materiais.

A partir dos dados de resistência à compressão da Tabela 42 foi feita a ANOVA com 95% de significância para a média dos resultados aos 28 dias, apresentada na Tabela 43.

**Tabela 43 - ANOVA para resistência à compressão aos 28 dias.**

FONTE DE VARIAÇÃO	SQ	GDL	MQ	TESTE F	F TAB	COMPARAÇÃO
FILER (A)	500,3	3	166,78	46,61	2,90	Efeito significativo
RELAÇÃO (a/a) (B)	831,4	3	277,14	77,45	2,90	Efeito significativo
AB	62,7	9	6,97	1,95	2,19	Efeito não significativo
ERRO	114,5	32	3,58	-	-	-
TOTAL	1509,0	47	-	-	-	-

SQ: Soma dos quadrados

GDL: Graus de liberdade

MQ: Médias quadradas

Teste F: Valor da distribuição F de Snedecor

F Tab: Valor tabelado de Correspondente ao F de Snedecor

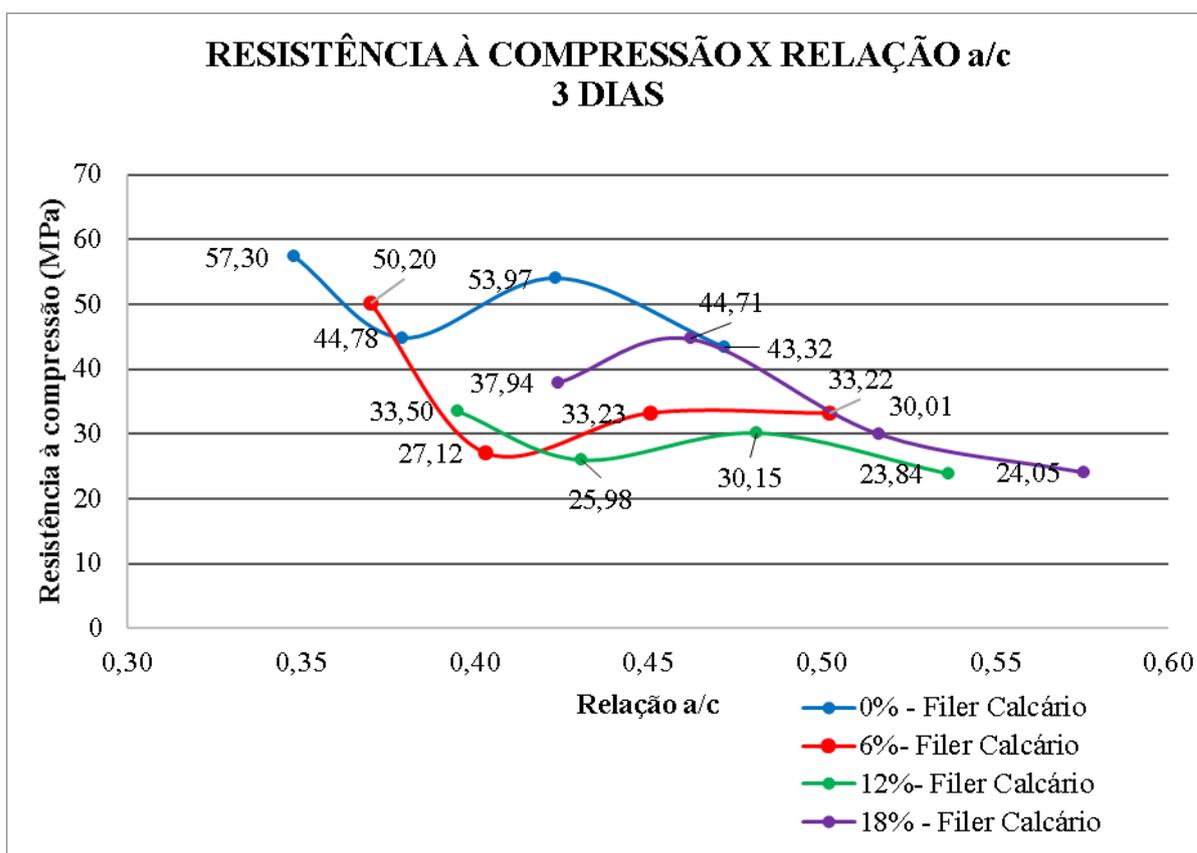
Fonte: O Autor (2016)

Observando a ANOVA, percebe-se que tanto a teor de substituição de Cimento Portland por Fíler calcário quanto à relação a/c influenciam na resistência à compressão dos concretos estudados, assim como encontrado nos resultados do estudo preliminar realizado com argamassa. Ainda, percebe-se que não ocorre interação entre essas duas fontes de variação.

Nas Figura 47, Figura 48 e Figura 49 estão apresentados os gráficos de resistência à compressão em função da relação a/c para cada teor de substituição de fíler calcário, para três, sete e vinte e oito dias respectivamente.

Conforme esperado, aos 3 dias de idade observou-se a tendência de diminuição de resistência à compressão conforme a relação a/c diminui. Também foi observada a tendência de diminuição da resistência conforme o teor de fíler aumenta, sendo que os maiores resultados foram obtidos para a 0% de substituição.

Figura 47 - Resistência à compressão X relação a/c - 3 dias



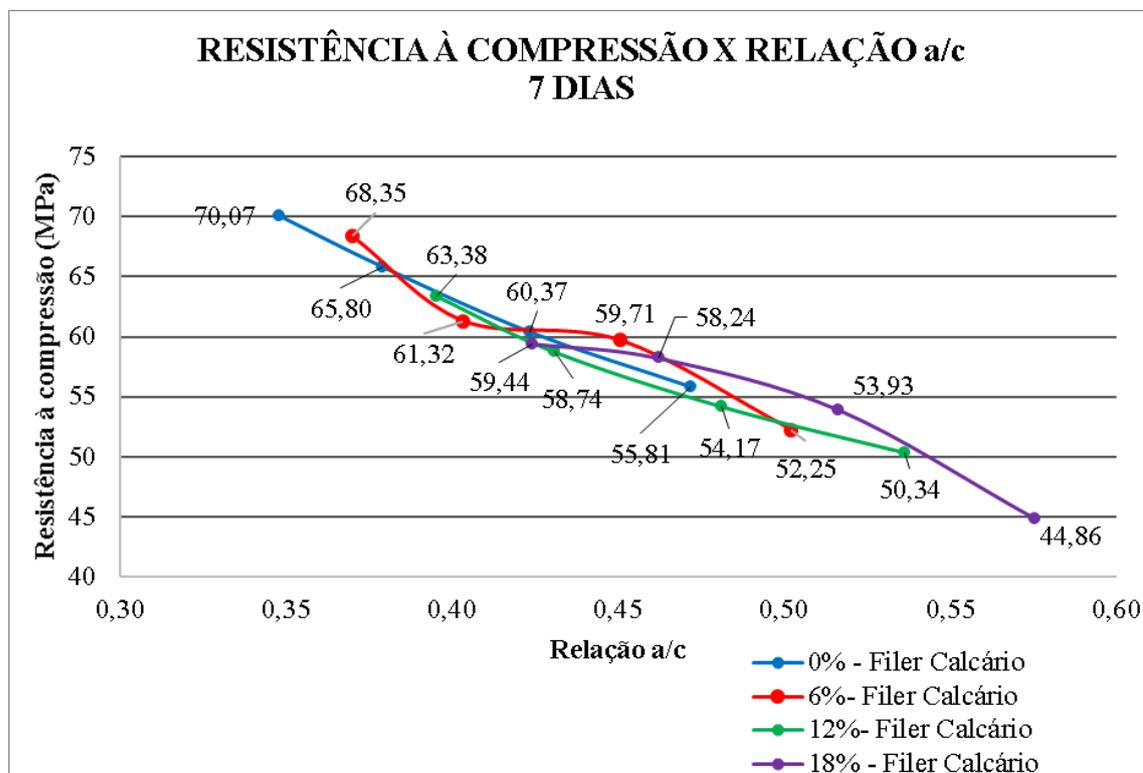
Fonte: O Autor (2016)

Assim como aos 3 dias, aos 7 dias foi observada a tendência de diminuição de resistência à compressão conforme se aumenta a relação a/c, sendo que os maiores resultados de resistência foram observados para 0% de substituição.

Comparando a evolução da resistência à compressão entre 3 e 7 dias, observa-se que para 0% de substituição, o aumento de resistência foi em média de 27%, para 6% de substituição foi de 75%, para 12% de substituição foi 102% e 18% de substituição gerou resistências 63% maiores. Isto provavelmente ocorreu devido ao alto teor de material fino, baixo consumo de cimento e baixa quantidade de água, gerando maior afastamento dos grãos de cimento nas primeiras idades, não permitindo o a aglomeração dos grãos deste material. Conforme os

crístais crescem durante a reação de hidratação, estes vencem o afastamento gerado pelo fíler calcário os concretos tendem a resistêcia da mistura com 0% de substituição.

Figura 48 - Resistência à compressão X relação a/c - 7 dias



Fonte: O Autor (2016)

Analisando os dados referentes à idade de 28 dias, apresentados na Figura 49, se percebe a grande influência da relação a/c nas resistências e a pequena influência da variação do teor de substituição de cimento por fíler calcário, sendo que a CMM apresentada abaixo revelou que em 27% das comparações não houve variação significativa na resistência à compressão com a substituição do cimento por fíler calcário. Avaliando a variação dos resultados, observou uma sensível melhora dos resultados dos CV, sendo que o CV médio aos 28 dias foi de 2,23% e aos 7 dias foi de 3,76%.

A evolução da resistência à compressão resultou nos ganhos de resistência conforme Tabela 44. Comparando as idades 3 e 28 dias, percebe-se que o maior desenvolvimento de resistência ocorreu para o teor de substituição 12%, sendo que na comparação entre as idades 7 e 28 dias o maior desenvolvimento foi observado para o teor de substituição de 18%, sendo que para 12% o desenvolvimento ficou apenas um ponto percentual abaixo. Isto indica que a

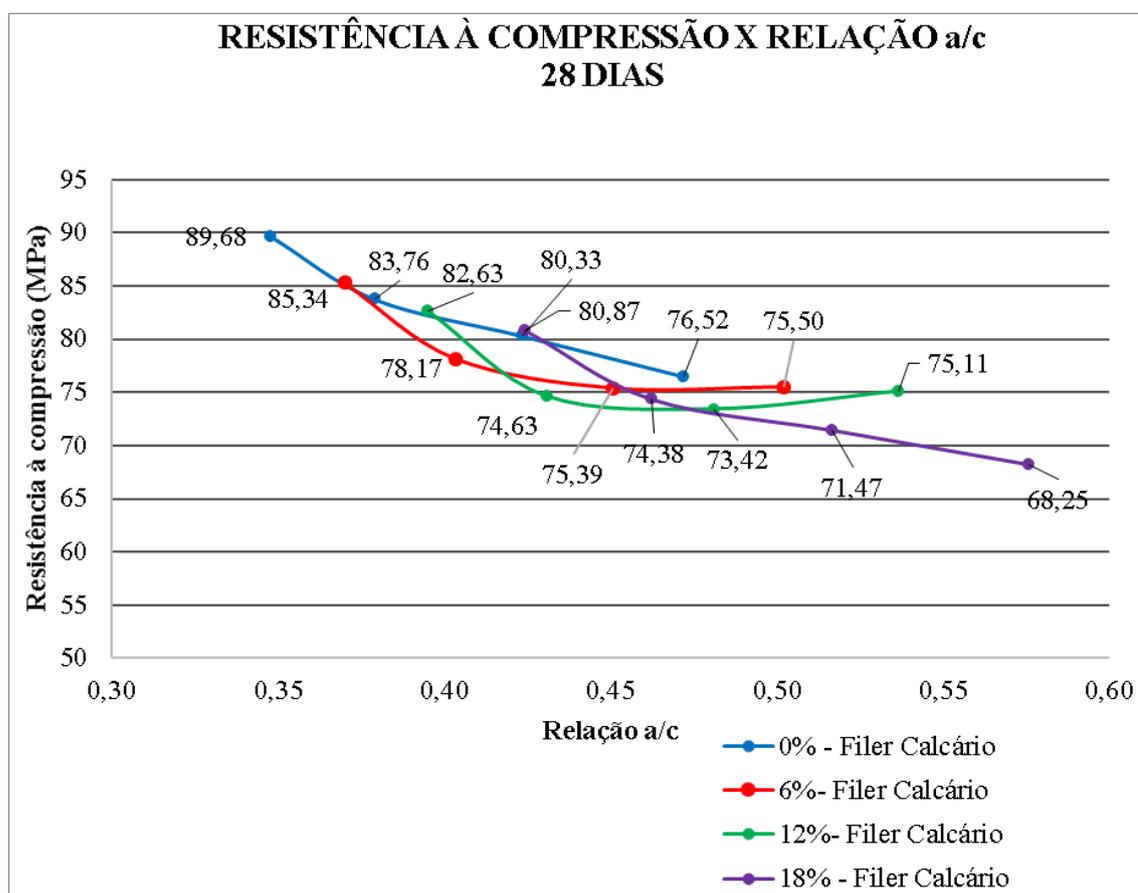
resistência inicialmente perdida com o efeito de afastamento é recuperada com a idade do concreto e provavelmente o teor de 12% de substituição gere o melhor fechamento granular.

