



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

THAÍS PINTO LÔBO SIQUEIRA

**USO DE FINOS DE ROCHA GRANÍTICA (FRG) E AREIA DE
BRITAGEM, PRODUZIDOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE
SALVADOR (RMS), PARA A PRODUÇÃO DE CONCRETO
AUTOADENSÁVEL**

Salvador
2020

THAÍS PINTO LÔBO SIQUEIRA

**USO DE FINOS DE ROCHA GRANÍTICA (FRG) E AREIA DE
BRITAGEM, PRODUZIDOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE
SALVADOR (RMS), PARA A PRODUÇÃO DE CONCRETO
AUTOADENSÁVEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Vêras Ribeiro

Co-orientador: Prof. Dr. Cléber Marcos Ribeiro Dias

Agência Financiadora: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)

Salvador

2020

Pinto Lobo Siqueira, Thais
USO DE FINOS DE ROCHA GRANÍTICA (FRG) E AREIA DE
BRITAGEM, PRODUZIDOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE
SALVADOR (RMS), PARA A PRODUÇÃO DE CONCRETO
AUTOADENSÁVEL / Thais Pinto Lobo Siqueira. --
Salvador, 2020.
195 f. : il

Orientador: Daniel Véras Ribeiro.
Coorientador: Cleber Marcos Ribeiro Dias.
Dissertação (Mestrado - Mestrado em Engenharia
Civil) -- Universidade Federal da Bahia, Escola
Politécnica, 2020.

1. Concreto Autoadensável. 2. Argamassa
Autoadensável. 3. Fino de rocha granítica. 4. Areia de
britagem. I. Véras Ribeiro, Daniel. II. Marcos
Ribeiro Dias, Cleber. III. Título.

THAÍS PINTO LÔBO SIQUEIRA**USO DE FINOS DE ROCHA GRANÍTICA (FRG) E AREIA DE BRITAGEM, PRODUZIDOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE SALVADOR (RMS), PARA A PRODUÇÃO DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

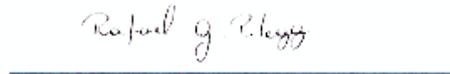
Dissertação de mestrado apresentada como requisito para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Daniel Vêras Ribeiro - Orientador
Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais pela UFSCar
PPEC - UFBA



Prof. Dr. Cleber Marcos Ribeiro Dias - Coorientador
Doutor em Engenharia de Construção Civil e Urbana pela USP
PPEC - UFBA



Prof. Dr. Rafael Giuliano Pileggi
Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais pela UFSCar
PPGEC – USP



Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Doutor em Engenharia Civil pela UPC-ETSECCPB
PPGEC-UFES



Profa. Dr. Vanessa Silveira Silva
Doutora em Ciências e Engenharia de Materiais pela USP
MEE-UFBA

Dedico esta dissertação aos meus irmãos Bruno, Gabriel e Rafael por me ensinarem a amar e ver o lado bom da vida todos os dias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe e Deco por todo o amor e incentivo que recebi ao longo desta caminhada. Obrigada por acreditarem em mim quando eu não conseguia e obrigada por me levantarem a cada tropeço neste caminho, se cheguei até aqui devo a vocês.

Ao meu pai e Renata por todo carinho, amor e paciência que tiveram comigo ao longo desses dois anos, principalmente por torcerem pela minha vitória e entenderem quando precisei me fazer ausente em momentos especiais. Esse amor me fez chegar mais longe.

Aos meus irmãos, Bruno, Gabriel e Rafael, por serem os maiores professores que tenho na vida, por me ensinarem a amar cada dia mais, por me mostrarem que o mais importante da vida não tem preço e por fazerem meu mundo mais colorido e feliz. Sem vocês nada disso teria sentido, vocês são a razão de eu não ter desistido ao longo do caminho.

Agradeço aos meus avós, tios e primos pela torcida e por comemorarem comigo cada vitória.

Ao professor Dr. Daniel Vêras pela orientação e infraestrutura disponibilizada para realização da pesquisa, mas, acima de tudo, agradeço pela oportunidade de ter ingressado no mundo da pesquisa como bolsista de iniciação científica em 2013. Através desta oportunidade o mundo de materiais de construção se abriu pra mim e eu encontrei algo que amo fazer. Obrigada por acreditar em mim desde então.

Ao professor Dr. Cléber Dias, pela paciência e disponibilidade ao longo desses dois anos, pelas correções, sugestões e dicas e, principalmente, por todo apoio emocional e torcida que recebi nos momentos em que me encontrava mais nervosa ou angustiada. Saber que o senhor acreditava em mim fazia com que eu acreditasse também e, para isso, não tenho agradecimentos suficientes.

À Alexandre, por ter caminhado ao meu lado desde o início da graduação, por me apoiar nos piores momentos e comemorar os melhores,

pela paciência ao longo de todos esses anos e, principalmente, por me acalmar nos momentos em que nada parecia dar certo.

À Carolina Alves, Marianna Loureiro, João Pedro Virgili e Renan Barreto pela amizade e companheirismo. Obrigada por me ensinarem o verdadeiro significado da palavra amizade, vocês são meus quatro pilares de sustentação.

Aos colegas do LEDMa, obrigada por todos os ensinamentos e risadas compartilhadas ao longo desses anos. Foi incrível trabalhar com vocês.

À Nilson Amorim, por toda ajuda, suporte e auxílio físico, intelectual e emocional ao longo desses anos. Me faltam palavras para agradecer tudo que fez por mim, me orgulho de dizer que além de colegas hoje somos amigos.

À Bruna, por ser o oposto de mim e, por isso, termos cultivado uma amizade tão bonita e sincera ao longo dos anos. À Tiago, Silas, José, Henrique, Gessivaldo, Igor e Thays pela ajuda nas moldagens mas, principalmente, pela amizade construída, pelos bons momentos compartilhados e pelo apoio nos maus momentos. Sem ajuda de cada um de vocês eu não teria chegado tão longe.

À Ana Lucia, pela ajuda nas moldagens, pelo bom humor contagiante e por me fazer enxergar as coisas de uma forma mais positiva mesmo quando dava tudo errado.

Ao técnico Paulo por toda ajuda e orientação desde a iniciação científica.

Aos professores Rafael Pileggi, João Luiz Calmon e Vanessa Silva por participarem da minha defesa em meio à pandemia histórica de COVID-19.

À CAPES pelo financiamento durante todo o mestrado.

*“Live your life with arms wide open
Today is where your book begins
The rest is still unwritten.”*
(Natasha Bedingfield)

RESUMO

O concreto autoadensável (CAA), por possuir a habilidade de fluir sob ação do peso próprio, surge como possível solução para concretagem de estruturas densamente armadas e com formas arquitetônicas complexas, de maneira a garantir a durabilidade e segurança das estruturas. Para garantir as propriedades reológicas necessárias, o CAA utiliza aditivos superplastificantes e/ou modificadores de viscosidade, além de um elevado teor de finos. A utilização de finos de rocha granítica (FRG) surge como alternativa eficaz, uma vez que sua incorporação auxilia na obtenção das propriedades necessárias. Além do FRG, a areia de britagem (AB) pode ser utilizada em substituição parcial à areia natural, com o objetivo de reduzir os impactos ambientais e sociais relacionados à sua excessiva extração. Sendo assim, o presente trabalho visa estudar a dosagem de CAAs, com adição do FRG e substituição parcial da areia natural por AB, a fim de obter misturas com parâmetros reológicos e desempenho no estado endurecido adequados visando eliminar a necessidade da incorporação do aditivo modificador de viscosidade. Primeiramente foi realizada a caracterização do FRG, seguida das análises em pasta para determinação dos teores de finos a serem utilizados e do estudo da distância entre partículas (IPS). Na sequência, foram realizadas as análises em estado fresco em argamassas autoadensáveis por ensaios de mini funil-V e mini *slump test*. Em CAAs, as análises em estado fresco se deram através dos ensaios de *slump test*, T_{500} , índice de estabilidade visual, funil-V, caixa-L, anel J e coluna de segregação. Para as misturas de argamassas e CAAs foi analisada, ainda, a espessura máxima de pasta (MPT) que indica a separação entre os agregados da mistura e auxilia no entendimento do comportamento em estado fresco das formulações, além da análise de custo de cada mistura. Por fim, foram avaliadas as propriedades no estado endurecido, por meio da verificação da resistência à compressão axial e à tração na flexão, absorção de água por capilaridade e porosidade e densidade aparentes. Para os CAAs foi analisada, ainda, a retração por secagem dos corpos de prova e os Indicadores intensidade de ligante (IL) e intensidade de CO_2 (IC) foram calculados. Os resultados mostram que as misturas com incorporação simultânea do FRG e da areia de britagem apresentaram desempenho mecânico equivalente às formulações de referência. Além disso, verificou-se que a incorporação do FRG é o fator com maior influência sobre o aumento da viscosidade e redução da porosidade aparente e absorção de água por capilaridade das matrizes analisadas, enquanto a areia de britagem não possui influência significativa. Percebe-se, ainda, que todas as misturas estudadas, com incorporação isolada e simultânea de FRG e areia de britagem apresentaram menor retração por secagem quando comparadas às formulações de referência. Quanto ao custo, as formulações com incorporação simultânea dos dois materiais apresentaram custo equivalente aos das misturas de referência com comportamento reológico mais satisfatório. Com a incorporação de FRG obteve-se, ainda, uma redução significativa do IL e IC, reduzindo o impacto ambiental das formulações.

Palavras-chave: Concreto Autoadensável. Argamassa Autoadensável. Fino de rocha granítica. Areia de britagem.

ABSTRACT

Because of its ability to flow under its own weight, self-compacting concrete (SCC) appears as a possible solution for the assembly of densely reinforced concrete structures with complex architectural forms, to guarantee the safety and durability of these structures. To guarantee the rheological properties, the SCC uses superplasticizers and/or viscosity modifiers additives, besides a high content of fines. The use of granitic rock fines (GRF) emerges as an effective alternative, since its incorporation assists the achievement of the properties needed. In addition to the GRF, manufactured sand (MS) can partially replace natural sand, to reduce the environmental and social impacts related to its excessive extraction. Thus, the present work studies the dosage of SCCs, with addition of GRF and partial replacement of natural sand by MS, to obtain mixtures with satisfactory rheological parameters and performance in hardened state, aiming to eliminate the usage of viscosity modifier. First, the GRF was characterized, followed by paste analysis to determine the levels of fines to be used and the analysis of Interparticle Separation Distance (IPS) was carried out. Subsequently, fresh analyzes were carried out on self-compacting mortars by mini-V funnel and mini slump flow test. In SCCs, the analyzes carried out in fresh state were the slump test, T500, visual stability index, V-funnel, L-box, J-ring and segregation column. For mortars and SCCs mixtures, the Maximum paste thickness (MPT) was also analyzed, which shows the separation distance between the aggregates of the mixture and helps to understand the fresh state behavior of the formulations, besides the cost analysis of each mixture. Finally, properties in the hardened state were evaluated by assessing the resistance to axial compression and tensile flexion, water absorption by capillarity and apparent porosity and density. For SCCs, the drying shrinkage of the specimens was also analyzed and the Indicator of binder intensity (IB) and CO₂ intensity (IC) were calculated. The results show that mixtures with simultaneous incorporation of GRF and manufactured sand showed mechanical performance equivalent to the reference formulations. In addition, it was found that the addition of GRF is the factor with the greatest influence on the increase in viscosity and reduction of apparent porosity and water absorption by capillarity of the analyzed matrices, while the manufactured sand has no significant influence. It is also noticed that all the studied mixtures, with isolated and simultaneous incorporation of GRF and manufactured sand, presented less shrinkage when compared to the reference formulations. As for the cost, the formulations with simultaneous incorporation of the two materials presented an equivalent cost when compared to the reference mixtures with a better rheological behavior. With incorporating GRF, there was also a significant reduction in IB and IC, reducing the environmental impact of the formulations.

Keywords: Self-compacting concrete. Self-compacting mortar. Fine granitic rock. Manufactured sand

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Comportamento básico dos fluidos independentes do tempo de diferentes modelos reológicos.....	7
Figura 2. Esquema representativo das partículas (a) em contato e (b) separadas por uma distância D devido à presença de um fluido em volume suficiente para recobrir a superfície das partículas e preencher completamente os poros.	9
Figura 3. Ponte Shin-kiba Ohashi, edificada em 1991 e, (B) ancoradouro 4A da ponte Akashi-Kaikyo, construída em 1998, ambos no Japão.	12
Figura 4. Fundações do Burj Khalifa, em construção no ano de 2009. ...	13
Figura 5. (a) Taipei 101 (Taiwan), (b) Trump Tower (Chicago), (c) Infiniti Tower (Dubai), (d) Torre Um, World Trade Center (Nova Iorque).....	14
Figura 6. Comportamento reológico do concreto, segundo sua aplicação	16
Figura 7. Mecanismo de bloqueio da passagem do concreto ao redor das armaduras.....	17
Figura 8. Mecanismo para obtenção de autoadensabilidade relacionando propriedades da argamassa com a habilidade passante do concreto autoadensável.....	18
Figura 9. Comparativo de custos entre o sistema que utilize concreto convencional e o concreto autoadensável para f_{ck} de 20 MPa	28
Figura 10. Pilha de finos de rocha disposta em pátio de uma pedreira. ...	29
Figura 11. Consumo anual de agregados, no Brasil, em milhões de toneladas.	35
Figura 12. Fluxograma das etapas que compõem a presente pesquisa.	44
Figura 13. Fluxograma do método de dosagem proposto por Repette-Melo.....	49
Figura 14. Ensaio de espalhamento das pastas de cimento (A) Mini cone de Kantro e (B) Exemplo de pasta após espalhamento.....	51

Figura 15. Tempo de escoamento das pastas em função do teor de superplastificante utilizado.	52
Figura 16. Comparação da curva de distribuição ideal (vermelha) e da curva de distribuição dos materiais utilizados (azul), por meio do software EMMA.....	54
Figura 17. Zona ideal da distribuição granulométrica para o agregado miúdo, proposta pelo método Repette-Melo.....	54
Figura 18. Zona ideal da distribuição granulométrica para o agregado graúdo, proposta pelo método de Repette-Melo.	57
Figura 19. Dimensões dos aparatos sugeridos pela EFNARC (de ensaios de <i>mini slump test</i> , à esquerda e mini Funil-V, à direita)	62
Figura 20. Esquema das classes do índice de estabilidade visual (IEV) 64	
Figura 21. Ilustração da Caixa-L e indicação das alturas H_1 e H_2	65
Figura 22. Ilustração e medidas da Coluna de Segregação.....	67
Figura 23. Ensaio de retração por secagem em andamento.....	69
Figura 24. Distribuição do tamanho de partículas do cimento e do FRG. 76	
Figura 25. Distribuição do tamanho de partículas das areias natural e de britagem e da brita.	76
Figura 26. Distribuição discreta do tamanho de partículas do cimento e do FRG.	77
Figura 27. Distribuição discreta do tamanho de partículas das areias natural e de britagem e da brita.	78
Figura 28. Difrátograma de raios-X, com a identificação das fases cristalinas do cimento utilizado.....	79
Figura 29. Difrátograma de raios-X, com a identificação das fases cristalinas do FRG utilizado.....	81
Figura 30. Micrografia eletrônica de varredura (MEV) dos finos de rocha granítica.	82

Figura 31. Curva de Abrams construída segundo a NBR 7215 (ABNT, 1996), utilizando cimento CP II-F 40.	83
Figura 32. Análise visual de pastas com diferentes teores de FRG: (a) fluído, (b) ótimo e (c) seco.....	85
Figura 33. Exemplos de ensaios com (A) exsudação em excesso e (B) sem exsudação.....	85
Figura 34. Ponto de saturação do aditivo superplastificante para as pastas com diferentes relações água/cimento.....	87
Figura 35. Análise das proporções entre areia natural e areia de britagem pelo software EMMA.....	89
Figura 36. Análise das proporções de areia natural x areia de britagem e a zona ideal proposta pelo método Repette-Melo.	90
Figura 37. Aspecto da argamassa com relação a/c de 0,63, contendo 45% FRG, 100% areia natural e 1,2% de aditivo superplastificante..	92
Figura 38. Espalhamento das argamassas autoadensáveis com acréscimo de 5% de FRG nas argamassas com relações a/c iguais a (A) 0,46 e (B) 0,42.....	93
Figura 39. Aspecto da argamassa com relação a/c de 0,63, contendo 40% FRG, 100% areia natural e 2% de aditivo superplastificante.....	95
Figura 40. Teores de aditivo adotados para as argamassas com relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	97
Figura 41. Tempos de escoamento das argamassas com relações a/c iguais a 0,63, 0,46 e 0,42, obtidos por meio do ensaio do mini funil-V.	99
Figura 42. Tempos de escoamento, com variação no IPS, das argamassas com relações água/cimento iguais a (A) 0,63, (B) 0,46 e (C) 0,42.	102
Figura 43. Tempos de escoamento, com variação no MPT, das argamassas com relações água/cimento iguais a (A) 0,63, (B) 0,46 e (C) 0,42.	103

Figura 44. Visualização da ocorrência (A) de exsudação e (B) concentração de agregado miúdo no centro do espalhamento nas argamassas com baixo tempo de escoamento.....	104
Figura 45. Teores de ar para as argamassas com relações a/c iguais a (A) 0,63, (B) 0,46 e (C) 0,42.	105
Figura 46. Densidade aparente das argamassas, em função da relação a/c e dos teores de FRG e areia de britagem.....	107
Figura 47. Porosidade aparente das argamassas estudadas	108
Figura 48. Coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas estudadas.	109
Figura 49. Resistência à tração na flexão para as argamassas com relações a/c de (A) 0,63, (B) 0,46 e (C) 0,42.	111
Figura 50. Resistência à compressão para as argamassas com relações a/c de (A) 0,63, (B) 0,46 e (C) 0,42.	114
Figura 51. Custo por m ³ das argamassas estudadas com relação a/c iguais a 0,63, 0,46 e 0,42, apresentando incorporação de FRG e AB (isolada e simultânea).	117
Figura 52. Teores de aditivo adotados para os CAAs com relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	121
Figura 53. Tempo de escoamento (T ₅₀₀) para os CAAs com relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	123
Figura 54. Tempo de escoamento, pelo método do Funil V, para os CAAs com relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	125
Figura 55. Habilidade passante, avaliada por meio do método do Anel J, para os CAAs com relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	128
Figura 56. Habilidade passante, avaliada por meio do método da Caixa L, para os CAAs com relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	130
Figura 57. Análise da segregação, pelo IEV, dos CAAs com relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	131

Figura 58. Exemplos de misturas de CAA com índices de estabilidade visual (IEV) iguais a 0 e 1, respectivamente.....	132
Figura 59. Análise da segregação, avaliada pelo ensaio de coluna de segregação, dos CAAs com relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	132
Figura 60. Densidade aparente dos concretos autoadensáveis, em função da relação a/c e dos teores de FRG e areia de britagem.	134
Figura 61. Porosidade aparente dos concretos autoadensáveis, em função da relação a/c e dos teores de FRG e areia de britagem.....	135
Figura 62. Absorção de água por capilaridade dos concretos autoadensáveis, em função da relação a/c e dos teores de FRG e areia de britagem.....	136
Figura 63. Resistência à tração na flexão para os CCAs com relações a/c de (A) 0,63, (B) 0,46 e (C) 0,42.....	138
Figura 64. Resistência à compressão axial dos CCAs com relações a/c de (A) 0,63, (B) 0,46 e (C) 0,42.....	141
Figura 65. Retração por secagem dos CAAs com relações a/c iguais a (A) 0,63, (B) 0,46 e (C) 0,42.	144
Figura 66. Custo final dos concretos estudados.	146
Figura 67. Índice IL dos concretos autoadensáveis estudados.	148
Figura 68. Índice IL para dados internacionais, brasileiros e da presente pesquisa.	148
Figura 69. Índice IC dos concretos autoadensáveis estudados.	149
Figura 70. Índice IC para dados internacionais, brasileiros e da presente pesquisa.	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais métodos de dosagem de CAA.	39
Tabela 2 - Caracterização físico-química do aditivo superplastificante Hyperkem 80, fornecida pela Novakem.....	44
Tabela 3 - Classificação do CAA e suas aplicações.	57
Tabela 4 - Classes de índice de estabilidade visual (IEV).....	64
Tabela 5 – Custos dos materiais utilizados na produção dos concretos analisados.....	71
Tabela 6 – Propriedades físicas do cimento, FRG, areia natural e AB utilizados.....	75
Tabela 7 – Composições químicas, em óxidos, do cimento e dos FRG, obtidas por FRX.....	78
Tabela 8 - Teores quantitativos das principais fases cristalinas e teor de amorfo do cimento, obtidos pelo método de Rietveld (R_{wp} igual a 9,14).....	80
Tabela 9 - Teores quantitativos das principais fases cristalinas e teor de amorfo do FRG, obtidos pelo método de Rietveld (R_{wp} igual a 12,5).....	81
Tabela 10 - Teores de adição FRG e o índice de exsudação (IE).....	86
Tabela 11 – Resultado de $Pofg$ e IPS das pastas analisadas, com diferentes relações água/cimento.....	88
Tabela 12 - Análise do volume de areia em relação ao volume de argamassa e classificação do comportamento reológico quanto aos ensaios de mini slump e mini funil-V.	91
Tabela 13 - Consumo dos materiais de cada dosagem estudada (kg/m^3).	94
Tabela 14 – Resultado de $Pofg$ e máxima espessura de pasta (MPT) das argamassas analisadas	96
Tabela 15 - Consumo dos materiais, por m^3 , para cada traço de concreto estudado.	119

Tabela 16 – Resultado de <i>Pofg</i> e MPT dos concretos analisados	120
Tabela 17 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento das argamassas com incorporação de FRG em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.	173
Tabela 18 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento das argamassas com incorporação de areia de britagem em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	173
Tabela 19 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento das argamassas com incorporação de areia de britagem e FRG em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	174
Tabela 20 - Análise ANOVA dos resultados de teor de ar incorporado das argamassas estudadas.	174
Tabela 21 - Análise ANOVA dos resultados de densidade aparente das argamassas com incorporação de FRG em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	175
Tabela 22 - Análise ANOVA dos resultados de densidade aparente das argamassas com incorporação de AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	175
Tabela 23 - Análise ANOVA dos resultados de densidade aparente das argamassas com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	176
Tabela 24 - Análise ANOVA dos resultados de porosidade aparente das argamassas com incorporação de FRG em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	176
Tabela 25 - Análise ANOVA dos resultados de porosidade aparente das argamassas com incorporação de AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	177
Tabela 26 - Análise ANOVA dos resultados de porosidade aparente das argamassas com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	177

Tabela 27 - Análise ANOVA dos resultados de absorção de água por capilaridade das argamassas com incorporação de FRG em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.178

Tabela 28 - Análise ANOVA dos resultados de absorção de água por capilaridade das argamassas com incorporação de AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.178

Tabela 29 - Análise ANOVA dos resultados de absorção de água por capilaridade das argamassas com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.179

Tabela 30 - Análise ANOVA dos resultados de resistência à tração na flexão das argamassas com diferentes relações a/c.180

Tabela 31 - Análise ANOVA dos resultados de resistência à compressão das argamassas com diferentes relações a/c.....181

Tabela 32 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento (T_{500}) dos CAAs com incorporação de FRG em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.....183

Tabela 33 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento (T_{500}) dos CAAs com incorporação de AB em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.....183

Tabela 34 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento (T_{500}) dos CAAs com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.....184

Tabela 35 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento pelo funil V dos CAAs com incorporação de FRG em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.....184

Tabela 36 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento pelo funil V dos CAAs com incorporação de AB em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.....185

Tabela 37 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento pelo funil V dos CAAs com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.....185

Tabela 38 - Análise ANOVA dos da habilidade passante pelo método do anel J dos CAAs com incorporação de FRG em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.186

Tabela 39 - Análise ANOVA dos da habilidade passante pelo método do anel J dos CAAs com incorporação de AB em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.186

Tabela 40 - Análise ANOVA dos da habilidade passante pelo método do anel J dos CAAs com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.....187

Tabela 41 - Análise ANOVA dos da habilidade passante pelo método da caixa L dos CAAs com incorporação de FRG em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42187

Tabela 42 - Análise ANOVA dos da habilidade passante pelo método da caixa L dos CAAs com incorporação de AB em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42188

Tabela 43 - Análise ANOVA dos da habilidade passante pelo método da caixa L dos CAAs com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.....188

Tabela 44 - Análise ANOVA dos resultados de densidade aparente dos CAAs com incorporação de FRG em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.189

Tabela 45 - Análise ANOVA dos resultados de densidade aparente dos CAAs com incorporação de AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.189

Tabela 46 - Análise ANOVA dos resultados de densidade aparente dos CAAs com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.190

Tabela 47 - Análise ANOVA dos resultados de porosidade aparente dos CAAs com incorporação de FRG em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	190
Tabela 48 - Análise ANOVA dos resultados de porosidade aparente dos CAAs com incorporação de AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	191
Tabela 49 - Análise ANOVA dos resultados de porosidade aparente dos CAAs com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	191
Tabela 50 - Análise ANOVA dos resultados de absorção de água por capilaridade dos CAAs com incorporação de FRG em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	192
Tabela 51 - Análise ANOVA dos resultados de absorção de água por capilaridade dos CAAs com incorporação de AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	192
Tabela 52 - Análise ANOVA dos resultados de absorção de água por capilaridade dos CAAs com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.	193
Tabela 53 - Análise ANOVA dos resultados de resistência à tração na flexão dos CAAs com diferentes relações a/c.	194
Tabela 54 - Análise ANOVA dos resultados de resistência à compressão das argamassas com diferentes relações a/c.	195

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAA	Concreto Auto Adensável
FRG	Finos de Rocha Granítica
AB	Areia de Britagem
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Cimento Portland
DRX	Difração de raios X
FRX	Fluorescência de raios X
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
EFNARC	European Federation of National Associations Representing for Concrete
EMMA	Elkem Materials – Mixture Analyzer
ANOVA	Análise de Variância
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção
UFBA	Universidade Federal da Bahia
IFBA	Instituto Federal da Bahia
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ix
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xvii
LISTA DE TABELAS	xxiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xxix
SUMÁRIO	xxxí
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. REOLOGIA.....	5
2.1.1. Modelos reológicos	5
2.1.2. Influência da distância entre partículas (IPS) e da máxima espessura de pasta nos agregados (MPT)	9
2.2. CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....	11
2.2.1. Histórico.....	11
2.2.2. Propriedades no estado fresco	14
2.2.3. Propriedades no estado endurecido	22
2.2.4. Vantagens do CAA	26
2.3. USO DOS FINOS DE ROCHA COMO ADIÇÃO MINERAL	28
2.4. USO DA AREIA DE BRITAGEM EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL À AREIA NATURAL	33
2.5. MÉTODOS DE DOSAGEM	39
3. MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1. MATERIAIS	43
3.1.1. Cimento	43
3.1.2. Agregados (Areia e Brita) Naturais	43
3.1.3. Água	43
3.1.4. Finos de rocha granítica e areia de britagem	43
3.1.5. Aditivo Superplastificante.....	44
3.2. MÉTODOS	44
3.2.1. Caracterização dos materiais empregados	45

3.2.2. Dosagem das argamassas e concretos autoadensáveis.	49
3.2.3. Ensaio de avaliação das argamassas autoadensáveis no estado fresco.....	61
3.2.4. Ensaio de avaliação dos concretos autoadensáveis no estado fresco.....	63
3.2.5. Ensaio de avaliação das argamassas e dos concretos autoadensáveis no estado endurecido.	67
3.2.6. Análise de custo.	71
3.2.7. Indicadores IC (Intensidade de CO ₂) e IL (Intensidade de ligantes).....	72
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	75
4.1.1. Caracterização Física	75
4.1.2. Caracterização Química	78
4.1.3. Caracterização Mineralógica.....	79
4.1.4. Caracterização Morfológica	82
4.2. CURVA DE ABRAMS.....	82
4.3. DOSAGEM DAS PASTAS.....	84
4.3.1. Teores de adição FRG.....	84
4.3.2. Ponto de saturação do aditivo superplastificante	86
4.3.3. Análise da fração de poros e da distância de separação entre partículas (IPS).....	87
4.4. DOSAGEM DAS ARGAMASSAS	89
4.4.1. Determinação da proporção ideal entre areia natural e areia de britagem..	89
4.4.2. Definição do volume de areia e ajuste final do teor de FRG	90
4.4.3. Análise da fração de poros e da máxima espessura de pasta	96
4.4.4. Teor de aditivo superplastificante.....	97
4.4.5. Caracterização das argamassas autoadensáveis em estado fresco.....	99
4.4.6. Caracterização das argamassas autoadensáveis em estado endurecido.....	106
4.4.7. Análise do custo das argamassas estudadas	117

4.5. DOSAGEM DOS CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS	118
4.5.1. Dosagem final e consumo de materiais	118
4.5.2. Análise da fração de poros e da máxima espessura de pasta ...	119
4.5.3. Teor de aditivo superplastificante.....	120
4.5.4. Caracterização dos concretos autoadensáveis no estado fresco.....	122
4.5.5. Caracterização dos concretos autoadensáveis em estado endurecido.....	134
4.5.6. Análise do custo dos concretos estudados	145
4.5.7. Indicadores intensidade de ligante (IL) e intensidade de CO ₂ (IC) dos concretos autoadensáveis	147
5. CONCLUSÕES	151
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	155
7. REFERÊNCIAS	157
APÊNDICE A.....	173
APÊNDICE B.....	183

1 INTRODUÇÃO

A qualidade, resistência mecânica, durabilidade e vida útil das estruturas de concreto, material de construção mais consumido na atualidade, dependem diretamente de um adequado adensamento. Ou seja, mesmo que a dosagem, a mistura e a escolha dos materiais constituintes sejam feitas de maneira correta, o resultado final da concretagem depende da qualidade da compactação, pois, um adensamento realizado de forma ineficiente pode resultar em falhas de concretagem, comprometendo o desempenho dos elementos estruturais.

Esses problemas são agravados quando as estruturas são densamente armadas ou possuem formas que dificultam o acesso dos trabalhadores para realizar a compactação de maneira correta. Neste cenário, o concreto autoadensável (CAA) surge como uma solução viável no intuito de aumentar a produtividade e a qualidade final da concretagem, desde que a dosagem e a mistura sejam feitas de maneira adequada. Por ter a capacidade de se adensar por ação do peso próprio, sem necessidade de energia de compactação externa, o concreto autoadensável consegue fluir entre as armaduras sem que ocorra segregação dos materiais, ocupando os espaços vazios de maneira homogênea. Para que tenha essa propriedade, o CAA precisa apresentar fluidez e viscosidade adequadas, além de resistência à segregação (FELEKOGLU, 2007).

A utilização de concretos autoadensáveis apresenta diversas vantagens, porém, devido ao seu custo mais alto quando comparado ao dos concretos tradicionais, este material enfrenta diversas barreiras na expansão de sua aplicação. Assim sendo, estudos que visem reduzir o custo deste material e ampliar sua utilização possuem grande importância técnica e econômica (HO *et al.*, 2002).

Para que seja possível a obtenção de concretos autoadensáveis com desempenho reológico satisfatório, é necessário que estes materiais possuam um elevado teor de finos. Na literatura existem diversos estudos sobre a influência da incorporação de finos de rocha de calcário e basalto nas propriedades de concretos e argamassas. Entretanto, pouco se vê acerca da utilização de finos de rocha granítica, provenientes de pedreiras, como adição para argamassas e concretos autoadensáveis, existindo alguns estudos sobre a incorporação deste material

quando proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais (KARMEGAM, KALIDASS e ULAGANATHAN, 2014; SADEK, EL-ATTAR e ALI, 2016) ou sobre a utilização deste material como substituto parcial ou total do agregado miúdo (JAIN *et al.*, 2019; JAIN, GUPTA e CHAUDHARY, 2019; KARISIDDAPPA, 2011).

Os estudos realizados que utilizam o FRG proveniente da produção de britas como adição mineral para matrizes autoadensáveis apresentam poucas análises e conclusões incipientes (ELYAMANY, ABD ELMOATY e MOHAMED, 2014; HO *et al.*, 2002).

O FRG produzido pelas pedreiras causa, ainda, um elevado impacto ambiental quando disposto de maneira inadequada, pois, quando levado pelas águas da chuva e pelo vento, chegam às águas de rios e mares, provocando assoreamento. Ao mesmo tempo, a inalação de FRG está relacionada a diversos problemas respiratórios, como as pneumoconioses, em trabalhadores que mantêm contato prolongado com este material (D'AGOSTINO e SOARES, 2003). Com isso, a indústria da construção civil, maior consumidora de agregados, possui destacada importância quanto a estes impactos, podendo ser responsável por assimilar em sua cadeia estes subprodutos.

A redução do consumo de cimento através da incorporação de FRG minimiza, também, o elevado impacto ambiental causado pela produção do cimento. Sabe-se que ao reduzir o consumo de cimento nas construções atuais, geram-se diversos benefícios ao meio ambiente como a redução da quantidade de dióxido de carbono (CO₂) emitida para a atmosfera e a diminuição do consumo de energia elétrica. Além disso, uma vez que o cimento possui elevado valor agregado, a redução do seu consumo pode vir a resultar em uma expressiva economia na produção dos concretos autoadensáveis.

Assim, a adição do FRG pode ser uma solução que agrega valor ao resíduo, além de reduzir consumo de aditivos e de cimento, minimizando o impacto ambiental da sua disposição inadequada (RODRIGUES, MANTOVANI e LOPES, 2004).

Outro assunto de destacada preocupação é a extração excessiva de areia natural para utilização em concretos e argamassas. A obtenção deste material tem

se tornado cada vez mais difícil devido ao esgotamento das jazidas naturais e às restrições impostas pelos órgãos ambientais, tornando necessária a busca de areia natural em locais cada vez mais distantes, o que acaba por elevar o custo com transporte.

A retirada da areia dos córregos e rios apresenta, ainda, elevado impacto ambiental diminuindo as matas ciliares e prejudicando a fauna e a flora. Sendo assim, a busca por materiais alternativos que possam minimizar a extração de areia natural é de suma importância no sentido de reduzir os danos causados pela indústria da construção ao meio ambiente (YAMEI e LIHUA, 2017; ILANGOVARA, MAHENDRANA e NAGAMANIB, 2008; SILVA, BUEST e CAMPITELI, 2005).

Uma solução para reduzir o consumo de areia natural é a substituição desta pela areia de britagem (AB) que, assim como os finos de rocha, é um resíduo proveniente da produção de britas, comumente disposto nos pátios das pedreiras. Observa-se, então, que a incorporação deste material em substituição à areia natural resulta em benefícios econômicos e ambientais, uma vez que reduz a extração da areia natural, promove um destino adequado ao resíduo e reduz o custo com transporte, já que as pedreiras estão normalmente localizadas mais próximas dos principais centros de consumo de concreto e argamassa do que as jazidas de areia natural (YAMEI e LIHUA, 2017; ALMEIDA e SAMPAIO, 2004; ILANGOVARA, MAHENDRANA e NAGAMANIB, 2008; KLEIN, 2008).

Enquanto existem diversos estudos acerca da influência da substituição total ou parcial da areia natural por areia de britagem em matrizes cimentíceas, nenhum deles analisa a influência da incorporação simultânea destes dois resíduos (FRG e AB) nas propriedades de concretos autoadensáveis. Fica, assim, evidente a necessidade de estudos acerca de concretos autoadensáveis que incorporem, em conjunto, os finos de rocha granítica e a areia proveniente do processo de britagem.

Com isso, o presente estudo visa analisar a viabilidade da adição de finos de rocha granítica (FRG) e da substituição parcial da areia natural pela areia de britagem (AB), ambos provenientes da região metropolitana de Salvador, em concretos autoadensáveis com o intuito de eliminar a incorporação de aditivo modificador de viscosidade, expandindo sua utilização na construção civil e minimizando os impactos causados ao meio ambiente.

Para isto, este estudo pretende avaliar a influência da incorporação destes materiais tanto na reologia do CAA quanto no seu desempenho no estado endurecido. Inicialmente têm-se como objetivo definir o teor de finos a serem adicionados para cada relação água/cimento estudada, seguindo da análise de como essa adição influencia a distância entre partículas (IPS) da pasta visando entender a influência da incorporação do FRG no comportamento das misturas em estado fresco.

Finalizado o estudo em pasta, iniciou-se o estudo em argamassa objetivando definir o teor de substituição ideal de areia natural por areia de britagem, com intuito de minimizar a quantidade de vazios das misturas para, posteriormente, analisar o volume ideal de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa através dos ensaios de mini *slump test* e mini funil-V.

Para avaliar a influência da incorporação isolada ou simultânea de FRG e AB no comportamento em estado fresco do concreto autoadensável, foram realizadas as análises de diâmetro de espalhamento, tempo de escoamento através dos ensaios de T_{500} e funil-V, habilidade passante pelos ensaios de anel J e caixa-L, e avaliação da segregação através do índice de estabilidade visual (IEV) e da coluna de segregação. Com objetivo de entender a influência da substituição parcial da areia natural pela AB na porosidade e distância de separação dos agregados nas formulações foi, ainda, calculado o MPT (*Maximum Paste Thickness*).

A avaliação da influência da incorporação do FRG e da AB no desempenho das argamassas e concretos no estado endurecido foi realizada através dos ensaios de resistência à tração na flexão e compressão axial, porosidade e densidade aparente, absorção de água por capilaridade e, apenas para os CAAs, retração por secagem.