**Tabela 44 - Evolução da resistência em fundação do tempo**

Teor de substituição	Comparação	
	3-28 (dias)	7-28 (dias)
0%	67%	31%
6%	128%	31%
12%	173%	36%
18%	125%	37%

Fonte: O Autor (2016)

**Figura 49 - Resistência à compressão X relação a/c - 28 dias**



Fonte: O Autor (2016)

A comparação múltipla de médias revelou diferença não significativa, para o nível de resistência de 90 MPa, apenas na comparação dos resultados entre 6% e 12% e entre 12%-18%. Para o nível de resistência de 80 MPa, apresentou diferença não significativa a comparação entre 12% e 18%. Já para o nível de resistência de 70 MPa, a comparação múltipla de médias

revelou que não há diferença entre a comparação dos resultados de 6% e 12% e entre os resultados de 12% e 18%. Finalmente para o nível de resistência 60 MPa, não há diferença estatística entre os resultados de 0% e 6%, 0% e 12%, e 6% e 12. Vale ressaltar que o CV médio aos 28 dias foi de 2,23%, ou seja, valores ligeiramente diferentes são considerados estatisticamente diferentes. Esta pequena dispersão, gerada pela boa moldagem do CPs, só foi conseguida através da utilização de concreto auto adensável. Para efeito de comparação, Campos (2015), utilizando materiais semelhantes aos desta pesquisa, obteve CV médio aos 28 dias de 10,82%. A Tabela 45 apresenta o resumo da CMM em função da resistência alvo e teor de substituição/comparação.

**Tabela 45 - Resumo da CMM**

Comparação	60MPa	70MPa	80MPa	90MPa
12% e 18%	DS	DNS	DNS	DNS
18% e 6%	DS	DS	DS	DS
18% e 0%	DS	DS	DS	DS
12% e 6%	DNS	DNS	DNS	DNS
12% e 0%	DNS	DS	DS	DS
6% e 0%	DNS	DS	DS	DS

Fonte: O autor (2016)

A partir dos resultados obtidos para resistência à compressão média aos 28 dias, para cada teor de substituição, foram determinadas as equações de regressão das curvas que representam a resistência à compressão em função da relação a/c e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), conforme apresentado na Tabela 46.

O valor de  $R^2$  indica a variação do modelo de regressão, sendo que quanto mais próximo de 1,0 é o valor assumido por  $R^2$ , menor é a variação. Quando o valor de  $R^2$  está abaixo de 0,3, significa que o resíduo é muito elevado, devendo-se proceder uma análise dos dados para determinação da procedência e confiabilidade dos dados, sendo que estes podem ser influenciados por fatores externos ao estudo (RIBEIRO e CATEN, 2003).

**Tabela 46 - Equações de ajuste e  $R^2$  para resistência à compressão em função da relação a/c**

Teor de substituição	Equação	$R^2$
0%	$y = 52,349x^{-0,499}$	0,97
6%	$y = 56,807x - 0,382$	0,76
12%	$y = 61,381x - 0,28$	0,48
18%	$y = 50,602x - 0,527$	0,95

Fonte: O autor (2016)

#### 4.3.4 Resistência à tração por compressão diametral

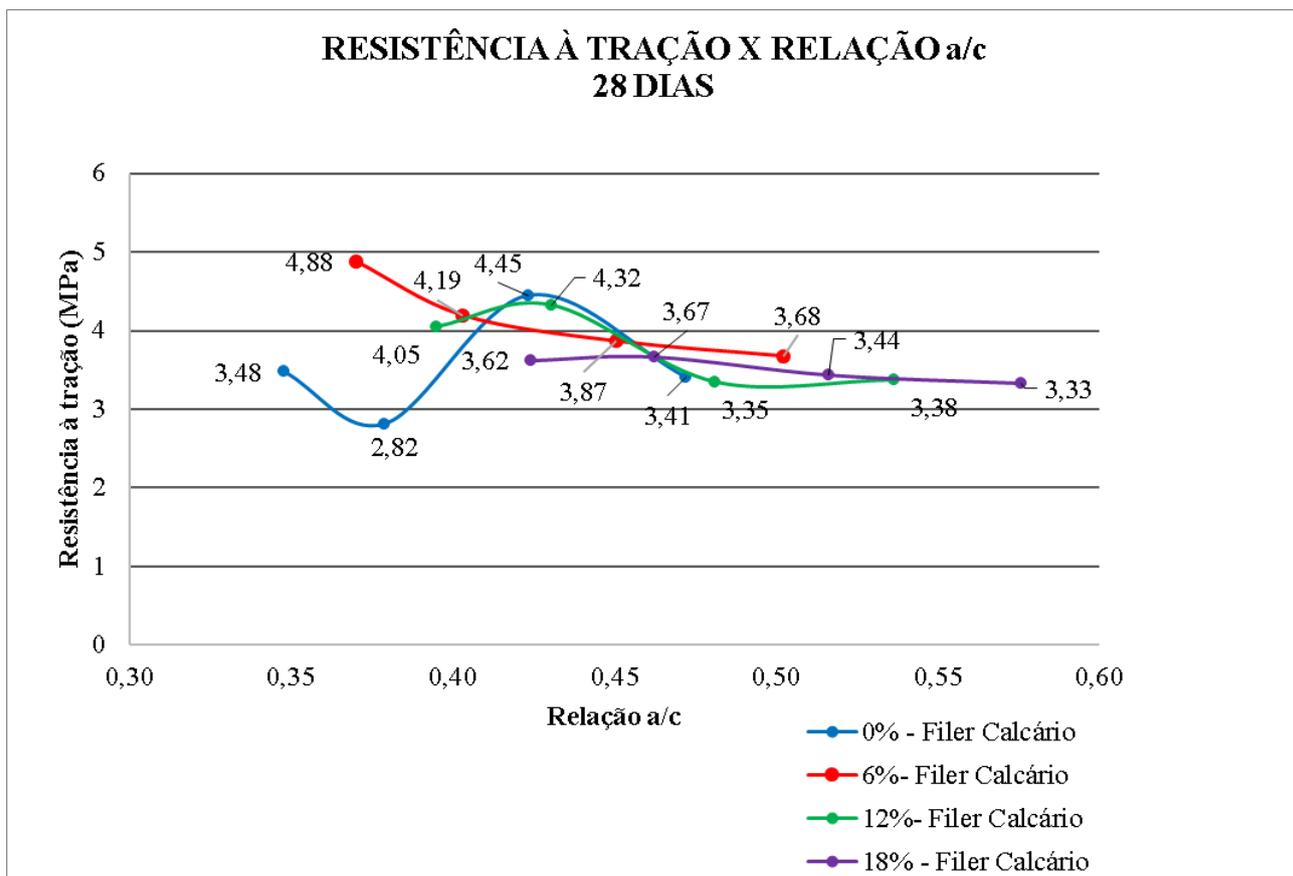
A Tabela 47 apresenta os resultados numéricos para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral e a Figura 50 apresenta graficamente os resultados.

**Tabela 47 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, em função do nível de resistência e teor de fíler**

% FÍLER CALCÁRIO		NÍVEL DE RESISTÊNCIA			
		60MPa	70MPa	80MPa	90MPa
0	CP1	3,88	5,09	1,74	2,48
	CP2	3,10	4,85	3,37	3,36
	CP3	3,24	3,40	3,34	4,59
	MÉDIA	3,41	4,45	2,82	3,48
	DP	0,42	0,91	0,93	1,06
	CV (%)	12,21%	20,56%	33,11%	30,48%
	6	CP1	2,70	3,88	5,69
CP2		3,13	3,36	3,64	4,51
CP3		5,20	4,36	3,25	3,73
MÉDIA		3,68	3,87	4,19	4,88
DP		1,34	0,50	1,31	1,38
CV (%)		36,35%	12,93%	31,26%	28,23%
12		CP1	3,41	3,79	4,25
	CP2	2,22	3,51	3,93	3,54
	CP3	4,50	2,75	4,79	3,55
	MÉDIA	3,38	3,35	4,32	4,05
	DP	1,14	0,54	0,43	0,87
	CV (%)	33,77%	16,06%	10,05%	21,60%
	18	CP1	4,67	4,65	3,15
CP2		2,41	2,93	4,39	3,88
CP3		2,91	2,73	3,47	3,46
MÉDIA		3,33	3,44	3,67	3,62
DP		1,19	1,06	0,64	0,23
CV (%)		35,65%	30,71%	17,54%	6,21%

Fonte: O Autor (2016)

Figura 50 - Resistência à tração por compressão X relação a/c aos 28 dias, para cada teor de adição de filer calcário



Fonte: O Autor (2016)

A ANOVA com nível de significância de 95%, para os resultados de resistência à tração por compressão diametral, está apresentada na Tabela 48.

Tabela 48 - ANOVA para resistência à tração por compressão diametral

FONTE DE VARIACÃO	SQ	GDL	MQ	TESTE F	F TAB	COMPARAÇÃO
FILER (A)	3,18	3	1,06	1,20	2,90	Efeito não significativo
RELAÇÃO (a/c) (B)	1,91	3	0,64	0,72	2,90	Efeito não significativo
AB	7,10	9	0,79	0,89	2,19	Efeito não significativo
ERRO	28,38	32	0,89	-	-	-
TOTAL	40,57	47	-	-	-	-

SQ: Soma dos quadrados

GDL: Graus de liberdade

MQ: Médias quadradas

Teste F: Valor da distribuição F de Snedecor

F Tab: Valor tabelado de Correspondente ao F de Snedecor

Fonte: O autor (2016)

Analisando a Figura 50, se percebe a tendência de diminuição da resistência à tração conforme a relação a/c aumenta, porém a ANOVA encontrou efeito não significativo para a variação da relação a/c e também teor de substituição de cimento Portland por fíler calcário. Ainda, não ocorre interação entre a fonte de variação relação a/c e variação do teor de fíler calcário.

A comparação múltipla de médias revelou diferença não significativa para todas as comparações. Portanto, para os parâmetros adotados nesta pesquisa, o consumo de cimento, relação a/c e teor calcário pulverizado não influenciam na resistência à tração por compressão diametral.

#### 4.3.5 Módulo de elasticidade

A Tabela 49 apresenta os resultados obtidos para o ensaio do módulo de elasticidade.

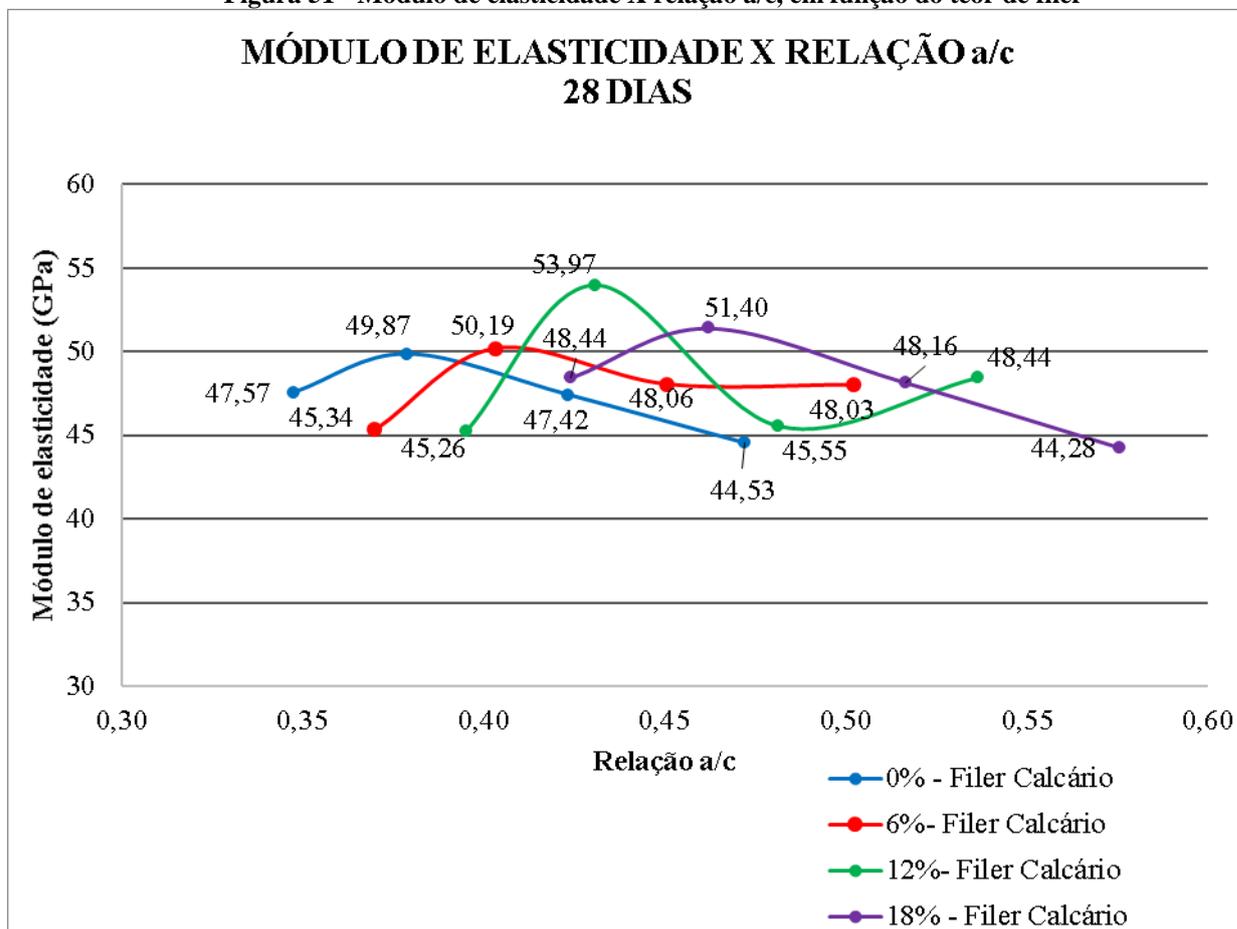
**Tabela 49 - Resultado do ensaio de módulo de elasticidade**

% FÍLER CALCÁRIO		NÍVEL DE RESISTÊNCIA			
		60MPa	70MPa	80MPa	90MPa
0	CP1	39,37	41,44	44,85	44,15
	CP2	49,69	53,39	54,89	50,98
	MÉDIA	44,53	47,42	49,87	47,57
	DP	7,30	8,45	7,10	4,83
	CV (%)	16,39%	17,82%	14,24%	10,15%
6	CP1	44,54	52,63	50,87	43,68
	CP2	51,52	43,49	49,51	47,00
	MÉDIA	48,03	48,06	50,19	45,34
	DP	4,94	6,46	0,96	2,35
	CV (%)	10,28%	13,45%	1,92%	5,18%
12	CP1	47,30	44,93	51,74	42,01
	CP2	49,58	46,17	56,20	48,50
	MÉDIA	48,44	45,55	53,97	45,26
	DP	1,61	0,88	3,15	4,59
	CV (%)	3,33%	1,92%	5,84%	10,14%
18	CP1	48,75	44,36	50,72	48,47
	CP2	39,81	51,96	52,08	48,40
	MÉDIA	44,28	48,16	51,40	48,44
	DP	6,32	5,37	0,96	0,05
	CV (%)	14,28%	11,16%	1,87%	0,10%

Fonte: O autor (2016)

A Figura 51 apresenta os resultados para módulo de elasticidade dos concretos estudados, em função da relação a/c e teor de substituição de fíler calcário.

Figura 51 - Módulo de elasticidade X relação a/c, em função do teor de fíler



Fonte: O autor (2016)

A Tabela 50 apresenta a ANOVA com 95% de significância, realizada a partir dos dados de módulo de elasticidade dos concretos estudados. Embora o maior resultado para o módulo de elasticidade tenha sido encontrado para o teor de substituição de 12%, a ANOVA revelou que não é possível associar o teor de substituição de cimento por fíler calcário com a variação no módulo de elasticidade. Ainda, a análise de variância também revelou que não há diferença significativa para a variação da relação a/c nem há interação desta variável com o teor de fíler calcário.

**Tabela 50 - ANOVA para módulo de elasticidade dos concretos**

FONTE DE VARIAÇÃO	SQ	GDL	MQ	TESTE F	F TAB	COMPARAÇÃO
FILER (A)	4,00	3	1,33	0,06	3,24	Efeito não significativo
RELAÇÃO (a/a) (B)	131,05	3	43,68	1,86	3,24	Efeito não significativo
AB	70,54	9	7,84	0,33	2,54	Efeito não significativo
ERRO	375,09	16	23,44			
TOTAL	580,66	31				

SQ: Soma dos quadrados

GDL: Graus de liberdade

MQ: Médias quadradas

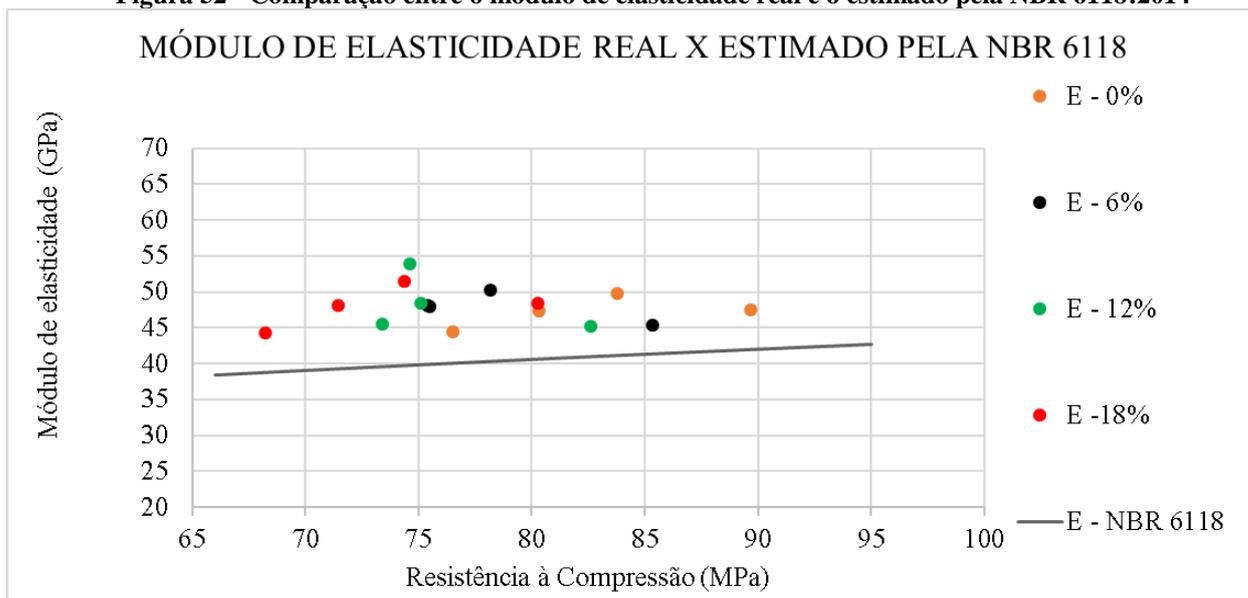
Teste F: Valor da distribuição F de Snedecor

F Tab: Valor tabelado de Correspondente ao F de Snedecor

Fonte: O autor (2016)

A Figura 52 apresenta a comparação entre os módulos de elasticidade reais dos concretos estudados e a estimativa segundo a NBR 6118:2014, em função da resistência à compressão e teor de fíler calcário. Observa-se que todos os resultados obtidos são superiores aos estimados pelo método recomendado pela NBR 6118:2014, o que leva a conclusão de que uma estrutura calculada com parâmetros estimados segundo a norma desenvolverá deformações menores do que as previstas em projeto, porém o comportamento na ruptura será mais frágil do que o considerado.

Figura 52 - Comparação entre o módulo de elasticidade real e o estimado pela NBR 6118:2014



Fonte: O autor (2016)

Como a ANOVA revelou não haver correspondência entre a variação do teor de fíler, relação a/c, nem interação entre as variáveis, as equações de correlação não foram calculadas.

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE CONSUMO DE CIMENTO E EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>

As emissões de CO<sub>2</sub> para os concretos desenvolvidos para esta pesquisa foram calculados considerando apenas o consumo de cimento Portland e, para validação externa, foram comparados com os dados de Bianchini (2010), que utilizou a mesma metodologia de obtenção de dados, especificamente utilizando materiais disponíveis na região metropolitana de Curitiba, mesmo local desta pesquisa.

O Relatório Anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2013) indica que a taxa média de emissão de CO<sub>2</sub> do cimento Portland foi de 600 kgCO<sub>2</sub>/t, considerando emissões nulas decorrentes da utilização de adições minerais na composição do cimento. Ainda na mesma publicação, a taxa média de clínquer para o mesmo período no país foi de 69%, dessa maneira se estima que a emissão média de CO<sub>2</sub> devido ao clínquer, no Brasil, seja de 869,57 kgCO<sub>2</sub>/t (de clínquer).

A Tabela 51 apresenta o consumo de cimento e emissões de CO<sub>2</sub> por MPa em função da resistência à compressão aos 28 dias para concretos convencionais produzidos em Curitiba, conforme obtido Bianchini (2010) até 45,0 MPa e para CAR conforme obtidos por Campos

(2015). Percebe-se que, conforme aumenta a resistência, o consumo de cimento por MPa diminui, conseqüentemente a emissão de CO<sub>2</sub> por MPa também diminui. Isto ocorre porque nos concretos de alta resistência a quantidade de água é mais próxima à necessária para reagir com o cimento. Assim, o potencial do cimento é melhor aproveitado. Já no concreto convencional há excesso de água para garantir a trabalhabilidade (AİTCIN, 2000). Após a reação de hidratação do cimento, esse excesso de água gera vazios, resultando que o concreto convencional possui mais vazios do que os concretos de alta resistência.