Por fim, com intuito de avaliar a influência da incorporação destes materiais no preço final das misturas, foi feito um levantamento de custo por m^3 de argamassa e concreto. Além disso, os indicadores de intensidade de CO_2 (IC) e intensidade de ligantes (IL) foram calculados visando aferir a influência da incorporação do FRG no consumo de cimento e, conseqüentemente, na liberação de dióxido de carbono para o meio ambiente.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Para que se possa entender o comportamento de materiais de construção fluidos, como concretos autoadensáveis, faz-se necessária uma introdução aos conceitos básicos de reologia e aos modelos reológicos que descrevem o comportamento destes materiais.

2.1. REOLOGIA

A reologia é definida como a ciência que estuda o fluxo e/ou a deformação de um material quando submetido à tensão externa (OLIVEIRA *et al.*, 2000). A palavra reologia vem do grego *rheos* que significa fluir e *logos* que significa estudo. No caso de materiais fluidos, a reologia se relaciona com a tensão necessária para que se inicie o escoamento e como este escoamento se comporta ao longo do tempo (CASTRO, 2007).

2.1.1. Modelos reológicos

Isaac Newton verificou a existência de uma correlação direta e proporcional entre a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) e a solitação externa, denominada tensão de cisalhamento (τ). A constante de proporcionalidade encontrada por ele foi chamada de viscosidade do fluido (η) e a Equação 1 apresenta a relação entre estas propriedades, sendo aplicada a fluidos com características semelhantes aos utilizados nos estudos de Newton.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

Para os fluidos Newtonianos, a viscosidade é uma característica intrínseca do material, dependendo apenas da temperatura e da pressão, e que indica a facilidade com que o mesmo flui quando submetido a uma tensão externa. Nos fluidos não-newtonianos, aqueles em que a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento não é constante, a viscosidade pode se modificar com a alteração da taxa ou da tensão de cisalhamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Os fluidos mais complexos não possuem uma relação linear entre a taxa e a tensão de cisalhamento (com exceção do fluido de Bingham), isto é, a viscosidade

de um fluido não-newtoniano não é constante. Os modelos de fluidos não-Newtonianos são divididos em duas classes distintas, podendo possuir comportamentos reológicos dependentes ou independentes do tempo (BARBOSA, 2010; CASTRO, 2007). Os modelos reológicos independentes do tempo são aqueles nos quais a taxa de cisalhamento é dependente apenas da tensão de cisalhamento aplicada (CASTRO, 2007).

Os fluidos pseudoplásticos são caracterizados pela redução da viscosidade aparente com o aumento da taxa e/ou tensão de cisalhamento. O principal motivo do surgimento da pseudoplasticidade é a interação existente entre as partículas presentes em suspensões que podem encontrar-se no estado aglomerado. Estas aglomerações podem ser desfeitas com o aumento da taxa de cisalhamento, reduzindo a turbulência causada por partículas maiores nas linhas de fluxo, provocando a redução de viscosidade (BARBOSA, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2000). A Equação 2 é a mais utilizada para representar estes fluidos, sendo k uma constante e n um índice que representa o comportamento do fluido que, no caso dos fluidos pseudoplásticos, é menor do que 1 (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

Os fluidos dilatantes apresentam a característica de aumento da viscosidade aparente com o aumento da taxa e/ou tensão de cisalhamento aplicada. Este comportamento é característico de suspensões com elevada concentração de partículas sólidas bem empacotadas e próximas entre si que dificultam o fluxo da fase líquida entre elas (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

O fluido de Bingham (Equação 3) possui uma relação linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento tendo comportamento similar ao fluido Newtoniano, se diferenciando deste apenas pelo fato de possuir uma tensão de escoamento, ou seja, quando submetido a tensões de cisalhamento inferiores à sua tensão de escoamento ($\tau < \tau_0$), o mesmo se comporta como um sólido, iniciando o processo de escoamento apenas quando a tensão aplicada excede a tensão de escoamento ($\tau > \tau_0$) (BANFILL, 2005; BARBOSA, 2010).

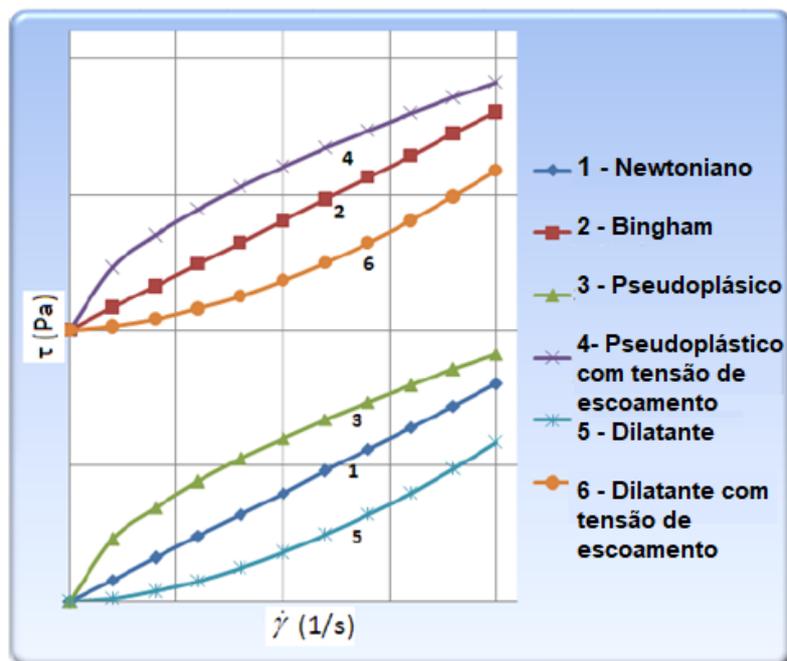
$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (3)$$

Em 1926, Herschel e Bulkley propuseram outro modelo mais abrangente do que os apresentados anteriormente. Este modelo, expresso pela Equação 4, representa um comportamento não linear entre a taxa e a tensão de cisalhamento, considerando a tensão de escoamento (τ_0) de cada material. Quando $n < 1$, o material é classificado como pseudoplástico, quando $n > 1$, o material é classificado como dilatante e, quando n for igual a 1, o mesmo será considerado um fluido de Bingham, com k representando a viscosidade plástica do material (CASTRO, 2007).

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (4)$$

A Figura 1 ilustra os diferentes comportamentos reológicos independentes do tempo possíveis de ocorrer nos fluidos.

Figura 1. Comportamento básico dos fluidos independentes do tempo de diferentes modelos reológicos.



Fonte: (PEREIRA, 2010, p. 122).

Alguns fluidos, porém, possuem suas características dependentes do tempo. Os comportamentos reológicos de tais fluidos são influenciados pela “história de cisalhamento”, que consiste na duração e sequência das solicitações aplicadas aos

materiais antes da avaliação reológica, sendo classificados em fluidos tixotrópicos e reopéticos (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Os fluidos tixotrópicos apresentam redução da viscosidade aparente com o tempo sob uma taxa de cisalhamento constante. Este comportamento é observado em suspensões que possuem aglomerados fracos de partículas, os quais são lentamente quebrados durante o fluxo (CASTRO, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Os fluidos reopéticos apresentam comportamento contrário ao visualizado em fluidos tixotrópicos, ou seja, sua viscosidade aumenta com o passar do tempo quando submetidos a uma tensão de cisalhamento constante. Esta característica pode ser explicada pela presença de aglomerados fracos na suspensão ou pela presença de partículas assimétricas, que se unem quando o fluido está submetido a baixas taxas de cisalhamento, aumentando gradativamente a viscosidade aparente do material. Os comportamentos dos fluidos reopéticos e tixotrópicos se diferenciam com relação à história de cisalhamento à qual as suspensões foram submetidas (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

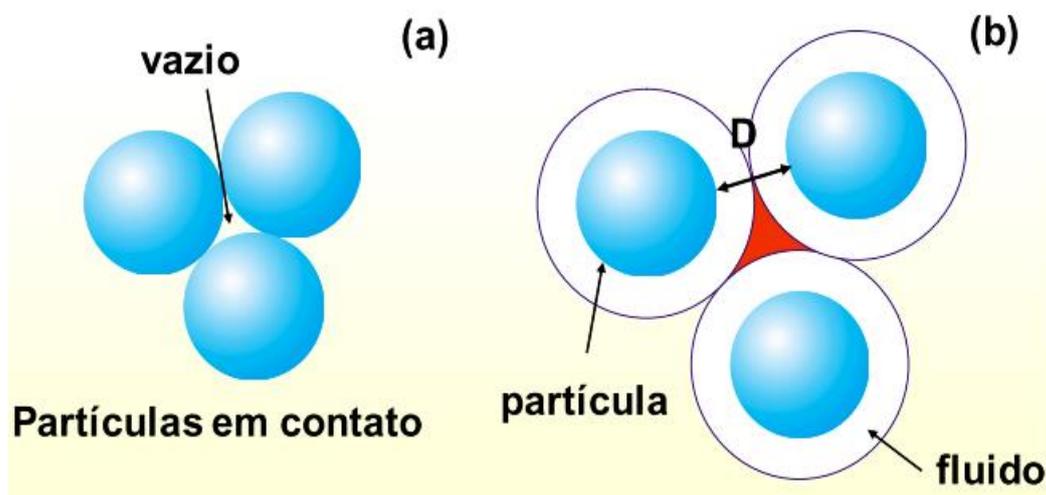
De acordo com Ferraris (1999), o concreto é definido como uma suspensão concentrada de partículas sólidas em um líquido viscoso, que possui a capacidade de fluir como um líquido. Modelos reológicos que relacionem o fluxo das matrizes cimentícias com as propriedades dos seus componentes são difíceis de serem estabelecidos, principalmente, pela ampla distribuição do tamanho de partículas presente na composição destes materiais, que variam de micrômetros a milímetros.

O modelo reológico de Bingham pode ser utilizado para descrever de maneira aproximada o comportamento dos concretos e argamassas em estado fresco, sendo definido por dois fatores: viscosidade e tensão de escoamento. A maioria dos ensaios realizados em argamassas e concretos permite determinarmos apenas um destes parâmetros, o que não caracteriza de maneira adequada o comportamento do fluido. Sendo assim, é de suma importância a realização de ensaios que caracterizem o comportamento reológico das matrizes cimentícias por meio da definição de ambos os parâmetros (FERRARIS, 1999).

2.1.2. Influência da distância entre partículas (IPS) e da máxima espessura de pasta nos agregados (MPT)

Em suspensões, como argamassas e concretos, a fluidez e a trabalhabilidade do material encontram-se diretamente relacionadas ao afastamento existente entre os grãos. Este afastamento é proveniente da presença de um fluido, que pode ser a água ou a pasta de cimento. Inicialmente, o fluido adicionado na mistura irá recobrir completamente a superfície das partículas sólidas para depois preencher os vazios existentes entre estas. Somente quando os vazios existentes entre os grãos são completamente preenchidos pelo fluido é que se tem o início da separação destas partículas promovendo, então, a movimentação da mistura, conforme ilustrado na Figura 2 (CARDOSO, 2009; DAMINELI, 2013; FUNK e DINGER, 1994).

Figura 2. Esquema representativo das partículas (a) em contato e (b) separadas por uma distância D devido à presença de um fluido em volume suficiente para recobrir a superfície das partículas e preencher completamente os poros.



Fonte: (PILEGGI, 2011 *apud* CARDOSO, 2009).

Conclui-se, então, que a porosidade intergranular indica a quantidade mínima de fluido necessário para iniciar o movimento da mistura e, quanto maior for a porosidade resultante da distribuição granulométrica dos materiais empregados, maior a quantidade de pasta necessária para iniciar o afastamento dos grãos (DAMINELI, 2013; MACIEL *et al.*, 2018).

Do ponto de vista da reologia, a água é o fluido que movimentada os finos (partículas com dimensões inferiores a 125 µm) e a pasta composta da mistura de finos e água move os agregados (partículas com dimensões superiores a 125 µm) das argamassas e concretos (DAMINELI, 2013). A distância de separação das partículas das pastas pode ser calculada através do parâmetro teórico chamado de *Interparticle Separation Distance* (IPS) que leva em consideração a concentração dos sólidos, a porosidade proveniente da distribuição granulométrica dos finos e a área superficial volumétrica dos materiais, sendo calculado conforme a Equação 5 (DAMINELI, 2013; FUNK e DINGER, 1994).

$$IPS = \frac{2}{VSA} * \left[\frac{1}{V_s} - \frac{1}{1 - P_{of}} \right] \quad (5)$$

Em que, VSA é a área superficial volumétrica (m²/cm³) calculada a partir do produto entre a massa específica do material (g/cm³) e área superficial específica (m²/g); V_s é a fração volumétrica de sólidos da mistura e P_{of} é a fração de poros proveniente da mistura dos materiais finos.

De maneira análoga, no caso das argamassas e concretos, é medida a espessura máxima da pasta ao redor dos agregados, chamada de *Maximum Paste Thickness* (MPT), que é calculada de acordo com a Equação 6 (CARDOSO, 2009; DAMINELI, 2013; HU e DE LARRARD; GJØRV, 1995).

$$MPT = \frac{2}{VSA_g} * \left[\frac{1}{V_{sg}} - \frac{1}{1 - P_{ofg}} \right] \quad (6)$$

Em que, VSA_g é a área superficial volumétrica dos agregados (m²/cm³); V_{sg} é a fração volumétrica dos agregados e P_{ofg} é a fração de poros proveniente da mistura dos materiais grossos.

Tanto o IPS quanto o MPT influenciam de maneira significativa o comportamento reológico das pastas e dos concretos e argamassas, respectivamente. Ao analisar as equações apresentadas, nota-se que, quanto maior a porosidade do sistema, menor a separação das partículas, considerando área superficial volumétrica e fração de sólidos constante. Isto se deve ao fato de que,

com o aumento da porosidade da mistura, ocorre um maior consumo de líquido, ou pasta, para preencher os vazios, resultando em menor quantidade disponível para efetivamente afastar as partículas (CARDOSO, 2009).

Estudos mostram que quanto menor o valor encontrado para o IPS, maior a dificuldade para iniciar-se o escoamento das misturas, aumentando simultaneamente a tensão de escoamento e a viscosidade do material. Isto ocorre, pois, com a redução do IPS, as partículas dos finos que compõem a pastas tendem a colidir entre si de forma mais acentuada, gerando um aumento significativo do atrito existente entre as partículas que, conseqüentemente, aumenta a viscosidade plástica das misturas (DAMINELI, 2013; ROJAS-RAMÍREZ *et al.*, 2019; VARHEN *et al.*, 2016).

2.2. CONCRETO AUTOADENSÁVEL

2.2.1. Histórico

Na década de 1980, no Japão, a durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto passaram a ser fonte de preocupação devido, principalmente, à redução gradual de mão de obra qualificada na indústria da Construção Civil. Esta redução de trabalhadores qualificados resultou em crescente perda de desempenho das construções devido, especialmente, às falhas do processo de adensamento ineficiente (OKAMURA e OZAWA, 1996).

Além da diminuição da mão de obra disponível, o aumento da taxa de armadura utilizada nas construções da época, com o intuito de suportar os abalos sísmicos da região, resultava em mais uma dificuldade na execução adequada do adensamento das estruturas. Assim, em 1986, surgiu como possível solução para a problemática, o concreto autoadensável (CAA), proposto pelo então professor da Universidade de Tóquio, Hajime Okamura, tendo sua primeira aplicação em um protótipo no ano de 1988 (OKAMURA e OUCHI, 2003; MORAES, 2010).

O protótipo foi executado em escala real, utilizando os materiais disponíveis na região. Os resultados apresentados pelo estudo do protótipo foram satisfatórios em relação à retração por secagem, propriedades mecânicas, calor de hidratação, densidade, entre outras propriedades. Após o desenvolvimento do protótipo,

diversos estudos passaram a ser realizados, culminando na utilização do CAA em diversas estruturas de grande porte. A primeira aplicação do concreto autoadensável foi na construção de um prédio, no Japão, em 1990 (OKAMURA e OUCHI, 2003).

Após esta construção, o CAA foi utilizado nas torres de sustentação de uma ponte de concreto protendido, em 1991 (Figura 3a). Em 1998, os ancoradouros da ponte Akashi-Kaikyo foram construídos com concreto autoadensável (Figura 3b), reduzindo o número de trabalhadores de 150 para 50 e a duração da construção de 22 para 18 meses (OKAMURA e OUCHI, 2003).

Figura 3. Ponte Shin-kiba Ohashi, edificada em 1991 e, (B) ancoradouro 4A da ponte Akashi-Kaikyo, construída em 1998, ambos no Japão.



(A)



(B)

Fonte: (OKAMURA e OUCHI, 2003, p.12-13).

Devido às suas diversas vantagens, o concreto autoadensável vem sendo amplamente utilizado nas construções dos chamados “*Super-tall buildings*”, edifícios super altos (NEHDI, 2013). Em 2010 foi inaugurado o Burj Khalifa, prédio mais alto do mundo, com 830 metros de altura, em Dubai. Os engenheiros responsáveis pela obra optaram pela utilização do concreto autoadensável para a construção das quatro fundações que sustentam o edifício (Figura 4). Foram utilizados 12.500 m³ de CAA para a concretagem destas fundações (BAKER *et al.*, 2009).

Figura 4. Fundações do Burj Khalifa, em construção no ano de 2009.



Fonte: (BAKER *et al.*, 2009, p.6).

Além do Burj Khalifa, a construção do Taipei 101 (Figura 5a), edifício com 508 metros de altura e a construção das torres Tungtxt & Chingtai em Taiwan, que possuem 85 andares, foram feitas empregando-se concretos autoadensáveis com espalhamento entre 580 e 620 mm e 56 MPa de resistência.

Já em 2005, na construção do *Trump International Hotel and Tower* em Chicago (Figura 5b), que possui 423 metros de altura, foi utilizado o CAA na concretagem de um radier no centro do empreendimento, com 3 metros de espessura e 69 MPa de resistência. Além disso, o CAA com espalhamento de 610 mm foi utilizado em zonas estabilizantes que necessitavam de uma resistência de 110 MPa e, conseqüentemente, eram densamente armadas. Acredita-se que esta foi a primeira vez que um concreto autoadensável com resistência tão alta foi bombeado a uma elevação de 200 metros (NEHDI, 2016).

O icônico *Infiniti Tower* (Figura 5c), localizado em Dubai, que possui uma torção de 90° do topo em relação à base e 300 metros de altura utilizou um CAA com 600 mm de espalhamento nas regiões densamente armadas e em todos os pilares e perímetro da construção. Por fim, a Torre Um do novo *World Trade Center* (Figura 5d), localizado em Nova Iorque, utilizou concreto autoadensável da fundação até o trigésimo andar (NEHDI, 2016).

Figura 5. (a) Taipei 101 (Taiwan), (b) Trump Tower (Chicago), (c) Infiniti Tower (Dubai), (d) Torre Um, World Trade Center (Nova Iorque)



Fonte: (NEHDI, 2016, p.81).

No Brasil, o concreto autoadensável ainda não é utilizado na proporção que poderia ser, apesar das diversas vantagens que este tipo de concreto oferece, sendo utilizado de maneira mais significativa por empresas de pré-moldados. Mesmo assim, já existem registros da utilização deste material em algumas construções pelo país, como na ampliação do Shopping Center Flamboyant, em Goiânia, e na obra do metrô de São Paulo, devido à maior facilidade do CAA de preencher elementos estruturais densamente armados. Além disso, foi utilizado o concreto autoadensável branco na construção do Museu Iberê Camargo, em Porto Alegre (TUTIKAIN e DAL MOLIN, 2015).

Em janeiro de 2020 o concreto autoadensável foi utilizado para o preenchimento das lajes de contraventamento, localizadas nos pavimentos 30 e 53, do Yatchouse de Balneário Camboriú de forma a garantir o preenchimento de todos os espaços existentes entre as armaduras.

2.2.2. Propriedades no estado fresco

O CAA é definido como o concreto capaz de fluir sobre a ação do seu peso próprio sem a necessidade de empregar algum método de compactação. Este material possui a capacidade de preencher todos os espaços vazios, mesmo em estruturas densamente armadas, resultando em uma superfície praticamente plana

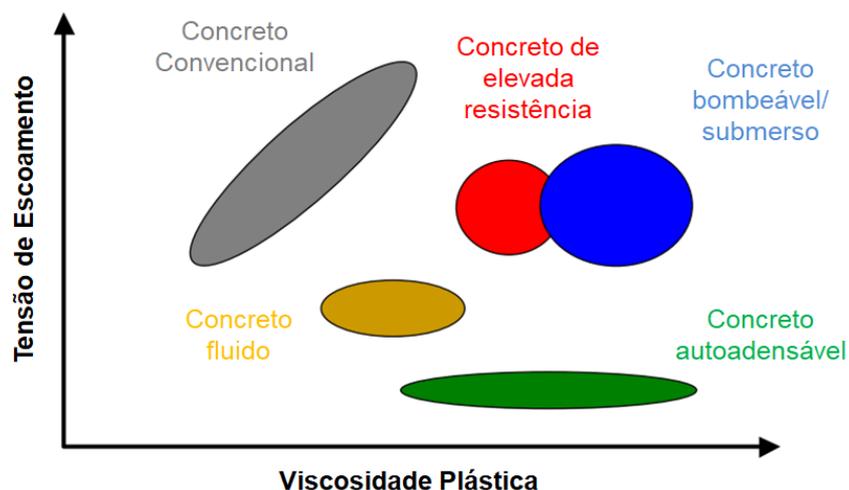
e com acabamento superficial satisfatório. Sendo assim, o concreto autoadensável é definido pela sua capacidade de preenchimento, resistência à segregação e capacidade de passar por lugares estreitos, chamada de habilidade passante (NUNES, 2001; DEHWAH, 2012; SADEK, EL-ATTAR e ALI, 2016; HO *et al.*, 2002).

A capacidade de preenchimento característica do concreto autoadensável é resultado de sua capacidade de escoamento e resistência à segregação. Estas características são regidas, principalmente, pela fluidez e coesão da mistura, responsáveis por garantir que o material escoe e preencha de maneira uniforme os espaços sem a ocorrência de segregação dos materiais constituintes e sem bloqueios nas regiões densamente armadas (MELO, 2005; MORAES, 2010).

O comportamento reológico do concreto autoadensável vem sendo descrito de maneira satisfatória pelo modelo de Bingham, conforme Equação 3, (LARRARD, 1999; ROUSSEL, 2007; SHEN, JOVEIN e LI, 2014), porém, a depender de sua aplicação e das características da concretagem, pode-se visar que o CAA se comporte como um fluido pseudoplástico ou dilatante. Por exemplo, caso o concreto autoadensável seja bombeado, é mais vantajoso que o mesmo possua comportamento próximo ao apresentado pelos fluidos pseudoplásticos uma vez que estes apresentam uma redução da viscosidade plástica ao ser aplicada uma taxa ou tensão de escoamento, minimizando o risco de entupimento das bombas. Por outro lado, quando for despejado de alturas elevadas, é interessante que este material possua um comportamento dilatante de maneira a minimizar o risco de segregação.

Ao contrário do concreto tradicional, que exige elevadas tensões de escoamento e viscosidade reduzida, o concreto autoadensável deve apresentar uma baixa tensão de escoamento, próxima de zero, de maneira que o material consiga fluir pelas fôrmas e armaduras sem a necessidade da aplicação de energia externa de adensamento. Além disso, como foi dito anteriormente, o CAA deve apresentar elevada resistência à segregação, garantindo que não haja separação entre a pasta de cimento e os agregados, sendo necessário que a mistura apresente uma viscosidade moderada (Figura 6) (MORAES, 2010; FELEKOGLU, 2007; HO *et al.*, 2002; TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015).

Figura 6. Comportamento reológico do concreto, segundo sua aplicação



Fonte: (Adaptado de NUNES, 2001, p. 51).

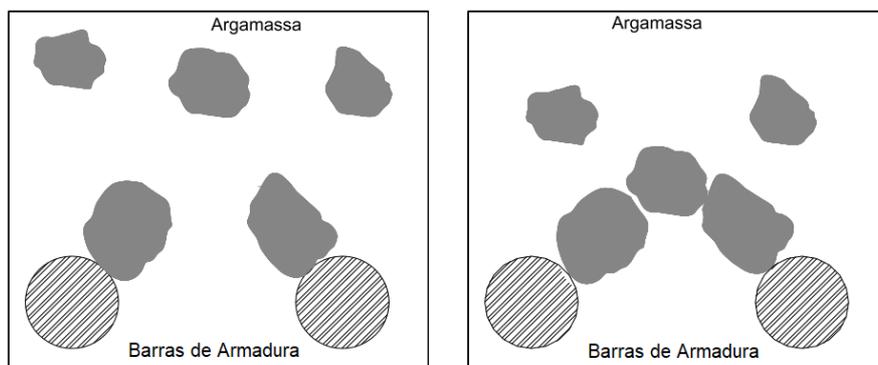
Segundo Zerbino *et al.* (2009), a segregação dos materiais constituintes do CAA é prevenida quando a tensão de escoamento e a viscosidade do material estão em equilíbrio. Ou seja, concretos autoadensáveis que apresentem tensão de escoamento muito baixa devem apresentar viscosidade mais alta, enquanto CAAs com viscosidades mais baixas devem apresentar tensões de escoamento mais elevadas.

Além disso, a boa coesão do CAA é um fator importante para garantir a homogeneidade das propriedades mecânicas dos elementos no estado endurecido. De acordo com Schwartzenruber, Roy e Cordin (2006), existem dois tipos distintos de segregação que podem ocorrer com a mistura de concreto autoadensável: i) a segregação dinâmica, que se dá durante o processo de transporte e bombeamento da mistura e, ii) a segregação estática, que se refere à sedimentação dos agregados no fundo das fôrmas devido à sua elevada massa específica.

O risco de exsudação, segregação que ocorre entre as partículas sólidas e a água, é maior em concretos mais fluidos como o autoadensável. Este risco é reduzido quando se diminui a quantidade de água livre presente na mistura, através da redução da relação água/finos. Além disso, os finos incorporados, por apresentarem elevada superfície específica, adsorvem grande quantidade de água, reduzindo a água livre na mistura (AVELAR, 2008; NUNES, 2001).

O concreto autoadensável deve, ainda, ser capaz de passar por restrições impostas sem que ocorra o bloqueio da passagem pelo acúmulo de agregados graúdos na região. O mecanismo pelo qual pode ocorrer o bloqueio é ilustrado na Figura 7 que mostra, de maneira simplificada, o escoamento do concreto entre duas barras de armadura (NUNES, 2001; KRAUS, 2006).

Figura 7. Mecanismo de bloqueio da passagem do concreto ao redor das armaduras.



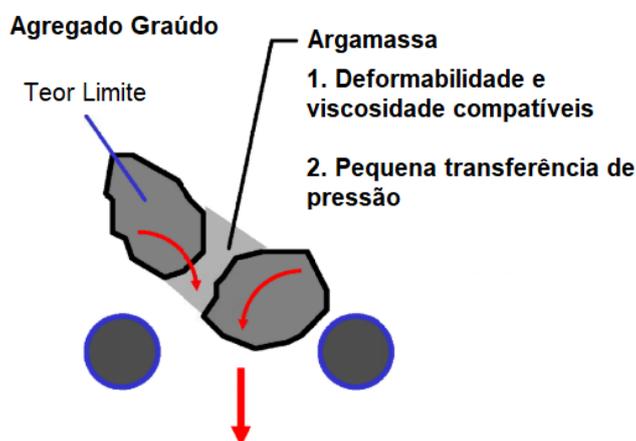
Fonte: (NUNES, 2001, p.66).

Segundo Nunes (2001) as armaduras formam obstáculos ao escoamento do material, provocando uma alteração do percurso dos agregados graúdos que podem entrar em contato entre si. Este contato direto entre as partículas pode formar um arco estável, que bloqueia o escoamento do concreto. A possibilidade da formação destes arcos aumenta quanto maiores forem a dimensão ou a quantidade dos agregados e a irregularidade da superfície das partículas, pois, agregados com formato mais próximo ao esférico e mais lisos possuem menor possibilidade de travamento. O risco de bloqueio aumenta, ainda, se a mistura possuir elevada tendência à segregação das partículas grossas, podendo ocorrer mesmo que os agregados graúdos não possuam dimensões tão grandes (COUTINHO, 2011).

Okamura e Ouchi (2003) e Schwartzentruber, Roy e Cordin (2006) afirmam que a pasta de cimento é o fator principal que rege a resistência à segregação do CAA, devendo ser fluida o suficiente para garantir o espalhamento da mistura e viscosa o suficiente para suportar os agregados graúdos de forma que os mesmos não tendam a ficar presos entre as armaduras ou sedimentados no fundo das fôrmas. Quando o concreto é deformado ao redor dos obstáculos, a pasta com

elevada viscosidade previne o surgimento de elevadas tensões devido à aproximação dos agregados graúdos, facilitando o escoamento do material entre as barras da armadura (Figura 8).

Figura 8. Mecanismo para obtenção de autoadensabilidade relacionando propriedades da argamassa com a habilidade passante do concreto autoadensável.



Fonte: (Adaptado de OKAMURA e OUCHI, 2003, p.6).

O concreto autoadensável é constituído basicamente pelos mesmos materiais do concreto convencional (cimento, agregados, água e adições), porém, para obter a autoadensabilidade, o CAA deve possuir elevado percentual de finos na mistura e menor quantidade de agregados graúdos, além da incorporação de aditivos superplastificantes e/ou modificadores de viscosidade (HO *et al.*, 2001; DEHWAH, 2012; COUTINHO, 2011; SADEK, EL-ATTAR e ALI, 2016; HOLSCHMACHER e KLUG, 2002).

Existem diversos ensaios para analisar o comportamento do concreto autoadensável no estado fresco. O ensaio mais utilizado para analisar a fluidez e a existência de segregação no CAA é o ensaio de espalhamento, que segue as diretrizes da NBR 15823-2 (ABNT, 2017). Por meio deste ensaio, têm-se uma medida do espalhamento do material, o qual indica se o concreto se encontra muito fluido ou muito coeso e, também é possível realizar a análise visual da homogeneidade da mistura após seu espalhamento, chamado de Índice de Estabilidade Visual (IEV). Concretos susceptíveis à segregação apresentarão um elevado acúmulo de agregado graúdo no centro da mistura espalhada, enquanto

CAAs adequados se apresentarão homogêneos em toda extensão da mistura espalhada. A maior vantagem deste ensaio é que ele é de baixo custo e simples de ser realizado, podendo ser realizado tanto em canteiros de obra quanto em laboratórios.

Ao mesmo tempo em que se realiza o ensaio de espalhamento pode-se analisar o tempo de escoamento (t_{500}) do material, que simula as condições de concretagens com fluxo livre, como lajes e pisos. Por outro lado, o ensaio do funil-V, regido pela NBR 15823-5 (ABNT, 2017), reproduz o que ocorre em concretagens em fluxo confinado, como vigas e pilares. Ambos os ensaios servem de indicativo da coesão da mistura, uma vez que um concreto pouco coeso apresentará um baixo tempo de escoamento tanto pelo funil-V quanto pelo t_{500} , e um concreto muito coeso um elevado tempo de escoamento.

Os métodos do anel-J, caixa-L e caixa-U visam simular a habilidade passante do concreto autoadensável quando submetido ao fluxo livre, como o que acontece em vigas e pilares, ou fluxo confinado, como ocorre na concretagem de lajes e pisos. O ensaio do anel-J segue as diretrizes da NBR 15823 – 3 (ABNT, 2017) enquanto a caixa-L e a caixa-U possuem sua execução regida pela NBR 15823 – 4 (ABNT, 2017). Estes ensaios simulam o espaçamento que será empregado entre as armaduras da construção de forma a verificar a existência ou não de bloqueio do agregado graúdo entre as barras de aço, ou a segregação da mistura após passar pelas armaduras.

Para analisar a existência de segregação estática dos materiais constituintes do CAA, executa-se o ensaio de coluna de segregação, segundo a NBR 15823 – 6 (ABNT, 2017) no qual o material permanece em repouso durante 20 minutos e analisam-se as massas de agregado graúdo do topo e da base da coluna. Caso a mistura tenha elevada tendência à segregação, a maior parte dos agregados graúdos tenderá a sedimentar, aumentando sua concentração na base da coluna e diminuindo sua concentração no topo. Por outro lado, quando o concreto tiver baixa tendência à segregação a brita permanecerá distribuída de maneira uniforme por toda a coluna.

A retenção das características do concreto autoadensável em estado fresco é crucial no quesito de manter sua empregabilidade. Assim como o concreto

convencional, o CAA perde sua trabalhabilidade devido a alguns mecanismos como a evaporação de parte da água da mistura para o ambiente, que leva a um aumento de sua plasticidade; pelo consumo de parte desta água nas reações iniciais de hidratação do cimento e pela absorção de parte da água pelos agregados quando estes não se encontram saturados no momento da mistura (KHRAPKO, 2001).

Quando o concreto autoadensável é dosado em centrais dosadoras e transportado para o local de moldagem, as propriedades em estado fresco devem ser atendidas no momento de sua utilização. Sendo assim, os efeitos da produção e transporte nas propriedades do CAA devem ser considerados, sendo necessário um entendimento das interações entre os materiais empregados e os aditivos utilizados.

Estudos mostram que, ao contrário do que ocorre no concreto tradicional, as características de trabalhabilidade do CAA não são facilmente mantidas por um longo período. Isso porque flutuações da trabalhabilidade do concreto convencional podem ser superadas aumentando o tempo ou a intensidade da vibração aplicada durante a concretagem, o que não se aplica ao CAA. Dito isto, os tempos de produção e transporte devem ser levados em consideração quando da escolha das propriedades que o CAA deve apresentar no momento da concretagem (ARDALAN, JOSHAGHANI e HOOTON, 2017; FELEKOĞLU e SARIKAHYA, 2008).

Além disso, o efeito de tixotropia no concreto autoadensável pode ser um problema no momento do preenchimento das fôrmas. Isso se dá porque quando a energia externa de mistura é cessada, o CAA tende a aumentar a sua viscosidade plástica. Esta perda de trabalhabilidade proveniente do aumento da viscosidade não é problemática caso ocorra anteriormente à moldagem porque pode ser recuperada uma vez que a energia externa de mistura seja aplicada novamente. Porém, quando o aumento da viscosidade do CAA ocorre antes que o mesmo consiga preencher todos os espaços vazios das formas pode levar a uma série de defeitos na superfície (KHRAPKO, 2001).

Visando garantir a trabalhabilidade necessária, aditivos superplastificantes são normalmente adicionados aos concretos autoadensáveis, porém, sua incorporação só é efetiva enquanto existir quantidade suficiente de moléculas de aditivo disponível para cobrir toda a superfície exposta das partículas de cimento. Com o passar do tempo, algumas moléculas do aditivo ficam presas nos produtos de

hidratação do cimento, reduzindo a quantidade de moléculas livres e diminuindo drasticamente a trabalhabilidade da mistura (KHRAPKO, 2001).

Para vencer o problema da perda de trabalhabilidade, estudos sobre a composição química destes aditivos têm sido realizados de forma a maximizar a retenção da consistência do CAA. Estes estudos mostram que aditivos superplastificantes à base de policarboxilato com ligação éster não são eficazes na manutenção da trabalhabilidade do concreto fresco devido à vulnerabilidade que essa estrutura apresenta ao ataque de álcalis presente na composição do cimento. Por outro lado, ao ligar diretamente a cadeia lateral de polioxietileno à cadeia principal do copolímero, a trabalhabilidade dos CAAs pode ser efetivamente mantida por um período de 2 horas (FELEKOĞLU e SARIKAHYA, 2008).

Um estudo realizado por Hwang e Khayat (2006) concluiu que a utilização de aditivos superplastificantes à base de sulfonato de polinaftaleno (PNS) resultou em menor perda de trabalhabilidade quando comparados aos aditivos à base de policarboxilato. Este resultado se deve ao efeito retardador do PNS quando utilizado em alta concentração. Os resultados mostram, ainda, que estas formulações não apresentaram aumento significativo da tensão de escoamento após uma hora do início da mistura resultando, também, em uma excelente retenção da habilidade passante e capacidade de preenchimento. Já as misturas à base de policarboxilato apresentaram elevada perda da trabalhabilidade.

Para suprir a dificuldade de manutenção da trabalhabilidade por longos períodos apresentada pelos aditivos superplastificantes, surgiu o chamado aditivo polifuncional, da associação dos aditivos plastificantes e superplastificantes com o intuito de eliminar a necessidade de adição de parte do aditivo no canteiro para corrigir a consistência da mistura. Assim, o aditivo polifuncional resulta em uma elevada plasticidade e um bom tempo de retenção da trabalhabilidade, permitindo sua dosagem na central dosadora sem a necessidade de correção da consistência no canteiro de obras (CORRÊA, 2010).

A incorporação dos aditivos modificadores de viscosidade também pode auxiliar na retenção da consistência dos concretos autoadensáveis, uma vez que estes apresentam a característica de retardar o início do processo de hidratação do cimento, garantindo que maior quantidade de água da mistura permaneça livre por

um tempo maior (FIGUEIREDO, ÇOPUROĞLU e SCHLANGEN, 2019; ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK, 2013).

Para ser classificado como um concreto autoadensável, a mistura deve apresentar um espalhamento entre 550 e 850 mm. As formulações que apresentam espalhamento entre 550 e 650 mm, por possuírem menor fluidez, são indicadas para estruturas não armadas ou com baixas taxas de armadura, enquanto misturas com espalhamento entre 660 e 750 mm são consideradas adequadas para a maioria das aplicações correntes. Os CAAs que apresentam espalhamento superior a 750 mm são indicados somente para estruturas que apresentem elevada taxa de armadura estando mais susceptíveis à ocorrência de segregação pela fluidez elevada.