**Tabela 51 - Consumo de cimento e Emissão de CO<sub>2</sub> por MPa, para concretos produzidos em Curitiba**

f <sub>ck</sub> 28 dias	Consumo de cimento	Emissão de CO <sub>2</sub>
MPa	kg/MPa	kg/MPa
15	12,33	7,40
18	11,28	6,77
20	10,75	6,45
25	9,84	5,90
30	9,27	5,56
35	8,97	5,38
40	8,83	5,30
45	8,8	5,28
51,57	7,02	4,21
62,5	6,54	3,93
67,54	6,69	4,02
79,6	6,11	3,66

Fonte: Adaptado de Bianchini (2010) – (Centrais dosadoras de concreto de Curitiba) até 45MPa. Campos (2015) a partir de 51Mpa.

A Tabela 52 apresenta o consumo de cimento por MPa e as emissões de CO<sub>2</sub> por MPa para os concretos produzidos neste trabalho e a Figura 53 apresenta a comparação dos resultados obtidos para CCV por Bianchini (2010) e os resultados desta pesquisa.

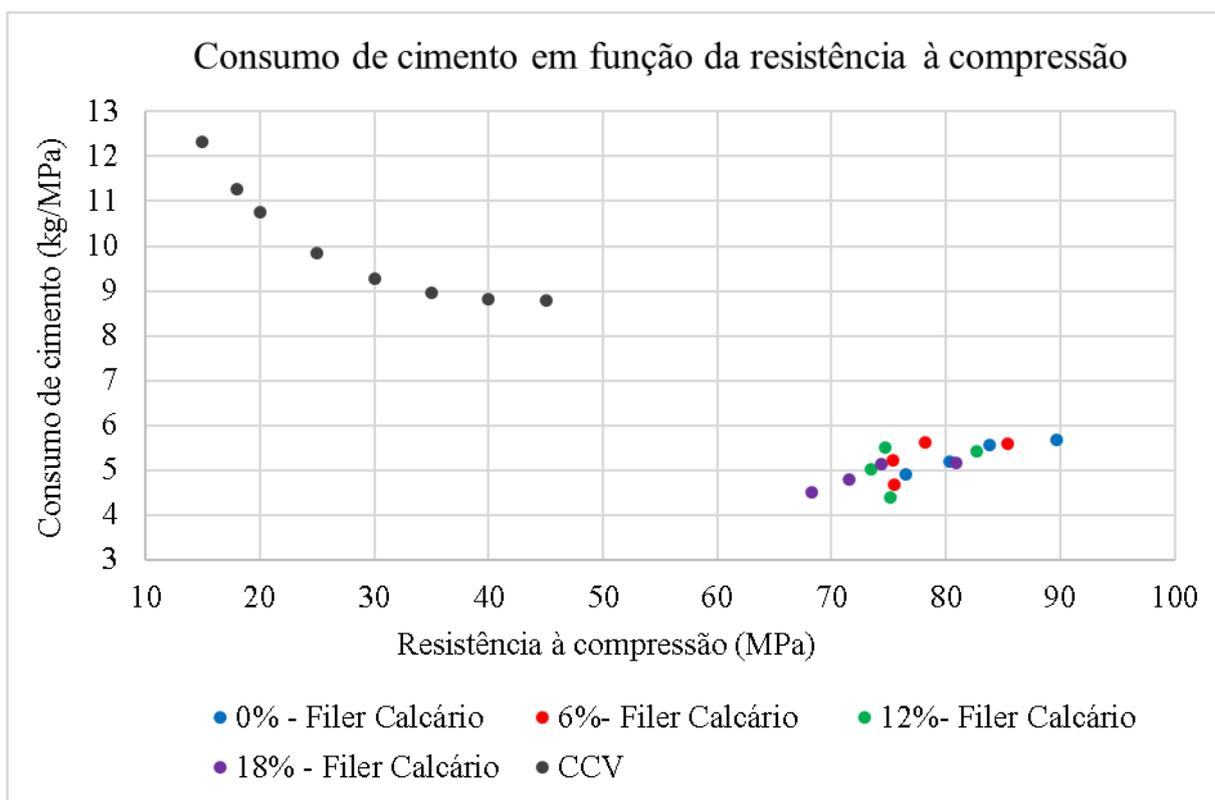
Tabela 52 - Consumo de cimento e emissão de CO<sub>2</sub> por MPa, para os concretos produzidos nesta pesquisa

Teor de fíler	Fc 28 dias MPa	Consumo de cimento kg/MPa	Emissão de CO <sub>2</sub> kg/MPa
0%	76,52	4,90	4,05
	80,33	5,20	4,30
	83,76	5,58	4,61
	89,68	5,68	4,69
6%	75,55	4,67	3,85
	75,39	5,21	4,31
	78,17	5,62	4,64
	85,34	5,61	4,63
12%	75,11	4,39	3,63
	73,42	5,01	4,14
	74,63	5,51	4,55
	82,63	5,42	4,48
18%	68,25	4,51	3,72
	71,47	4,80	3,96
	74,38	5,15	4,25
	80,87	5,16	4,26

Fonte: O autor (2016)

Como observado na Tabela 51, fica evidente a tendência de concretos mais resistentes a terem uma melhor relação entre o consumo de cimento e a resistência à compressão obtida, sendo que este comportamento é igual quando se compara as emissões de CO<sub>2</sub> por MPa à resistência à compressão. Entretanto, dentro dos limites desta pesquisa, foi observado a tendência do aumento de consumo de cimento por unidade de resistência, como mostra a Figura 53. Este aumento de consumo está associado ao rompimento precoce dos agregados graúdos. Ainda assim, os valores de consumo de cimento encontrados nesta pesquisa são menores em comparação ao CCV e aos valores encontrados por Campos (2015) sem substituição de fíler. A comparação entre o maior consumo de cimento por MPa encontrado nesta pesquisa, 5,68 kg/MPa (89,68 MPa) e o respectivo consumo para a resistência de 79,60 MPa encontrado por Campos (2015) sem adição de fíler, resulta numa redução 7,0% no consumo de cimento por MPa. Já a comparação do maior consumo de cimento encontrado nesta pesquisa com o menor consumo para CCV, conforme Bianchini (2010), 8,80 kg/Mpa, resulta em uma redução de até 35,5% no consumo de cimento por unidade de resistência.

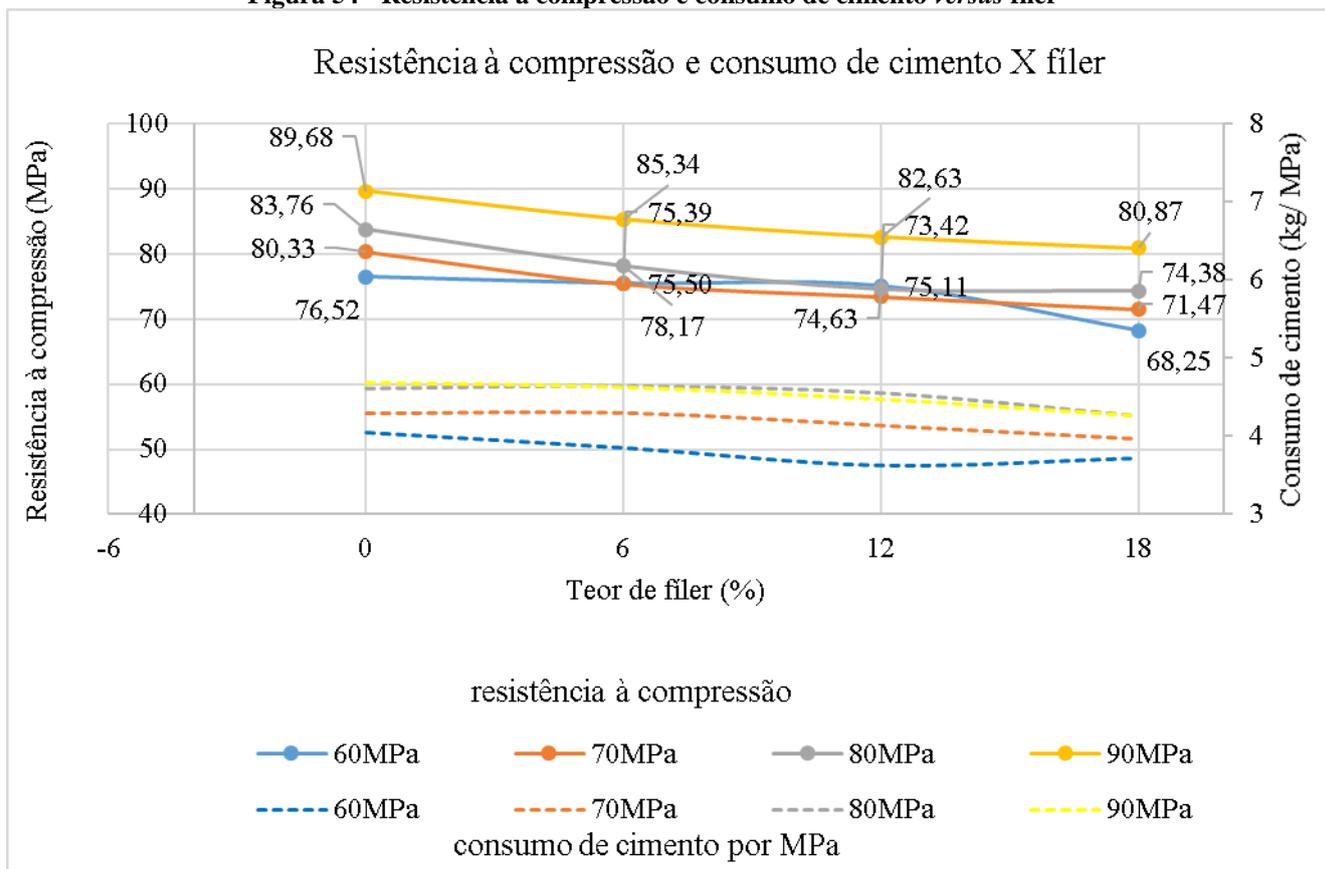
Figura 53 - Consumo de cimento por unidade de resistência em função da resistência à compressão



Fonte: O autor (2016)

A Tabela 52 demonstra que a substituição do cimento Portland por calcário pulverizado reduz as emissões de CO<sub>2</sub>, sendo que os menores valores de CO<sub>2</sub>/MPa foram encontrados para 18% de substituição. A Figura 54 apresenta a comparação entre resistência à compressão e consumo de cimento por MPa, em função do teor de substituição do calcário pulverizado.

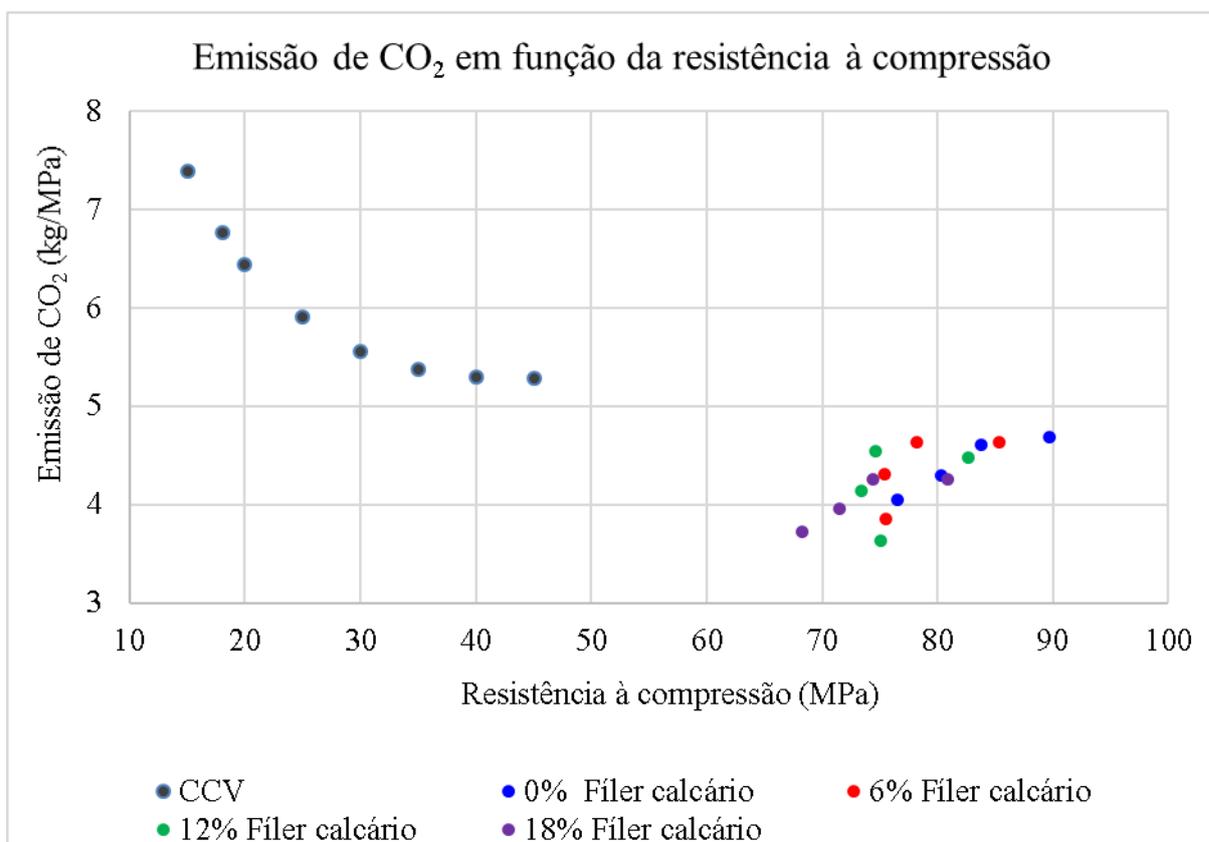
Figura 54 - Resistência à compressão e consumo de cimento versus filer



Analisando a Figura 54, é possível concluir que se aumentando o teor de substituição de cimento Portland por filer calcário melhora-se o aproveitamento do potencial do cimento, mesmo com relações a/c maiores. Isto leva ao melhor aproveitamento dos recursos naturais, já que se usa menos cimento para uma mesma resistência, e se aproveita o rejeito de britagem.

A substituição do cimento Portland por calcário pulverizado permitiu reduzir até 10,3% o consumo de cimento para a faixa de resistência 60 MPa e teor de substituição de 12%. Em média, as reduções dos consumos foram de 1,3% para teor de substituição de 6%, 4,9% para teor de 12% e 8,2% de redução para 18% de teor de substituição. As emissões de CO<sub>2</sub> tem os mesmos valores percentuais de redução, já que nesta pesquisa estão relacionadas somente ao consumo de cimento. A Figura 55 apresenta a emissão de CO<sub>2</sub> em função da resistência à compressão.

Figura 55 - Emissão de CO<sub>2</sub> em função da resistência à compressão



Fonte: O autor (2016)

A Tabela 53 apresenta a comparação entre os resultados de resistências à compressão obtidos nesta pesquisa e os resultados obtidos por Campos (2015). Os resultados obtidos por Campos (2015) foram escolhidos por terem sido obtidos utilizando os mesmos materiais, entre eles: Cimento, aditivo SP, agregado miúdo e fíler calcário. Diferem apenas o agregado graúdo e a utilização de sílica ativa no concreto de Campos (2015) e no CAA desta pesquisa não. Outros fatos que favoreceram a comparação entre estes resultados foram as faixas de consumo de cimento e resistências próximas em ambas pesquisas.

**Tabela 53 - Comparação da resistência à compressão aos 28 dias com a bibliografia**

Traço	Substituição	Resultados - CAA				Campos (2015) - CAR			
		Fc	C Cim	a/c	Cim/Fc	Fc	C Cim	a/c	Cim/Fc
		MPa	kg/m <sup>3</sup>	kg/kg	kg/MPa	MPa	kg/m <sup>3</sup>	kg/kg	kg/MPa
1	0%	89,68	509,00	0,35	5,68	79,60	486,00	0,26	6,11
2		83,76	467,00	0,38	5,58	67,54	452,00	0,28	6,69
3		80,33	418,00	0,42	5,20	62,50	409,00	0,31	6,54
4		76,52	375,00	0,47	4,90	51,57	362,00	0,35	7,02
5	6%	85,34	478,46	0,37	5,61	78,45	443,04	0,26	5,65
6		78,17	438,98	0,40	5,62	73,03	407,24	0,28	5,58
7		75,39	392,92	0,45	5,21	70,93	361,79	0,31	5,10
8		75,50	352,50	0,50	4,67	57,50	312,27	0,35	5,43
9	12%	82,63	447,92	0,40	5,42	82,35	399,71	0,26	4,85
10		74,63	410,96	0,43	5,51	65,80	362,20	0,28	5,50
11		73,42	367,84	0,48	5,01	77,83	314,59	0,31	4,04
12		75,11	330,00	0,54	4,39	66,80	262,53	0,35	3,93
13	18%	80,87	417,38	0,42	5,16	67,30	356,37	0,26	5,30
14		74,38	382,94	0,46	5,15	67,67	317,15	0,28	4,69
15		71,47	342,76	0,52	4,80	62,13	267,39	0,31	4,30
16		68,25	307,50	0,58	4,51	56,30	212,79	0,35	3,78

Fc Resistência à compressão

C cim Consumo de cimento por m<sup>3</sup> de concreto

Cim/Fc Consumo de cimento por unidade de resistência

Fonte: O autor (2016)

Ao se comparar os resultados obtidos, percebe-se que, para um mesmo consumo de cimento, as resistências para o CAA tendem a ser maiores do que do CAR, mesmo com o CAA utilizando relação a/c maior do que o CAR. Pode-se destacar as seguintes comparações:

- 0% de substituição: O traço 4 do CAA alcançou resistência à compressão de 76,52 MPa para consumo de cimento de 375,00 kg/m<sup>3</sup> e a/c de 0,47. Já o CAR no traço 3 e superiores, utilizando 409 kg/m<sup>3</sup> de cimento e relação a/c igual à 0,31, alcançou resistência de 62,50 MPa, ou seja, o CAA alcançou 18,3% mais resistência com um consumo de cimento 9,1% menor, mesmo com uma relação a/c maior. Para esta faixa de substituição, todos os consumos de cimento por unidade de resistência do CAA são inferiores aos do CAR.
- 6% de substituição: O traço 8 de CAA teve consumo de cimento igual 352,50 kg/m<sup>3</sup> e desenvolveu 75,50 MPa para relação a/c igual à 0,50, enquanto o CAR no traço 7 consumiu 361,79 kg/m<sup>3</sup> e desenvolveu 70,93 MPa para relação a/c 0,31. Sendo assim, o CAA desenvolveu 6,1% mais resistência com consumo de cimento 2,6% menor.

- 12% de substituição: Nesta faixa de substituição, o CAA desenvolveu maior resistência com menor consumo de cimento quando se compara o traço 12 de CAA com o traço 10 do CAR, entretanto a resistência do CAR neste traço pode ser considerada espúria. A comparação entre os consumos de cimento por unidade de resistência foi favorável ao CAA em 4 casos, mesmo as dosagens de CAA terem relação a/c compreendidas entre 0,4 e 0,54 e o CAR valores entre 0,26 e 0,35.
- 18% de substituição: o traço 16 de CAA desenvolveu 68,25 MPa de resistência com consumo de cimento de 307,50kg/m<sup>3</sup> e relação a/c 0,58. O CAR alcançou 67,30 MPa com consumo de cimento de 356,37 e relação a/c de 0,26, ou seja, o CAA desenvolveu 1,4 % mais resistência com consumo de cimento 15,9% menor.

O CAA provavelmente alcançou resistências maiores devido ao fato de que, na etapa da definição do traço, os agregados têm seu esqueleto granular otimizado até que seja encontrado o menor índice de vazios, sendo que na dosagem de CAR, não ocorre essa otimização. Outro fato que contribui para resistências maiores é a melhor moldagem dos corpos de prova, o que diminui a dispersão de resultados e propicia maior aproveitamento da resistência potencial do material.

#### 4.5 ANÁLISE DE CUSTO

A análise dos custos dos concretos foi feita através do levantamento dos valores unitários de cada material, informados pelos fornecedores. Assim como na análise de consumo de cimento e emissão de CO<sub>2</sub>, os valores foram calculados por unidade de resistência (R\$/MPa), - e o valor do calcário pulverizado foi considerado custo nulo, por ser um resíduo do processo de britagem. A Tabela 54 apresenta os custos unitários considerados de cada material e a Tabela 55 os custos por MPa de cada material na composição do CAA, bem como o custo total por MPa para cada m<sup>3</sup>.

**Tabela 54 - Custos dos Materiais**

Material	R\$/kg
Cimento CP V - ARI	0,42
Brita #0	0,02
Areia artificial	0,039
Aditivo SP	10,47
Aditivo P	4,10
Fíler	0,0

Fonte: Fornecedores (2016)

**Tabela 55 - Custos do concreto por traço**

Teor de fíler	Fc 28 dias MPa	Cimento R\$/ MPa	Areia R\$/ MPa	Brita #0 R\$/ MPa	Aditivo P R\$/ MPa	Aditivo SP R\$/ MPa	Fíler R\$/ MPa	Total R\$/ MPa
0%	76,52	2,06	0,35	0,49	0,31	0,70	0,00	3,90
	80,33	2,19	0,33	0,47	0,30	0,67	0,00	3,95
	83,76	2,34	0,32	0,45	0,28	0,64	0,00	4,03
	89,68	2,38	0,30	0,42	0,26	0,60	0,00	3,97
6%	75,55	1,96	0,35	0,50	0,31	0,71	0,00	3,83
	75,39	2,19	0,35	0,50	0,31	0,71	0,00	4,06
	78,17	2,36	0,34	0,48	0,30	0,69	0,00	4,17
	85,34	2,35	0,31	0,44	0,28	0,63	0,00	4,02
12%	75,11	1,85	0,35	0,50	0,31	0,71	0,00	3,72
	73,42	2,10	0,36	0,51	0,32	0,73	0,00	4,03
	74,63	2,31	0,35	0,50	0,32	0,72	0,00	4,21
	82,63	2,28	0,32	0,46	0,29	0,65	0,00	3,99
18%	68,25	1,89	0,38	0,55	0,35	0,78	0,00	3,95
	71,47	2,01	0,37	0,52	0,33	0,75	0,00	3,99
	74,38	2,16	0,35	0,50	0,32	0,72	0,00	4,06
	80,87	2,17	0,33	0,47	0,29	0,67	0,00	3,92

Fonte: O autor (2016)