2.2.3. Propriedades no estado endurecido

A avaliação do desempenho do concreto autoadensável no estado endurecido é de fundamental importância para garantir sua aplicabilidade em construções de grande porte. Além das vantagens de sua aplicação no estado fresco, é necessário que o material apresente propriedades satisfatórias quanto ao desempenho mecânico e à durabilidade.

Sendo assim, comparações de desempenho entre concretos tradicionais e os autoadensáveis devem ser feitas de forma a analisar o desempenho do material. Vale ressaltar que as comparações entre os dois materiais deve ser feita com cautela, utilizando os mesmos materiais e as mesmas proporções nas duas misturas que se pretende comparar, uma vez que o CAA tende a possuir maior teor de finos e de aditivos químicos e incorporação de agregados com menor granulometria, podendo influenciar significativamente os resultados das análises (DOMONE, 2007).

A microestrutura do concreto autoadensável tende a ser mais homogênea e com menor teor de vazios do que o concreto tradicional devido, principalmente, à sua maior fluidez e ao maior teor de finos na mistura. O elevado teor de finos leva à melhor distribuição granulométrica do concreto, resultando em uma matriz mais densa, enquanto sua fluidez garante melhor distribuição do material dentro das

fôrmas, garantindo a inexistência de falhas de concretagem (KRAUS, 2006; MELO, 2005).

Já a resistência à compressão dos CAAs, aos 28 dias de idade, não difere significativamente da apresentada para os concretos tradicionais com composição similar. O tipo de adição empregada (ativa ou inerte) é o fator que irá influenciar de forma mais significativa a resistência à compressão do material (HOLSCHEMACHER e KLUG, 2002; MELO, 2005).

O levantamento de dados realizado por Holschemacher e Klug (2002) mostrou que a resistência à tração por compressão diametral dos concretos autoadensáveis tende a ser maior do que a apresentada por concretos tradicionais. Isto pode ser explicado pela microestrutura mais homogênea apresentada pelo CAA, devido, principalmente, à menor porosidade e à distribuição mais uniforme de tamanho de poros na zona de transição.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade, o CAA apresenta redução de cerca de 20% quando comparado aos resultados exibidos por concretos tradicionais de mesma resistência e feitos com os mesmos materiais. Esta redução é justificada pelo maior consumo de materiais finos e aditivos e pela menor incorporação de agregados graúdos no concreto autoadensável, uma vez que o módulo de elasticidade tende a aumentar com o acréscimo do teor de agregado graúdo e diminuir com o aumento do teor de pasta da mistura (HOLSCHEMACHER e KLUG, 2002; MELO, 2005; AVELAR, 2008; TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015).

Já a aderência apresentada entre o CAA e as barras de aço da armadura pode ser maior ou igual àquela apresentada pelo concreto tradicional. A melhoria na aderência é resultado, principalmente, da maior homogeneidade e retenção de água apresentada pelo concreto autoadensável, reduzindo consideravelmente a formação da película de água na interface aço/concreto (HOLSCHEMACHER e KLUG, 2002; MELO, 2005; KRAUS, 2006).

Em relação à durabilidade, o concreto autoadensável apresenta diversas vantagens em comparação ao concreto tradicional. Segundo Avelar (2008), Kraus (2006), Melo (2005) e Tutikian e Dal Molin (2015), a maior homogeneidade, fluidez, e o melhor empacotamento de partículas do CAA garantem a formação de um

material mais denso e, conseqüentemente, com menor teor de vazios. Além disso, a habilidade do CAA de passar por obstáculos mantendo a coesão garante, ainda, uma concretagem sem falhas e melhor acabamento superficial. Sendo assim, quando comparados aos concretos tradicionais dosados com os mesmos materiais e proporções, o concreto autoadensável apresenta menor permeabilidade à água e gases.

A principal desvantagem do concreto autoadensável no estado endurecido é sua elevada retração quando comparado ao concreto tradicional. Esta variação volumétrica excessiva pode resultar no surgimento de tensões internas de tração que, ao exceder a resistência à tração do CAA, podem levar ao surgimento de fissuras. Estas fissuras podem comprometer a durabilidade e o desempenho das estruturas uma vez que facilitam a entrada de agentes agressivos para o interior do material (LOSER e LEEMANN, 2009; ZHU *et al.*, 2016; PERIUS, 2009).

A retração do concreto é definida como a redução de seu volume ao longo do tempo devido à diminuição da umidade interna do material, podendo ser dividida em retração autógena, resultante da redução da umidade interna devido à evolução do processo de hidratação do cimento que consome a água livre presente na mistura, e retração por secagem, que resulta da perda de água para o ambiente (KHAYAT e SCHUTTER, 2014; NUNES e FIGUEREDO, 2007; OLIVEIRA, RIBEIRO e BRANCO, 2017). Na prática, a retração total é normalmente a única deformação medida, porém, a retração autógena tende a ser significativamente menor do que a retração por secagem. Sendo assim, a retração total é dominada majoritariamente pela retração por secagem (KHAYAT e SCHUTTER, 2014).

A retração autógena do concreto ocorre durante a evolução da hidratação do cimento, sem que ocorra perda de umidade para o ambiente e quando submetido à temperatura constante. Esta redução de volume ocorre devido ao consumo de parte da água livre dos poros nas reações de hidratação além de parte desta água ser adsorvida na superfície dos cristais de C-S-H. Assim, meniscos capilares são formados, gerando uma tensão superficial que acaba por induzir a contração da pasta de cimento. A retração autógena depende diretamente das reações que ocorrem durante a hidratação das partículas de cimento, sendo influenciada pela

relação água/cimento, tipo e finura de cimento (NUNES e FIGUEREDO, 2007; OLIVEIRA, RIBEIRO e BRANCO, 2017).

A perda de água do concreto para o ambiente quando submetido à umidade relativa inferior a 100% é chamada de retração por secagem e é tida como a principal e mais expressiva causa de retração dos concretos. Diversos fatores podem afetar a retração por secagem dos materiais como a umidade atmosférica, ou seja, quanto maior for a umidade do ambiente externo menor será o fluxo de água das regiões internas do concreto para a superfície do material, fazendo com que a retração seja menor. Outro fator importante é a geometria das peças que, ao terem uma maior área exposta, podem sofrer mais significativamente com a retração por secagem. É importante destacar que a perda de água para o ambiente ocorre sempre na superfície do material, criando uma diferença de umidade entre a superfície e o interior do concreto. Este gradiente de umidade faz com que a secagem não aconteça de maneira homogênea, podendo resultar em um empenamento da peça (KHAYAT e SCHUTTER, 2014; NUNES e FIGUEREDO, 2007; PERIUS, 2009).

O aumento significativo da retração apresentado pelo CAA é resultante do seu maior volume de pasta de cimento quando comparado aos concretos tradicionais, e da maior quantidade de finos empregados em sua dosagem. Quanto maior o volume de pasta empregado, maior tende a ser a retração do material, uma vez que a presença dos agregados promove restrições à deformação da pasta. Isto ocorre devido à elevada estabilidade volumétrica apresentada pelos agregados quando submetidos a diferenças de umidade (NUNES e FIGUEREDO, 2007; ZHU *et al.*, 2016; LOSER e LEEMANN, 2009).

Por outro lado, quando o volume de pasta é mantido constante, quanto maior for a relação água/cimento empregada, maior será a retração do concreto, uma vez que haverá maior quantidade de água livre sujeita à secagem (KHAYAT e SCHUTTER, 2014; PERIUS, 2009). Além disso, quanto maior a relação água/cimento, maior a quantidade de poros presente na mistura e menor a resistência da pasta, aumentando o risco de fissuração do CAA. Com o aumento da porosidade do material ocorre, ainda, um acréscimo da quantidade de água que se

movimenta pelo interior do concreto através das redes capilares, resultando em um aumento das pressões hidrostáticas internas (NUNES e FIGUEREDO, 2007).

A incorporação de adições minerais pode resultar em um aumento da retração uma vez que estas tendem a levar a um refinamento dos poros que resulta em maiores pressões capilares (NUNES e FIGUEREDO, 2007). Por outro lado, quando estas adições resultam em acréscimo da resistência da pasta de cimento e na redução da permeabilidade da matriz, há um aumento da dificuldade de saída de água do interior do concreto. Estes fatores podem compensar o efeito negativo do refinamento dos poros (KHAYAT e SCHUTTER, 2014; NUNES e FIGUEREDO, 2007).

Um estudo realizado por Gupta e Vyas (2018) utilizou areia de britagem proveniente de rocha granítica substituindo parcialmente o agregado miúdo de argamassas e encontrou que esta substituição parcial levou a um aumento da retração das argamassas. Este resultado foi explicado devido à dureza destes agregados miúdos uma vez que a areia natural e a areia de britagem possuíam durezas iguais a 7 e 6, respectivamente. Isto indica que a areia de britagem utilizada era mais flexível, o que resultou em um aumento da retração.

2.2.4. Vantagens do CAA

São diversas as vantagens da aplicação do concreto autoadensável. A eliminação do adensamento do material permite sua aplicação em estruturas de difícil acesso, ou densamente armadas, que teriam sua execução dificultada ou impedida pela utilização do concreto tradicional. Segundo diversos autores (AVELAR, 2008; COUTINHO, 2011; DEHWAH, 2012; HOLSCHEMACHER e KLUG, 2002; OUCHI *et al.*, 2003; SADEK e EL-ATTAR; ALI, 2016; TUTIKIAN, 2004), a não necessidade de vibração externa resulta em diversos benefícios, tais como:

- a) Diminuição do custo da concretagem: a eliminação da etapa de adensamento reduz a duração e o número de trabalhadores necessários para realização das concretagens, além da não necessidade da utilização de aparelhos de vibração, o que reduz os gastos com equipamentos e energia elétrica;

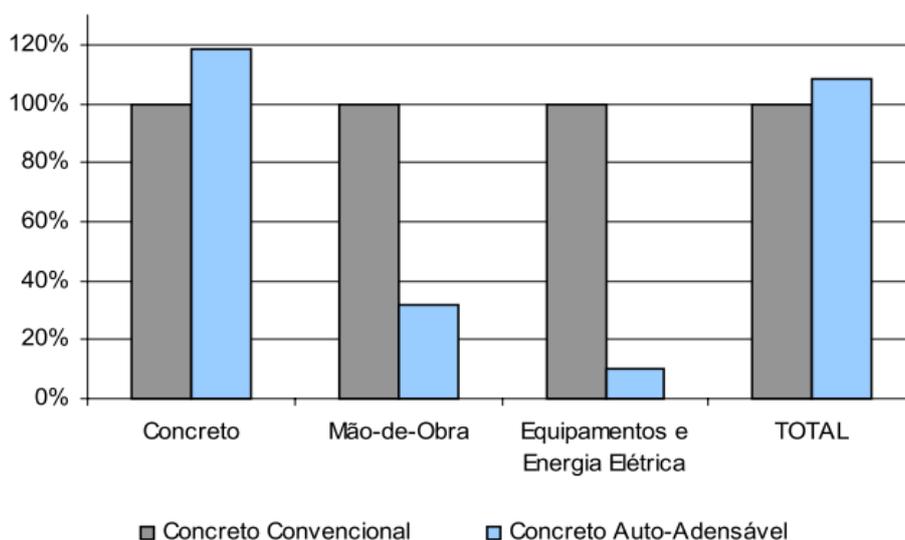
- b) Aumento da produtividade e conseqüente redução da duração da construção: pela eliminação do adensamento, é possível concretar áreas maiores em tempo menor;
- c) Menor dependência da qualidade da mão-de-obra: uma vez que a qualidade final do concreto tradicional depende de um adensamento executado por mão-de-obra qualificada, a eliminação do processo de vibração resulta em independência entre a qualidade da mão-de-obra empregada e a qualidade final da estrutura;
- d) Redução do ruído gerado: o ruído provocado pela utilização dos equipamentos de vibração é prejudicial para a saúde dos trabalhadores e incomoda a vizinhança da construção. Sendo assim, a utilização do CAA elimina a geração de ruído pela supressão do procedimento de vibração;
- e) Redução de problemas ergonômicos dos trabalhadores: o procedimento de vibração é danoso para a saúde dos trabalhadores, resultando em dores lombares, fadiga e problema de circulação sanguínea resultante do carregamento do equipamento de vibração. Com a eliminação desta etapa, os problemas ergonômicos são reduzidos consideravelmente;
- f) Melhor acabamento superficial: a capacidade de se autonivelar do concreto autoadensável resulta em superfícies mais uniformes e com menor índice de vazios, sendo recomendado para estruturas de concreto aparente.

Apesar das vantagens da incorporação do concreto autoadensável nas construções, seu custo, comparado ao do concreto tradicional, ainda é elevado, resultando em uma barreira na expansão de sua aplicação. Diante deste fato, tentativas de reduzir o custo deste material têm grande importância técnica e econômica (HO *et al.*, 2001). Por outro lado, quando é levado em consideração o custo total da construção, como o valor gasto com os equipamentos de vibração, com a mão-de-obra e energia elétrica, o concreto autoadensável se torna competitivo comercialmente (AVELAR, 2008).

O trabalho que ganhou o 12º Concurso Falcão Bauer realizado pela Câmara Brasileira de Construção Civil (CBIC), em 2005, realizou um estudo comparativo de custos entre o sistema convencional e sistema com concreto autoadensável,

considerando apenas o custo direto da construção. A análise mostrou que apesar de ter uma redução de quase 70% do custo com a mão-de-obra e 90% com equipamentos e energia elétrica, o custo final do CAA fica, em média, 8% mais caro do que o concreto tradicional (Figura 9). Isto se deve, principalmente, ao fato da mão-de-obra da região estudada ser muito barata quando comparada ao custo do concreto (CBIC, 2005).

Figura 9. Comparativo de custos entre o sistema que utilize concreto convencional e o concreto autoadensável para f_{ck} de 20 MPa



Fonte: (CBIC, 2005, p. 13).

Porém, no estudo realizado não foram analisados os custos indiretos, como velocidade da execução da obra, melhoria na qualidade final da estrutura, menor riscos de acidentes de trabalho, entre outros. Assim, acredita-se que se todos os custos indiretos fossem considerados, o custo total do sistema com concreto autoadensável seria menor que o convencional (CBIC, 2005).

2.3. USO DOS FINOS DE ROCHA COMO ADIÇÃO MINERAL

A NBR 7225 (ABNT, 1993) define pó de pedra, aqui chamado de fino de rocha, como “material proveniente do britamento de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 0,075 mm”. Esse material é, então, considerado um resíduo oriundo do processo de britagem.

O processo de produção de britas começa com os desmontes primários e secundários da rocha através da utilização de explosivos. Os blocos obtidos são armazenados e, posteriormente, levados para os britadores primários e secundários onde se tem a geração dos finos de rocha. Estes finos são depositados em bacias de decantação e, posteriormente, descartados (CUCHIERATO, 2000).

Devido ao seu reduzido valor comercial estes finos são normalmente dispostos em pilhas localizadas nas próprias pedreiras, a céu aberto, causando diversos impactos ambientais, como assoreamento dos rios e contaminação do ar, podendo afetar a saúde dos trabalhadores e da população no seu entorno (Figura 10). A inalação das partículas de finos de rocha está associada à ocorrência de asma, câncer de pulmão e pneumoconioses como a silicose, sendo esta uma doença crônica, irreversível e incurável (D'AGOSTINO e SOARES, 2003; FELEKOGLU, 2007; RODRIGUES, MANTOVANI e LOPES, 2004; ALMEIDA e SAMPAIO, 2004).

Figura 10. Pilha de finos de rocha disposta em pátio de uma pedreira.



Fonte: (SANTANA, 2008, p. 23).

A utilização de finos de rocha reduz o consumo de cimento nas matrizes cimentíceas, gerando uma economia significativa na produção deste material (UYSAL e YILMAZ, 2011). Além disso, a indústria do cimento é tida como uma das mais poluidoras do mundo, gerando, no Brasil, cerca de 564 kg de CO₂ por tonelada de cimento produzida (VISEDIO e PECCHIO, 2019). Assim, a redução do consumo

de cimento é de extrema importância para a diminuição do impacto ambiental causado pela construção civil.

Além de reduzir consideravelmente o consumo de cimento, a incorporação de adições minerais em concretos e argamassas tem como objetivo melhorar a distribuição das partículas que constituem o material, de forma a reduzir o atrito entre os grãos e aumentar a quantidade de água livre no sistema. Sendo assim, a adição destes materiais aumenta tanto a densidade quanto a fluidez do concreto autoadensável, podendo reduzir consideravelmente o consumo de aditivo superplastificante e a porosidade do material. O aumento da durabilidade do concreto está possivelmente relacionada à redução de porosidade das matrizes (TOPÇU, BILIR e UYGUNOGLU, 2009; UYSAL e YILMAZ, 2011).

Com foi dito anteriormente, a incorporação das adições minerais tende a aumentar o espalhamento do CAA. Porém, a partir de certo teor de adição, o espalhamento reduz significativamente devido ao excesso de materiais finos, o que exige maior consumo de água e/ou aditivo superplastificante (TOPÇU *et al.*, 2009; GESOĞLU *et al.*, 2012).

A adição de finos de rocha ao concreto autoadensável contribui, ainda, para o aumento de sua viscosidade, podendo reduzir consideravelmente o consumo de aditivos modificadores de viscosidade, além de diminuir a segregação dos materiais constituintes e possuir potencial de aumentar as resistências mecânicas. Portanto, o emprego deste resíduo nos CAAs apresenta a possibilidade de agregar valor econômico ao resíduo, minimizar o impacto ambiental causado pela ineficiente disposição final deste material e reduzir o custo final do empreendimento, tornando o CAA mais competitivo comercialmente (FELEKOGLU, 2007; GESOĞLU *et al.*, 2012; HO *et al.*, 2002; SCHANKOSKI *et al.*, 2017).

Para garantir a estabilidade dos concretos e argamassas, algumas características do fino de rocha devem ser levadas em consideração quando da escolha da adição, tais como: o formato das partículas e a distribuição granulométrica do pó, que interferem diretamente na viscosidade e, conseqüentemente, no escoamento da mistura, além da composição química e mineralógica do mesmo, pois, estas características afetam as reações que ocorrerão após a mistura do concreto e da argamassa (MORAES, 2010; MENEZES,

2006; SADEK, EL-ATTAR e ALI, 2016; UYSAL e YILMAZ, 2011; RIZWAN e BIER, 2012).

De acordo com estudos realizados por Felekoglu (2007), finos de pedreira de origem calcária aumentam a viscosidade do concreto autoadensável, melhorando a estabilidade das misturas e reduzindo a segregação dos materiais constituintes, sendo considerados excelentes modificadores de viscosidade. Ainda neste estudo, foi observado que a magnitude do aumento da viscosidade depende da porcentagem de adição utilizada, porém, a relação encontrada não foi linear.

Do mesmo modo, verificou-se que a adição de finos que possuíam maior área superficial aumentou de maneira mais significativa o espalhamento da matriz cimentícia. Este resultado se deve ao fato de, apesar do tamanho médio de partículas ser reduzido, as características superficiais e a porosidade dos grãos possuem influência significativa na trabalhabilidade do CAA. Além disso, grãos mais grosseiros possuem superfícies irregulares e extremamente porosas quando comparados à morfologia da adição mais fina, retendo maior quantidade de água e, conseqüentemente, reduzindo a fluidez do material (FELEKOGLU, 2007).

Sadek *et al.* (2016) também concluíram que a adição de finos de mármore resultou em uma redução do espalhamento do CAA devido à sua superfície angular e textura rugosa das suas partículas, o que aumenta a demanda de água e, conseqüentemente, reduz a trabalhabilidade do CAA. Além disso, foi observado que o aumento do teor de finos no concreto autoadensável aumentou sua habilidade passante devido à redução do consumo de agregados graúdos e do atrito interno entre as partículas sólidas.

Uysal e Yilmaz (2011) estudaram a influência da substituição parcial do cimento por finos de calcário, basalto e mármore e observaram que todas as misturas em que foram empregadas estas adições apresentaram melhor trabalhabilidade. Esta melhoria é resultado de um melhor empacotamento de partículas, que reduz o atrito entre estas e facilita o escoamento do material. Ao contrário do estudo de Felekoglu (2007), os autores concluíram que adições mais grossas foram mais eficientes em aumentar o espalhamento do que partículas mais finas, visto que as adições que possuem maior área superficial resultaram em um aumento da demanda de água, reduzindo a trabalhabilidade do CAA. Conclui-se,

portanto, que não apenas a dimensão das partículas influencia no espalhamento, como também suas características morfológicas.

Além disso, todas as misturas contendo adição mineral apresentaram resistências menores quando comparadas às misturas de referência, exceto a mistura contendo pó de mármore. Os autores explicam que a adição do pó de mármore, material com granulometria mais fina entre as estudadas, resultou em um melhor empacotamento de partículas e em uma consequente densificação da matriz, derivando em uma dispersão mais eficiente dos grãos de cimento. Ao mesmo tempo, as irregularidades da superfície do pó de mármore atuam como pontos de nucleação para reações de formação da portlandita e C-S-H, acelerando a hidratação dos clínqueres e aumentando a resistência do CAA em menores idades (UYSAL e YILMAZ, 2011).

Dehwah (2012) estudou a influência da incorporação de finos de rocha calcária, combinados à sílica ativa e à cinza volante, nas propriedades mecânicas de concretos autoadensáveis. Os resultados encontrados mostraram que misturas com adição de 8 a 10% de finos de rocha possuíram melhor desempenho mecânico do que as demais formulações, o que, segundo o autor, ocorria pelo fato do fino de rocha preencher os microporos do concreto de maneira mais eficiente do que a sílica ativa e a cinza volante.

Atualmente existem poucos estudos acerca da influência da adição de finos de rocha granítica em argamassas e concretos autoadensáveis. Karmegam, Kalidass e Ulaganathan (2014) e Sadek, El-Attar e Ali (2016) estudaram a influência da incorporação de FRG proveniente do beneficiamento de rochas artesanais, enquanto nos estudos realizados por Elyamany, Elmoaty e Mohamed (2014) e Ho *et al.* (2002) estes finos eram provenientes de pedreiras. A diferença da forma de obtenção desta adição interfere tanto na granulometria quanto no formato das partículas o que altera sua influência nas propriedades das matrizes.

Estes estudos concluíram que a influência da incorporação de FRG nas propriedades dos concretos autoadensáveis depende das características físicas e morfológicas do material. Além disso, verificou-se que estes finos atuam como micro-filers preenchendo os poros capilares e densificando a zona de transição, o que pode resultar em uma melhora no desempenho mecânico das formulações. No

estado fresco, a adição de FRG aumentou o tempo de escoamento pelo funil-V das misturas, indicando um aumento da viscosidade, além de manter a habilidade passante pelo método do anel-J e aumentar a resistência à segregação das misturas (KARMEGAM, KALIDASS e ULAGANATHAN, 2014; SADEK, EL-ATTAR e ALI, 2016; ELYAMANY; ELMOATY; MOHAMED, 2014; HO *et al.*, 2002).

Com isso, conclui-se que ainda há uma quantidade incipiente de estudos acerca da influência da incorporação de FRG proveniente de pedreiras nas propriedades de argamassas e concretos autoadensáveis quando comparado à quantidade de estudo acerca dos outros tipos de finos de rocha.

Estudos realizados por Ye *et al.* (2007), Poppe e De Schutter (2005) e Uysal e Yilmaz (2011) acerca da influência da incorporação de fíleres na hidratação e microestrutura das pastas de cimento mostraram que esta incorporação tende a reduzir a duração do período de dormência, acelerar as reações de hidratação do período de aceleração e fazer com que apareça, em alguns casos, um terceiro pico de liberação de calor por volta de 12 horas após iniciado o contato entre o material e a água da mistura. Estes resultados podem ser explicados pela ação do fíler como ponto de nucleação para hidratação do C_3S e C_2S .

Além disso, a incorporação deste material ativa reações menos expressivas em pastas de concretos tradicionais, justificando o surgimento do terceiro pico. Sendo assim, os resultados encontrados por estes autores concluem que os finos estudados não participam das reações químicas, porém, atuam como acelerador da hidratação nas primeiras idades (YE *et al.*, 2007; POPPE e DE SCHUTTER, 2005; UYSAL e YILMAZ, 2011).

2.4. USO DA AREIA DE BRITAGEM EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL À AREIA NATURAL

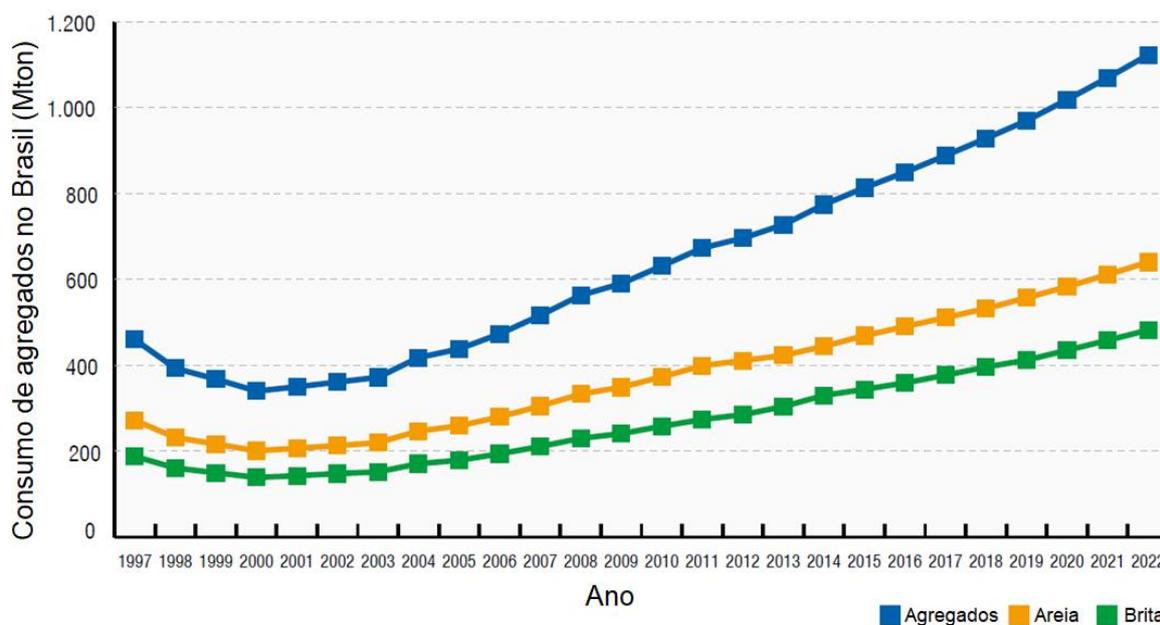
A utilização de areia natural na produção de concretos e argamassas vem se tornando uma problemática nos dias atuais, pois, seu processo de extração apresenta alto custo e, principalmente, acarreta diversos impactos ambientais. (ASSUNÇÃO, 2014; ILANGOVANA, MAHENDRANA e NAGAMANIB, 2008; YAMEI e LIHUA, 2017). Devido a estes impactos, órgãos ambientais como IBAMA (Instituto

Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) vêm proibindo ou inibindo sua extração em diversas localidades.

O Código Florestal Brasileiro (1965), por meio da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965 (BRASIL, 1965), classifica como áreas de preservação permanente a vegetação natural que se encontra ao longo dos rios. Como a areia natural para construção civil é obtida, em sua grande parte, dos leitos dos rios, as licenças de exploração têm sido suspensas, aumentando a escassez e custo do material. Sendo assim, as jazidas naturais disponíveis para extração da areia natural estão cada vez mais distantes dos grandes centros urbanos, o que eleva significativamente o custo com o transporte deste material.

Além disso, os locais de extração da areia natural resultam em áreas de acúmulo de água parada, apresentando risco de proliferação de agentes transmissores de doenças, como mosquitos da dengue, gerando riscos à saúde. Dados levantados pela ANEPAC (Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção) mostram que o consumo de areia natural, no Brasil, para a construção civil vem crescendo desde 2001 e tende a manter o crescimento até o ano de 2022 (Figura 11). Neste cenário, a busca de materiais alternativos é de suma importância na busca da redução do impacto ambiental gerado pela construção civil (YAMEI e LIHUA, 2017; ALMEIDA e SAMPAIO, 2004).

Figura 11. Consumo anual de agregados, no Brasil, em milhões de toneladas.



Fonte: (ANEPAC, 2012, p.3).

Como apresentado no item anterior, o processo de britagem gera como subproduto o pedrisco, que é definido pela NBR 7225 (ABNT, 1993) como “*material proveniente do britamento de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 4,75 mm e de dimensão nominal mínima igual ou superior a 0,075 mm*”. Este material pode ser empregado em substituição parcial ou total à areia natural, com o intuito de minimizar os impactos gerados por sua extração. Além disso, por ser um subproduto do processo de britagem, sua utilização não traria malefício ao meio ambiente, pois, seria dada uma opção de destinação final adequada a outro subproduto de baixo valor comercial.

Por outro lado, como as pedreiras normalmente se encontram mais próximas dos grandes centros urbanos, o custo com transporte destes materiais é consideravelmente menor do que o apresentado pela areia natural. Sendo assim, a substituição parcial ou total da areia natural pela areia de britagem resulta em uma economia no custo final do material, na energia utilizada para transportar o mesmo e uma considerável redução de emissão de dióxido de carbono (CO₂) (BEIXING, GUOJU e MINGKAI, 2011).

A substituição parcial da areia natural pela areia de britagem pode trazer inúmeros benefícios para o concreto autoadensável, pois, se dosada de maneira eficiente, a utilização da areia de britagem pode resultar em um empacotamento mais eficiente das partículas. Isto se deve ao fato de a areia de britagem e a areia natural tenderem a ter tamanhos médios de partículas diferentes e, assim, quando utilizadas em conjunto e em proporções adequadas, uma tende a preencher os vazios deixados pela outra, resultando em concretos e argamassas mais densos.

Segundo pesquisas realizadas por Menossi (2004), Gonçalves *et al.* (2000) e D'Agostino e Soares (2003), a forma do grão das areias provenientes do processo de britagem depende diretamente do processo de produção e dos equipamentos utilizados. Sendo assim, areias de britagem provenientes de processos produtivos diferentes podem afetar de maneira distinta as propriedades das matrizes cimentícias.

De acordo com Yamei e Lihua (2017) e Donza *et al.* (2002), as características morfológicas do agregado miúdo compõem o fator mais importante para determinação do consumo de água da mistura além de influenciar significativamente as resistências à compressão e à tração na flexão dos materiais. Quando comparada à areia natural, a areia de britagem demanda maior consumo de água e/ou de aditivo superplastificante para atingir mesma trabalhabilidade. Isso se dá, principalmente, por causa da textura da superfície, irregularidades e angularidade que resultam em menor quantidade de água livre na mistura, afetando negativamente a trabalhabilidade dos materiais (YAMEI e LIHUA, 2017; DONZA *et al.*, 2002; SHEN *et al.*, 2018).

Além disso, D'Agostino e Soares (2003), Silva *et al.* (2005) e Prakash e Rao (2016) concluíram que as argamassas e concretos preparados com areia de britagem apresentaram maior resistência à compressão e à tração quando comparada com formulações que foram preparadas com areia natural, principalmente, devido à maior resistência da zona de transição proveniente das irregularidades superficiais da areia artificial que geram uma espécie de travamento entre os agregados miúdos e a pasta.

Segundo Beixing, Guoju e Mingkai (2011) e Shen *et al.* (2018), inicialmente a adição dos finos de britagem afeta positivamente a trabalhabilidade devido a um

maior preenchimento dos vazios, o que facilita o movimento das partículas, aumentando a fluidez do concreto. No entanto, quando o teor de finos adicionado é superior ao ideal, a influência passa a ser negativa, pois, devido à elevada área superficial deste material, há uma maior demanda de água ou de aditivos para se atingir uma trabalhabilidade adequada do concreto.

Com isso, ressalta-se a necessidade de uma caracterização física e morfológica do material com a finalidade de entender melhor seu comportamento quando adicionado aos concretos e argamassas (BEIXING, GUOJU e MINGKAI, 2011; SHEN *et al.*, 2018).

Benabed *et al.* (2012) estudaram a influência da utilização de diferentes tipos de areia (areia de britagem, areia de rio, areia de duna e diferentes proporções entre estas) nas propriedades das argamassas autoadensáveis. Os autores concluíram que a utilização de areia de britagem em conjunto com areia de rio melhora as propriedades reológicas e mecânicas das argamassas, por proporcionar melhor distribuição granulométrica enquanto a utilização da areia proveniente de duna, em teores elevados, resulta em perda de desempenho mecânico devido à sua elevada área superficial.

Assunção (2014) concluiu que foi possível obter CAA confeccionado com adições de 30% de areia de britagem, a partir do estudo das características reológicas da argamassa e que a presença deste material não interferiu significativamente na resistência mecânica do concreto. Já em um estudo realizado por Klein (2008), verificou-se que a substituição de 30% da areia natural por AB resultou em melhor desempenho mecânico além de um aumento da viscosidade. Esta divergência de resultados está diretamente relacionada com as características das areias empregadas nas respectivas pesquisas, ressaltando que as características físicas e morfológicas dos agregados influenciam de maneira significativa no comportamento final das misturas.

Alguns estudos realizados em concretos autoadensáveis mostram que a incorporação de areia de britagem, ou areia artificial, tende a aumentar o espalhamento do CAA, reduzindo o teor de aditivo superplastificante necessário para alcançar o espalhamento ideal (KUMAR e RADHAKRISHNA, 2016; ZEGHICHI, BENGHAZI e BAALI, 2014). Por outro lado, devido à superfície irregular dos grãos

da areia artificial, esta incorporação parece reduzir a habilidade passante dos CAAs devido ao aumento do atrito que proporciona (TULJARAMSA e GUNDAKALLE, 2015; ZEGHICHI, BENGHAZI e BAALI, 2014).

Sobre a influência da incorporação da AB no tempo de escoamento dos concretos autoadensáveis há uma divergência de resultados encontrados na literatura. Enquanto os estudos realizados por Tuljaramsa e Gundakalle (2015) concluíram que esta incorporação aumenta o tempo de escoamento, tanto pelo ensaio de T_{500} quanto pelo funil-V, Kumar e Radhakrishna (2016) concluíram que este tipo de areia facilita o escoamento, reduzindo o tempo de fluxo. Estas divergências são provenientes das diferenças morfológicas e físicas das partículas de areia de britagem utilizadas em cada pesquisa, ressaltando que areias provenientes de pedreiras diferentes e/ou com processos produtivos diferentes influenciam as propriedades de maneira distinta.

Em contrapartida, parece ser um senso comum da literatura a incorporação de areia de britagem, em conjunto com areia natural, tende a melhorar a resistência das misturas devido ao interavamento mecânico que proporciona devido à irregularidade da superfície de suas partículas (KUMAR e RADHAKRISHNA, 2016; TULJARAMSA e GUNDAKALLE, 2015; ZEGHICHI, BENGHAZI e BAALI, 2014).

Um estudo realizado por Nanthagopalan e Santhanam (2011), concluiu que as formulações de concretos autoadensáveis com incorporação de areia de britagem necessitaram de uma maior quantidade de pasta para alcançar o espalhamento ideal quando comparadas às misturas de referência com areia natural. Isto se dá devido, novamente, às irregularidades superficiais das partículas de areia artificial além da elevada quantidade de finos que esta areia possui, quando comparada à areia natural, o que acaba por demandar uma maior quantidade de água.

2.5. MÉTODOS DE DOSAGEM

A Tabela 1 apresenta os principais métodos de dosagem para concretos autoadensáveis e suas considerações. Estes métodos podem ser classificados em três diferentes famílias: a dos métodos teóricos que se baseiam nas características de cada material empregado na mistura bem como na sua interação teórica com os demais componentes da mistura; a dos métodos empíricos que se baseiam em sucessivas dosagens e ajustes para que todas as características desejadas sejam alcançadas e, por fim, os métodos semi-empíricos que são aqueles que se baseiam na teoria para formular uma mistura preliminar e partem para a prática para validar e ajustar essas formulações.

Tabela 1 - Principais métodos de dosagem de CAA.

Autores	Ano	Considerações
Okamura e Ozawa	1993	<ul style="list-style-type: none"> • Quantidades de agregados fixas em 50% do volume de concreto de agregado graúdo e 40% do volume da argamassa de agregado miúdo.
Su et al.	2001	<ul style="list-style-type: none"> • Método que tem como ponto de partida a utilização da pasta para preencher os vazios deixados pelos agregados sendo dividido em nove etapas que vai desde o cálculo das quantidades de agregados até o ajuste da mistura
EFNARC	2002	<ul style="list-style-type: none"> • Baseia-se no método proposto por Okamura e Ozawa, com relação água/materiais secos fixa, entre 0,80 e 1,0 A quantidade de agregado graúdo utilizada varia entre 28% e 35% do volume da mistura e o volume de agregado miúdo é definido para balancear o volume dos outros constituintes
Gomes et al.	2003	<ul style="list-style-type: none"> • Dosagem de concreto autoadensável visando a obtenção de concretos de alta resistência, partindo do pressuposto que a trabalhabilidade do concreto é governada pela trabalhabilidade da pasta. São realizados estudos separados da composição da pasta e do esqueleto granular dos agregados empregados.

Fonte: (A Autora).

Tabela 1 (continuação) - Principais métodos de dosagem de CAA.