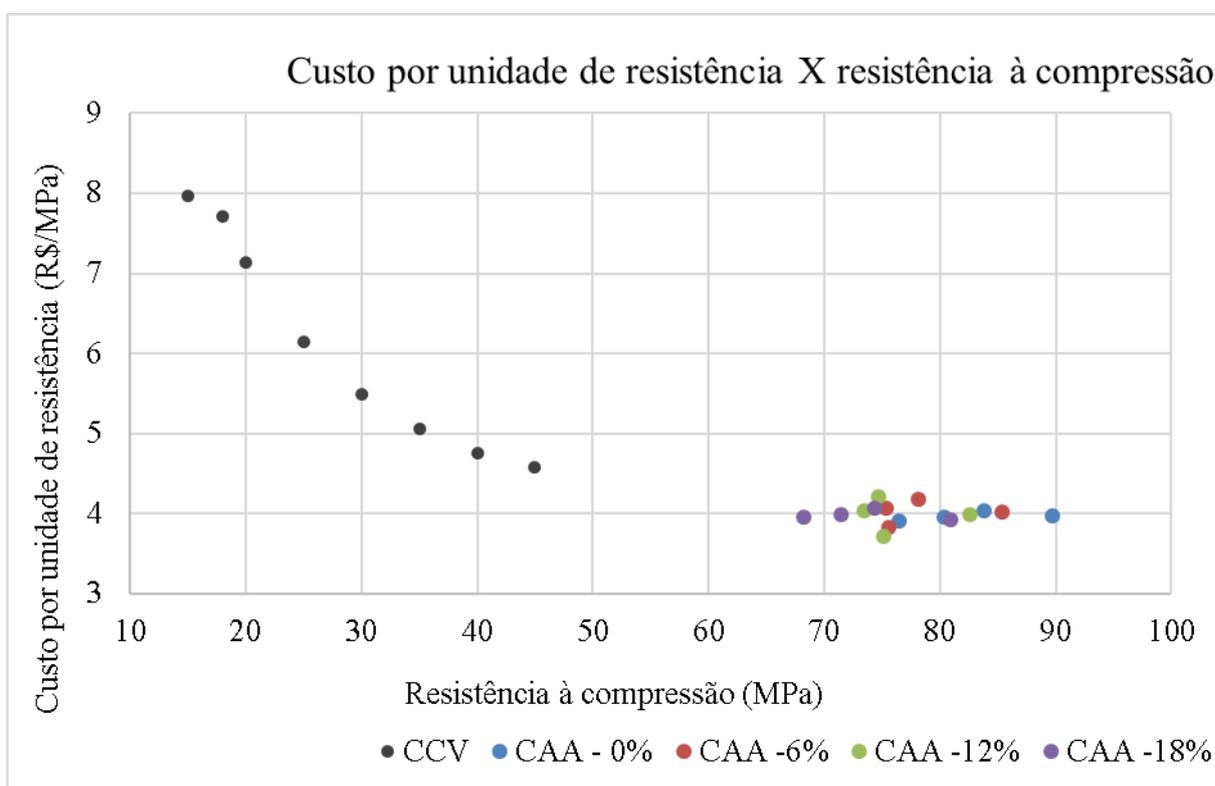
A Tabela 56 apresenta o custo por MPa de CCVs da região de Curitiba, obtidos por Bianchini (2010) e a Figura 56 apresenta a comparação entre estes e os concretos desenvolvidos nesta pesquisa.

**Tabela 56 - Custo médio por MPa para CCV em Curitiba**

fc 28 dias	Custo por MPa
	R\$/MPa
15	7,96
18	7,71
20	7,14
25	6,14
30	5,49
35	5,06
40	4,76
45	4,57

Fonte: Bianchini (2010)

**Figura 56- Comparação entre custo por MPa do CCV e CAA desta pesquisa**



Fonte: O autor (2016), dados de fc até 45MPa adaptados de Bianchini (2010)

É possível observar na Figura 56 que é possível produzir concretos auto adensáveis, de alta resistência, com custo inferior dos CCV. Isto só foi possível de ser alcançado devido à redução do custo relacionado aos altos consumos de fíler calcário, considerados como custo zero. Os altos teores de material fino otimizaram o empacotamento da mistura, compensando a redução do cimento.

A utilização de alto consumo de material fino só foi possível através da utilização de aditivo superplastificante, que tem custo unitário alto. Mesmo com consumos de aditivo SP superiores ao CCV, foi possível reduzir os custos finais dos concretos produzidos, sendo que o menor valor alcançado nesta pesquisa, para 12% de substituição, foi de R\$ 3,72 (três reais e setenta e dois centavos), frente aos R\$ 4,57 (quatro reais e cinquenta e sete reais), menor valor para CCV, representando uma redução de quase 19%.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho tem dois objetivos claros. O primeiro é investigar se é possível confeccionar concretos auto adensáveis utilizando areia 100% artificial, já que a população mundial vem crescendo e juntamente a demanda por matérias primas, em contraste ao esgotamento de jazidas naturais de areia. Outro objetivo é estudar o efeito da substituição do cimento Portland por fíler calcário nos parâmetros resistência, simultaneamente destinando este rejeito do processo de britagem. Através dos procedimentos e resultados do programa experimental, pode-se chegar as seguintes conclusões:

- 1 Considerando as condições e materiais utilizados nesta pesquisa, se conclui ser possível e viável produzir argamassas e pastas de cimento Portland, bem como CAA. Eventuais acréscimos de água devido à utilização areia 100% artificial e fíler calcário podem ser contornados através da utilização de aditivos SP 3º geração ou superiores.
- 2 A adição de fíler calcário na argamassa e pasta de cimento Portland influenciam a consistência destes materiais. Conforme se aumenta o teor de fíler, observa-se redução no espalhamento da argamassa e pasta de cimento Portland. Este fenômeno está associado à superfície específica do fíler calcário.
- 3 O superplastificante age sobre o fíler calcário, sendo que o espalhamento das argamassas e pastas de cimento Portland aumenta conforme o teor de aditivo aumenta. Este comportamento foi observado até 0,9% de aditivo SP, sendo que após este teor os valores se estabilizam. Conclui-se que este valor está próximo do ponto de saturação do aditivo SP para as combinações de cimento Portland e fíler calcário utilizados nesta pesquisa. Para efeito de comparação, o teor de aditivo SP utilizado nos CAA foi de 0,88%.
- 4 É possível produzir argamassas e pastas de cimento Portland, bem como CAA, utilizando adição e substituição de fíler calcário proveniente de britagem de agregado graúdo e miúdo, sem necessidade de peneiramento. Quando utilizado fíler sem peneiramento, a perda de consistência média foi de 3,63% em comparação quando se utiliza fíler peneirado, sendo considerada como estatisticamente insignificante.
- 5 Argamassas produzidas com fíler calcário como substituição parcial de areia tendem a ter sua resistência à compressão aumentada conforme o teor de substituição aumenta. Este comportamento é observado até 12% de substituição da areia artificial e os valores referentes a 18% de substituição são muito próximos aos de 12 %, porém ligeiramente

menores. As comparações múltiplas de médias dos resultados entre 0% e 12%, 0% e 18%, 6% e 12%, para 0,9% de superplastificante, resultaram significantes.

- 6 A utilização de areia 100% artificial juntamente com adição de calcário pulverizado possibilita a concretos autos adensáveis, mesmo com relações  $a/f = 0,27$ , considerada baixa. Os requisitos das normas pertinentes para o estado fresco foram atendidos, para todas as classes de resistência e teores de substituição de fíler, à exceção da viscosidade testada do Funil-V.
- 7 Os CAA produzidos nesta pesquisa geraram CV menores do que concretos similares, utilizando mesmos materiais e faixas de resistência à compressão. Nesta pesquisa, a resistência à compressão aos 28 dias gerou CV médio de 2,23% enquanto Campos (2015) na mesma idade, observou CV médio de 10,82%. Isso comprova o esperado inicialmente, que o CAA gera menores dispersões nos resultados dos ensaios, portanto este tipo de concreto está menos suscetível às falhas de concretagem e promove a diminuição de consumo de cimento devido a diminuição do desvio padrão para o cálculo da resistência de dosagem.
- 8 Com substituição de cimento Portland por fíler calcário foi possível observar tendência de redução na resistência à compressão, lembrando que a relação  $a/c$  também aumentou. Por outro lado, analisando o consumo de cimento por MPa, percebe-se a tendência de diminuir a demanda de cimento por MPa conforme aumenta o teor de fíler. O menor valor encontrado foi de 4,39 kg/MPa para o teor de substituição de 12% no nível de resistência 60 MPa, o que significa redução de 10,4 % no consumo de cimento, com redução de resistência de 1,84%, sendo que esta redução de resistência foi considerada estatisticamente não significativa, mesmo com aumento de relação  $a/c$  de 0,47 para 0,54.
- 9 No CAA, as propriedades de resistência mecânica apresentam uma tendência de redução de valor com a substituição de cimento Portland por calcário pulverizado, porém o efeito da substituição só é significativo para a resistência à compressão. Ou seja, para o módulo de elasticidade e resistência à tração, nos limites estudados e com as dispersões observadas, a substituição de cimento Portland por calcário pulverizado não causou redução nos valores dos parâmetros. A resistência à compressão, para o nível de 90 MPa, apresentou diferença não significativa para as comparações entre 6% e 12% e entre 12% e 18%. Para o nível 80 MPa, as diferenças não são significativas entre 12% e 18%. Já para o nível 70 MPa, não há diferença entre 6% e 12% e entre 12% e 18%. Finalmente para o nível 60 MPa, a resistência à compressão não apresentou diferença para as comparações entre 0% e 6%, 0% e 12%, e

entre 6% e 12%. Desta maneira, 38% das CMM para resistência à compressão resultaram como sendo não significativas, mesmo com acréscimo na relação a/c.

- 10 A substituição do cimento Portland por fíler calcário permitiu a redução do consumo deste aglomerante. Em média, as reduções dos consumos foram de 1,3% para teor de substituição de 6%, 4,9% para teor de 12% e 8,2% de redução para 18% de teor de substituição. As emissões de CO<sub>2</sub> têm os mesmos valores de redução, já que nesta pesquisa estão relacionadas somente ao consumo de cimento.
- 11 A utilização de altos teores de finos permite a produção de CAA com custo competitivo frente ao CCV. O menor custo alcançado por MPa foi de R\$ 3,72 (três reais e setenta e dois centavos), frente aos R\$ 4,57 (quatro reais e cinquenta e sete reais), menor valor para CCV, representando uma redução de quase 19% no custo por MPa.
- 12 O CAA se mostrou competitivo em comparação ao CAR, sendo possível alcançar resistências maiores com menor consumo de cimento mesmo utilizando relação a/c maior. Na comparação mais favorável, o CAA alcançou 18,3% mais resistência com um consumo de cimento 9,1% menor em relação ao CAR, mesmo quando CAA foi dosado com relação a/c de 0,47 e o CAR com relação a/c 0,31. Isso se deve à otimização do esqueleto granular durante a dosagem do CAA e a melhor moldagem dos CPs promovida pela fluidez deste material.
- 13 O método de dosagem utilizado não se mostrou adequado para substituição de cimento Portland por materiais finos, já que esse exige que o teor de argamassa e consumo de aditivo superplastificante sejam mantidos constantes para que os concretos sejam considerados da mesma família. Quando se substitui cimento por fíler mantendo a quantidade de água, a relação a/f e consumo de superplastificante não são alteradas, mas a relação a/c sofre acréscimo. Desta maneira, para manter a relação a/c constante mesmo com a substituição de cimento por fíler, seria necessário diminuir a quantidade de água proporcionalmente ao cimento e aumentar o consumo de superplastificante.