Tutikian	2004	<ul style="list-style-type: none"> • Baseia-se na metodologia de dosagem de concretos convencionais do IPT/EPUSP e é composto de 9 passos que resultam na confecção de três traços de concreto para confecção do diagrama de dosagem
Repette e Melo	2005	<ul style="list-style-type: none"> • Definição das relações água/cimento de acordo com a resistência e durabilidade visadas, seguido do estudo em pasta para definição do teor ideal de fíler. Em sequência iniciam-se os ensaios em argamassa para definir o teor de agregado miúdo e aditivo superplastificante. Finaliza-se o método com o ajuste do teor de agregado graúdo e otimização do teor de aditivo empregado.
Tutikian e Dal Molin	2007	<ul style="list-style-type: none"> • Aprimoramento do método proposto anteriormente por Tutikian, utilizando conceitos de empacotamento de partículas e diagramas de dosagem do IPT/EPUSP
Wang et al.	2014	<ul style="list-style-type: none"> • Modificação do método de dosagem proposto por Browsers para concretos convencionais que se baseia no método do empacotamento de partículas com intuito de reduzir a quantidade de pasta da mistura mantendo a qualidade e desempenho do concreto.

Fonte: (A Autora).

O primeiro método de dosagem para concretos autoadensáveis foi proposto, em 1993 (versão japonesa), pelos então professores da Universidade de Tóquio Hajime Okamura e Kazumasa Ozawa. No método proposto, a quantidade de agregados graúdos e miúdos é fixada para que o autoadensamento seja obtido, apenas com ajuste do teor água/finos utilizado e da dosagem de superplastificante (OKAMURA e OUCHI, 2003). Com isso, a aplicabilidade deste método é extremamente limitada, uma vez que não permite a variação da quantidade de agregado empregada, além de aumentar consideravelmente o custo final do material, uma vez que as propriedades reológicas seriam alcançadas através do uso de teores elevados de aditivos.

A EFNARC publicou, em 2002, um guia de especificações e diretrizes para CAAs, no qual foi proposto um método de dosagem que se baseia no método de

Okamura e Ouchi. Este método fixa a relação água/materiais secos, quantidade total de finos e quantidade de agregado graúdo. A relação água/cimento é definida com base nas exigências da norma EN 206 e o volume de agregado miúdo é definido para balancear o volume dos outros constituintes. Este método apresenta vantagens sobre o método proposto por Okamura e Ouchi, pois, permite, mesmo que de maneira limitada, uma adequação da proporção dos materiais, de acordo com as características dos agregados escolhidos.

Gomes, Gettu e Agulló apresentaram, em 2003, uma metodologia para a dosagem de concreto autoadensável que visa a obtenção de concretos de alta resistência com, no mínimo, 50 MPa de resistência aos 7 dias de idade. Esta metodologia proposta parte do pressuposto que a trabalhabilidade do concreto é governada pela trabalhabilidade da pasta. O método proposto é dividido em três fases: obtenção da pasta, determinação do esqueleto granular e seleção dos constituintes da pasta. Este método apresenta como principal desvantagem a dosagem dos aditivos superplastificantes no seu ponto de saturação, o que eleva consideravelmente o custo final do CAA, dificultando a expansão de sua aplicação. A principal vantagem do método é que o mesmo possui etapas mais simples e diretas do que os métodos anteriores, o que facilita sua utilização.

Um dos métodos recentes mais difundidos no Brasil é o método de dosagem proposto por Tutikian (2004) que se baseia na metodologia de dosagem de concretos convencionais do IPT/EPUSP de Helene e Terzian. O método de Tutikian é composto de 9 passos que resultam na confecção de três traços de concreto para que se possa fazer o diagrama de dosagem. Este método possui como desvantagem a elevada quantidade de cálculos e etapas propostas para a obtenção da dosagem do CAA, o que diminui a viabilidade de sua aplicação em centros de dosagem. Em 2007 o método foi aprimorado e chamado de método de Tutikian e Dal Molin.

O método de dosagem proposto por Repette-Melo (2005), que será utilizado neste trabalho, baseia-se na racionalização da dosagem do concreto autoadensável por meio da escolha da relação água/aglomerante, segundo as características visadas de durabilidade e/ou resistência à compressão. Assim, o presente método auxilia na disseminação do uso do CAA por aproximar o mesmo das necessidades

das construções atuais. Este método se diferencia dos demais pela utilização de ensaios rápidos e de baixo custo, sem a necessidade de julgamentos subjetivos que dependem da experiência dos trabalhadores, e sem a utilização de cálculos excessivos, permitindo a utilização dos mais diversos materiais e, conseqüentemente, reduzindo o custo final do CAA. Neste método, o aditivo superplastificante é dosado abaixo do seu ponto de saturação, com o intuito de garantir a autoadensabilidade do material (MELO, 2005; REPETTE e MELO, 2009).

Por ser um método basicamente empírico, na presente pesquisa optou-se por adicionar a análise teórica do teor de vazios das misturas (P_{of}) bem como a análise distanciamento de partículas (IPS e MPT) para auxiliar no entendimento da influência da incorporação do FRG e da AB sobre as misturas autoadensáveis.

Em 2014, Wang *et al.*, propuseram um novo método de dosagem para concretos autoadensáveis que se fundamenta no método baseado em empacotamento de partículas, originalmente proposto por Brouwers para concretos convencionais. Este novo método apresenta como objetivo principal otimizar o empacotamento de partículas dos materiais empregados nas formulações com intuito de reduzir a quantidade de pasta necessária na mistura e manter a qualidade e o desempenho do CAA. As formulações provenientes deste novo método apresentaram potencial de diminuir até 20% do teor de ligante das misturas em comparação às formulações de referência, mantendo desempenho satisfatório.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Cimento

O cimento utilizado neste estudo foi o CP V ARI, fornecido pela Intercement.

3.1.2. Agregados (Areia e Brita) Naturais

Neste trabalho foi utilizada areia natural comercializada na cidade de Salvador/BA, proveniente de jazidas existentes na cidade de Camaçari/BA e britas de origem granítica, com dimensão máxima característica ($D_{máx}$) igual a 12,5 mm. Para concretos autoadensáveis é usual a utilização de britas de granulometrias inferiores às empregadas nos concretos convencionais, com o intuito de diminuir o risco de travamento das mesmas entre as armaduras e as fôrmas.

3.1.3. Água

A água empregada na pesquisa é proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Salvador/BA, fornecida pela Empresa Baiana de Água e Saneamento S.A. (EMBASA).

3.1.4. Finos de rocha granítica e areia de britagem

Os finos de rocha granítica (FRG) e a areia de britagem (AB) utilizados nesta pesquisa foram cedidos pela Civil Pedreira, localizada na cidade de Salvador/BA, que tem capacidade produtiva de 100 mil toneladas de brita por mês, tendo produzido, no ano de 2018, cerca de 98 mil toneladas de pó de pedra e 73 mil toneladas de areia de britagem. O pó de pedra produzido pela empresa possui dimensão máxima de 2 mm. Na presente pesquisa, este material foi peneirado e a fração passante na peneira com abertura de 75 μ m, cerca de 74% do material, denominada de FRG, foi utilizada como filer.

3.1.5. Aditivo Superplastificante

Foi utilizado o aditivo superplastificante Hyperkem 80 à base de policarboxilato, da Novakem, e sua caracterização físico-química, fornecida pelo fabricante, é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização físico-química do aditivo superplastificante Hyperkem 80, fornecida pela Novakem.

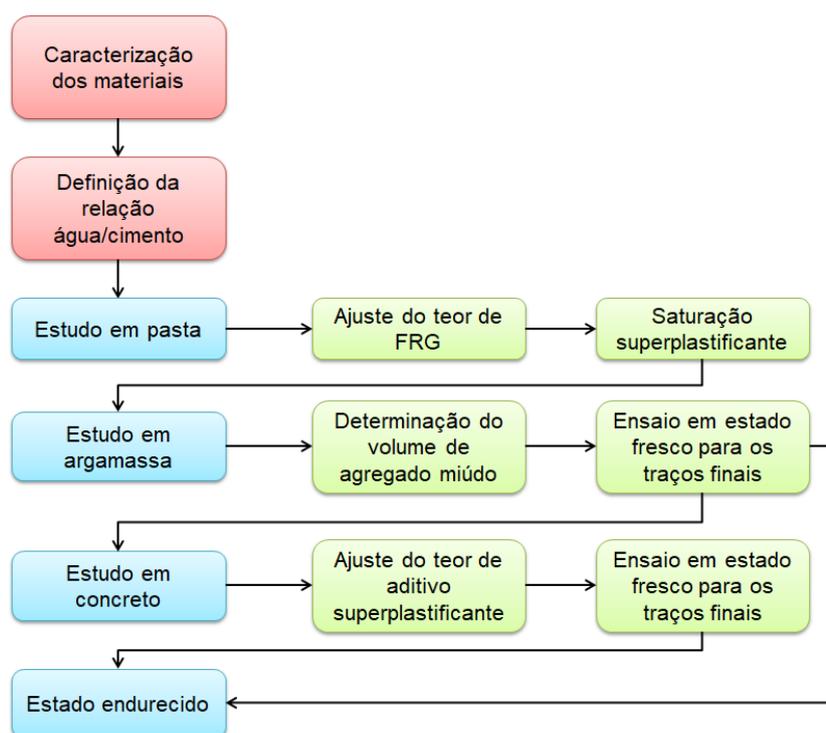
Propriedade	Valor apresentado
pH	4,0 ± 1,0
Massa específica (g/cm ³)	1,06 ± 0,02
Teor de sólidos (%)	21,9 ± 0,03

Fonte (Novakem).

3.2. MÉTODOS

A metodologia empregada no presente estudo é apresentada na Figura 12.

Figura 12. Fluxograma das etapas que compõem a presente pesquisa.



Fonte: (A autora).

Os materiais utilizados foram caracterizados de acordo com sua composição e propriedades físicas. Em seguida, foram realizados estudos em pastas e argamassas autoadensáveis, nos estados fresco e endurecido. Posteriormente, foram realizados estudos em concretos autoadensáveis, também nos estados fresco e endurecido, com o intuito de definir a formulação ideal para cada caso.

3.2.1. Caracterização dos materiais empregados

3.2.1.1. Distribuição granulométrica

A distribuição do tamanho de partículas dos agregados (areia, britas e areia de britagem) utilizados nesta pesquisa foi determinada por peneiramento, de acordo com o procedimento da NBR NM 248 (ABNT, 2003) e sua classificação foi realizada de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009). A partir desta análise, foram determinados o módulo de finura e a dimensão máxima característica. Além disso foi realizado o ensaio de teor de materiais pulverulentos, seguindo a NBR 7219 (ABNT, 1987).

As distribuições granulométricas do cimento e do FRG foram determinadas por granulometria a laser, via seca, em equipamento da marca Microtrac, modelo S3500, disponível no Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Este ensaio baseia-se na captação da fração de luz que atravessa a amostra em suspensão, analisando a porcentagem de massa acumulada, em função do diâmetro equivalente das partículas, uma vez que as partículas maiores tendem a se depositar mais rapidamente.

A distribuição granulométrica consiste na proporção relativa das massas dos diferentes tamanhos dos grãos do material. Esta propriedade apresenta grande influência na reologia e qualidade do concreto, como, também, no empacotamento final das partículas que constituem o material.

3.2.1.2. Massa Específica

A massa específica de dado material é dada pela relação da massa de seus grãos e o volume dos mesmos, incluindo os poros impermeáveis, porém, desconsiderando os poros permeáveis. As massas específicas das areias natural e de britagem foram determinada conforme procedimento estabelecido pela NBR NM 52 (ABNT, 2009). Para os agregados graúdos, a massa específica foi determinada conforme procedimento estabelecido pela NBR NM 53 (ABNT, 2009).

Para o cimento e os FRG, a massa específica foi determinada utilizando a técnica de picnometria a gás hélio. O equipamento utilizado foi um picnômetro Micromeritics AccuPyc II 1340.

3.2.1.3. Massa Unitária

A massa unitária representa a relação entre a massa dos grãos que compõem o material e seu volume total, incluindo os poros permeáveis, impermeáveis e os vazios entre grãos. Este parâmetro é de grande utilidade principalmente em canteiros de obra, onde as medidas são normalmente feitas em volume e o acesso à balança é restrito. Além disso, alguns métodos de dosagem exigem o conhecimento da massa unitária dos agregados graúdos no estado compactado.

A determinação da massa unitária das areias natural e de britagem e da brita, tanto no estado solto quanto no estado compactado foi realizada de acordo com a norma NBR NM 45 (ABNT, 2006).

3.2.1.4. Área Superficial Específica

A área superficial específica é uma grandeza que indica a relação entre a área superficial e a massa do material, sendo um indicativo da reatividade do material e relacionando-se com sua finura e/ou rugosidade superficial. A área superficial específica pode ser determinada segundo diversos métodos, entre eles os métodos de Blaine e BET, utilizados nesta pesquisa.

O método Blaine segue a NM 76 (ABNT, 1998), sendo a superfície específica determinada pela comparação do material em estudo com uma amostra de cimento

de referência, por meio do método de permeabilidade ao ar. Durante o ensaio, observa-se o tempo necessário para certa quantidade de ar passar pela camada de material compactado. Quanto maior o tempo necessário para o ar fluir pela amostra, mais fino é o material. Já no método BET, a área superficial específica é determinada pela adsorção física de camadas moleculares de um gás inerte sobre a superfície das partículas do material em estudo. A partir da curva isoterma obtida pelo ensaio e da teoria matemática desenvolvida por Brunauer, Emmett e Teller, descreve-se a adsorção gerada, que serve como base para a definição da área superficial da amostra.

As áreas superficiais específicas do cimento e do FRG foram determinadas pelo método de Blaine, utilizando um permeabilímetro de Blaine automático da marca Acme Labo, modelo BSA1 e pelo método BET (Brunauer, Emmett, Teller), utilizando o equipamento Gemini VII da Micromeritics.

3.2.1.5. Composição Química (FRX)

Para a análise da composição química do cimento e do FRG, foi empregada a técnica de fluorescência de raios X (FRX), utilizando-se o equipamento S2 Ranger, da marca Brucker.

A energia proveniente dos raios X é absorvida pela amostra em análise, criando vacâncias nas camadas eletrônicas dos átomos que compõem a mesma, caso possuam energia suficientemente alta. Ao ocorrer o deslocamento de elétrons das camadas mais externas para as mais internas, com o intuito de preencher estas vacâncias, os mesmos emitem radiações fluorescentes características dos materiais presentes. Com a medida do comprimento da onda e da energia emitida, é possível identificar os elementos que compõem o material, assim como a determinação de suas massas e concentrações.

3.2.1.6. Composição Mineralógica (DRX)

Para identificação da composição mineralógica do FRG e do cimento foi utilizada a técnica de difração de raios X (DRX). Para tal ensaio foi utilizado um difratômetro D2 Phaser Bruker, com tubo de alvo de cobre (radiação $K\alpha$ com

comprimento de onda de 1,54060 Å) de 30 kV e 10 mA, sem sistema de filtragem com monocromador secundário. As fases presentes nas amostras foram posteriormente identificadas com o auxílio do programa computacional DIFFRAC plus-EVA, com base de dados centrada no sistema COD (*Crystallography Open Database*).

Esta técnica se baseia na incidência de um feixe monocromático de raios X na amostra, que deve estar pulverizada (partículas de 0,002 mm a 0,005 mm de diâmetro). Quando o feixe atinge um átomo, os elétrons ao seu redor começam a oscilar na mesma frequência do feixe incidente e, havendo interferência construtiva entre as ondas, o feixe sofrerá difração em um ângulo que é o dobro do ângulo de incidência (em relação a um plano fixo), conforme a lei de Bragg (Equação 7).

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \quad (7)$$

Em que, n é um número inteiro que corresponde à ordem de difração; λ é o comprimento de onda característico do feixe; d é a distância interplanar dos planos cristalográficos e θ é o ângulo de incidência.

Assim, são obtidas informações relativas às distâncias entre os planos cristalográficos e à intensidade da reflexão. Os picos de difração, verificados para cada ângulo (2θ), são característicos das fases presentes, podendo identificar as mesmas.

3.2.1.7. Morfologia

A morfologia do FRG foi avaliada utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV), Veja 3 LMU-TESCAN da marca Phenom. As imagens foram obtidas com auxílio de um detector BSE (*Backscattering Electron*) com tensão de 15 kV.

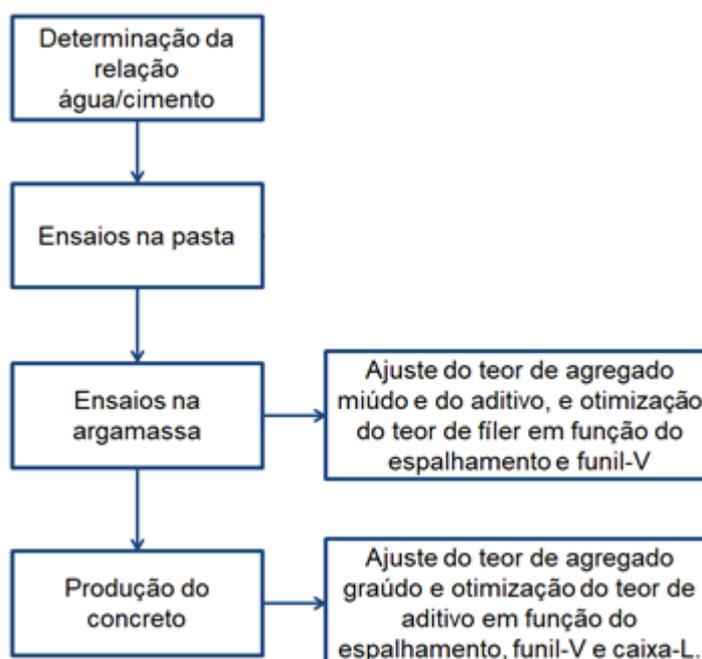
A técnica de microscopia eletrônica de varredura utiliza um feixe de elétrons, que varre a superfície da amostra, formando a imagem a partir da interação do feixe incidente com a superfície do material. Esta imagem pode ser formada a partir de dois tipos de sinais emitidos pela amostra, sendo os mais utilizados os sinais

gerados pelos elétrons secundários (SE) ou pelos elétrons retroespalhados (BSE). Os chamados elétrons retroespalhados são aqueles que não são atraídos pelo núcleo do átomo, sendo reemitidos pelo espalhamento elástico através da superfície do material em análise. Esta interação elástica faz com que os elétrons se aproximem da superfície do detector com energia cinética, associando a intensidade do espalhamento com o número atômico do elemento. Esta técnica foi utilizada para analisar o formato e, conseqüentemente, a tendência à aglomeração dos FRG.

3.2.2. Dosagem das argamassas e concretos autoadensáveis.

Na presente pesquisa foi adotado o método de dosagem proposto por Repette-Melo (2005), que se baseia na racionalização da dosagem do concreto autoadensável pela escolha da relação água/aglomerante, segundo as características desejadas de desempenho mecânico e de durabilidade (Figura 13). Assim, o presente método auxilia na disseminação do uso do concreto autoadensável por aproximar o mesmo das necessidades das construções atuais (MELO, 2005; REPETTE e MELO, 2009).

Figura 13. Fluxograma do método de dosagem proposto por Repette-Melo.



Fonte: (MELO, 2005, p. 158).

3.2.2.1. Escolha dos materiais

O primeiro passo deste método consiste na escolha dos materiais empregados. Consideram-se como finos provenientes da adição mineral, as partículas passantes na peneira com abertura de malha de 0,075 mm, sendo utilizada para a composição das pastas. As partículas retidas na peneira com abertura de 0,075 mm deverão ser consideradas como parte do agregado miúdo.

3.2.2.2. Dosagem preliminar da pasta

A seguir, iniciou-se o estudo em pasta, que teve como ponto de partida a definição das relações água/cimento a serem estudadas. Para a definição deste parâmetro, foi verificada a classe de resistência mecânica desejada, sendo adotadas relações água/cimento que resultem em resistências de 25, 35 e 45 MPa.

Para a definição destas relações água/cimento foi traçada a curva de Abrams para o cimento utilizado, seguindo as diretrizes da NBR 7215 (ABNT, 1996). Para isto foram moldados corpos de prova de argamassa com traço de 1,00 : 3,00 (cimento: areia normal) e relações água/cimento de 0,40; 0,48; 0,55; 0,60 e 0,70. Estas argamassas tiveram suas propriedades avaliadas nas idades de 7 e 28 dias.

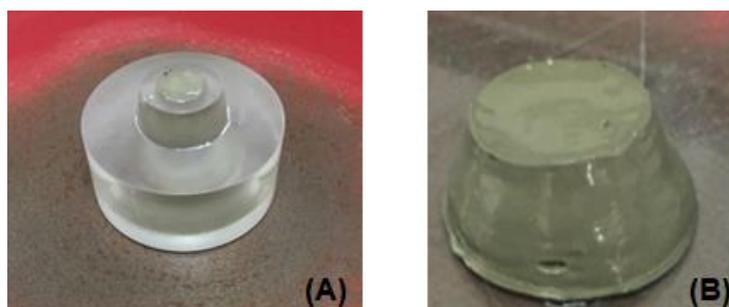
Em seguida, foram definidos os teores de FRG a serem incorporados nas pastas com as relações água/cimento definidas de maneira empírica, com intuito de simular o que acontece em construções reais. O teor ideal desta adição é aquele em que a pasta não apresenta mais exsudação, devendo ser adicionado em incrementos de 5%, ou em incrementos menores, caso haja a necessidade de uma dosagem mais rigorosa, visando garantir a estabilidade da mistura no estado fresco. O ajuste do teor de adição volumétrica de FRG, em relação ao cimento, foi realizado mantendo fixa a relação água/cimento definida previamente.

Além da análise visual da segregação, após finalizado o espalhamento da pasta utilizando o mini cone de Kantro (Figura 14), foi analisado o índice de exsudação das pastas com diferentes teores de adição, de acordo com a NBR 7681-3 (ABNT, 2013). Este ensaio consiste na inserção da pasta em estudo no interior de uma proveta, marcando-se o volume inicial da amostra (V_i). Após duas horas em repouso, faz-se a leitura do volume final da amostra (V_f), que consiste no

volume da calda somado ao volume da água exsudada, e do volume de sólidos da pasta (V_s). Com estes dados, calcula-se o índice de exsudação (E_{sd}), de acordo com a Equação 8.

$$E_{sd}(\%) = \frac{V_f - V_s}{V_i} * 100 \quad (8)$$

Figura 14. Ensaio de espalhamento das pastas de cimento (A) Mini cone de Kantro e (B) Exemplo de pasta após espalhamento



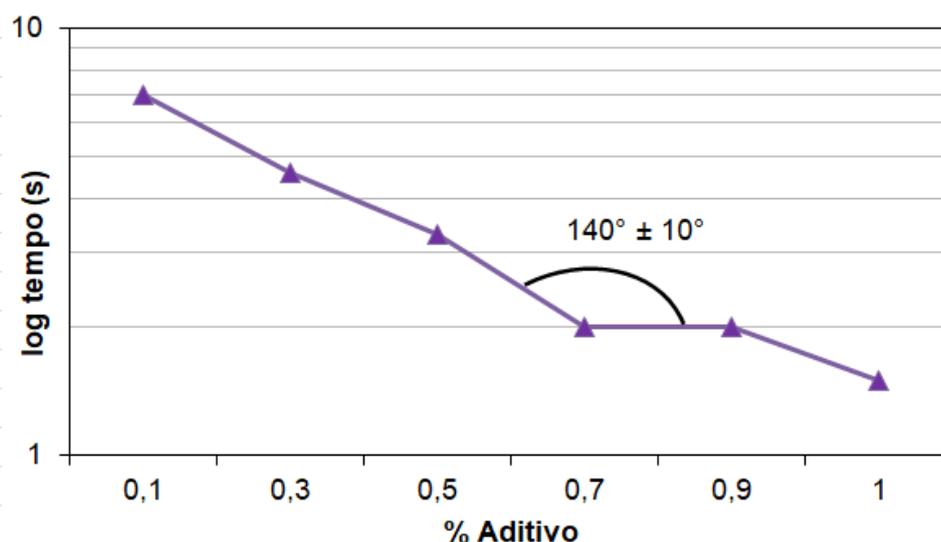
Fonte: (A Autora).

Com a definição dos teores de FRG para cada relação água/cimento, foi analisado o ponto de saturação do aditivo superplastificante. O ponto de saturação é tido como o ponto em que ocorre a maior dispersão das partículas de cimento na matriz, ou seja, a partir deste ponto não existe uma alteração significativa no tempo de fluxo da mistura. Além disso, alguns estudos mostram que teores de superplastificantes acima do ponto de saturação podem gerar efeitos negativos, como retardo excessivo do tempo de pega e problemas de estabilidade (MELO, 2005; RONCERO, 2000; ROY e ROUSSEL, 2004).

Para a determinação do ponto de saturação do superplastificante nas pastas da presente pesquisa, utilizou-se o teste do Cone de Marsh, de acordo com o método proposto por Roncero (2000). Este método consiste no preenchimento do cone com 800 mL de pasta, medindo-se o tempo necessário para o escoamento de 200 mL do material. Foram realizadas adições de 0,2% de aditivo, em relação à massa de cimento, considerando o teor de sólidos do aditivo, ou seja, o teor de água presente no aditivo foi descontado da água a ser adicionada na mistura.

O ponto de saturação representa o momento em que ocorre uma redução do tempo de fluxo para valores inferiores ou iguais a 1 segundo. Graficamente, está associado ao ponto em que o ângulo interno da curva log do tempo de escoamento *versus* teor de superplastificante mede $140^\circ \pm 10^\circ$ (REPETTE e MELO, 2009; RONCERO, 2000), conforme Figura 15.

Figura 15. Tempo de escoamento das pastas em função do teor de superplastificante utilizado.



Fonte: (A Autora).

As pastas foram misturadas em um misturador eletromecânico planetário de bancada da marca Contenco, com duas frequências de rotação (140 ± 5 rpm e 285 ± 5 rpm) e capacidade de 5 litros. O tempo total de mistura foi de 6 minutos, segundo o procedimento proposto por Melo (2005), com a seguinte rotina:

- 1) Colocação do cimento e 80% da água, em velocidade lenta, por 30 segundos;
- 2) Adição dos finos em velocidade lenta, por 30 segundos;
- 3) Mistura em velocidade rápida, por 1 minuto;
- 4) Limpeza da pá e descanso da mistura por 3 minutos;
- 5) Incorporação do aditivo e 20% da água, 5 minutos após início da mistura;
- 6) Mistura final em velocidade rápida, por 1 minuto.

3.2.2.3. Dosagem preliminar das argamassas

Finalizado o estudo em pasta, iniciou-se o estudo da composição das argamassas, que teve como ponto de partida a definição do teor ideal de agregado miúdo. Nesta etapa, as argamassas de mesma relação água/cimento foram produzidas variando-se o teor de agregado miúdo, a fim de definir o teor que apresenta os melhores resultados nos ensaios em estado fresco. O método preconiza que o volume de agregado miúdo empregado deve estar entre 35% e 55% do volume total da argamassa, estando, preferencialmente, entre 40% e 50%.

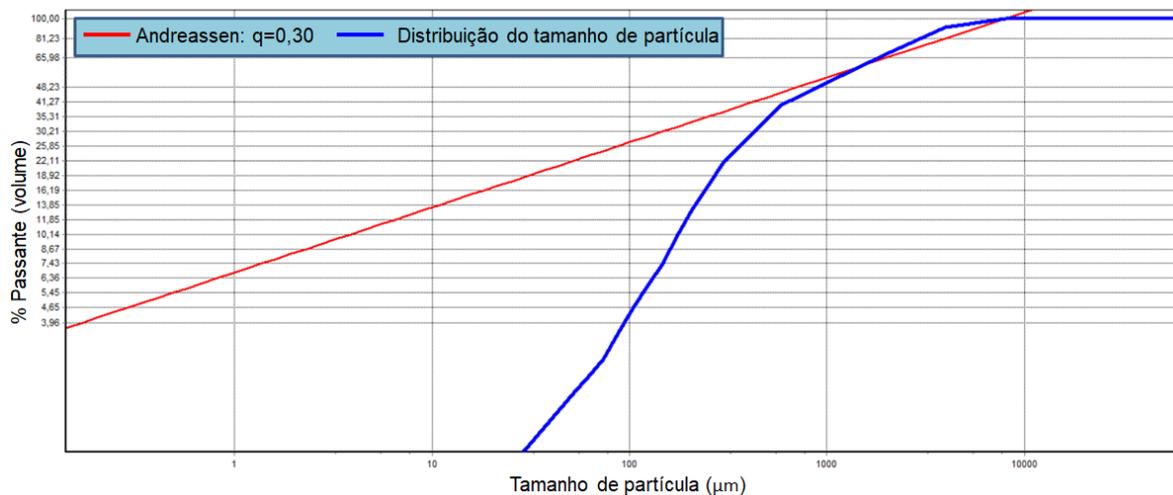
Esta faixa ideal de volume de agregado miúdo proposta pelo método desenvolvido por Repette-Melo está de acordo com diversos estudos, como os realizados por Domone (2006), EFNARC (2005), Gomes, Gettu e Agulló (2003), Jin (2002), Okamura e Ouchi (2003) e Rizwan e Bier (2009). Sendo assim, no presente estudo, foram analisados os volumes de 40%, 45% e 50% de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa.

O primeiro passo para determinação da proporção ideal entre a areia natural e a areia de britagem das argamassas foi a utilização do software EMMA (*Elkem Materials – Mixture Analyzer*) da empresa Elkem. Este software permite a entrada dos dados das distribuições granulométricas dos materiais e a análise da proporção ideal entre estes, de forma a alcançar o maior fator de empacotamento possível.

Com os dados inseridos no programa, foi possível alterar a proporção entre as areias de forma a encontrar uma curva de distribuição granulométrica final (curva azul) que mais se aproxime da distribuição ideal (curva vermelha), como ilustrado na Figura 16. Esta distribuição ideal é dada pelo software de acordo com o “q-value” especificado. Este valor indica o fator de empacotamento que o usuário pretende alcançar e, para argamassas e concretos autoadensáveis, foram utilizados valores entre 0,28 e 0,30, conforme estudos de Castro e Pandolfelli (2009) e Oliveira *et al.* (2000).

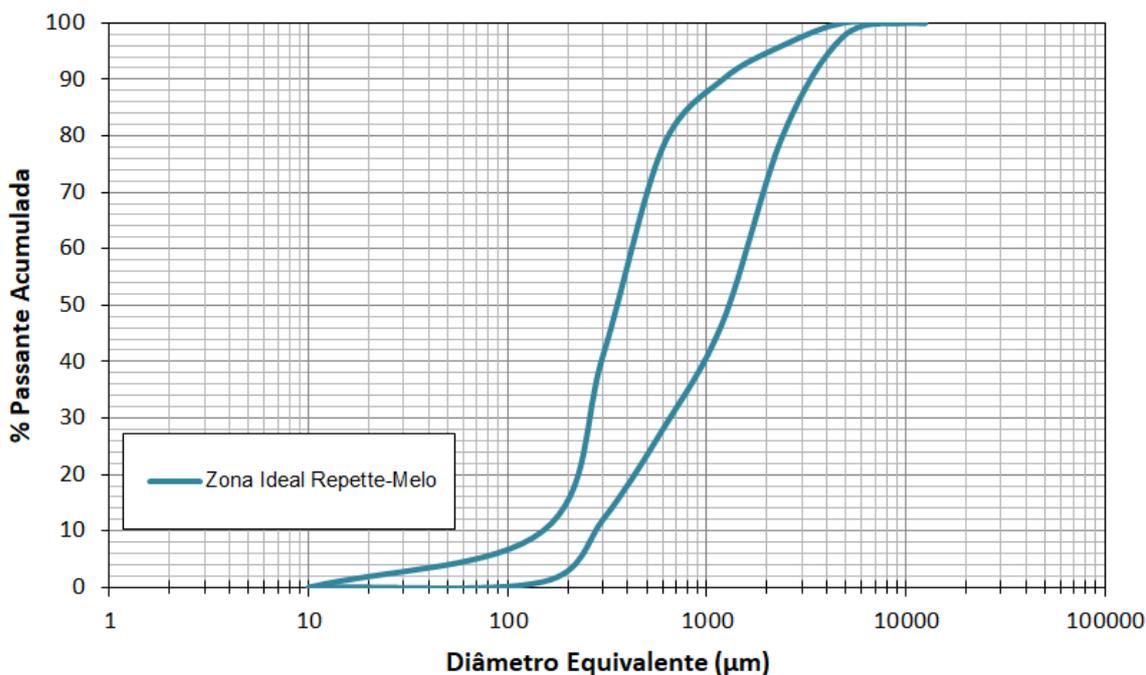
A proporção teórica ideal definida pelo software teve como objetivo encontrar a proporção entre areia natural e areia de britagem que resultasse em um bom empacotamento de partículas e se adequasse à distribuição ideal de agregado miúdo proposta pelo método, como ilustrado na Figura 17.

Figura 16. Comparação da curva de distribuição ideal (vermelha) e da curva de distribuição dos materiais utilizados (azul), por meio do software EMMA



Fonte: (A Autora).

Figura 17. Zona ideal da distribuição granulométrica para o agregado miúdo, proposta pelo método Repette-Melo.



Fonte: (Adaptado de Melo, 2005, p. 95).

Para cada volume de agregado miúdo (40, 45 e 50%) foram realizados os ensaios de espalhamento e funil-V adaptados para argamassa, conhecidos como

mini *slump-test* e mini funil-V. Nesta etapa, realizou-se a incorporação do aditivo superplastificante, em massa de sólidos do aditivo em relação à massa de cimento, em incrementos de 0,05% ou 0,02%, quando da necessidade de uma dosagem mais precisa, partindo do teor de 0,1%. O método preconiza que o teor ideal de aditivo é aquele que resulta em um diâmetro de espalhamento entre 200 e 280 mm e tempo de escoamento pelo mini funil-V entre 3,5 e 10 segundos. O volume ideal de agregado miúdo é considerado como o máximo que possa ser adicionado, atingindo os parâmetros definidos.

Após definição do volume ideal de agregado miúdo, pode-se aumentar o teor de FRG definido anteriormente no estudo em pasta, devido ao emprego do aditivo superplastificante. Assim, após a definição do teor de areia, estudou-se a possibilidade de aumentar em 5% o FRG definido no estudo em pasta, realizando-se novamente os ensaios de mini *slump test* e mini funil-V para verificação da viabilidade deste incremento.

Com os traços definitivos das argamassas, os ensaios de mini *slump test* e mini funil-V foram refeitos e o ensaio para determinação do teor de ar foi realizado a fim de se obter uma caracterização mais aprofundada das propriedades das argamassas.

Os parâmetros de aceitação mais utilizados para argamassas autoadensáveis são os propostos pela EFNARC (2005), com espalhamento entre 240 e 260 mm e tempo de fluxo pelo mini funil-V entre 7 e 11 segundos, os propostos por Rizwan e Bier (2012), com espalhamento entre 240 e 270 mm e tempo de fluxo pelo mini funil-V entre 12 e 18 segundos e os propostos por Melo (2005), com espalhamento entre 200 e 280 mm e tempo de fluxo pelo mini funil-V entre 3,5 e 10 s. Assim, para esta pesquisa foram definidos como valores ideais para os ensaios de mini *slump test*, argamassas que apresentarem espalhamento entre 240 e 260 mm e tempo de escoamento pelo mini funil-V entre 5 e 10 segundos.

As argamassas foram misturadas utilizando o mesmo misturador eletromecânico planetário de bancada empregado na mistura das pastas. O tempo total de mistura foi de 6 minutos, segundo o procedimento proposto por Melo (2005) e seguindo a seguinte sequência:

- 1) Colocação do cimento, FRG e 80% da água, em velocidade lenta, por 30 segundos;
- 2) Adição do agregado miúdo, em velocidade lenta, por 30 segundos;
- 3) Mistura em velocidade rápida por 1 minuto;
- 4) Limpeza da pá e descanso da argamassa por 3 minutos;
- 5) Incorporação do aditivo e 20% da água, 5 min após o início da mistura;
- 6) Mistura final em velocidade rápida por 1 minuto.

Finalizadas as dosagens das argamassas, foram analisados os custos finais de cada um dos traços, baseando-se nos valores dos fornecedores locais e da tabela SINAPI, de forma a avaliar a influência da incorporação do FRG e areia de britagem, além da variação do teor de aditivo superplastificante, no custo total das misturas.

3.2.2.4. Dosagem preliminar dos concretos autoadensáveis

Com os traços finais das argamassas definidos, foram iniciados os estudos da composição do concreto autoadensável. O volume de agregado miúdo e a proporção entre a areia natural e areia de britagem definidos na etapa de estudo da argamassa foram mantidos constantes.

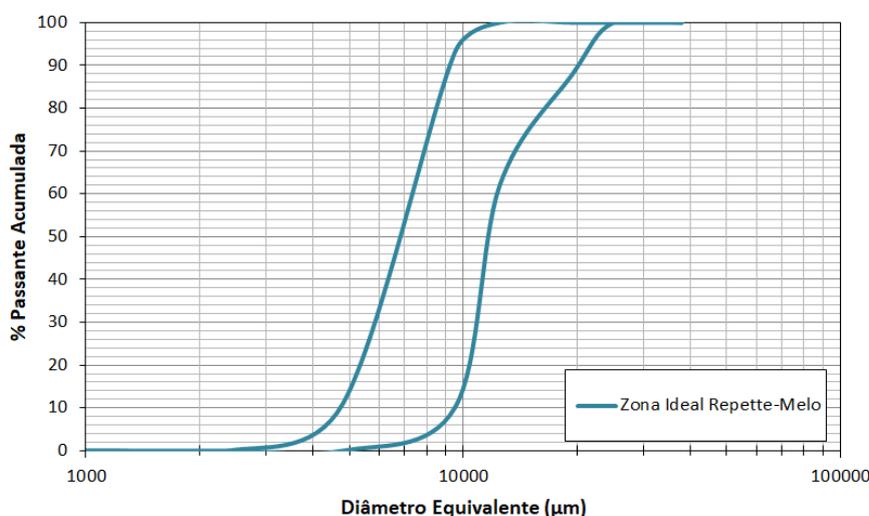
Foi, então, analisada a adequação da distribuição granulométrica da brita à zona ideal de distribuição granulométrica de agregados graúdos proposta pelo método (Figura 18).

O método preconiza que o volume de agregado graúdo empregado em CAA deve estar entre 27% e 33% do volume total do concreto. Na literatura, a maioria dos teores de agregado graúdo varia entre 29 e 35% (DOMONE, 2006; EFNARC, 2005; JIN, 2002; RIZWAN E BIER, 2009). No presente estudo o volume de agregado graúdo foi fixado em 30% do volume total de concreto.

O teor de aditivo superplastificante definido na etapa de estudo em argamassa foi ajustado de maneira que o espalhamento obtido se enquadrasse na classe SF2 (entre 660 e 750 mm) segundo a NBR 15823 - 1 (ABNT, 2017), de forma a se

adequar à maioria das aplicações correntes. Os resultados dos ensaios de T_{500} , Funil-V, Caixa L, Anel J e coluna de segregação foram classificados seguindo as diretrizes da mesma norma (Tabela 3).

Figura 18. Zona ideal da distribuição granulométrica para o agregado graúdo, proposta pelo método de Repette-Melo.



Fonte: (Adaptado de Melo, 2005, p. 95).

Tabela 3 - Classificação do CAA e suas aplicações.

Propriedade	Classe	Parâmetros	Aplicação
Fluidez	SF1	550 a 650 mm	Estruturas com baixa taxa de armadura e embutidos, com concretagem realizada a partir do ponto mais alto e que exigem curta distância de espalhamento.
	SF2	660 a 750 mm	Adequada para a maioria das aplicações.
	SF3	760 a 850 mm	Estruturas com fôrmas complexas e alta densidade de armadura.
Viscosidade	VS1/VF1	$T_{500} \leq 2$ s Funil V ≤ 8 s	Elementos com alta densidade de armadura e embutidos, concretados a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.
	VS2/VF2	$T_{500} > 2$ s Funil V 9 a 25 s	Adequada para a maioria das aplicações, apresentando maior pressão sobre as fôrmas e maior resistência à segregação.

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

Tabela 3 (continuação) - Classificação do CAA e suas aplicações.

Propriedade	Classe	Parâmetros	Aplicação
Habilidade Passante	PL1/PJ2	Anel J: 25 a 50 mm Caixa-L: $\geq 0,80$ duas barras de aço	Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm.
	PL2/PJ1	Anel J: 0 a 25 mm Caixa-L: $\geq 0,80$ três barras de aço Caixa-U: até 30 mm	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm.
Resistência à segregação	SR1	≤ 20	Lajes de pequena espessura. Estruturas de pouca complexidade.
	SR2	≤ 15	Elementos de fundações profundas. Pilares, paredes e elementos estruturais complexos e elementos pré-fabricados.

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

De maneira similar ao realizado para as argamassas, foram avaliados os custos finais de cada uma das misturas, baseando-se em valores obtidos de fornecedores locais e da tabela SINAPI.

3.2.2.5. Análise da fração de poros das misturas

Finalizadas as dosagens das pastas, argamassas e concreto autoadensáveis, foram analisadas as frações de poros resultantes das proporções utilizadas entre os materiais finos (cimento e FRG) e das proporções entre agregados com dimensão superior a 125 μm (areia natural, areia de britagem e brita).

Para análise da influência da incorporação de FRG, foram analisadas as frações de poros das pastas com e sem incorporação do resíduo. Para isto, foi realizado o ensaio de compacidade, por demanda de água, com índice de compactação (K) igual a 6,7. Este índice representa a energia de compactação associada ao protocolo de adensamento utilizado.

Este ensaio foi realizado com o objetivo de determinar a quantidade de água necessária para preencher todos os espaços vazios da mistura. Foram analisadas,

então, quatro composições diferentes para as pastas: uma de referência, contendo 100% de cimento (sem FRG) e outras três misturas com diferentes proporções entre cimento e FRG, definidas no estudo em pasta para cada relação água/cimento analisada.

Na primeira fase do ensaio, as partículas encontram-se em estado seco e desordenado, com um elevado índice de vazios. Com a inicial inserção de água no sistema, as partículas passam para o estado pendular, ou seja, a água adicionada se condensa entre os grãos formando pontes líquidas entre as partículas. Com a gradativa incorporação de água na mistura, a quantidade de pontes líquidas aumenta até o ponto em que as superfícies de todas as partículas são completamente molhadas. Este estado, chamado estado funicular, tem como característica marcante a presença de bolhas de ar no interior da mistura (SILVA, 2004).

Por fim, existe a fase capilar, que se inicia quando todos os vazios existentes na fase funicular são preenchidos pela água. A partir deste ponto, qualquer quantidade de água adicionada à mistura produz um afastamento entre as partículas, aumentando a fluidez da mistura. Define-se como ponto característico da demanda de água o início do estado capilar (SILVA, 2004).

Este ensaio foi realizado conforme procedimento adaptado de Silva (2004), descrito a seguir:

- 1) Pesar uma amostra com aproximadamente 350 gramas do material completamente seco;
- 2) Colocar o material na argamassadeira e adicionar 50% da água prevista para que seja atingida a demanda de água;
- 3) Mistura em velocidade baixa durante um minuto;
- 4) Misturar em velocidade baixa e adicionar uma pequena quantidade de água em intervalos de um minuto até visualizar a formação de aglomerados;
- 5) Deixar a mistura em repouso por 30 segundos e raspar o recipiente com auxílio de uma espátula;
- 6) Misturar em velocidade alta por um minuto;

7) Finalizar o ensaio quando uma pasta homogênea e adensada se formar no fundo do recipiente.

Após a determinação da quantidade de água correspondente ao estado de demanda de água, a compacidade real pode ser calculada segundo a Equação 9, quando se utiliza apenas um material e, segundo a Equação 10, quando se utilizam dois materiais em conjunto.

$$C = \frac{1}{1 + me * \frac{M_{H2O}}{M}} \quad (9)$$

$$C = \frac{1}{1 + \frac{me_1 * me_2}{\left[me_2 * \frac{M_1}{M_T} + me_1 * \frac{M_2}{M_T} \right]} * \left(\frac{M_{H2O}}{M_T} \right)} \quad (10)$$

Em que me_1 é a massa específica do material 1 (g/cm^3), me_2 é a massa específica do material 2 (g/cm^3), M_1 é a massa do material 1 (g), M_2 é a massa do material 2 (g), M_{H2O} é a massa de água ao atingir o estado de demanda (g) e $M_T = M_1 + M_2$ é a massa total dos materiais secos (g).

Para a análise da compacidade das proporções de agregados utilizadas foi utilizado um método que emprega, em conjunto, o procedimento de vibração e compactação, com K igual a 9. Este ensaio consiste em inserir uma quantidade padrão de material dentro de um aparato cilíndrico com diâmetro e altura conhecidos e aplicar sobre a camada de amostra a ser estudada uma pressão de 10 kPa, somado a um efeito de vibração por um tempo padronizado. Finalizada a vibração, mede-se a altura final da amostra e calcula-se a compacidade do material, de acordo com a Equação 11. Com o resultado da compacidade da amostra obtêm-se a fração de poros (P_{of}) de acordo com a Equação 12 (SILVA, 2004).

$$C = \frac{4 * M_s}{\pi * D_c^2 * h * \rho_s} \quad (11)$$

$$P_{of} = 1 - C \quad (12)$$

Em que M_s é a massa do material seco (g), ρ_s é a densidade do material 2 (g/cm^3), D_c é o diâmetro interno do cilindro (cm) e h é a altura final da camada do material após a compactação (cm).

Este ensaio foi realizado para analisar a compactidade da areia natural utilizada isoladamente e em conjunto com a areia de britagem e a compactidade das composições com brita e areia natural e da brita com ambos os agregados miúdos. As proporções entre os materiais utilizados foram mantidas constantes iguais às definidas na etapa de dosagem de concretos e argamassas.

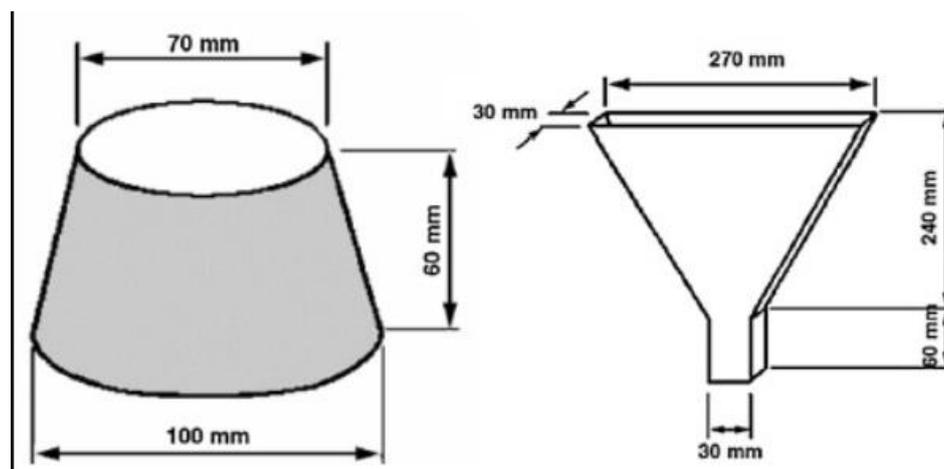
Com os resultados da fração de poros das pastas, argamassas e concretos, foi calculado o IPS, para as pastas, segundo a Equação 5, e MPT, para os concretos e argamassas, de acordo com a Equação 6, apresentadas anteriormente na seção 2.1.2.

3.2.3. Ensaio de avaliação das argamassas autoadensáveis no estado fresco

3.2.3.1. Mini Slump Test

Este ensaio consiste em preencher um tronco de cone, com as dimensões apresentadas na Figura 19 e, sem que haja qualquer tipo de adensamento, levantar o mesmo de forma perpendicular, para que a argamassa possa fluir livremente sobre a superfície. O valor do espalhamento é obtido pela média aritmética dos valores de dois diâmetros de abertura da argamassa, medidos perpendicularmente um ao outro. Neste ensaio, também é possível analisar a existência ou não de segregação dos materiais constituintes.

Figura 19. Dimensões dos aparatos sugeridos pela EFNARC (de ensaios de *mini slump test*, à esquerda e mini Funil-V, à direita)



Fonte: (EFNARC, 2002, p.15).

3.2.3.2. Mini funil-V

O ensaio do mini funil-V (Figura 19) também é descrito pela EFNARC (2002) e consiste em preencher o funil completamente com argamassa para, então, abrir a comporta inferior, permitindo que a argamassa flua livremente. A fluidez da argamassa é medida pelo tempo decorrido desde a abertura da comporta até quando for possível visualizar verticalmente, através do funil, o recipiente posicionado sob ele pela primeira vez.

3.2.3.3. Determinação da densidade de massa e do teor de ar

O ensaio de determinação da densidade de massa e do teor de ar segue as diretrizes da NBR 13278 (ABNT, 2005) de maneira adaptada e consiste na introdução da argamassa em um recipiente calibrado. Ao final, o recipiente é rasado e pesado. A densidade de massa (d), em g/cm^3 , e o teor de ar (A), em porcentagem, são obtidos de acordo com as Equações 15 e 16, em que, m_c é a massa do recipiente contendo argamassa, em gramas; m_v é a massa do recipiente vazio, em gramas; v_r é o volume do recipiente, representado em cm^3 ; d é a densidade medida em g/cm^3 e d_t a densidade de massa teórica, em g/cm^3 .

$$d = \left(\frac{m_c - m_v}{v_r} \right) * 1000 \quad (15)$$

$$A = 100 * \left(1 - \frac{d}{d_t} \right) \quad (16)$$

3.2.4. Ensaios de avaliação dos concretos autoadensáveis no estado fresco

3.2.4.1. Espalhamento, tempo de escoamento e análise visual

A viscosidade do concreto, parâmetro diretamente relacionado à consistência da mistura, pode ser determinada de forma indireta pelo método do funil-V, pelo espalhamento e pelo t_{500} . O ensaio de funil-V reproduz concretagens em fluxo confinado, como vigas e pilares, já o tempo de espalhamento t_{500} representa concretagens sob fluxo livre, como lajes e pisos.

Os ensaios de espalhamento e t_{500} seguem a NBR 15823-2 (ABNT, 2017). O procedimento consiste em preencher o cone de Abrams de maneira contínua e uniforme seguido da desmoldagem, que deve ser feita na direção vertical, com velocidade constante. No momento em que o molde perde contato com a placa base, o cronômetro deve ser acionado até que a massa de concreto cubra completamente a marca circular de 500 mm, registrando-se este intervalo de tempo (t_{500}), em segundos. Após a retirada do molde, deve-se aguardar que o concreto atinja repouso para, então, realizar duas medidas perpendiculares entre si do diâmetro final de espalhamento.

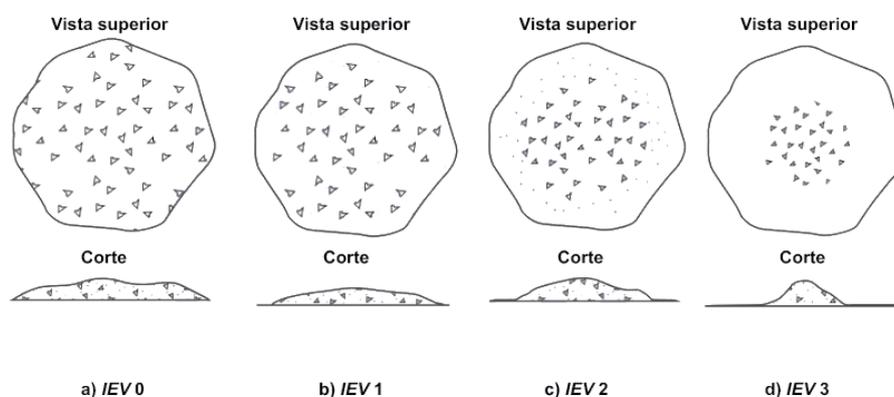
O espalhamento (SF) é obtido pela média aritmética das duas medidas perpendiculares do diâmetro, o tempo de escoamento t_{500} é o intervalo de tempo, em segundos, até a massa de concreto cobrir completamente a marca de 500 mm e o resultado do índice de estabilidade visual (IEV) é determinado visualmente pela análise do concreto imediatamente após o término do escoamento, sendo classificado de acordo com a Tabela 4 e Figura 20.

Tabela 4 - Classes de índice de estabilidade visual (IEV)

Classe	IEV
IEV 0 (Altamente estável)	Sem evidência de segregação ou exsudação (Figura 20a)
IEV 1 (Estável)	Sem evidência de segregação e leve exsudação (Figura 20b)
IEV 2 (Instável)	Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10 mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto (Figura 20c)
IEV 3 (Altamente Instável)	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades (auréola de argamassa > 10 mm) (Figura 20d)

Fonte (ABNT NBR 15823 -2:2017).

Figura 20. Esquema das classes do índice de estabilidade visual (IEV)



Fonte: (ABNT NBR 15823 -2:2017).

3.2.4.2. Funil V

Este ensaio segue a norma NBR 15823-5 (ABNT, 2017). O procedimento consiste em preencher totalmente o funil de maneira uniforme, constante e sem adensamento. Após preenchimento, a comporta deve ser aberta ao mesmo tempo em que se deve acionar o cronômetro. O cronômetro deve ser parado quando for possível visualizar verticalmente, através do funil, o recipiente posicionado sob ele pela primeira vez, obtendo-se o valor T_{10seg} .

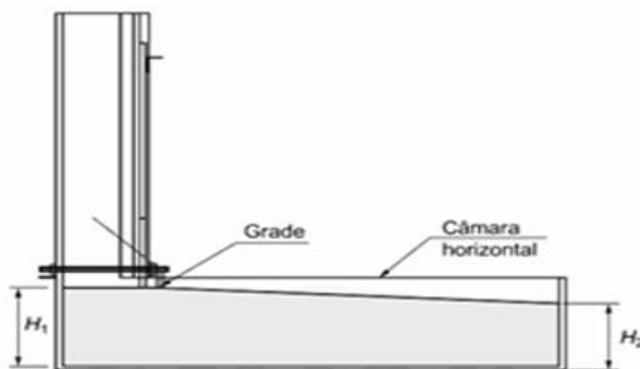
3.2.4.3. Determinação da Habilidade Passante

a) Caixa L

Este ensaio consiste na análise da facilidade do concreto em vencer obstáculos e passar por espaços estreitos presentes nas fôrmas. O ensaio da caixa-L reproduz um fluxo confinado, representando o que acontece na concretagem de lajes e pisos de maneira geral.

De acordo com a NBR 15823-4 (ABNT, 2017), o procedimento consiste em preencher a câmara vertical, de forma uniforme e sem adensamento, seguido da abertura da comporta de maneira rápida, permitindo o escoamento do concreto para a câmara horizontal. Ao final do escoamento, devem-se medir as alturas H_1 e H_2 (Figura 21), e calcular a habilidade passante (HP) dada pela razão entre as alturas da superfície do concreto nas extremidades da câmara horizontal.

Figura 21. Ilustração da Caixa-L e indicação das alturas H_1 e H_2 .



Fonte: (NBR 15823 -4:2017).

b) Anel J

Outro método de avaliar a habilidade passante do concreto autoadensável é o chamado Anel J, que segue as diretrizes da NBR 15823 – 3 (ABNT, 2017). Ao contrário do método de caixa-L, o método do anel J visa simular situações em que o concreto irá fluir sobre um fluxo livre, como ocorre dentro de fôrmas de vigas e pilares.

O procedimento de ensaio consiste em posicionar o anel J no centro da placa base e posicionar o molde (cone de Abrams) de forma invertida, no centro do anel. Em seguida, procede-se o preenchimento do cone de forma contínua e uniforme e sua desmoldagem, que deve ser feita com velocidade constante. Finalizado o escoamento do concreto, devem-se medir dois diâmetros de espalhamento perpendiculares entre si, sendo o espalhamento final com a utilização do anel J (j_F), obtido pela média dos diâmetros medidos. A diferença entre o diâmetro médio de espalhamento com e sem anel J (PJ) deve ser calculada para analisar a redução do diâmetro quando a mistura tem que vencer os obstáculos produzidos pela armadura.

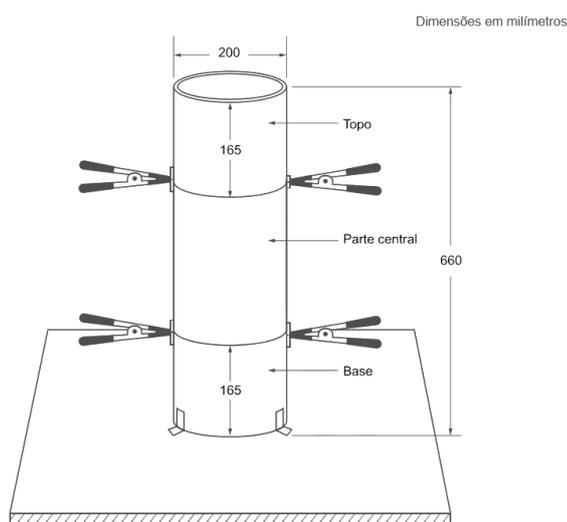
3.2.4.4. Determinação da resistência à segregação por meio do ensaio de coluna de segregação

A resistência à segregação do concreto autoadensável pode ser definida como a capacidade do material em resistir à separação dos seus materiais constituintes de forma a manter sua homogeneidade durante o transporte e após o lançamento (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015). A NBR 15823-6 (ABNT, 2017) rege o procedimento de ensaio de resistência à segregação estática através do método de coluna de segregação.

O procedimento consiste no preenchimento da coluna de segregação (Figura 22) e, após aproximadamente 20 minutos, deve-se retirar a parte inferior e superior da coluna, com o auxílio de uma chapa metálica. As amostras devem ser lavadas individualmente sobre uma peneira com abertura de malha de 4,75 mm, de forma a retirar toda a argamassa. Finalizada a lavagem, os agregados graúdos devem ser submetidos à secagem superficial, e, em seguida, devem ser pesados obtendo-se as massas de brita da base e do topo.

A resistência à segregação (SR), expressa em porcentagem (%), deve ser calculada segundo a Equação 17, em que m_B é a massa do agregado graúdo proveniente da amostra retirada da base da coluna e m_T é a massa do agregado graúdo proveniente da amostra retirada do topo da coluna, em gramas.

Figura 22. Ilustração e medidas da Coluna de Segregação.



Fonte: (NBR 15823 -6:2017).

$$SR = \frac{2(m_B - m_T)}{m_B + m_T} * 100 \quad (17)$$

Em que m_B é a massa do agregado graúdo proveniente da amostra retirada da base da coluna e m_T é a massa do agregado graúdo proveniente da amostra retirada do topo da coluna, em gramas

3.2.5. Ensaios de avaliação das argamassas e dos concretos autoadensáveis no estado endurecido.

3.2.5.1. Determinação das resistências à tração na flexão e à compressão axial

As argamassas foram avaliadas quanto às resistências à compressão axial e à tração na flexão, seguindo as recomendações da NBR 13279 (ABNT, 2005). Para isso, foram moldados corpos de prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm) a serem ensaiados nas idades de 3, 7 e 28 dias, com uma quantidade mínima de três corpos de prova por idade. Para avaliação da resistência à tração na flexão dos concretos serão utilizados os mesmos corpos de prova prismáticos empregados para argamassas, de acordo com a norma NBR 12142 (ABNT, 2010).

O ensaio de resistência à compressão axial do concreto foi executado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), utilizando corpos de prova com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Os ensaios de compressão axial foram realizados nas idades de 3, 7 e 28 dias utilizando-se, no mínimo, três corpos de prova por idade. A resistência à compressão foi calculada utilizando-se a Equação 18, em que, R_c é a resistência à compressão; P é carga máxima suportada pelo corpo de prova; e A representa área da sua seção transversal.

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (18)$$

A resistência à tração na flexão (R_t) é calculada conforme a Equação 19

$$R_t = \frac{P * L}{B * D^2} \quad (19)$$

Em que P é a carga máxima aplicada, em N; L é a distância entre os apoios de suporte, em mm; B é a largura do corpo-de-prova na seção de ruptura, em mm; D é a altura do corpo-de-prova, na seção de ruptura, em mm.

3.2.5.2. Determinação da retração por secagem

O ensaio de retração por secagem do concreto foi executado de acordo com a norma C157 (ASTM, 2017), utilizando corpos de prova prismáticos (7,5 cm x 7,5 cm x 28,5 cm). Os corpos de prova foram desmoldados 24 horas após a mistura e seus comprimentos iniciais foram medidos com o auxílio de um relógio comparador digital (Figura 23).

Figura 23. Ensaio de retração por secagem em andamento



Fonte: (A Autora).

Em seguida, os corpos de prova foram armazenados em um tanque de cura com água saturada com cal até que atingissem a idade de 28 dias quando uma segunda medida de seu comprimento foi efetuada. Após a segunda medida, os corpos de prova foram armazenados ao ar em uma sala com temperatura controlada tendo seu comprimento medido periodicamente pelo menos uma vez por semana até a estabilização do mesmo. A retração (ΔL_x) foi calculada de acordo com a Equação 20.

$$\Delta L_x = \frac{CRD - CRD_0}{G} \times 100 \quad (20)$$

Em que ΔL_x é a variação do comprimento do corpo de prova em qualquer idade, expresso em %; CRD é a diferença entre o comprimento da barra padrão e do corpo de prova em qualquer idade, em mm, e G é o distanciamento efetivo entre os parafusos dos corpos de prova (250 mm).

3.2.5.3. Densidade e porosidade aparentes

Os ensaios para a determinação da densidade e porosidade aparentes se baseiam no princípio de Arquimedes. Inicialmente, mede-se a massa do corpo de prova seco (m_s) e, em seguida, a amostra é mantida imersa em água por 24 horas

para que ocorra sua saturação. Ao final deste período, são medidas as massas imersa (m_i) e úmida (m_u).

A porosidade aparente (P_A) e a densidade aparente (D_A) são calculadas por meio das Equações 21 e 22, em que ρ_L é a densidade do líquido utilizado no ensaio ($\rho_{\text{água}} = 1,0 \text{ g/cm}^3$).

$$P_A(\%) = 100 * \frac{m_u - m_s}{m_u - m_i} \quad (21)$$

$$D_A = \rho_L * \frac{m_s}{m_u - m_i} \quad (22)$$

As medidas de densidade e porosidade aparentes serão realizadas em corpos de prova de prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm) para concretos e argamassas com, no mínimo, três corpos de prova sendo ensaiados simultaneamente.

3.2.5.4. Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi determinada segundo a NBR 9779 (ABNT, 2012). O ensaio foi realizado em três corpos de prova com 28 dias de idade, calculando-se o coeficiente de absorção capilar, que tem a função de representar a quantidade de água absorvida por metro quadrado do material em contato com a água, em função da raiz quadrada do tempo decorrido até o fim do ensaio.

Os corpos de prova foram secos em estufa até que se verifique constância de massa. Finalizada a secagem, os corpos de prova foram resfriados à temperatura ambiente e suas respectivas massas secas (m_s) foram medidas. Ao longo do ensaio, determina-se a massa saturada (m_{sat}) dos corpos de prova em intervalos de tempo específicos, determinados pela NBR 9779 (ABNT, 2012).

3.2.5.5. Análise estatística dos resultados

Todos os resultados da caracterização dos concretos e argamassas em estado fresco e endurecido foram analisados estatisticamente, por meio da análise de variância dos dados (ANOVA) de fator único, com nível de significância (α) de 0,05,

com o intuito de verificar se as alterações encontradas nas propriedades são significativas ou se podem ser atribuídas à aleatoriedade dos ensaios realizados.

As variáveis de controle empregadas nesta pesquisa foram: incorporação de FRG, incorporação de areia de britagem e incorporação simultânea de ambas as matérias primas, além da variação do teor de aditivo superplastificante. Como respostas experimentais foram analisadas as resistências à compressão e à tração na flexão, tempo de escoamento, teor de ar, porosidade e densidade aparente e absorção de água por capilaridade.

3.2.6. Análise de custo.

Para realização de análise de custos dos concretos e argamassas produzidos, foram considerados valores fornecidos por cimenteiras, concreteiras e pedreiras da região, além de dados coletados na tabela SINAPI, de acordo com a Tabela 5. Foram analisados os custos para produção de 1 m³ de concretos e argamassas, respectivamente.

Ressalta-se que esta análise de custo refere-se, exclusivamente, ao cenário avaliado na presente pesquisa, desconsiderando-se custo com transporte e mão-de-obra.

Tabela 5 – Custos dos materiais utilizados na produção dos concretos analisados.

Material	Custo
Cimento (ton)	R\$ 350,00
Areia natural fina (ton)	R\$ 38,00
Brita natural (ton)	R\$ 49,00
FRG (ton)	R\$ 60,00
Areia de britagem (ton)	R\$ 28,00
Aditivo superplastificante (litro)	R\$ 8,50
Água (litro)	R\$ 0,01629

Fonte: (A Autora).

3.2.7. Indicadores IC (Intensidade de CO₂) e IL (Intensidade de ligantes).

Sabe-se que a produção do clínquer, material base para a produção de cimento, é responsável por cerca de 8% das emissões de CO₂ do mundo, colocando a indústria cimenteira como importante causadora da poluição mundial (DE LENA *et al.*, 2019). Assim sendo, a busca por formulações de concreto que usem de maneira mais eficiente o cimento de forma a reduzir os impactos gerados pela sua fabricação são de suma importância no quesito de minimizar os impactos ambientais da construção civil.

Deste modo, as formulações finais dos concretos autoadensáveis produzidos foram analisadas segundo dois indicadores distintos: IC (Intensidade de CO₂) e IL (Intensidade de ligantes). O indicador IC mede o impacto da produção de determinada mistura através da quantidade de CO₂ emitida por unidade de desempenho que, neste caso, foi fixada como a resistência à compressão, conforme a Equação 13. Este indicador mede a eficiência de cada formulação, sendo esta menor quanto maior for o IC (DAMINELI, 2013).

$$IC = \frac{c}{r_c} \quad (13)$$

Em que c é o total de emissões de CO₂, em kg/m³, gerados pela produção e transporte de todos os materiais empregados nas dosagens e r_c é a resistência à compressão aos 28 dias das formulações, em MPa. Na presente pesquisa, somente as emissões provenientes da produção do cimento foram consideradas.

Para o cálculo da emissão de CO₂, foi considerado que o cimento CP V ARI utilizado na pesquisa apresenta 95% de clínquer, sendo este o ponto médio do intervalo fornecido pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Além disso, foi considerada a emissão de 842 kg de CO₂ para cada tonelada de clínquer produzido (WBCSD, 2016) resultando em um total de 0,8 kg de CO₂ para cada kg de cimento. A emissão de CO₂ proveniente da produção do FRG foi considerada nula por ser comumente alocada na cadeia produtiva da fabricação das britas (DAMINELI, 2013).

Além disso, foi calculado o IL que relaciona o consumo de ligantes com a resistência à compressão, conforme a Equação 14. Este indicador auxilia na comparação entre formulações, uma vez que permite uma rápida análise das misturas menos eficientes, ou seja, distingue aquelas com maior quantidade de cimento para obter o mesmo desempenho final (maior IL) daquelas que são mais eficientes (menor IL) (BARBOZA, 2016; DAMINELI, 2013):

$$IL = \frac{l}{r_c} \quad (14)$$

Em que l é o consumo total de ligantes, em kg/m^3 , e r_c a resistência à compressão aos 28 dias de idade, em MPa. Na presente pesquisa o consumo de ligantes se resume ao consumo de cimento para cada dosagem estudada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

4.1.1. Caracterização Física

A Tabela 6 apresenta as propriedades físicas e as Figuras 24 e 25 apresentam as distribuições granulométricas dos materiais empregados na pesquisa.

Tabela 6 – Propriedades físicas do cimento, FRG, areia natural e AB utilizados.

Propriedade	Cimento	FRG	Areia Natural	Areia de Britagem	Brita
Massa específica (g/cm ³)	3,1200 ± 0,0032	2,8600 ± 0,0006	2,65 ± 0,01	2,77 ± 0,01	2,77 ± 0,03
Área superficial Blaine (m ² /g)	0,4099	0,2042	-	-	-
Área superficial BET (m ² /g)	1,6417	1,2729	-	-	-
Mediana do diâmetro equivalente, D ₅₀	19 μm	44 μm	0,36 mm	1,88 mm	69,0 mm
Dimensão máxima característica (mm)	-	-	1,18	4,75	12,5
Módulo de Finura	-	-	1,75	3,68	5,99
Massa unitária solta (kg/m ³)	-	-	1470	1550	1450
Massa unitária compactada (kg/m ³)	-	-	-	-	1530
Teor de material pulverulento (%)	-	-	1,5 ± 0,50	5,28 ± 0,24	0,40 ± 0,12*

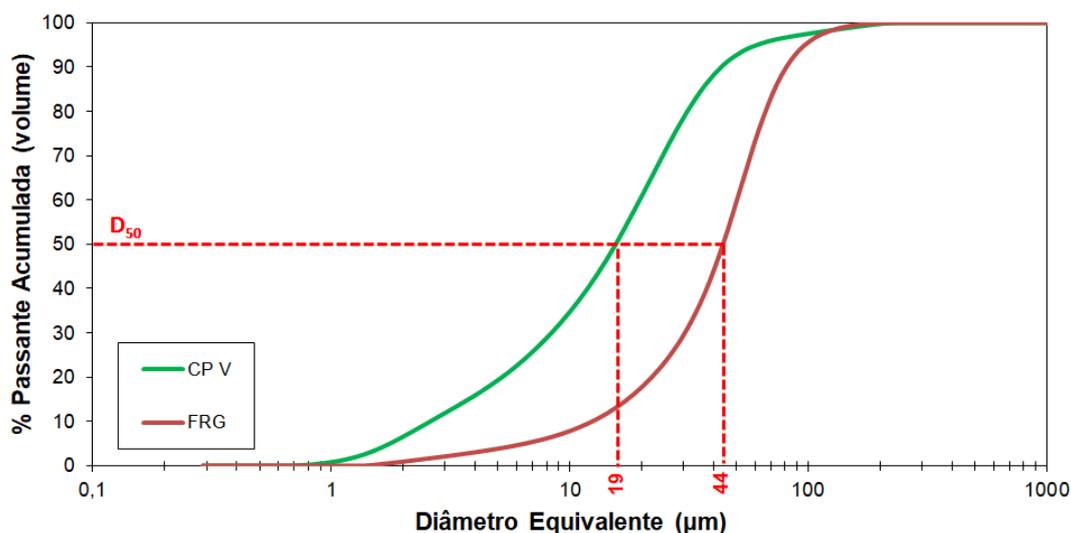
* Após Lavagem

Fonte: (A Autora).

Observa-se que o resultado da granulometria a laser está de acordo com os resultados da área superficial Blaine e BET, mostrando que o FRG possui partículas maiores que as do cimento empregado. Porém, vale ressaltar que a grande maioria

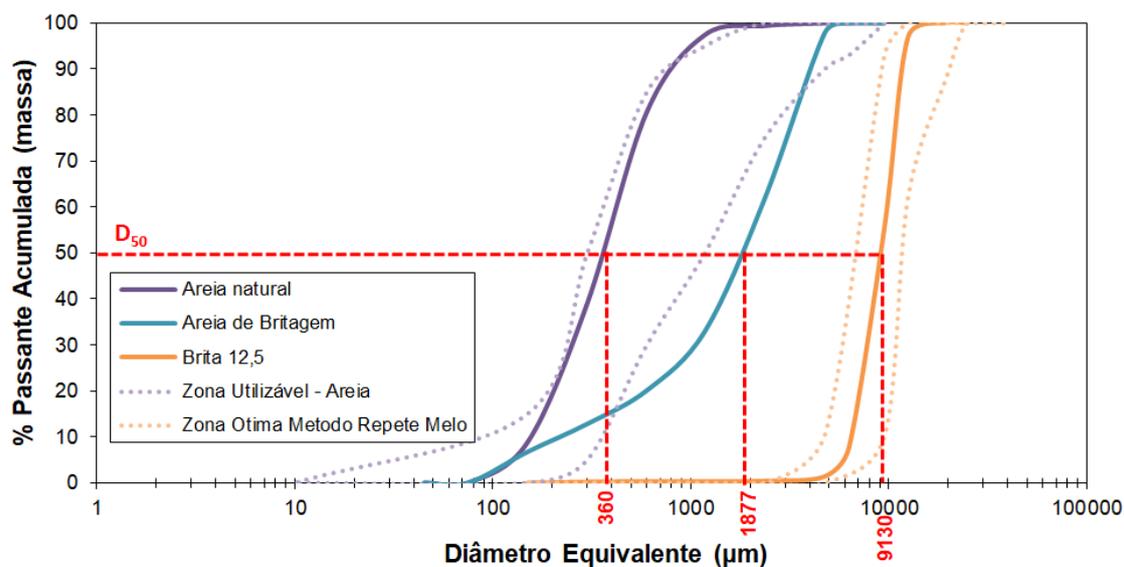
das partículas do FRG são inferiores a 75 μm , apresentando D_{50} de 44 μm , classificando-o como adição mineral, segundo o método Repette-Melo (MELO, 2005).

Figura 24. Distribuição do tamanho de partículas do cimento e do FRG.



Fonte: (A Autora).

Figura 25. Distribuição do tamanho de partículas das areias natural e de britagem e da brita.



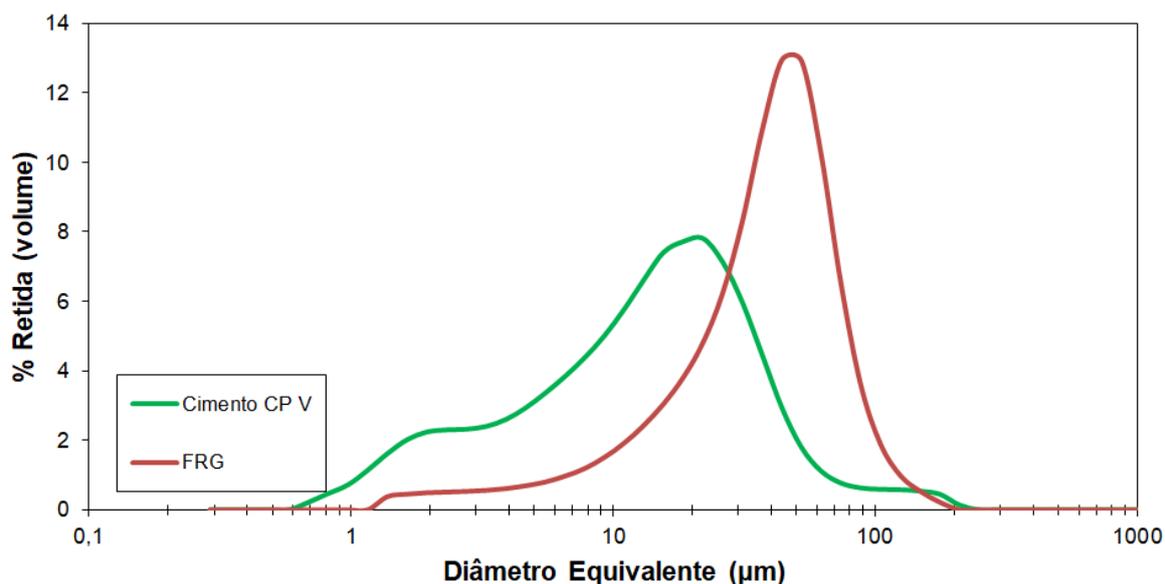
Fonte: (A Autora).