## 6 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

Partindo da análise dos resultados obtidos no programa experimental e reflexões acerca da metodologia utilizada, surgem as seguintes sugestões para pesquisas futuras:

- 1 Analisar a influência do empacotamento de partículas, correlacionando-as com as propriedades no estado fresco e endurecido;
- 2 Otimizar o método de dosagem de Tutikian (2007) para que seja possível produzir CAA substituindo cimento Portland por fíler calcário;
- 3 Estudar as propriedades de durabilidade dos CAA produzidos com 100% de areia artificial, substituição parcial de cimento por fíler e utilizando altos teores de material fino;
- 4 Estudar o impacto ambiental considerando toda a cadeia produtiva do CAA;
- 5 Avaliar os eventuais custos operacionais para utilização do fíler calcário como substituição parcial do cimento Portland de maneira industrial, bem como a viabilidade de se produzir agregados com altos teores de material fino em sua granulometria.
- 6 Estudar a tendência de acréscimo de consumo de cimento por unidade de resistência para o CAA, diferentemente do observado no CCV.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AARRE, T.; DOMONE, P. **Reference concretes for evaluation of test methods for SCC**. Proceedings: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE. Reykjavik: RILEM Publication. 2003. p. p. 495-505.

AÏTCIN, P. C.; JOLICOEUR, C.; MACGREGOR, J. Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. **Concrete International**, v.16, n.5, p42-52, May 1994.

ALBUQUERQUE, A. S.; BAUER L. A. F. Agregados. **Materiais de Construção**, v.1, 2003. p. 63-120.

ALMEIDA, I. R. **Concretos dosados em central, com areia 100% artificial**. Anais do II SUFFIB – Seminário: O uso da fração fina da britagem. São Paulo: [s.n.]. 2005.

ALMEIDA, S. L. M.; ET AL., E. **Produção de areia manufaturada em usina piloto**. Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33: Concreto - Amostragem de concreto fresco**. Rio de Janeiro,1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro,2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75um, por lavagem**. Rio de Janeiro,2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miudo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro,2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo– Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro,2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 5733:** Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro,1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 5735:** Cimento Portland de alto-formo. Rio de Janeiro,1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 5736:** Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro,1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 5737:** Cimentos Portland resistentes à sulfatos. Rio de Janeiro,1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para modagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: [s.n.], 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: [s.n.], 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificações. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222:** Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522:** Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935:** Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro: [s.n.], 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10908** – Aditivos para argamassa e concreto- Ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 11578:** Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768** – Aditivos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653** - Materiais Pozolânicos: Especificações. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 12989:** Cimento Portland de branco - Especificação. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 13116:** Cimento Portland de baixo calor de hidratação - Especificação. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1:** Concreto auto-adensável Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2:** Concreto auto-adensável Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams, Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-3:** Concreto auto-adensável Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4:** Concreto auto-adensável Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5:** Concreto auto adensável – Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V . Rio de Janeiro, 2010.

BARBOSA ET AL, M. T. G. Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 4, out/dez 2008. p. 51-60.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. **Resistência dos materiais**. Pearson Makron Books, 3rd ed, 1995.

BIANCHINI, M. **Análise da influência dos teores de sílica ativa na produção de concretos de alta resistência em central dosadora de concreto**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2010.

BONAVETTI, V. L.; IRASSAR, E. F. The effect of stone dust content in sand. **Cement and Concrete Research**, v.24, n. 3, Jan 1994. 580-590.

BUEST NETO, G. T.; **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland**. Curitiba: Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2006.

CAMPOS, H.F.; **Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland: estudo experimental**. Curitiba: Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2015.

CASTRO, A. L. Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia de concretos de alto desempenho. Tese de doutorado. **USP - EESC**, São Paulo, 2007.

CHAVES, A. P. **Estado da arte da produção de areia de britagem**. In: Anais do SUFFIB – SEMINÁRIO: O uso da fração fina da britagem. São Paulo: [s.n.]. 2005.

CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. Low Carbon Technology Partnership initiative (LCTPi) - Cement: full report - 2015. **CSI**, 2015. Disponível em: <<http://www.wbcsdcement.org/index.php/en/publications>> - Acesso em junho de 2016.

COPPOLA, I. Rheology and mix proportioning of self-compacting concrete. **Industria Italiana del Cemento**, v. 71, n. 2, feb 2001. p. 152-163.

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

DE LARRARD, F. **CONCRETE MIXTURE PORPORTIONING: A SCIENTIFIC APROACH**. London: E & FN Spon, 1999.

DOMONE, P. L. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. **Cement & Concrete Composites**, v. 28, p. 197-208, 2006.

EFNARC. **Specifications and guidelines for self-compacting concrete**. United Kingdon. 2005.

GEYER, A. L. B. **Utilização de concreto auto-adensável em estruturas de edifícios com custos inferiores ao concreto convencional**. 12º Concurso Falcão Bauer. [S.l.]: [s.n.]. 2005.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4th. ed. São Paulo: ATLAS S.A, 2002.

GOLDMAN, A; BENTUR, A. The influence of microfillers on enhancement of concrete strength. **Cement and concrete research**. Vol. 23, USA, 1993. Pp 962-972. Pergamon Press Ltd.

HARTMANN, C. T. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concreto de cimento Portland**. São Paulo: Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 2002.

HOPPE FILHO, J.; ET AL., E. Técnicas de caracterização reológica de concretos. **Revista Concreto e Construções**., n. 47, julho-agosto 2007. p. 108- 123.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Projeção da População. **IBGE**, 2014. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/default.php>>. Acesso em: 29 mar. 2014.

JOLICOEUR, C; SIMARD, M. A. Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physico-chemical concepts. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, 1998.

KHAYAT, K. H.; GUIZANI, Z. Use of viscosity modifying admixture to enhance stability of fluid concrete. **ACI Materials Journal**, July-Aug 1997. p. 332-340.

KLEIN, N. S. **Influência da substituição de areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável.** Dissertação de mestrado: Universidade Estadual de Londrina, 2008.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. Pozzolanic and cementitious materials. **Advances in concrete technology**, Ottawa, v.1, 1996. 191. p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** Estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 2008.

MEIRELES, D. D. **Contribuição aos estudos de uso de aditivos modificadores de viscosidade em concreto auto-densável.** [S.l.]: Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás., 2010.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de file calcário.** [S.l.]: Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

MENDES, S. E. D. S. Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba - Dissertação de mestrado. **UFPR - PPGCEC**, Curitiba, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2 ed. ed. São Paulo: PINI, 1997.

NUNES, S. C. **Betão Auto-Compactável:** Tecnologia e propriedades. Porto: Pós graduação em estruturas de engenharia civil, Faculdade de engenharia, Universidade do porto, 2001.

OKAMURA, H.; OZAWA, K.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Structural Concrete**, v. 1, n. 1, p. 3-17, march 2000. ISSN 1464-4177.

OKAMURA, H. Self-Compacting High Performance concrete. **In: Concrete International**, v. 17, n. 7, jul 1997. p. 50-54.

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

REPETTE, W. L. Concreto de Última geração: Presente e Futuro. **Concreto: Ensino Pesquisa e Realização**, São Paulo, v. 2, 2005. p. 1509-1550.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. T. **Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: FEENG UFRGS, 2003.

ROBSON, C. Real World Research: A resource for social scientist and practitioner researchers. 2nd. ed. [S.l.]: Malden Blackwell Publishers, 2002.

RONCERO, J. **Effects of superplasticizers on the behavior of concretes in the fresh and hardened states**: Implications to high performance concretes. Catalunya: Tese - Escola Tècnica Superior D'Enginyer de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, 2002.

SAFIUDDIN, M. RAMAN, S. N., ZAIN, M. F. M. Effects of Medium Temperature and Industrial By-Products on the Key Hardened Properties of High Performance Concrete. **Materials**, v. 8, no. 12, 2015, p. 8608-8923.

SAKAI, E.; YAMADA, K.; OHTA, A. Molecular structure of dispersion-adsorption mechanisms of comb-type superplasticizers used in Japan. **Journal of advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 1, 2003. p. 16-25.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório anual 2004-2013. **SNIC**, 2014. Disponível em: <[www.snic.org.br](http://www.snic.org.br)>. Acesso em: jun. 2016.

SPENCE, R.; MULLIGAN, H. Sustainable Development and the Construction Industry. **Elsevier Science**, v. 19, n. 3, 1995. p. 279-292.

SUGAMATA, T.; EDAMATSU, Y.; OUCHI, M. **A study of particle dispersing effect of polycarboxylate-base superplasticizers**. INTERNATIONAL RILEM SYPOSIUM ON SELF COMPACTING CONCRETE. France: Rilem Publications. 2003. p. 403-414.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. [S.l.]: Dissertação de mestado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concreto auto-adensável**. Porto Alegre: Tese de doutorado-Programa de Pós-Graduação em engenharia Civil, UFRGS, 2007.

WONG, H. H. C.; KWAN, A. K. H. Packing density of cementitious materials: Part 1 - measurement using a wet packing method. **Materials and Structures**, p. 689-701, 2008.

YURUGI, M.; SAKAI, G. A. A proved QA system for flowable concrete. **Concrete International**, v. 20, n. 10, outubro 1998. p. 44-48.

## **ANEXOS**

**ANEXO A**

Resultados: Consistência da argamassa – Flow Table e Cone de Kantro

TRAÇOS				FLOW TABLE (cm)				MINICONE DE KANTRO (cm)			
	Nº ENSAIO	Fíler	SP	M1	M2	M3	MÉDIA	M1	M2	M3	MÉDIA
<b>BASES</b>	1	0%	-	36,00	37,20	37,00	36,73	5,30	5,50	5,50	5,43
	2	6%	-	33,00	34,30	35,00	34,10	4,30	4,40	4,40	4,37
	3	12%	-	32,90	32,70	32,90	32,83	4,20	4,35	4,35	4,30
	4	18%	-	29,50	30,50	29,50	29,83	3,75	3,85	3,85	3,82
<b>SUPERPLASTIFICANTE</b>	1	0%	0,30%	39,70	40,40	39,40	39,83	10,01	10,10	10,15	10,09
	2	0%	0,60%	45,50	45,00	44,50	45,00	15,10	15,35	15,40	15,28
	3	0%	0,90%	46,50	46,50	46,00	46,33	24,00	27,00	28,50	26,50
	4	0%	1,20%	50,00	50,00	50,00	50,00	20,00	27,00	32,00	26,33
	5	6%	0,30%	38,70	39,50	39,50	39,23	8,65	8,70	8,73	8,69
	6	6%	0,60%	45,00	45,00	45,00	45,00	14,60	14,90	15,00	14,83
	7	6%	0,90%	50,00	50,00	50,00	50,00	8,45	8,51	8,53	8,50
	8	6%	1,20%	50,00	50,00	50,00	50,00	15,25	17,10	17,95	16,77
	9	12%	0,30%	36,50	36,00	36,70	36,40	6,20	6,23	6,30	6,24
	10	12%	0,60%	44,00	44,50	44,00	44,17	13,18	13,20	13,20	13,19
	11	12%	0,90%	43,50	44,00	43,50	43,67	19,00	21,00	22,50	20,83
	12	12%	1,20%	50,00	50,00	50,00	50,00	18,40	19,20	19,80	19,13
	13	18%	0,30%	35,60	36,60	36,00	36,07	7,12	7,15	7,20	7,16
	14	18%	0,60%	42,50	44,50	44,50	43,83	13,50	13,80	13,90	13,73
	15	18%	0,90%	50,00	50,00	50,00	50,00	15,00	16,10	17,30	16,13
	16	18%	1,20%	50,00	50,00	50,00	50,00	23,50	26,50	27,40	25,80