A areia natural comercializada em Salvador é classificada como muito fina, enquanto a areia de britagem utilizada é classificada como grossa, de acordo com a

NBR 7211 (ABNT, 1983), e ambas saem um pouco dos limites de utilização da NBR 7211 (ABNT, 2009) na parte inferior e superior, respectivamente. As areias serão utilizadas em conjunto, de maneira a alcançar a distribuição ideal de agregado miúdo proposta pelo método. A brita 12,5 mm empregada nesta pesquisa adequa-se à zona ótima proposta pelo método Repette-Melo.

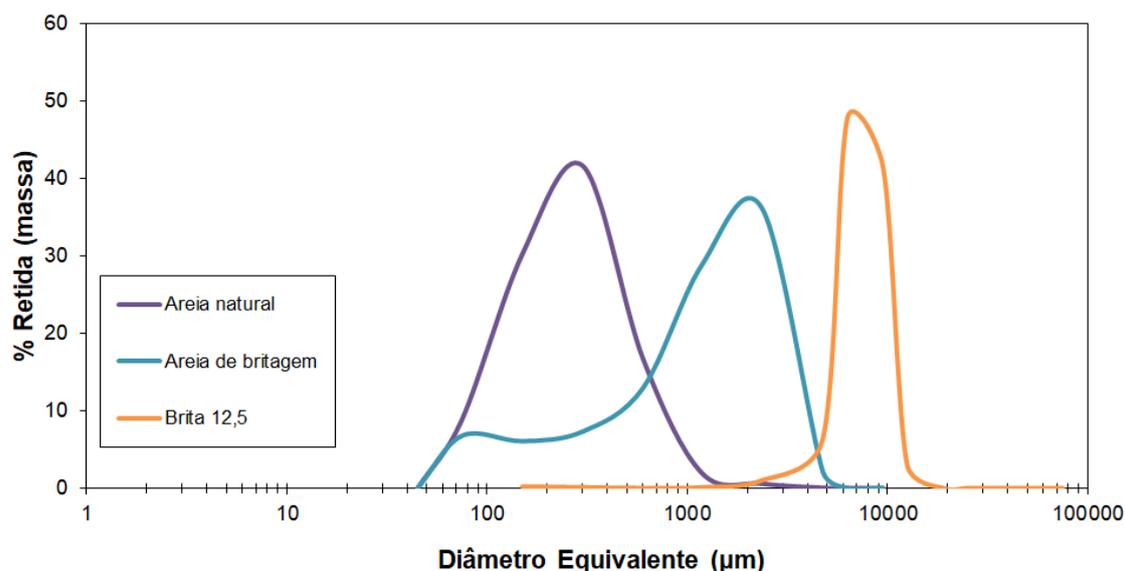
Ao analisar a distribuição discreta das matérias primas utilizadas na presente pesquisa (Figura 26 e Figura 27), percebe-se que os materiais utilizados apresentam uma maior concentração de partículas de tamanhos distintos, o que ressalta a tendência da utilização em conjuntos destes materiais resultar em matrizes mais densas uma vez que as partículas menores tendem a preencher os espaços deixados pelas partículas maiores. Ou seja, o cimento tende a preencher os espaços vazios deixados pelo FRG, enquanto a areia natural empregada tende a preencher os vazios deixados pela areia de britagem.

Figura 26. Distribuição discreta do tamanho de partículas do cimento e do FRG.



Fonte: (A Autora).

Figura 27. Distribuição discreta do tamanho de partículas das areias natural e de britagem e da brita.



Fonte: (A Autora).

4.1.2. Caracterização Química

As composições químicas do cimento e do FRG estão apresentadas na Tabela 7. A partir da análise dos resultados pode-se observar que a composição do cimento está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018) para os seus principais óxidos, como óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO₂), óxido de ferro (Fe₂O₃), alumina (Al₂O₃), óxido de magnésio (MgO) e álcalis (Na₂O e K₂O). A perda ao fogo (PF) se encontra abaixo do limite de 12,50%, indicado pela referida Norma.

Tabela 7 – Composições químicas, em óxidos, do cimento e dos FRG, obtidas por FRX.

Material	Óxido (%)									
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Outros	PF*
Cimento	3,79	3,57	15,70	5,16	1,73	59,12	-	2,96	0,38	7,48
FRG	4,83	15,28	53,34	0,32	2,96	6,21	3,16	10,50	2,00	1,40

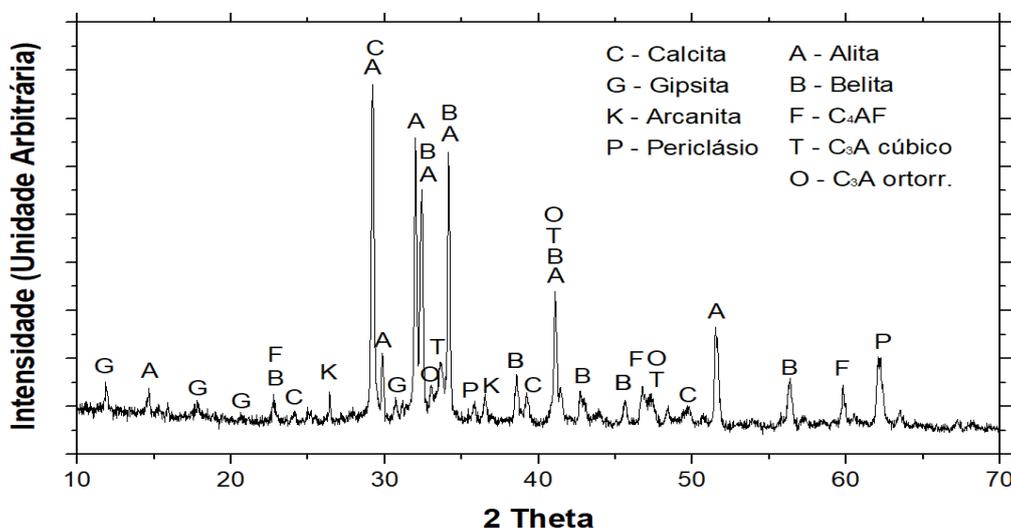
Fonte: (A Autora).

A partir dos resultados encontrados para o FRG, observa-se que o mesmo é composto majoritariamente de sílica, alumina e óxido de ferro. A baixa perda ao fogo apresentada pelo FRG indica que o material possui uma baixa concentração de voláteis, tais como compostos orgânicos, em sua composição.

4.1.3. Caracterização Mineralógica

O difratograma de raios-X do cimento empregado nesta pesquisa, com identificação de suas principais fases cristalinas (alita, belita, C_4AF , C_3A cúbico e ortorrômbico) é apresentado na Figura 28. Percebe-se, também, a presença das fases calcita, proveniente do fíler calcário adicionado ao clínquer, e das fases gipsita, arcanita e periclásio.

Figura 28. Difratograma de raios-X, com a identificação das fases cristalinas do cimento utilizado.



Fonte: (A Autora).

A Tabela 8 apresenta a quantificação das principais fases cristalinas presentes no cimento, o teor de amorfo do material e o parâmetro estatístico R-perfil ponderado (R_{wp}). O valor de R_{wp} observado foi igual a 9,14, e encontra-se abaixo do limite de 15, indicando que o refinamento foi otimizado (GOBBO, 2003).

Tabela 8 - Teores quantitativos das principais fases cristalinas e teor de amorfo do cimento, obtidos pelo método de Rietveld (R_{wp} igual a 9,14).

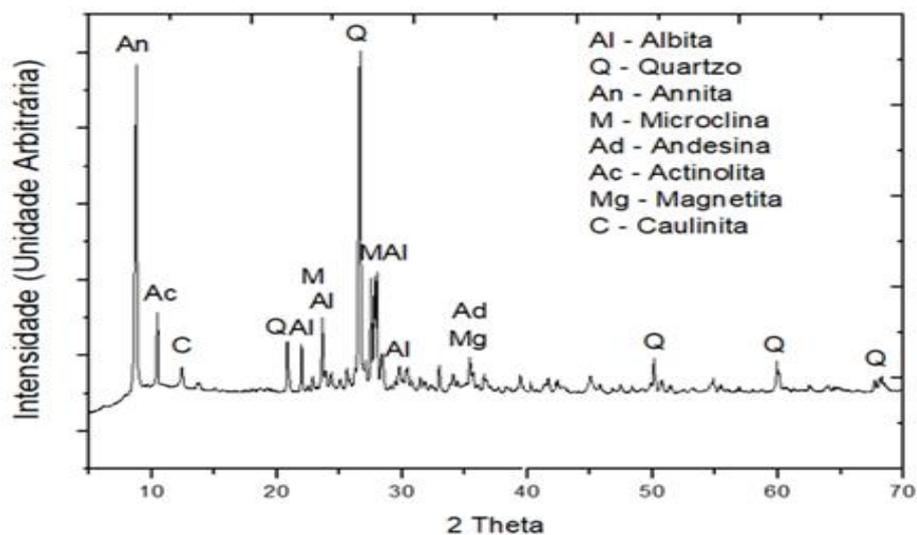
Fase Cristalina	Teor (%)
Alita ($C_3S - 3CaO.SiO_2$)	49,26
Belita ($C_2S - 2CaO.SiO_2$)	4,93
C_4AF ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$)	13,56
C_3A cúbico ($3CaO.Al_2O_3$)	1,23
C_3A ortorrômbico ($3CaO.Al_2O_3$)	4,14
Calcita ($CaCO_3$)	15,53
Gipsita ($CaSO_4.2H_2O$)	1,53
Arcanita (KSO_4)	0,77
Periclásio (MgO)	5,86
Teor de amorfo	6,10

Fonte: (A Autora).

Os resultados apresentados na Tabela 7 estão de acordo com a caracterização química apresentada na Tabela 7. Além disso, percebe-se a presença de calcita, proveniente da adição de fíler calcário, dentro dos limites especificados pela NBR 16697 (ABNT, 2018), além da presença de gipsita que é normalmente adicionada ao cimento com o intuito de retardar o início de pega, garantindo a trabalhabilidade inicial das misturas.

A Figura 29 apresenta o difratograma de raios-X do FRG empregado no estudo e a quantificação das fases cristalinas está apresentada na Tabela 9. Pode-se observar a presença de diversas fases mineralógicas, comprovando a heterogeneidade do material. As fases identificadas estão de acordo com a caracterização química apresentada na Tabela 7 e com os estudos realizados por Gao *et al.* (2017) e Song, Lee e Kim (2014), utilizando rochas graníticas.

Figura 29. Difratoograma de raios-X, com a identificação das fases cristalinas do FRG utilizado.



Fonte: (A Autora).

Tabela 9 - Teores quantitativos das principais fases cristalinas e teor de amorfo do FRG, obtidos pelo método de Rietveld (R_{wp} igual a 12,5).

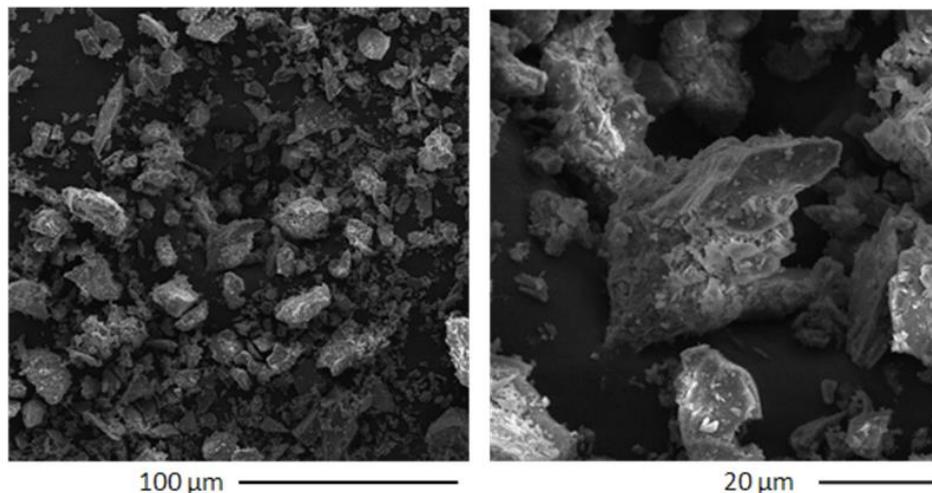
Fase Cristalina	Teor (%)
Quartzo (SiO_2)	17,70
Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)	3,08
Actinolita ($\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$)	3,14
Magnetita (Fe_3O_4)	0,80
Andesina ($(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$)	8,98
Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)	27,12
Annita ($\text{KFe}^{2+}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)	11,71
Microclina (KAlSi_3O_8)	11,60
Teor de amorfo	15,87

Fonte: (A Autora).

4.1.4. Caracterização Morfológica

A Figura 30 apresenta as imagens obtidas por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos finos de rocha granítica empregados na presente pesquisa.

Figura 30. Micrografia eletrônica de varredura (MEV) dos finos de rocha granítica.



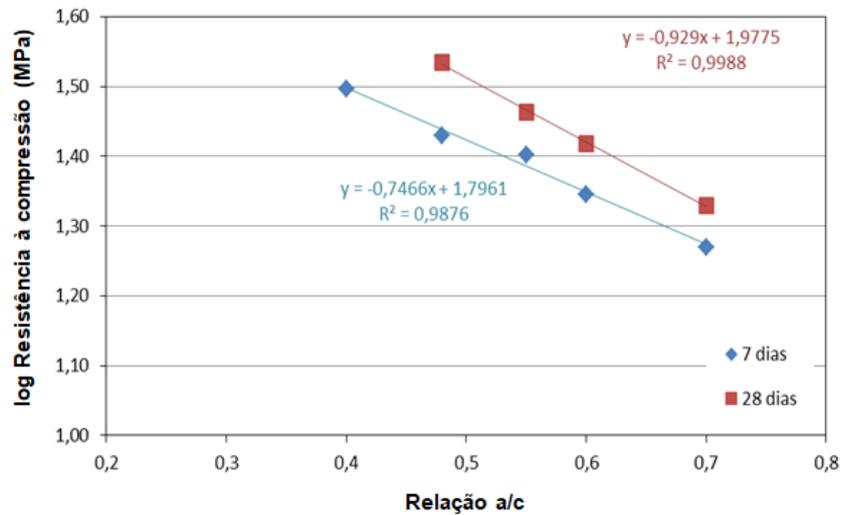
Fonte: (A Autora).

Pode-se observar que as partículas do FRG possuem formato irregular e prismático. Esta morfologia pode ser atribuída ao processo de redução forçada que ocorre no interior dos britadores e está de acordo com a morfologia encontrada por Pozo-Antônio *et al.* (2015).

4.2. CURVA DE ABRAMS

A Figura 31 apresenta a curva de Abrams, construída de acordo com as diretrizes da NBR 7215 (ABNT, 1996), a fim de determinar as relações água/cimento a serem empregadas na presente pesquisa.

Figura 31. Curva de Abrams construída segundo a NBR 7215 (ABNT, 1996), utilizando cimento CP II-F 40.



Fonte: (A Autora).

A partir da análise das curvas geradas, foi possível encontrar a equação que relaciona a resistência, aos 28 dias de idade, com a relação água/cimento que deve ser adotada (Equação 23). A partir desta equação, foi possível concluir que para obter as resistências de 25 MPa, 35 MPa e 45 MPa devem ser utilizadas as relações água/cimento de 0,63, 0,46 e 0,28, respectivamente.

$$f_{c28} = \frac{94,95}{8,49^{a/c}} \quad (23)$$

Com a análise das resistências à compressão obtidas para as argamassas com relação água/cimento de 0,63 e 0,46, apresentadas posteriormente, concluiu-se que, com o emprego em conjunto da areia natural com a areia de britagem, ao invés da areia normal, as resistências encontradas são, em média, 5 MPa superiores às previstas pela NBR 7215 (ABNT, 1996).

Este fato pode ser justificado pelo melhor empacotamento de partículas resultante da incorporação conjunta de areia natural e areia de britagem superior ao verificado na areia normal, conforme sugere a Norma. Assim sendo, a relação

água/cimento de 0,28 foi substituída pela relação água/cimento de 0,42, com o intuito de otimizar o teor de adição de FRG para todas as resistências analisadas.

Vale ressaltar que os resultados apresentados a seguir, tanto para o estudo em pasta quanto em argamassa e concreto referem-se às matérias primas utilizadas na presente pesquisa, ou seja, para o FRG e AB provenientes da região metropolitana de Salvador. Como discutido anteriormente, finos e areias provenientes de localidades distintas ou mesmo provenientes de lotes distintos podem apresentar comportamentos diferentes dos aqui apresentados quando incorporados em argamassas e concretos.

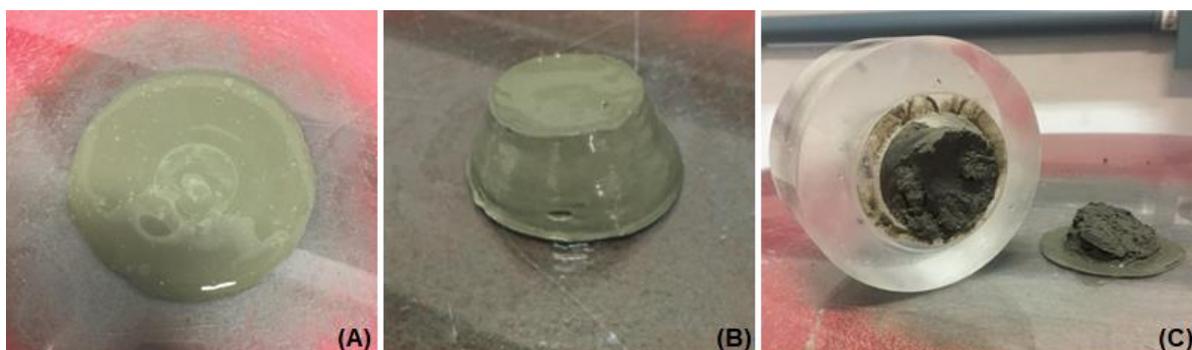
4.3. DOSAGEM DAS PASTAS

4.3.1. Teores de adição FRG

Após a definição das três relações água/cimento a serem empregadas, deu-se início ao estudo em pastas. Este estudo teve como objetivo definir os teores de FRG a serem incorporados nas pastas com diferentes relações água/cimento. O teor ideal de adição foi definido pela análise visual e pela determinação do índice de exsudação da pasta segundo a NBR 7681-3 (ABNT, 2013). Vale ressaltar que os resultados aqui apresentados dizem respeito ao FRG utilizado na presente pesquisa, sendo assim, finos provenientes de outras localidades ou mesmo de outros lotes podem apresentar comportamento diferente dos aqui apresentados.

A análise visual se deu por meio da utilização do Mini Cone de Kantro. A Figura 32A, apresenta um exemplo de uma pasta com elevado espalhamento e uma expressiva exsudação na superfície, indicando a necessidade de maior incorporação de FRG para eliminar a exsudação existente. No caso da Figura 32C, percebe-se que não houve fluxo da pasta pelo interior do cone, indicando que esta ficou extremamente seca e sem nenhuma fluidez, concluindo que, neste caso, o teor de finos estava muito elevado, deixando a pasta sem nenhuma trabalhabilidade. O teor de FRG ideal está apresentado na Figura 32B, na qual a pasta apresenta certa coesão, mantendo-se no formato do cone utilizado, sem excessiva exsudação, de forma a garantir a trabalhabilidade e a consistência necessárias.

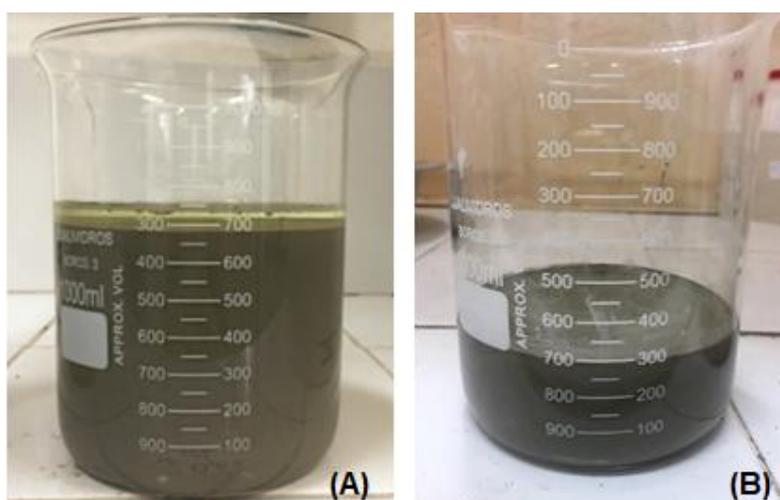
Figura 32. Análise visual de pastas com diferentes teores de FRG: (a) fluido, (b) ótimo e (c) seco.



Fonte: (A Autora).

Na Figura 33 é possível identificar o comportamento das pastas quando existe um baixo teor de finos e uma elevada exsudação (Figura 33A) e quando há a incorporação de teor ideal de finos, com ausência de exsudação (Figura 33B).

Figura 33. Exemplos de ensaios com (A) exsudação em excesso e (B) sem exsudação



Fonte: (A Autora).

A Tabela 10 apresenta os índices de exsudação das pastas estudadas. Foram definidas como ideais as pastas que apresentaram índices inferiores a 1,00%. Sendo assim, para a pasta com relações água/cimento de 0,63, 0,46 e 0,42, os teores ideais de adição FRG foram iguais a 40%, 15% e 12%, respectivamente.

Tabela 10 - Teores de adição FRG e o índice de exsudação (IE).

Relação a/c	FRG (%)	IE (%)
0,63	30%	1,47 ± 0,10%
	40%	0,89 ± 0,14%
	45%	Sem fluxo
0,46	0%	2,78 ± 0,96%
	15%	0,33 ± 0,32%
	20%	Sem fluxo
0,42	10%	1,94 ± 0,48%
	12%	0,62 ± 0,08%

Fonte: (A Autora).

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 9, percebe-se que, quanto maior a quantidade de água livre inicialmente presente na mistura, ou seja, quanto maior a relação água/cimento, maior o teor de adição de FRG necessário para manter a coesão da mistura e eliminar a ocorrência de exsudação. Isto ocorre, pois, com o aumento da incorporação dos finos, mantendo a relação água/cimento constante, ocorre um aumento da concentração de sólidos da pasta e uma consequente redução expressiva na quantidade de água livre na mistura, aumentando a coesão da mistura e eliminando quase que completamente a exsudação das amostras.

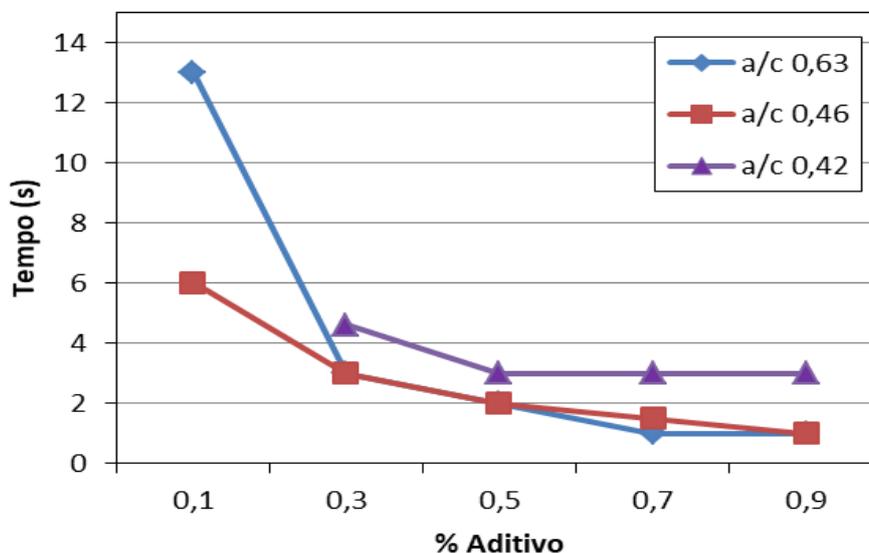
Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Melo (2005), que identificou a necessidade de empregar diferentes teores de adição para as diferentes relações água/cimento, a fim de garantir a estabilidade das pastas.

4.3.2. Ponto de saturação do aditivo superplastificante

A Figura 34 apresenta os resultados de tempo de escoamento das pastas com diferentes relações água/cimento e com distintos teores de incorporação de aditivo superplastificante. Como esperado, com o aumento do teor de aditivo incorporado

têm-se uma redução do tempo de escoamento da pasta pelo cone de Marsh, devido à maior dispersão das partículas ocasionada pela incorporação do aditivo.

Figura 34. Ponto de saturação do aditivo superplastificante para as pastas com diferentes relações água/cimento.



Fonte: (A Autora).

O ponto de saturação é tido como aquele em que ocorre uma redução de tempo de escoamento menor ou igual a 1 segundo. Sendo assim, para a pasta com relações a/c iguais a 0,63 e 0,46, o ponto de saturação foi 0,7% e, para a pasta com relação a/c igual a 0,42, o ponto de saturação foi de 0,5% de aditivo.

4.3.3. Análise da fração de poros e da distância de separação entre partículas (IPS)

A Tabela 11 apresenta os resultados encontrados após análise da fração de poros e cálculo da distância de separação entre partículas. A nomenclatura adotada seguiu o padrão $F\bar{X}$, sendo X o teor de adição de FRG.

Nesta seção encontram-se apresentadas as análises com teores de 20% e 17% de FRG para a pasta com relação a/c de 0,46 e 0,42, respectivamente, pois foram os teores adotados após ajuste feito no estudo em argamassa que será descrito na seção seguinte.

Tabela 11 – Resultado de P_{ofg} e IPS das pastas analisadas, com diferentes relações água/cimento.

a/c	Nome	P_{ofg} (%)	IPS (μm)
0,63	F0	47,73%	0,412
	F40	45,42%	0,153
0,46	F0	47,73%	0,203
	F20	46,79%	0,111
0,42	F0	47,73%	0,155
	F17	46,05%	0,096

Fonte: (A Autora).

Ao analisar os resultados obtidos, percebe-se que, em comparação com as pastas sem incorporação de FRG (F0), todas as pastas com adição de FRG obtiveram uma fração menor de poros. Ou seja, a utilização em conjunto do cimento e do FRG resultou em um melhor empacotamento das partículas reduzindo, assim, a porosidade das misturas para todas as relações água/cimento estudadas.

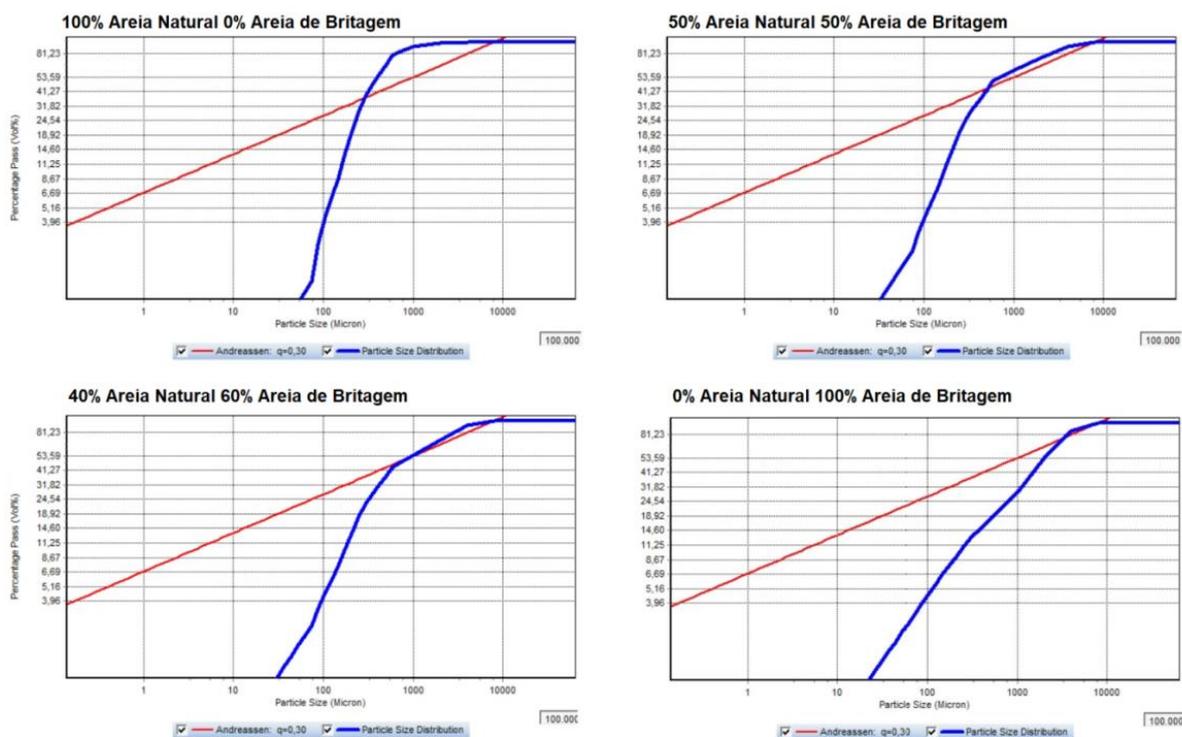
Porém, com a incorporação do FRG há uma redução da quantidade de água adicionada na mistura, uma vez que foi definido que a relação água/cimento seria mantida constante. Assim sendo, a incorporação de FRG nas pastas eleva a fração volumétrica de sólidos na suspensão (V_s), o que acaba por reduzir o IPS, de acordo com a Equação 5 apresentada anteriormente. Esta redução da distância entre partículas resulta em pastas com menor fluidez podendo, assim, elevar o consumo de aditivo superplastificante para alcançar uma mesma trabalhabilidade quando comparadas às pastas de referência.

4.4. DOSAGEM DAS ARGAMASSAS

4.4.1. Determinação da proporção ideal entre areia natural e areia de britagem

A primeira etapa para determinação da proporção ideal entre a areia natural e a areia de britagem das argamassas foi a utilização do software EMMA. Foram analisadas diversas proporções intermediárias entre os dois tipos de areia, sendo as mais relevantes apresentadas na Figura 35. Como se pode observar, as distribuições que mais se aproximaram da distribuição ideal foram compostas por 50% de areia natural e 50% de areia de britagem, em volume, e 40% de areia natural e 60% de areia de britagem. Vale ressaltar que os resultados aqui apresentados dizem respeito a AB utilizada na presente pesquisa, sendo assim, areias provenientes de outras localidades ou mesmo de outros lotes podem apresentar comportamento diferente dos aqui apresentados.

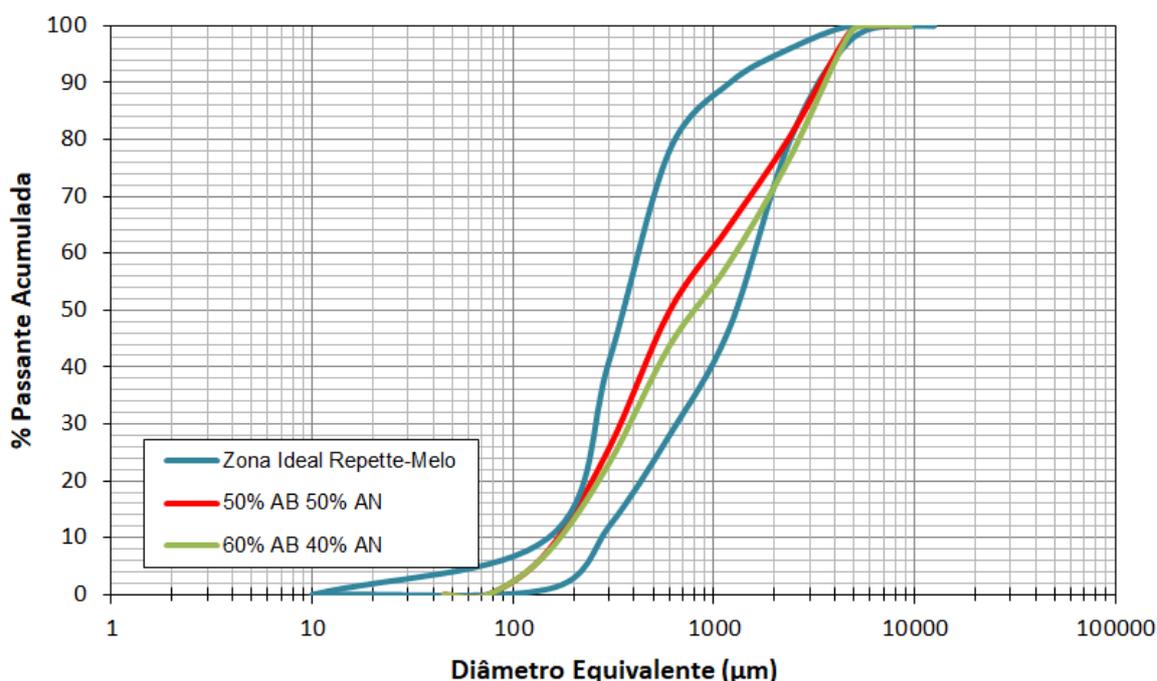
Figura 35. Análise das proporções entre areia natural e areia de britagem pelo software EMMA.



Fonte: (A Autora).

Finalizada a análise das proporções pelo EMMA, ambas as distribuições foram plotadas em conjunto com a zona ideal de distribuição do agregado miúdo, proposta pelo método Repette-Melo, apresentadas na Figura 36. Como se pode observar, a distribuição da proporção de 40% areia natural (AN) e 60% areia de britagem (AB), em volume, encontra-se fora da zona ideal proposta pelo método na parte inferior, indicando uma quantidade excessiva de material retido na peneira com abertura de malha de 2,36 mm, enquanto a distribuição de 50% AN e 50% AB encontra-se totalmente dentro da zona proposta. Assim sendo, definiu-se como ideal a proporção de 50% de areia natural e 50% de areia de britagem, em volume, sendo esta proporção mantida constante para todas as dosagens de argamassas e concretos autoadensáveis.

Figura 36. Análise das proporções de areia natural x areia de britagem e a zona ideal proposta pelo método Repette-Melo.



Fonte: (A Autora).

4.4.2. Definição do volume de areia e ajuste final do teor de FRG

Definida a proporção entre areia natural e areia de britagem a ser empregada nas argamassas e concretos, iniciou-se o estudo do volume de areia em relação ao

volume de argamassa. Para isto, realizou-se a incorporação do aditivo superplastificante até alcançar o espalhamento considerado como ideal (250 ± 10 mm) e análise do tempo de escoamento pelo mini funil-V.

A Tabela 12 apresenta os teores de aditivos necessários e a classificação dos tempos de escoamento encontrados. Nesta classificação, os tempos de escoamento foram estratificados como ideal (entre 5 e 10 segundos), aceitável (entre 3,5 e 5 segundos) e inadequado (entre 0 e 3,5 segundos).

Tabela 12 - Análise do volume de areia em relação ao volume de argamassa e classificação do comportamento reológico quanto aos ensaios de mini slump e mini funil-V.

Relação a/c	Volume de areia (%)	Aditivo (%)	Mini Slump	Mini Funil-V
0,63	40	0,67	Ideal	Inadequado
	45	0,68	Ideal	Aceitável
	50	0,78	Ideal	Ideal
0,46	40	0,32	Ideal	Inadequado
	45	0,39	Ideal	Inadequado
	50	0,48	Ideal	Aceitável
0,42	40	0,32	Ideal	Inadequado
	45	0,37	Ideal	Inadequado
	50	0,43	Ideal	Aceitável

Fonte: (A Autora).

Após análise dos resultados, verificou-se que o volume ideal de areia para as três relações água/cimento é de 50% do volume total da argamassa, alcançando a faixa de tempo de escoamento ideal para a relação a/c igual a 0,63 e a faixa aceitável para as relações 0,46 e 0,42. Em seguida foi analisada a viabilidade de aumentar o teor de FRG definido na etapa do estudo em pasta em 5%, fazendo a correção do teor de aditivo para manter a trabalhabilidade necessária.

Para a argamassa com relação água/cimento de 0,63, o aumento de 5% do teor de FRG levou a mistura a apresentar consistência extremamente seca (Figura 37), com perda total da trabalhabilidade, mesmo com incorporação de aditivo em teores superiores a 1%. Com isso, optou-se por não aumentar o teor de FRG definido no estudo em pasta e mantê-lo constante no valor de 40%.

Esta perda acentuada de trabalhabilidade pode ser justificada pelo fato de a argamassa com relação a/c 0,63 já possuir uma expressiva adição de FRG, eliminando quase que completamente a presença de água livre na mistura, o que explica, também, o elevado teor de aditivo necessário para alcançar o espalhamento ideal. Assim sendo, o aumento de 5% do teor de FRG na argamassa fez com que a pequena quantidade de água livre que ainda existia na mistura ficasse retida na superfície irregular dos finos, tornando inviável alcançar a autoadensabilidade com teores usuais de aditivo superplastificante.

Figura 37. Aspecto da argamassa com relação a/c de 0,63, contendo 45% FRG, 100% areia natural e 1,2% de aditivo superplastificante..



Fonte: (A Autora).

Por outro lado, para as argamassas com relações água/cimento iguais a 0,46 e 0,42, foi possível aumentar em 5% o teor de adição definido previamente (Figura 38). Com este acréscimo do teor de FRG, o tempo de escoamento destas argamassas passou da faixa aceitável para a faixa ideal e os teores de aditivo

passaram de 0,48% para 0,60% para as argamassas com relação a/c de 0,46 e de 0,43% para 0,48% para a relação a/c de 0,42.

O aumento do teor de FRG resultou em um aumento significativo do tempo de escoamento das argamassas devido à redução do consumo de cimento e consequente redução da água livre presente nas misturas.

Estes resultados estão de acordo com os estudos realizados por Gesoğlu *et al.* (2012) e Türkel e Kandemir (2010) que verificaram que o tempo de escoamento de concretos autoadensáveis dependia diretamente do teor de pó de mármore ou de calcário empregado, aumentando quanto maior fosse a incorporação dos finos.

Figura 38. Espalhamento das argamassas autoadensáveis com acréscimo de 5% de FRG nas argamassas com relações a/c iguais a (A) 0,46 e (B) 0,42.



Fonte: (A Autora).

Finalizada a definição ideal da dosagem das argamassas contendo incorporação simultânea de FRG e areia de britagem, foram estudadas três misturas de referência para cada relação água/cimento empregada. Estas misturas foram adotadas de maneira a estudar a influência da incorporação dos finos e da areia de britagem de maneira isolada e quando empregadas em conjunto. A Tabela 13 apresenta o consumo final dos materiais (kg/m^3) para cada mistura estudada. A

nomenclatura adotada seguiu o padrão $F\bar{X}AB\bar{Y}$, sendo X o teor de adição de FRG e Y o teor de substituição da areia natural por areia de britagem (AB).

Ou seja, F0AB0 refere-se às argamassas de referência sem FRG e sem areia de britagem, F40AB0 às argamassas de referência com adição de 40% de FRG, porém sem incorporação de areia de britagem, F0AB50 as argamassas de referência sem incorporação de FRG e com substituição parcial (50%) da areia natural pela areia de britagem. Vale ressaltar que para todas as argamassas, o volume total de agregado miúdo foi mantido constante em 50% do volume total da argamassa e que a adição de FRG e substituição parcial da areia natural por AB foram feitas em volume.

Tabela 13 - Consumo dos materiais de cada dosagem estudada (kg/m³).

a/c	Nome	Cimento	Fino	AN	AB	Água	Aditivo	FRG (%)	AB (%)
0,63	F0AB0	525,86	0,00	1324,50	0,00	331,29	1,47	0	0
	F0AB50	525,86	0,00	662,25	692,50	331,29	1,10	0	50
	F40AB0	-	-	-	-	-	-	40	0
	F40AB50	432,48	264,64	657,34	687,36	272,46	3,37	40	50
0,46	F0AB0	640,35	0,00	1324,50	0,00	294,56	2,56	0	0
	F0AB50	640,35	0,00	662,25	692,50	294,56	2,31	0	50
	F20AB0	579,19	132,90	1327,96	0,00	266,43	3,76	20	0
	F20AB50	579,19	132,90	663,98	694,31	266,43	3,48	20	50
0,42	F0AB0	647,93	0,00	1324,50	0,00	283,47	2,50	0	0
	F0AB50	674,93	0,00	662,25	692,50	283,47	2,36	0	50
	F17AB0	625,77	117,64	1312,05	0,00	262,82	3,63	17	0
	F17AB50	625,77	117,64	656,03	685,99	262,82	3,00	17	50

Fonte: (A Autora).

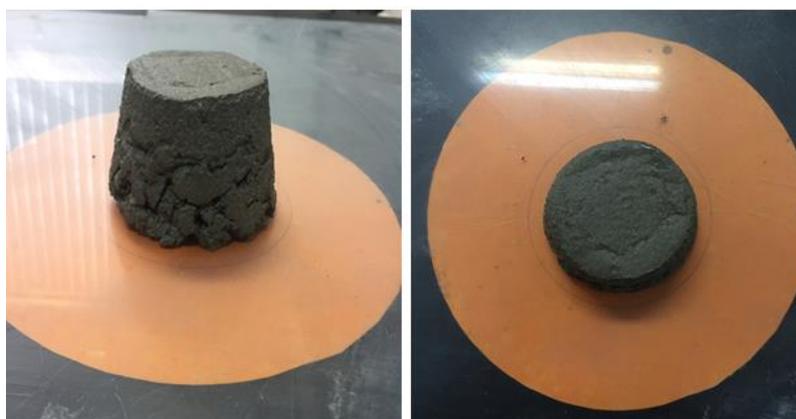
Ao analisar a Tabela 13, percebe-se que não foi possível atingir a autoadensabilidade da argamassa de relação a/c igual a 0,63, com incorporação de

40% de FRG e sem areia de britagem. Este resultado pode ser explicado pelo fato de, por ser uma areia classificada como muito fina, a utilização isolada da areia natural em uma mistura que possui elevado teor de finos aumenta expressivamente a demanda por água ou aditivo superplastificante. Isso ocorre porque a elevada área superficial específica dos materiais adsorve maior quantidade de água em sua superfície, reduzindo a quantidade de água livre na mistura e dificultando a autoadensabilidade (MORAES, 2010).

Além disso, a incorporação exclusiva de areia natural resulta em um pior empacotamento de partículas, gerando maior quantidade de vazios. Com isso, há a necessidade da presença de maior volume de pasta para preencher os vazios gerados, reduzindo a quantidade de pasta disponível para lubrificação (BENABED *et al.*, 2012). Assim sendo, mesmo com a incorporação de elevados teores de aditivo superplastificante ($\geq 2,0\%$), não foi possível obter uma formulação que atingisse os critérios de autoadensabilidade determinados (Figura 39).

Estes resultados estão de acordo com os estudos realizados por Benabed *et al.* (2012) e Halim e Taha (2007), nos quais o aumento da incorporação de areia fina também elevou a quantidade de água e cimento necessários para atingir a mesma fluidez quando comparados com misturas com substituição parcial da areia fina por areia de britagem.

Figura 39. Aspecto da argamassa com relação a/c de 0,63, contendo 40% FRG, 100% areia natural e 2% de aditivo superplastificante.



Fonte: (A Autora).

4.4.3. Análise da fração de poros e da máxima espessura de pasta

Os resultados da análise da fração de poros (P_{ofg}) e da máxima espessura de pasta (MPT) das argamassas avaliadas estão apresentados na Tabela 14. Após análise dos resultados, percebe-se que, uma vez que o volume de agregado miúdo foi mantido constante igual a 50% do volume da argamassa para todas as dosagens empregadas, o único fator que influencia a porosidade e a espessura de pasta presente ao redor dos agregados miúdos é a incorporação, ou não, da areia de britagem.

Ou seja, todas as argamassas que foram dosadas utilizando apenas a areia natural obtiveram P_{ofg} de 27,91%, enquanto todas as dosagens com incorporação simultânea das duas areias obtiveram P_{ofg} de 23,28%.

Tabela 14 – Resultado de P_{ofg} e máxima espessura de pasta (MPT) das argamassas analisadas

a/c	Nome	P_{ofg} (%)	MPT (μm)
0,63	F0AB0	27,91	40,79
	F0AB50	23,28	64,74
	F40AB0	-	-
	F40AB50	23,28	64,74
0,46	F0AB0	27,91	40,79
	F0AB50	23,28	64,74
	F20AB0	27,91	40,79
	F20AB50	23,28	64,74
0,42	F0AB0	27,91	40,79
	F0AB50	23,28	64,74
	F17AB0	27,91	40,79
	F17AB50	23,28	64,74

Fonte: (A Autora).

Como era de se esperar, a porosidade das argamassas com incorporação apenas da areia natural como agregado miúdo é maior do que aquelas que utilizaram simultaneamente areias natural e artificial. Isto pode ser explicado, como

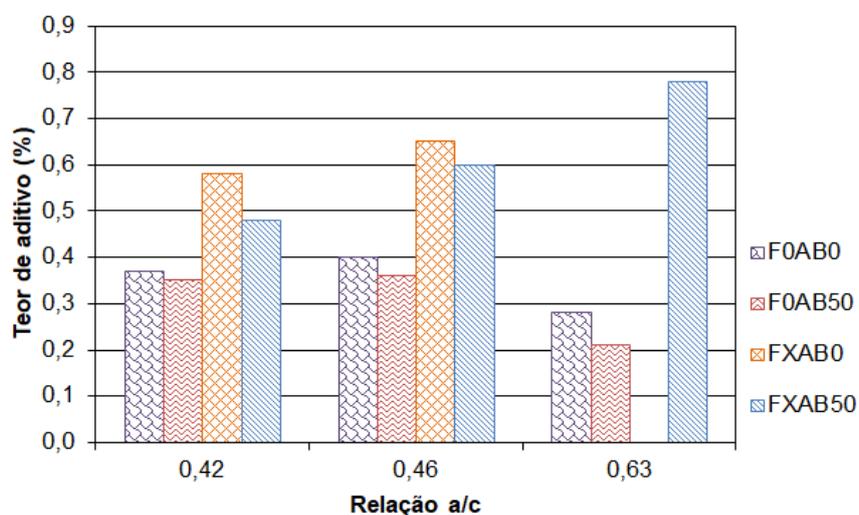
abordado anteriormente, pela tendência que as partículas de areia natural possuem de ocupar os espaços vazios deixados pelos grãos da areia de britagem. Assim sendo, a utilização simultânea das duas areias resulta em argamassas mais densas, com maior empacotamento.

Como consequência da maior porosidade, as argamassas com incorporação apenas de areia natural possuem uma menor espessura de pasta ao redor das partículas de agregado miúdo, uma vez que uma grande quantidade de pasta tende a preencher os vazios deixados pela areia, resultando em menor quantidade de pasta disponível para cobrir os grãos de agregado miúdo.

4.4.4. Teor de aditivo superplastificante

A Figura 40 apresenta a dosagem de aditivo necessária para garantir a fluidez ideal das argamassas estudadas. Observa-se que as misturas que utilizam em conjunto o FRG e 100% de areia natural são as que possuem o maior consumo de aditivo. Como explicado anteriormente, isto se deve ao fato da incorporação conjunta de dois materiais que possuem elevada área superficial específica (FRG e areia natural) e que, por consequência, elevam consideravelmente a quantidade de aditivo superplastificante necessária para alcançar o espalhamento ideal (BENABED *et al.*, 2012; HALIM e TAHA, 2007; MORAES, 2010).

Figura 40. Teores de aditivo adotados para as argamassas com relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.



Fonte: (A Autora).

Ressalta-se que o valor de X das nomenclaturas refere-se ao teor de adição de FRG que foi de 40%, 20% e 17% para as relações água/cimento de 0,63, 0,46 e 0,42, respectivamente.

Este resultado pode ser explicado, também, pela redução simultânea do IPS das misturas, pela incorporação do FRG, e do MPT, pela utilização isolada da areia natural. Assim sendo, estas dosagens possuem a menor quantidade de fluido disponível para lubrificar as partículas de todas as dosagens analisadas. Esta redução significativa na quantidade de fluido justifica o elevado teor de aditivo superplastificante necessário para manter a fluidez ideal.

Ao analisar a influência da incorporação individual da areia de britagem em substituição parcial à areia natural (F0AB50), percebe-se que o teor de aditivo superplastificante necessário para se atingir o espalhamento adequado diminui significativamente, para todas as relações água/cimento estudadas, quando comparada à argamassa de referência (F0AB0). Isto ocorre pelo fato de a AB possuir uma área superficial específica muito menor do que a areia natural empregada na pesquisa, o que reduz a demanda por água ou por aditivo superplastificante para alcançar a mesma consistência (BENABED *et al.*, 2012; LOHANI *et al.*, 2012).

Além disso, a utilização conjunta das duas areias resulta em uma menor porosidade, como apresentado na Tabela 11. Esta melhoria no empacotamento das partículas resulta em um aumento do MPT que, por sua vez, reduz o atrito interno entre as partículas pela presença de maior quantidade de pasta ao redor dos agregados. Esta maior quantidade de pasta livre presente na mistura facilita de maneira significativa o escoamento das argamassas, reduzindo o consumo de aditivo superplastificante para alcançar o espalhamento de 250 ± 10 mm (HALIM e TAHA, 2007; KUMAR e RADHAKRISHNA, 2016).

Ao analisar a dosagem de aditivo superplastificante nas misturas com incorporação simultânea de FRG e areia de britagem (FXAB50), nota-se um consumo intermediário de aditivo entre as dosagens com incorporação isolada de um dos materiais, devido à influência da adição conjunta das duas matérias-primas. Como explicado anteriormente, a adição FRG resulta em uma perda significativa da fluidez das argamassas, aumentando o consumo de aditivo de forma a alcançar o

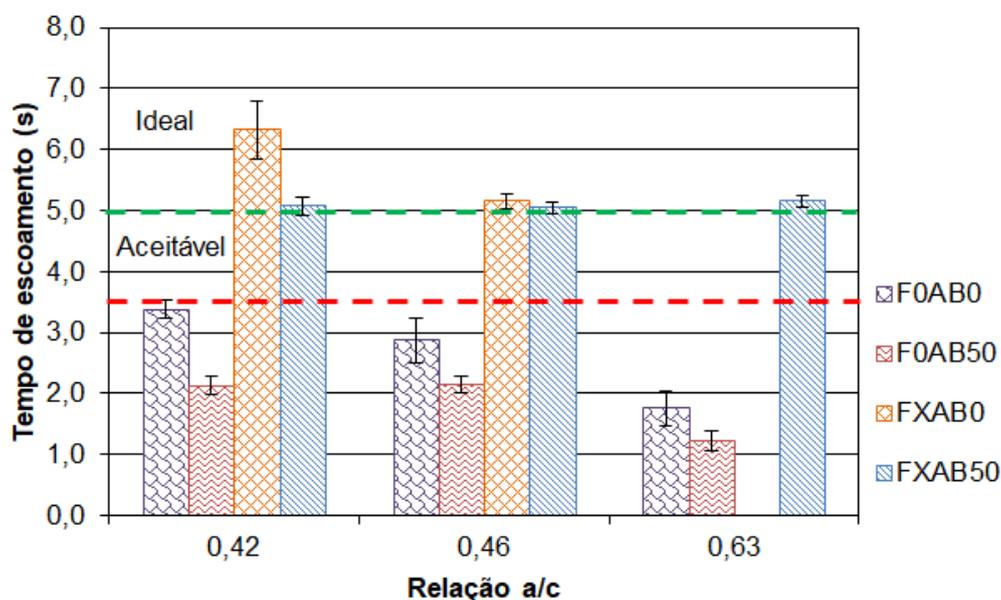
espalhamento ideal. Por outro lado, a substituição parcial da areia natural por AB reduz o consumo de aditivo, resultado do melhor empacotamento de partículas e consequente aumento do MPT.

4.4.5. Caracterização das argamassas autoadensáveis em estado fresco

4.4.5.1. Tempo de escoamento

A Figura 41 apresenta o tempo de escoamento das argamassas estudadas pelo ensaio do mini funil-V.

Figura 41. Tempos de escoamento das argamassas com relações a/c iguais a 0,63, 0,46 e 0,42, obtidos por meio do ensaio do mini funil-V.



Fonte: (A Autora).

Ao analisar os resultados apresentados na Figura 41, pode-se concluir que a adição de FRG (FXAB0) resulta em um acréscimo estatisticamente significativo do tempo de escoamento da mistura quando comparada à mistura de referência, sem FRG e sem areia de britagem (F0AB0) (ver no Apêndice A). Este resultado pode ser justificado pela redução da quantidade de água presente na argamassa quando da supressão de cimento na mistura e da consequente redução do IPS da pasta. A redução do IPS resulta em um escoamento dificultado pela maior proximidade das partículas e consequente acréscimo do atrito existente (Tabela 13).

Além disso, a superfície rugosa e irregular das partículas do FRG (Figura 30) resulta em maior retenção de água livre na superfície da adição mineral, reduzindo ainda mais a quantidade de água disponível para lubrificar as partículas da argamassa, tornando mais demorado seu escoamento (BENABED *et al.*, 2016; FELEKOGLU, 2007; FELEKOGLU *et al.*, 2006; GESOĞLU *et al.*, 2012; GUNYISI, GESOGLU e OZBAY, 2009).

Segundo Felekoglu *et al.* (2006), o tempo de escoamento encontrado pelo ensaio do mini funil-V pode, em alguns casos, ser correlacionado com a viscosidade da mistura, indicando uma tendência ao aumento ou redução da viscosidade com a mudança de algum parâmetro de dosagem. Porém, para baixas alterações de viscosidade, este ensaio parece não ser sensível o suficiente para captar tais alterações.

A partir da análise dos resultados pode-se observar, também, que a substituição parcial da areia natural por AB (F0AB50) resulta em uma redução significativa do tempo de escoamento da mistura (Apêndice A). De maneira similar ao que ocorre com o consumo de aditivo, a incorporação da areia de britagem faz com que haja uma redução da quantidade de vazios presentes na argamassa resultando, assim, em maior quantidade de pasta livre para lubrificação das partículas, aumentando o MPT e facilitando o escoamento das argamassas (BENABED *et al.*, 2012).

Além disso, a substituição de um material com elevada área superficial, como a areia natural, por uma areia mais grossa, resulta em uma redução da quantidade de água adsorvida na superfície das partículas, aumentando a quantidade de água livre presente na mistura e, conseqüentemente, reduzindo o atrito existente entre as partículas. Esta redução do atrito facilita o escoamento das misturas com substituição parcial da areia natural por AB (KUMAR e RADHAKRISHNA, 2016).

Nota-se, também, a mesma tendência do comportamento observado no estudo do consumo de aditivo superplastificante para o tempo de escoamento das argamassas com incorporação simultânea de FRG e AB. Ou seja, o tempo de escoamento destas misturas tende a ser menor do que os valores encontrados para argamassas com incorporação isolada de FRG e maior do que o apresentado pela argamassa com areia de britagem. Isto é, enquanto a incorporação dos finos tende

a aumentar significativamente o tempo de escoamento das misturas, pela redução significativa do IPS, a substituição parcial da areia natural pela AB tende a reduzir o mesmo, pelo aumento do MPT, resultando em um aumento intermediário das misturas com incorporação simultânea.

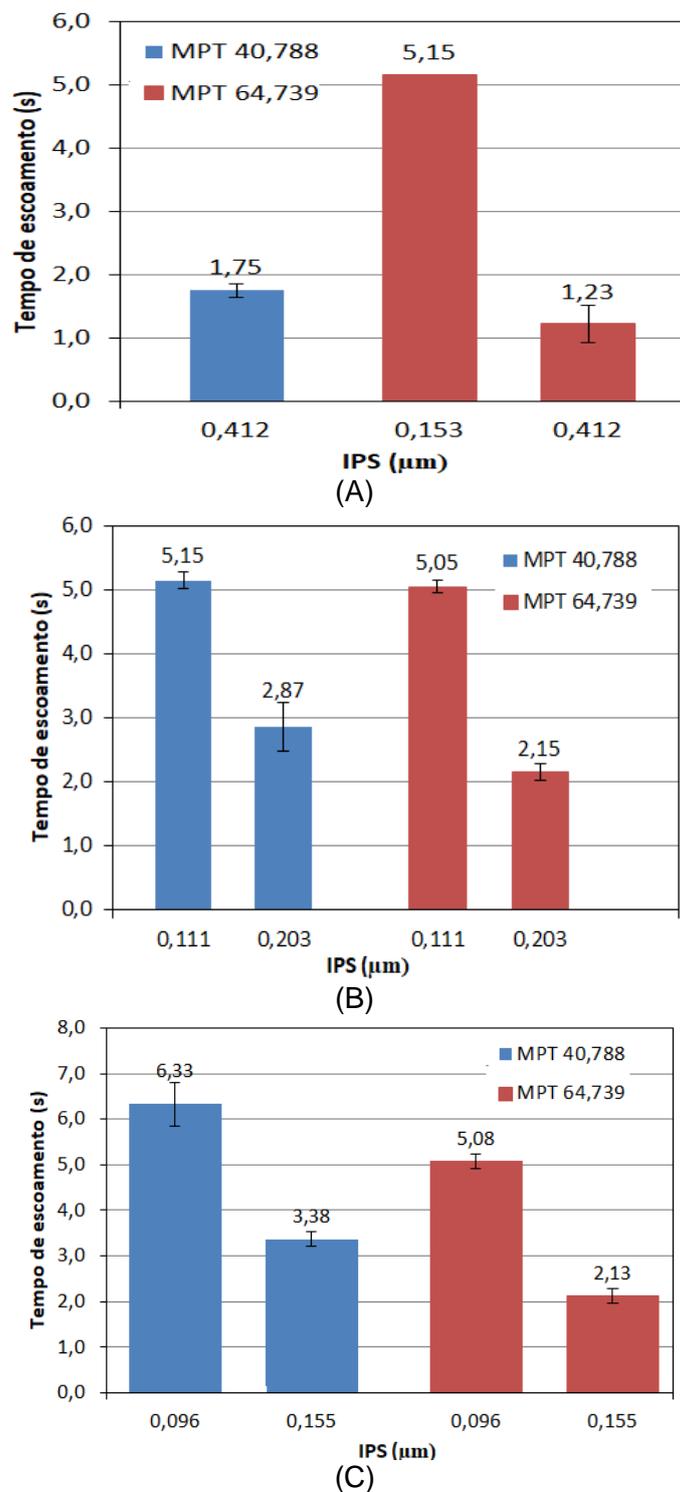
Percebe-se, porém, maior influência da incorporação do FRG no tempo de escoamento, uma vez que, apesar da redução provocada pela utilização da areia de britagem, todas as argamassas com o emprego simultâneo de FRG e AB atingiram a faixa de tempo de escoamento ideal, se aproximando mais dos resultados apresentados pelas argamassas contendo apenas FRG e areia natural (Figura 41).

Ao analisar os resultados, percebe-se que o aumento do IPS (Figura 42) possui uma influência muito mais expressiva na redução do tempo de escoamento das argamassas estudadas do que o aumento do MPT (Figura 43). Pode-se concluir, então, que a incorporação do FRG é o principal fator que altera o tempo de escoamento das misturas, fazendo com que o espaçamento entre as partículas finas seja reduzido consideravelmente e, conseqüentemente, aumentando o tempo de escoamento das argamassas. Assim sendo, a incorporação do FRG possui o potencial de adequar o tempo de espalhamento das argamassas autoadensáveis sem a necessidade da incorporação de aditivos modificadores de viscosidade.

Observa-se, também, que quanto maior o teor de adição de FRG, menor a influência da substituição parcial da areia natural no tempo de escoamento das argamassas.

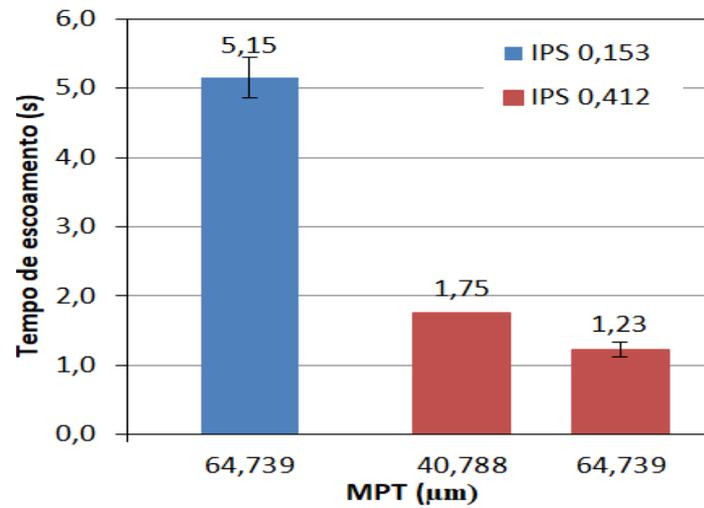
Constata-se que as argamassas com incorporação de FRG e com 100% de areia natural (FXAB0) e argamassas dosadas com FRG e AB simultaneamente (FXAB50) apresentaram tempo de escoamento dentro da faixa considerada ideal pelo método proposto por Repette-Melo. Este parâmetro visa à obtenção de argamassas com viscosidades intermediárias, de forma a reduzir o risco de segregação e aumentar a capacidade da argamassa de carrear os agregados graúdos, do concreto, sem a ocorrência de bloqueio nas armaduras.

Figura 42. Tempos de escoamento, com variação no IPS, das argamassas com relações água/cimento iguais a (A) 0,63, (B) 0,46 e (C) 0,42.

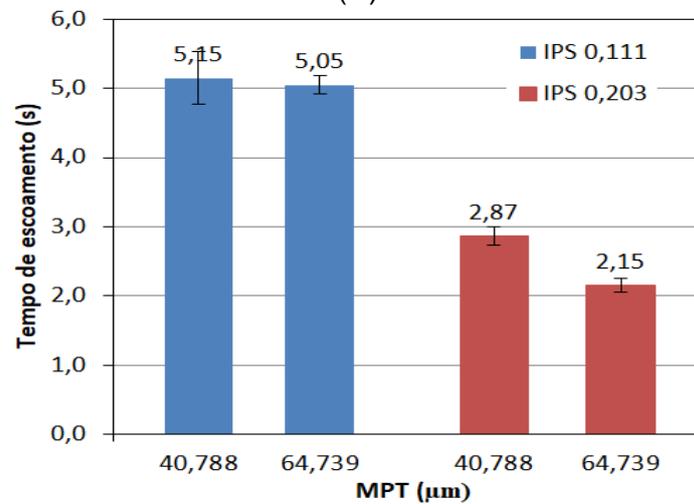


Fonte: (A Autora).

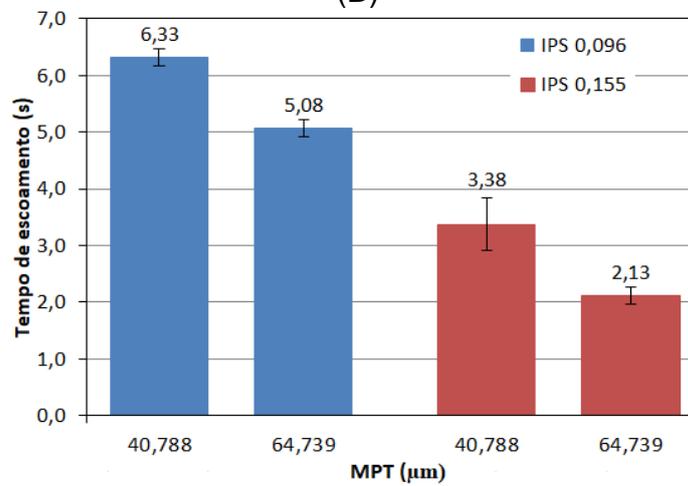
Figura 43. Tempos de escoamento, com variação no MPT, das argamassas com relações água/cimento iguais a (A) 0,63, (B) 0,46 e (C) 0,42.



(A)



(B)

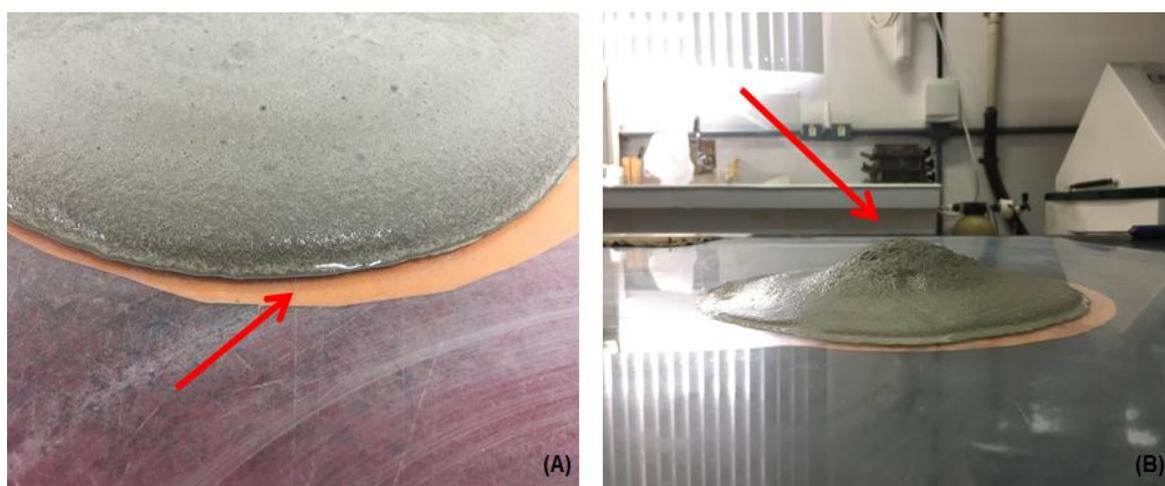


(C)

Fonte: (A Autora).

Por outro lado, quando as argamassas são muito fluidas e possuem um tempo de escoamento muito baixo, tais como as argamassas sem FRG e sem areia de britagem (F0AB0) e as argamassas com substituição parcial da areia natural por AB (F0AB50), ocorre uma elevada segregação dos materiais constituintes, caracterizados pela presença de uma película de água na superfície da mistura (Figura 44A) e pela alta concentração de agregados miúdos no centro do espalhamento, resultado do ensaio de mini *slump* (Figura 44B).

Figura 44. Visualização da ocorrência (A) de exsudação e (B) concentração de agregado miúdo no centro do espalhamento nas argamassas com baixo tempo de escoamento.

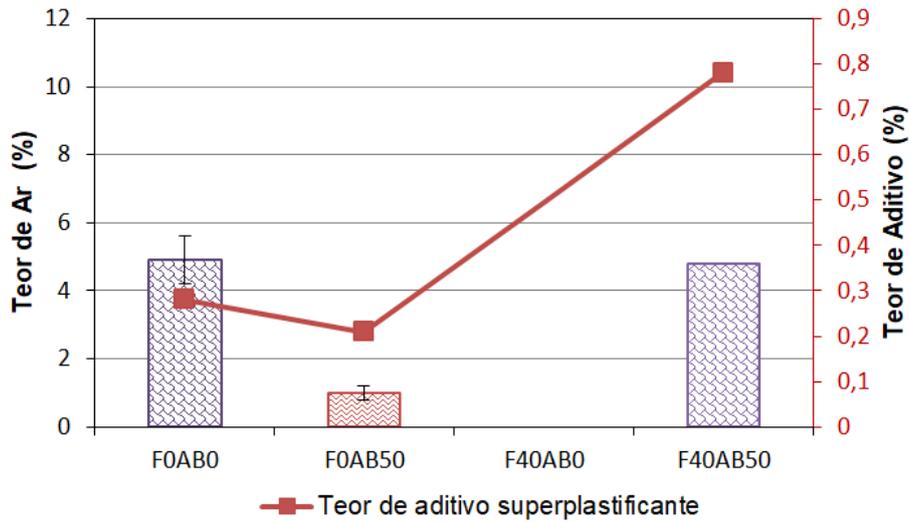


Fonte: (A Autora).

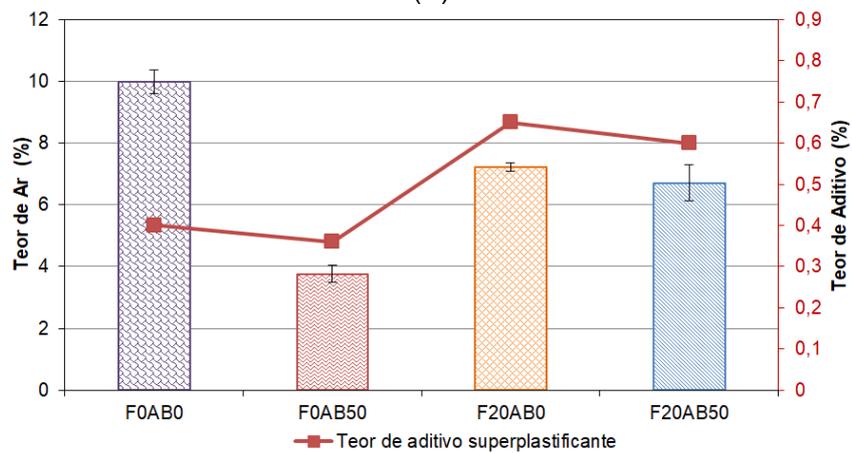
4.4.5.2. Teor de ar

Os teores de ar das argamassas dosadas estão representados na Figura 45 e os resultados da análise estatística encontram-se no Apêndice A. Observa-se, com exceção das argamassas de referência (F0AB0), uma relação direta entre o teor de ar e o teor de aditivo superplastificante empregado na mistura. Estudos mostram que concretos autoadensáveis com incorporação de aditivo superplastificante à base de policarboxilato apresentam, como efeito colateral, um aumento do teor de ar nas misturas de maneira similar ao que acontece quando da utilização de aditivos incorporadores de ar (FELEKOĞLU, TÜRKEL e BARADAN, 2007; SZWABOWSKI e PIEKARCZYK, 2010).

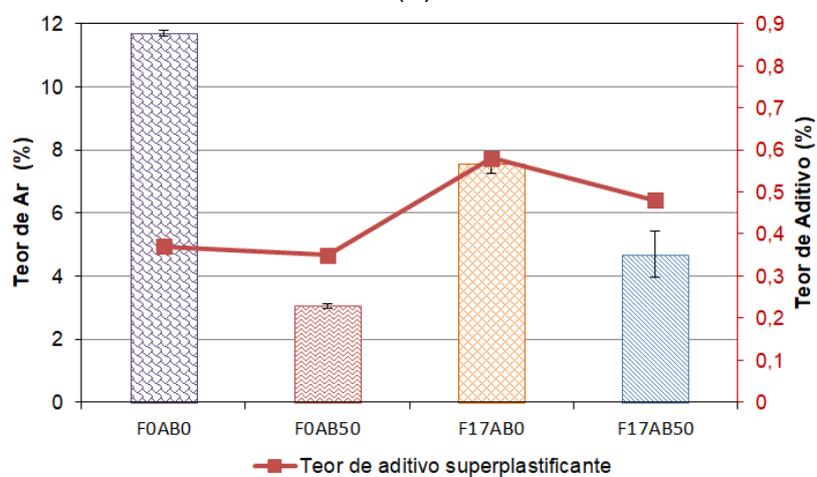
Figura 45. Teores de ar para as argamassas com relações a/c iguais a (A) 0,63, (B) 0,46 e (C) 0,42.



(A)



(B)



(C)

Fonte: (A Autora).

Ou seja, a incorporação do aditivo superplastificante resulta no surgimento dos fenômenos de hidrofiliidade e hidrofobicidade, reduzindo a tensão superficial da fase líquida da mistura. Assim sendo, as bolhas formadas pelas superfícies hidrofílicas das partículas não conseguem se manter aderida às mesmas, ficando dispersas na mistura, aumentando o teor de ar das argamassas. Estas bolhas geradas tendem a ser maiores e menos estáveis do que as bolhas produzidas pela utilização de aditivos incorporadores de ar (ROMANO, CINCOTTO e PILEGGI, 2018; SZWABOWSKI e PIEKARCZYK, 2010).

Além disso, argamassas com incorporação de areia de britagem tendem a ter um menor teor de ar visto que os grãos de areia artificial possuem superfície áspera e bordas afiadas, aumentando a curvatura das bolhas que se encontram aderidas às partículas. Estas irregularidades superficiais resultam em uma concentração de estresse, fazendo com que as bolhas de ar percam a estabilidade e acabem por romper, reduzindo, assim, o teor de ar nas misturas (YAMEI e LIHUA, 2017).

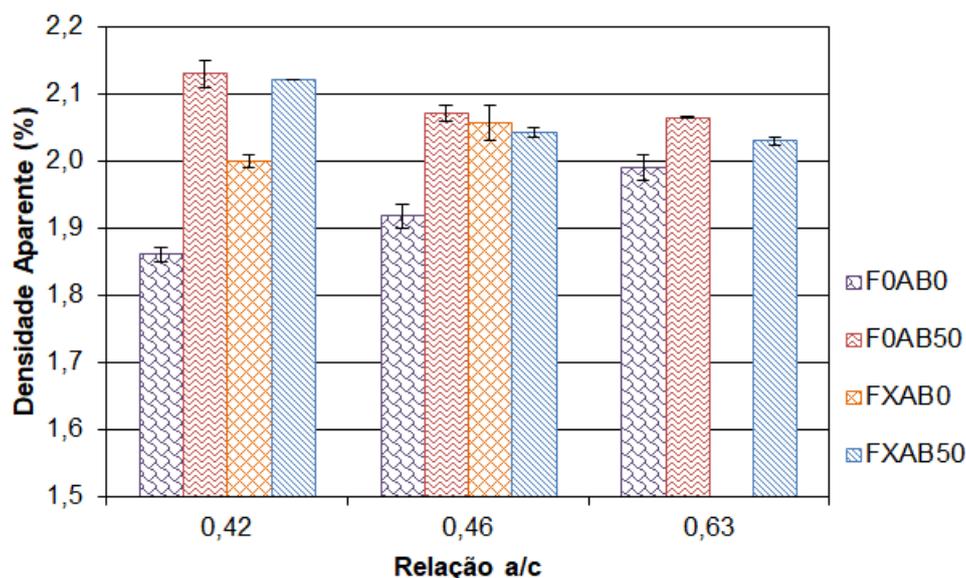
No caso das argamassas de referência, o elevado teor de ar pode ser explicado pela má distribuição granulométrica da mistura proveniente apenas da utilização de cimento e areia natural. Ou seja, a maior uniformidade do tamanho das partículas presente na mistura contribui de maneira negativa para o arranjo das partículas, resultando no surgimento de grandes espaços vazios que, por sua vez, elevam o teor de ar das argamassas (HADDAD *et al.*, 2016).

4.4.6. Caracterização das argamassas autoadensáveis em estado endurecido

4.4.6.1. Densidade e porosidade aparentes

A Figura 46 apresenta os resultados encontrados para a densidade aparente das diferentes argamassas avaliadas e os resultados da análise estatística encontram-se no apêndice A. As argamassas com incorporação de FRG apresentam a nomenclatura de FXAB0 ou FXAB50, nas quais X representa o teor de adição de FRG de cada relação a/c diferente, sendo de 40% de FRG para a argamassa com relação a/c de 0,63, 20% de FRG para a argamassa com relação a/c de 0,46 e 17% de FRG para a argamassa com relação a/c de 0,42.

Figura 46. Densidade aparente das argamassas, em função da relação a/c e dos teores de FRG e areia de britagem.