**ANEXO B**

Resultado: Resistência à compressão – Argamassas

<b>RESULTADOS ENSAIOS - CP 5 cm x 10 cm</b>						
<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>FORÇA (N)</b>	<b>RESISTÊNCIA (MPA)</b>	<b>RESISTÊNCIA MÉDIA POR TRAÇO (MPA)</b>	<b>AREIA (%)</b>	<b>PÓ (%)</b>	<b>SP (%)</b>
1	3705	18,8955	20,90	100%	0%	0,00%
	4490	22,899				
2	47653	24,3	21,80	100%	6%	0,00%
	37870	19,3				
3	42485	21,6	20,45	100%	12%	0,00%
	37870	19,3				
4	42485	21,6	23,00	100%	18%	0,00%
	47885	24,4				
5	43640	19,6	20,90	100%	0%	0,30%
	55679	22,2				
6	57832	28,4	28,95	100%	0%	0,60%
	48686	29,5				
7	52120	24,8	25,65	100%	0%	0,90%
	38906	26,5				
8	62797	31,9	31,95	100%	0%	1,20%
	62894	32,0				
9	48043	21,8	23,15	94%	6%	0,30%
	55447	24,5				
10	42565	28,2	24,95	94%	6%	0,60%
	72011	21,7				
11	43531	36,7	29,45	94%	6%	0,90%
	58167	22,2				
12	72156	29,6	33,15	94%	6%	1,20%
	52277	36,7				
13	40750	26,8	23,80	88%	12%	0,30%
	64410	20,8				
14	55360	32,8	30,50	88%	12%	0,60%
	77050	28,2				
15	76596	39,2	39,10	88%	12%	0,90%
	71258	39				
16	72226	36,3	36,55	88%	12%	1,20%
	51785	36,8				
17	48992	26,4	25,70	82%	18%	0,30%
	60152	25				
18	59319	30,6	30,40	82%	18%	0,60%
	73897	30,2				
19	72725	37,6	37,30	82%	18%	0,90%
	72342	37				
20	76777	36,8	37,95	82%	18%	1,20%
	58032	39,1				

### ANEXO C

Resultados: Ensaio determinação do teor de superplastificante em pasta de cimento Portland utilizando fíler peneirado – Minicone de Kantro.

TRAÇOS		MINICONE DE KANTRO (cm)			
	Nº ENSAIO	R1	R2	R3	MÉDIA
0% SP	1	3,1	3,5	3,9	3,5
	2	4,6	4,7	4,8	4,7
	3	4,4	4,4	4,5	4,4
	4	4,0	4,2	4,2	4,2
0,3% SP	5	15,8	15,9	15,9	15,9
	6	15,0	15,2	15,3	15,2
	7	14,9	15,0	15,0	15,0
	8	14,0	14,1	14,2	14,1
0,6% SP	9	17,4	18,3	18,5	18,1
	10	20,2	21,5	21,6	21,1
	11	21,3	22,0	22,6	22,0
	12	20,0	21,0	21,3	20,8
0,9% SP	13	21,9	23,7	23,7	23,1
	14	20,5	23,0	23,5	22,3
	15	23,5	29,5	29,5	27,5
	16	21,0	26,0	26,0	24,3
1,2% SP	17	22,5	21,5	24,5	22,8
	18	21,0	22,5	22,5	22,0
	19	18,8	18,9	20,0	19,2
	20	20,4	20,8	21,0	20,7
1,6% SP	21	18,3	18,6	18,7	18,5
	22	19,2	20,1	20,5	19,9
	23	19,7	20,5	21,2	20,5
	24	19,5	20,0	20,3	19,9

## ANEXO D

Resultados: Ensaio determinação do teor de superplastificante em pasta de cimento Portland – Minicone de Kantro – Pó sem peneiramento

TRAÇOS		MINICONE DE KANTRO (cm)			
	Nº ENSAIO	R1	R2	R3	MÉDIA
0% SP	1	3,1	3,5	3,9	3,5
	2	4,3	4,5	4,9	4,6
	3	4,2	4,4	4,5	4,4
	4	4,3	4,4	4,4	4,4
0,3% SP	5	15,8	15,9	15,9	15,9
	6	12,1	12,1	12,3	12,2
	7	14,1	14,2	14,2	14,2
	8	14,5	14,5	14,6	14,5
0,6% SP	9	17,4	18,3	18,5	18,1
	10	21,1	21,2	21,4	21,2
	11	20,0	20,0	21,1	20,4
	12	21,4	21,4	21,6	21,5
0,9% SP	13	21,9	23,7	23,7	23,1
	14	20,5	20,6	20,6	20,6
	15	22,0	22,2	22,8	22,3
	16	19,6	19,8	20,0	19,8
1,2% SP	17	22,5	21,5	24,5	22,8
	18	20,4	21,0	21,3	20,9
	19	20,0	20,0	20,4	20,1
	20	20,0	20,1	20,1	20,1
1,6% SP	21	18,3	18,6	18,7	18,5
	22	19,0	19,2	19,2	19,1
	23	19,2	19,2	19,3	19,2
	24	19,0	19,1	19,2	19,1

**ANEXO E**

Resultados: Caracterização do CAA no estado fresco.

TRAÇOS		T500	SLUMP FLOW		J-RING		J T500	V FUNNEL		U BOX		L BOX	
RESISTÊNCIA ALVO	% Fíler	s	mm	mm	mm	mm	s	T30	T5MIN	mm	mm	mm	mm
90 MPa	0%	13,5	750	760	740	750	15,0	27,0	53,0	280	280	490	50
	6%	5,3	750	750	760	750	11,3	39,0	59,0	280	280	490	50
	12%	7,4	750	740	760	750	10,8	49,0	70,0	280	280	490	50
	18%	7,3	780	765	760	800	8,9	37,0	46,0	280	280	490	50
80 MPa	0%	11,5	740	740	740	740	9,6	27,0	41,0	280	280	490	50
	6%	5,2	760	760	760	750	8,4	23,7	31,0	280	280	500	50
	12%	11,7	750	755	760	750	12,6	26,5	52,6	280	280	500	50
	18%	7,6	760	765	760	740	10,1	37,0	43,0	280	280	490	50
70 MPa	0%	12,6	750	755	760	750	17,0	1,0	1,4	280	280	490	50
	6%	10,0	750	760	760	755	12,3	35,0	54,0	280	280	490	50
	12%	10,3	760	740	750	760	12,2	54,0	1,0	280	280	490	50
	18%	8,6	760	750	750	760	15,8	57,0	3,4	280	280	490	50
60 MPa	0%	9,5	770	760	770	780	12,5	31,0	55,0	280	280	490	50
	6%	16,2	720	730	730	740	19,2	1,2	1,5	280	280	490	50
	12%	15,2	750	760	755	765	18,5	1,2	1,5	280	280	500	50
	18%	9,0	750	760	760	770	12,8	34,0	55,0	280	280	500	50

Resultados: Resistência à compressão – Parte 1/2

Traço		Força de ruptura (kn)			Resistência à compressão (MPa)		
Resistência Alvo	% substituição	Idade (dias)			Idade (dias)		
		3	7	28	3	7	28
90 MPa	0%	449,6	565,6	689,4	57,24	72,01	87,78
		432,9	539,9	695,8	55,12	68,74	88,59
		467,6	545,4	727,8	59,54	69,44	92,67
	6%	388,8	549,4	667,5	49,50	69,95	84,99
		394,1	501,1	689,5	50,18	63,80	87,79
		399,9	560,0	653,7	50,92	71,30	83,23
	12%	257,8	493,7	657,6	32,82	62,86	83,73
		258,8	514,6	640,7	32,95	65,52	81,58
		272,7	485,1	648,7	34,72	61,76	82,60
	18%	290,7	451,6	650,1	37,01	57,50	82,77
		304,1	461,6	615,5	38,72	58,77	78,37
		299,1	487,3	639,9	38,08	62,04	81,47
80 MPa	0%	349,8	507,0	651,3	44,54	64,55	82,93
		350,1	543,5	679,2	44,58	69,20	86,48
		355,2	499,9	643,1	45,23	63,65	81,88
	6%	200,7	502,4	629,2	25,55	63,97	80,11
		218,5	476,3	614,0	27,82	60,64	78,18
		219,7	466,2	598,6	27,97	59,36	76,22
	12%	202,1	456,9	581,4	25,73	58,17	74,03
		211,4	477,9	579,9	26,91	60,85	73,84
		198,7	449,3	597,1	25,30	57,21	76,03
	18%	352,5	484,6	585,5	44,88	61,70	74,55
		354,2	444,9	566,0	45,10	56,65	72,07
		346,7	442,7	601,0	44,14	56,37	76,52

Resultados: Resistência à compressão – Parte 2/2

Traço		Força de ruptura (kn)			Resistência à compressão		
Resistência Alvo	% substituição	Idade (dias)			Idade (dias)		
		3	7	28	3	7	28
70 MPa	0%	422,1	467,8	639,3	53,74	59,56	81,40
		444,0	496,5	619,9	56,53	63,22	78,93
		405,6	458,1	633,5	51,64	58,33	80,66
	6%	283,8	464,1	588,0	36,13	59,09	74,87
		259,3	478,9	587,1	33,02	60,98	74,75
		239,9	463,9	601,2	30,55	59,07	76,55
	12%	244,1	438,6	594,3	31,08	55,84	75,67
		220,2	395,6	572,5	28,03	50,37	72,89
		246,1	442,2	563,1	31,33	56,30	71,70
	18%	238,8	429,1	566,2	30,40	54,63	72,09
		231,2	415,3	564,1	29,43	52,88	71,82
		237,3	426,3	553,8	30,21	54,28	70,51
60 MPa	0%	342,2	426,6	620,2	43,57	54,32	78,97
		351,3	422,1	596,5	44,73	53,74	75,95
		327,3	466,2	586,4	41,67	59,36	74,66
	6%	256,7	402,6	599,0	32,68	51,26	76,26
		276,6	404,3	610,6	35,22	51,48	77,74
		249,5	424,1	569,5	31,77	54,00	72,50
	12%	194,2	401,2	603,3	24,73	51,08	76,82
		181,7	379,3	590,5	23,13	48,29	75,18
		185,9	405,7	575,8	23,67	51,66	73,31
	18%	180,6	360,3	537,0	22,99	45,87	68,37
		190,6	352,3	534,7	24,27	44,86	68,09
		195,5	344,5	536,5	24,89	43,86	68,31

Resultados: Resistência à tração por compressão diametral – Parte 1/2

Traço		Força de ruptura (kn)	Resistência à tração (MPa)
Resistência Alvo	% substituição	Idade (dias)	Idade (dias)
		28	28
90 MPa	0%	77,82	2,48
		105,4	3,36
		144,0	4,59
	6%	201,1	6,41
		141,5	4,51
		117,0	3,73
	12%	158,8	5,06
		111,1	3,54
		111,4	3,55
	18%	110,8	3,53
		121,7	3,88
		108,6	3,46
80 MPa	0%	54,6	1,74
		105,7	3,37
		104,8	3,34
	6%	178,5	5,69
		114,2	3,64
		102,0	3,25
	12%	133,4	4,25
		123,3	3,93
		150,3	4,79
	18%	98,8	3,15
		137,8	4,39
		108,9	3,47

Resultados: Resistência à tração por compressão diametral – Parte 2/2

Traço		Força de ruptura (kn)	Resistência à tração (MPa)
Resistência Alvo	% substituição	Idade (dias)	Idade (dias)
		28	28
70 MPa	0%	159,7	5,09
		152,2	4,85
		106,7	3,40
	6%	121,7	3,88
		105,4	3,36
		136,8	4,36
	12%	118,9	3,79
		110,1	3,51
		86,3	2,75
	18%	145,9	4,65
		91,9	2,93
		85,7	2,73
60 MPa	0%	121,7	3,88
		97,3	3,10
		101,7	3,24
	6%	84,7	2,70
		98,2	3,13
		163,2	5,20
	12%	107,0	3,41
		69,7	2,22
		141,2	4,50
	18%	146,5	4,67
		75,6	2,41
		91,3	2,91