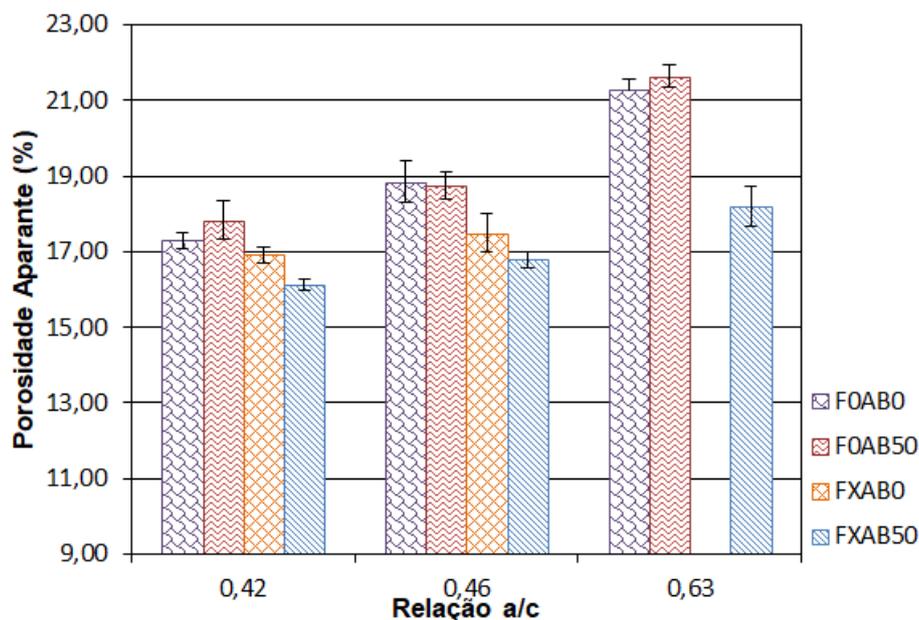
Fonte: (A Autora).

De acordo com os dados apresentados, percebe-se que a influência tanto da incorporação do FRG e da AB, de forma isolada ou simultânea, contribuíram significativamente para aumentar a densidade das argamassas em comparação às argamassas de referência (F0AB0). Isto ocorre, pois, a incorporação dos finos resulta em um preenchimento dos vazios deixados pelas partículas do agregado miúdo, melhorando o empacotamento final das argamassas e resultando em uma matriz mais densa (SADEK, EL-ATTAR e ALI, 2016; UYSAL e YILMAZ, 2011).

Da mesma forma, o aumento da densidade da mistura ao se incorporar a areia de britagem é uma consequência do melhor empacotamento de partículas, pois, as partículas de areia natural são bem menores do que as da AB, preenchendo de maneira mais eficiente os vazios deixados pela mesma. Além disso, o elevado teor de material pulverulento presente na areia de britagem também auxilia na densificação da matriz (BEIXING, GUOJU e MINGKAI, 2011; SHEN *et al.*, 2018; SILVA, BUEST e CAMPITELI, 2005).

Por outro lado, ao analisar os resultados de porosidade aparente apresentados na Figura 47, percebe-se que as argamassas de referência (F0AB0) e as argamassas com incorporação apenas da AB (F0AB50) apresentam as maiores porosidades. Isto mostra que a adição de FRG proporciona a redução da quantidade de poros permeáveis das argamassas e apresenta uma capacidade de preenchimento superior à incorporação da areia de britagem.

Figura 47. Porosidade aparente das argamassas estudadas



Fonte: (A Autora).

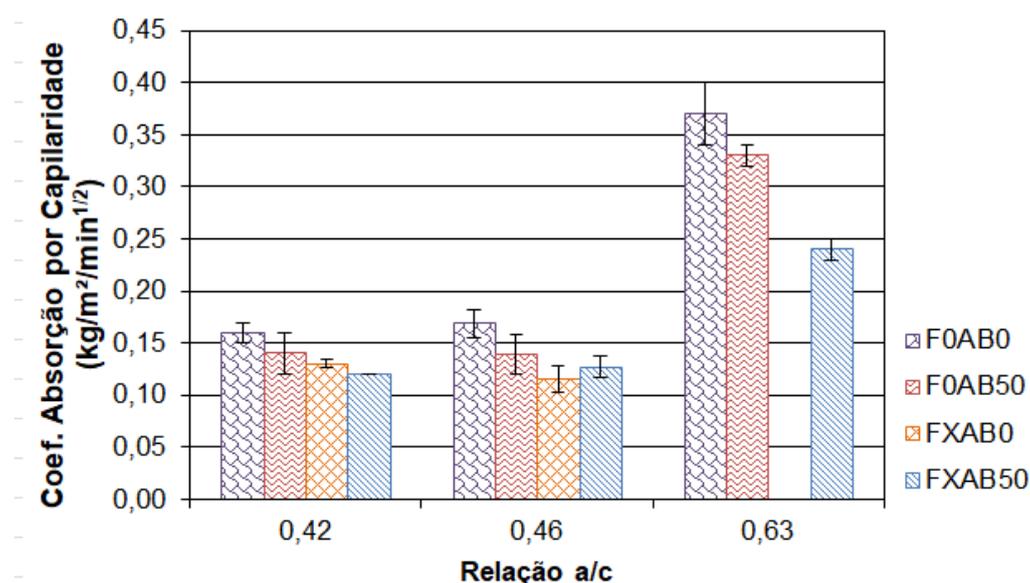
Pode-se concluir também, que o teor de material pulverulento presente na AB não é suficientemente elevado para preencher os poros e reduzir a porosidade aparente das argamassas de maneira efetiva. Além disso, vale ressaltar que o ensaio de porosidade aparente mede apenas a quantidade de poros abertos e interconectados, o que pode justificar a elevada porosidade aparente e elevada densidade das argamassas com substituição parcial da areia natural por AB. Ou seja, as argamassas com areia artificial tendem a possuir menor quantidade total de poros, resultando em maior densidade aparente, porém, a maior parte dos poros remanescentes é permeável, justificando a elevada porosidade aparente das misturas.

Em contrapartida, as argamassas com incorporação simultânea de AB e FRG apresentaram as menores porosidades, devido à melhor distribuição granulométrica que os dois materiais promovem. Por apresentar a menor porosidade aparente entre as dosagens estudadas, estas argamassas tendem a possuir maior durabilidade já que a entrada de agentes agressivos se dá, principalmente, através dos poros permeáveis.

4.4.6.2. Absorção de água por capilaridade

A Figura 48 apresenta os resultados encontrados para absorção de água por capilaridade das argamassas estudadas e os resultados de análise estatística ANOVA encontram-se no Apêndice A.

Figura 48. Coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas estudadas.



Fonte: (A Autora).

Ao se analisarem os resultados apresentados na Figura 48, percebe-se que as argamassas que apresentam os maiores valores de absorção de água por capilaridade são as que possuem as maiores porosidades aparentes. Ou seja, as argamassas simples (F0AB0) e com incorporação apenas da areia de britagem (F0AB50) possuem os maiores coeficientes de absorção de água por capilaridade,

enquanto as argamassas com FRG e com a incorporação conjunta de FRG e AB apresentam os menores coeficientes.

Assim sendo, conclui-se que a presença dos finos de rocha granítica é determinante na redução da porosidade aparente e da absorção de água por capilaridade das argamassas. Isto se deve, principalmente, ao efeito fíler apresentado pela incorporação do FRG, resultando em uma matriz mais densa e com menor quantidade de poros (BENABED *et al.*, 2016; SADEK, EL-ATTAR e ALI, 2016; TOPÇU, BILIR e UYGUNOGLU, 2009).

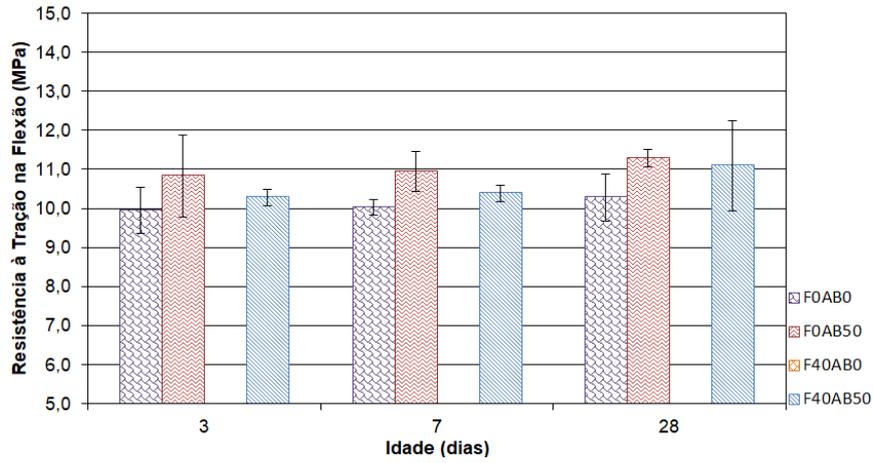
Os resultados encontrados mostram, mais uma vez, os benefícios da incorporação conjunta do FRG e da areia de britagem nas argamassas autoadensáveis, reduzindo a porosidade aparente e absorção de água por capilaridade, além de aumentar a densidade do material.

4.4.6.3. Resistência à tração na flexão

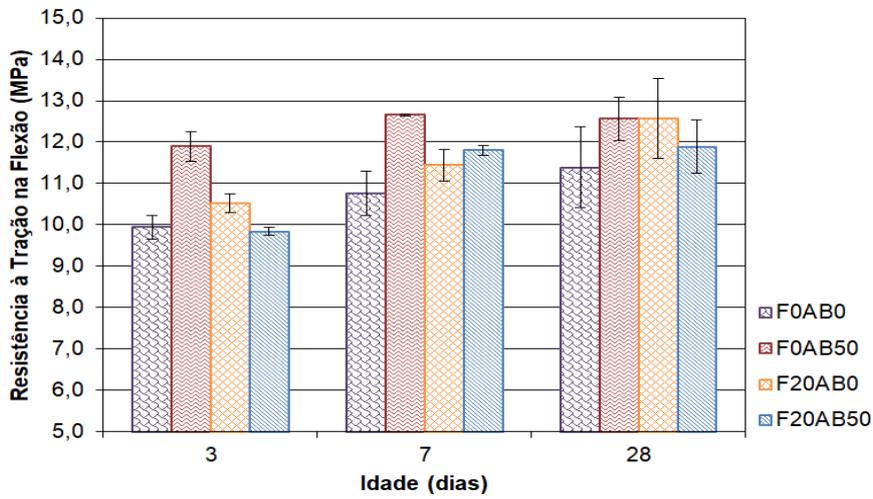
A Figura 49 apresenta os resultados de resistência à tração na flexão das argamassas com diferentes relações água/cimento, nas idades de 3, 7 e 28 dias. Ao analisar os resultados encontrados, percebe-se uma tendência ao aumento da resistência à tração na flexão tanto quando da incorporação isolada da areia de britagem e do FRG quanto da incorporação simultânea dos dois materiais. No entanto, este aumento é considerado estatisticamente significativo em relação às formulações de referência apenas para as argamassas com relação água/cimento igual a 0,42 (ver Apêndice A).

A incorporação de FRG tende a aumentar a resistência à tração na flexão por proporcionar uma melhor distribuição granulométrica, o que resulta em um maior preenchimento dos poros das argamassas, isto é, em uma matriz mais densa e resistente. Ou seja, mesmo com a redução de certa quantidade de cimento por incorporação de uma adição inerte, ocorre um ganho de resistência devido à densificação da matriz (DEHWAH, 2012; SADEK, EL-ATTAR e ALI, 2016).

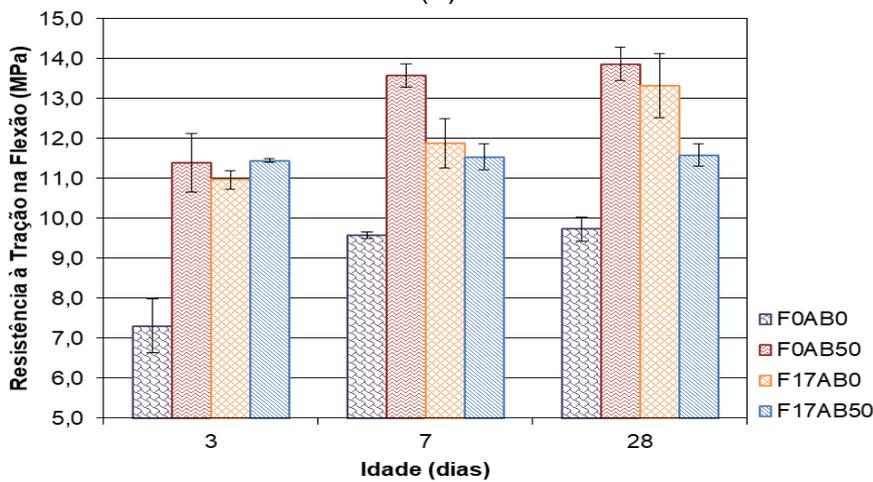
Figura 49. Resistência à tração na flexão para as argamassas com relações a/c de (A) 0,63, (B) 0,46 e (C) 0,42.



(A)



(B)



(C)

Fonte: (A Autora).

Por outro lado, a substituição parcial da areia natural pela AB pode melhorar a resistência da zona de transição entre a pasta e as partículas dos agregados miúdos devido ao aumento do intertravamento mecânico com a pasta de cimento, atribuído à superfície irregular da areia artificial. Assim, o ganho de resistência à tração na flexão resultante da incorporação da areia de britagem é decorrente da interação física das partículas, uma vez que a rugosidade da areia artificial aumenta a aderência entre as partículas de agregado miúdo e a pasta, melhorando o desempenho mecânico das argamassas. (BEIXING, GUOJU e MINGKAI, 2011; DONZA, CABRERA e IRASSAR, 2002; KUMAR e RADHAKRISHNA, 2016; YAMEI e LIHUA, 2017)

Ao realizar a análise de variância dos dados de resistência à tração na flexão das argamassas com relação água/cimento de 0,46 (Apêndice A), percebe-se que na idade de 3 dias existe uma diferença significativa de resistência à tração na flexão da argamassa sem FRG e com substituição parcial da areia natural pela areia de britagem (F0AB50) em comparação às demais misturas. Porém, nota-se, também, que esta diferença não é mantida para as demais idades, indicando que a argamassa em questão apresentou hidratação mais rápida e, conseqüentemente, ganho de resistência mais rápido do que as outras misturas, com tendência à desaceleração com o passar do tempo. Este comportamento pode ser explicado pelo fato desta argamassa possuir o menor teor de aditivo superplastificante entre as demais (Figura 40).

A evolução da resistência das demais argamassas com relação água/cimento igual a 0,46 é menor do que a da argamassa F0AB50, visto que o aumento do teor de aditivo superplastificante afeta a difusão, nucleação e crescimento das fases hidratadas, resultando em um retardo significativo do processo de hidratação com conseqüente aumento do tempo de pega inicial e final das misturas (EL-GAMAL, AL-NOWAISER e AL-BAITY, 2012).

No entanto, estudos mostram que a hidratação de matrizes com elevado teor de aditivo superplastificante, apesar de ser mais lenta, torna-se mais intensa em idades avançadas do que em misturas que possuem menor quantidade de aditivo, fazendo com que o calor total liberado seja maior ao final da hidratação. Por este motivo, após 28 dias de cura, não existe uma diferença significativa na composição

mineralógica nem no ganho de resistência de matrizes com e sem aditivo superplastificante (ATIS, 2005; PUERTAS *et al.*, 2005).

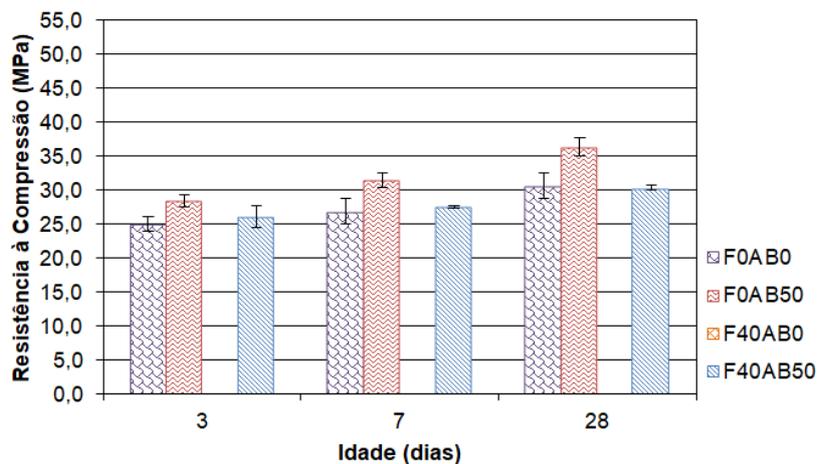
Já para a argamassa F0AB0 com relação água/cimento de 0,42, a resistência significativamente inferior quando comparada às demais argamassas de referência com relação a/c de 0,63 e 0,46, pode ser justificada pelo fato da mesma apresentar menor quantidade de pasta disponível, ao mesmo tempo em que apresenta uma elevada quantidade de vazios devido ao seu empacotamento de partículas menos eficiente. Assim sendo, a quantidade de pasta presente na mistura tende a ocupar os vazios existentes, resultando em quantidade reduzida de pasta para encobrir todas as partículas do agregado miúdo, fragilizando a zona de transição e reduzindo o desempenho mecânico da mesma.

4.4.6.4. Resistência à compressão axial

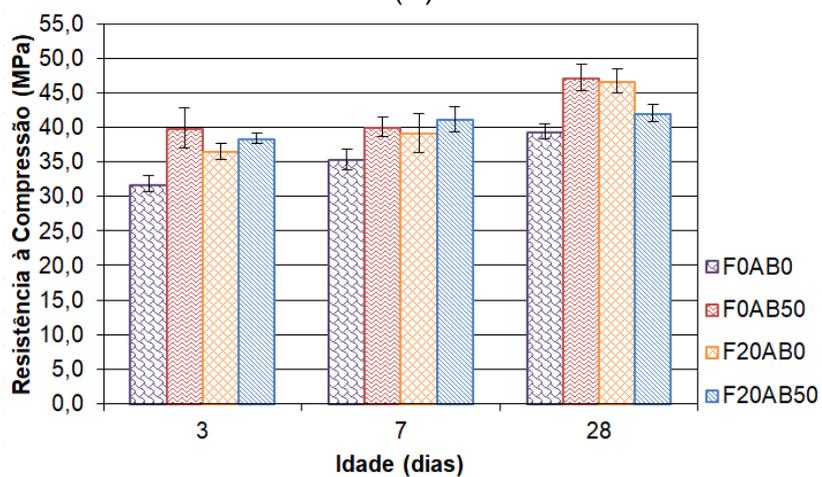
Os resultados de resistência à compressão axial das argamassas estudadas nas idades de 3, 7 e 28 dias são apresentados na Figura 50. Ao analisar os resultados encontrados, percebe-se que a influência da adição isolada da areia de britagem e do FRG tende a ser mais significativa no desenvolvimento da resistência à compressão (Apêndice A) do que na resistência à tração na flexão das argamassas, em todas as idades analisadas.

De maneira similar ao ocorrido nos ensaios de resistência à tração na flexão, as partículas de FRG incorporadas nas argamassas atuam como micro-fílers que possuem a capacidade de preencher os poros e densificar a zona de transição das misturas, resultando em um melhor empacotamento de partículas e melhor dispersão dos grãos de cimento. Esta ação conjunta da melhor dispersão do cimento e da densificação da matriz resulta em um considerável ganho de resistência à compressão (SADEK, EL-ATTAR e ALI, 2016).

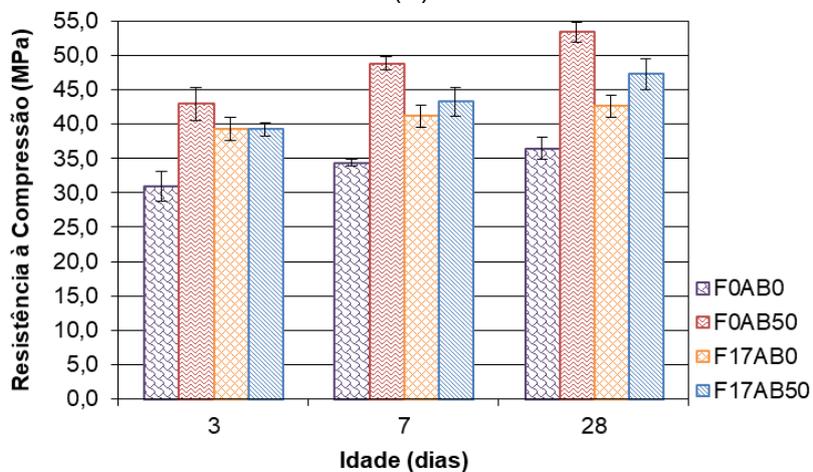
Figura 50. Resistência à compressão para as argamassas com relações a/c de (A) 0,63, (B) 0,46 e (C) 0,42.



(A)



(B)



(C)

Fonte: (A Autora).

Além disso, estudos mostram que a incorporação de finos inertes em matrizes cimentícias afeta a hidratação das misturas, uma vez que os finos adicionados na matriz atuam como pontos de nucleação para a hidratação, principalmente do C_3S e C_2S , aumentando a formação de portlandita (CH) e C-S-H, com consequente redução do estágio de dormência e aumento da taxa de reação do período de aceleração. A presença dos finos ainda pode vir a ativar reações pouco proeminentes no concreto tradicional, resultando na formação de um terceiro pico de geração de calor por volta de 12 horas após o início da mistura (BOSILJKOV, 2003; UYSAL e YILMAZ, 2011; YE *et al.*, 2007).

Assim sendo, o ganho de resistência deveria ser maior nas menores idades, porém, como se tratam de argamassas para concretos autoadensáveis, o aumento da incorporação de FRG eleva o teor de aditivo superplastificante necessário para garantir a trabalhabilidade da matriz, ao mesmo tempo em que reduz a quantidade de cimento na mistura. Desta forma, ocorre um aumento do tempo de pega inicial e final em comparação às misturas sem aditivos, fazendo com que esse ganho de resistência seja mais efetivo após os 3 dias de idade (GESOĞLU *et al.*, 2012).

Por outro lado, como explicado anteriormente, a incorporação da AB melhora a aderência da pasta de cimento às partículas do agregado miúdo devido, principalmente, à elevada rugosidade característica da areia artificial. Este aumento da aderência entre as partículas, principalmente na zona de transição, melhora a distribuição interna de tensão nas argamassas em estado endurecido, elevando significativamente o desempenho mecânico das mesmas (BEIXING, GUOJU e MINGKAI, 2011; KUMAR e RADHAKRISHNA, 2016; WEIDMANN, 2008; YAMEI e LIHUA, 2017).

Além disso, as partículas de agregado miúdo provenientes da britagem de rochas graníticas podem apresentar uma resistência superior às das partículas de areia natural o que, em conjunto com a melhoria da aderência da zona de transição, eleva ainda mais o desempenho mecânico das matrizes cimentícias (DONZA, CABRERA e IRASSAR, 2002).

Outro fator relevante quando da incorporação de areia de britagem nas misturas é o fato da mesma possuir um elevado teor de material pulverulento, por volta de 5,3%, que, de forma similar ao que acontece quando da incorporação dos

finos de rocha, auxilia na densificação da matriz e consequente ganho de resistência (SHEN *et al.*, 2018; SILVA, BUEST e CAMPITELI, 2005). Vale ressaltar que nas misturas com incorporação simultânea de FRG e AB, a quantidade de material pulverulento proveniente da areia artificial foi considerada como parte dos finos a serem incorporados de maneira a manter constante a quantidade final de FRG das misturas.

Em contrapartida, percebe-se que a incorporação simultânea da AB e do FRG não resultou em um ganho de resistência tão significativo quanto a incorporação dos materiais isolados para as relações a/c de 0,63 e 0,46. Isto pode ser explicado pela ação conjunta da redução expressiva da quantidade de água presente na mistura e aumento da quantidade de FRG, que resultaram em uma quantidade insuficiente de pasta para cobrir todas as partículas dos agregados miúdos, levando a uma perda no desempenho mecânico das argamassas.

Este resultado está de acordo com os estudos realizados por Balaji, Bhaskar e Mohan (2012), Benabed *et al.* (2012 e 2016), Ji *et al.* (2013) e Celik e Marar (1996) que observaram que a presença de teores superiores a 10 ou 15% de finos em misturas com incorporação de areia de britagem resulta em uma queda na resistência à compressão.

Já nas argamassas com relação a/c de 0,42, como há uma redução menos expressiva na quantidade de pasta na mistura e menor quantidade de FRG adicionado, percebe-se que a perda de resistência da argamassa com incorporação simultânea dos dois materiais (F17AB50), em comparação com a argamassa com incorporação apenas da AB (F0AB50), é inferior à observada nas argamassas com as demais relações água/cimento. Além disso, o ganho de resistência com a incorporação de FRG é inferior ao ganho apresentado nas argamassas com outras relações a/c estudadas, uma vez que a adição de menor quantidade de finos resulta em menor densificação da matriz e, conseqüentemente, em um ganho de resistência menos expressivo.

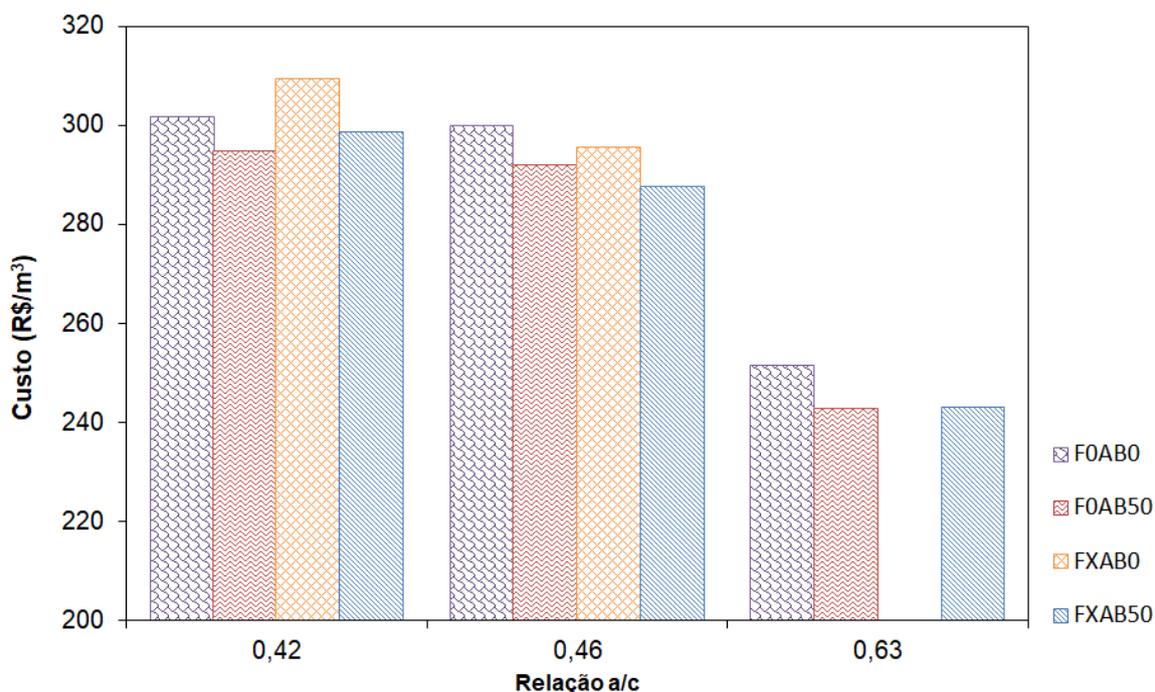
Ao analisar os resultados obtidos nas três relações água/cimento estudadas, é importante salientar que as argamassas com incorporação simultânea de FRG e areia de britagem obtiveram desempenho equivalente ou superior às argamassas de referência, produzidas apenas com cimento, areia natural e água, indicando a

viabilidade técnica da incorporação conjunta destes dois materiais mesmo quando há supressão expressiva do cimento.

4.4.7. Análise do custo das argamassas estudadas

Ao analisar os resultados apresentados na Figura 49, custo por m^3 de argamassa, percebe-se que as argamassas dosadas com incorporação isolada de FRG tendem a apresentar uma sutil variação de custo quando comparadas às argamassas de referência. Esta variação depende diretamente do teor de aditivo superplastificante incorporado, pois, este material possui elevado custo unitário, impactando no custo final das misturas. A argamassa F17AB0, com relação a/c de 0,42, apresentou um leve aumento de custo enquanto a dosagem F20AB0, com relação a/c de 0,46, apresentou uma sutil redução do custo final.

Figura 51. Custo por m^3 das argamassas estudadas com relação a/c iguais a 0,63, 0,46 e 0,42, apresentando incorporação de FRG e AB (isolada e simultânea).



Fonte: (A Autora).

Por outro lado, a incorporação isolada da areia de britagem e a incorporação simultânea de FRG e AB tende a reduzir o custo final das argamassas devido,

novamente, à redução do teor de aditivo superplastificante empregado nas misturas e pelo fato de a areia de britagem ser um insumo com menor valor agregado do que a areia natural. Porém, percebe-se que a diferença de custo entre as areias não é tão expressiva, podendo-se concluir que o fator mais impactante no custo final das argamassas é o teor de aditivo superplastificante.

Vale ressaltar, porém, que nesta análise apenas os custos diretos dos materiais empregados foram levados em consideração, desconsiderando o custo com o transporte, redução da duração das obras e redução da mão de obra necessária. Sabe-se que a incorporação da areia de britagem apresenta uma redução de custo no quesito transporte, uma vez que se encontra mais próxima dos grandes centros consumidores de concreto do que as jazidas de areia natural. Além disso, uma construção mais rápida e que utiliza menos mão de obra resulta, também, em uma economia significativa no custo total.

4.5. DOSAGEM DOS CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS

4.5.1. Dosagem final e consumo de materiais

Como dito anteriormente, o volume de agregado graúdo para todas as dosagens de concreto autoadensável foi mantido constante e igual a 30% do volume total de concreto. Além disso, o teor de aditivo superplastificante empregado foi definido pelo teor mínimo necessário para alcançar um espalhamento entre 660 mm e 750 mm, classificado como SF2 pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017) para que o CAA fosse classificado como adequado para a maioria das aplicações correntes como paredes, vigas e pilares.

Assim sendo, a Tabela 15 apresenta o consumo dos materiais (kg/m^3) para cada uma das misturas estudadas.

Tabela 15 - Consumo dos materiais, por m³, para cada traço de concreto estudado.

a/c	Mistura	Cimento (kg/m ³)	FRG (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	Areia Nat. (kg/m ³)	Areia Brit. (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)	FRG (%)	AB (%)
0,63	F0AB0	368,10	0,00	825,00	927,15	0,00	231,90	1,33	0	0
	F0AB50	368,10	0,00	825,00	463,58	484,75	231,90	1,27	0	50
	F40AB0	-	-	-	-	-	-	-	40	0
	F40AB50	300,95	179,37	836,35	457,42	478,32	189,60	3,76	40	50
0,46	F0AB0	448,25	0,00	825,00	927,15	0,00	206,19	2,24	0	0
	F0AB50	448,25	0,00	825,00	463,58	484,75	206,19	2,02	0	50
	F20AB0	403,43	87,74	834,50	931,80	0,00	185,58	5,36	20	0
	F20AB50	403,43	87,74	834,50	462,49	483,62	185,58	2,74	20	50
0,42	F0AB0	472,45	0,00	825,00	927,15	0,00	198,43	2,55	0	0
	F0AB50	472,45	0,00	825,00	463,58	484,75	198,43	2,03	0	50
	F17AB0	437,46	77,45	827,51	917,24	0,00	183,74	7,87	17	0
	F17AB50	437,46	77,45	827,51	458,62	479,57	183,74	5,10	17	50

Fonte: (A Autora).

4.5.2. Análise da fração de poros e da máxima espessura de pasta

Após análise dos resultados de fração de poros (P_{ofg}) e da máxima espessura de pasta (MPT), apresentados na Tabela 16, percebe-se que o único fator que influencia a porosidade e a espessura de pasta presente ao redor dos agregados é a incorporação, ou não, da areia de britagem, uma vez que o volume de agregado graúdo foi mantido constante e igual a 30% do volume do concreto e o volume de agregado miúdo foi mantido constante em 50% do volume da argamassa para todas as misturas empregadas.

Assim sendo, todos os concretos com incorporação isolada da areia natural apresentaram fração de poros (P_{ofg}) igual a 26,76%, enquanto as dosagens com incorporação simultânea das duas areias (natural e de britagem) apresentaram P_{ofg} igual a 21,42%.

Tabela 16 – Resultado de P_{ofg} e MPT dos concretos analisados

a/c	Nome	P_{ofg} (%)	MPT (μm)
0,63	F0AB0	26,76	22,09
	F0AB50	21,42	47,33
	F40AB0	-	-
	F40AB50	21,42	47,33
0,46	F0AB0	26,76	22,09
	F0AB50	21,42	47,33
	F20AB0	26,76	22,09
	F20AB50	21,42	47,33
0,42	F0AB0	26,76	22,09
	F0AB50	21,42	47,33
	F17AB0	26,76	22,09
	F17AB50	21,42	47,33

Fonte: (A Autora).

De forma similar ao ocorrido para as argamassas, os CAAs dosados com incorporação simultânea das duas areias apresentaram menor porosidade quando comparadas às misturas com incorporação apenas da areia natural, uma vez que apresentam um melhor empacotamento de partículas.

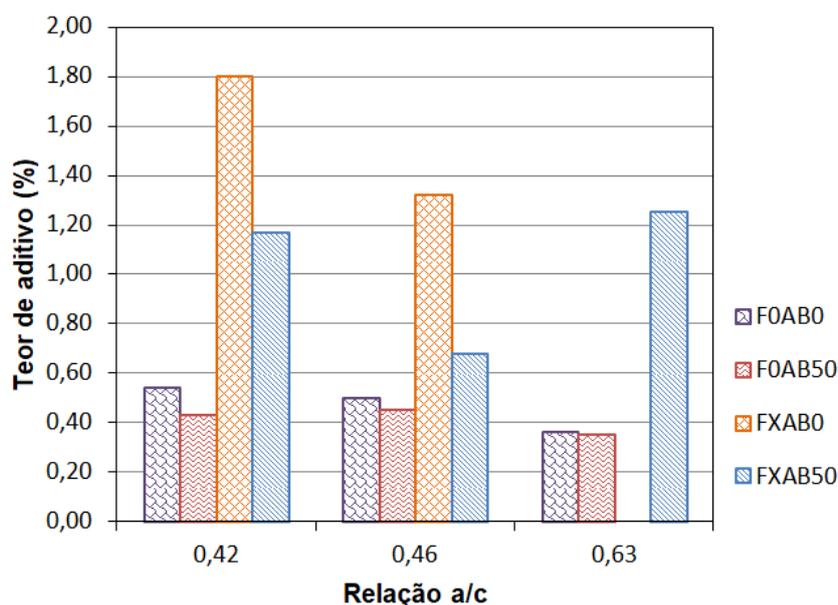
Como consequência da porosidade reduzida, os concretos com incorporação de ambas as areias apresentaram uma maior espessura de pasta ao redor dos agregados, uma vez que existe uma redução na porosidade e, conseqüentemente, maior quantidade de pasta livre, facilitando o escoamento do material, conforme será discutido a seguir.

4.5.3. Teor de aditivo superplastificante

Como se pode perceber ao analisar os resultados apresentados na Figura 52, o teor de aditivo superplastificante dos concretos autoadensáveis seguiu o mesmo comportamento do apresentado para as argamassas. Ou seja, as misturas com FRG e sem AB foram as que apresentaram maior consumo de aditivo. Isto pode ser explicado pela incorporação isolada de areia natural que resulta em um menor MPT,

como apresentado na Tabela 16, resultando em uma menor quantidade de pasta disponível para lubrificação das partículas de agregado, dificultando o escoamento e, conseqüentemente, aumentando o consumo de aditivo para alcançar uma mesma trabalhabilidade.

Figura 52. Teores de aditivo adotados para os CAAs com relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.



Fonte: (A Autora).

Além disso, a utilização de materiais com elevada área superficial (FRG e areia natural) demanda uma maior quantidade de água e/ou aditivo superplastificante para se atingir o espalhamento considerado como ideal (GESOĞLU *et al.*, 2012; MORAES, 2010; HALIM e TAHA, 2007).

Analisando-se a influência da incorporação isolada da AB (F0AB50) no consumo de aditivo superplastificante, percebe-se que há sempre uma redução no teor de aditivo, para todas as relações a/c estudadas, quando comparadas aos concretos de referência (F0AB0), de maneira similar ao verificado para as argamassas.

A redução no consumo de aditivo pode ser explicada pelo aumento do MPT destes concretos (Tabela 16), que resulta em uma redução do atrito entre as partículas de agregados, facilitando o escoamento e, conseqüentemente, reduzindo o consumo de aditivo (HALIM e TAHA, 2007; KUMAR e RADHAKRISHNA, 2016).

Ao mesmo tempo, a substituição parcial da areia natural pela AB reduz a demanda de água e/ou aditivo superplastificante, uma vez que há uma substituição de um material com elevada área superficial específica por um material com menor área superficial específica (BENABED *et al.*, 2012; LOHANI *et al.*, 2012).

Analisando a dosagem de aditivo superplastificante nas misturas com incorporação simultânea de FRG e AB (FXAB50), encontra-se um consumo intermediário de aditivo entre os encontrados para concretos com incorporação isolada dos materiais. De maneira análoga ao que ocorre nas argamassas, a incorporação do FRG acaba por reduzir o IPS e, conseqüentemente, aumentar o consumo de aditivo. Por outro lado, a incorporação da AB aumenta o MPT, reduzindo o teor de aditivo necessário para alcançar o espalhamento ideal. Assim sendo, a incorporação de ambos os materiais resulta em um consumo de aditivo intermediário.

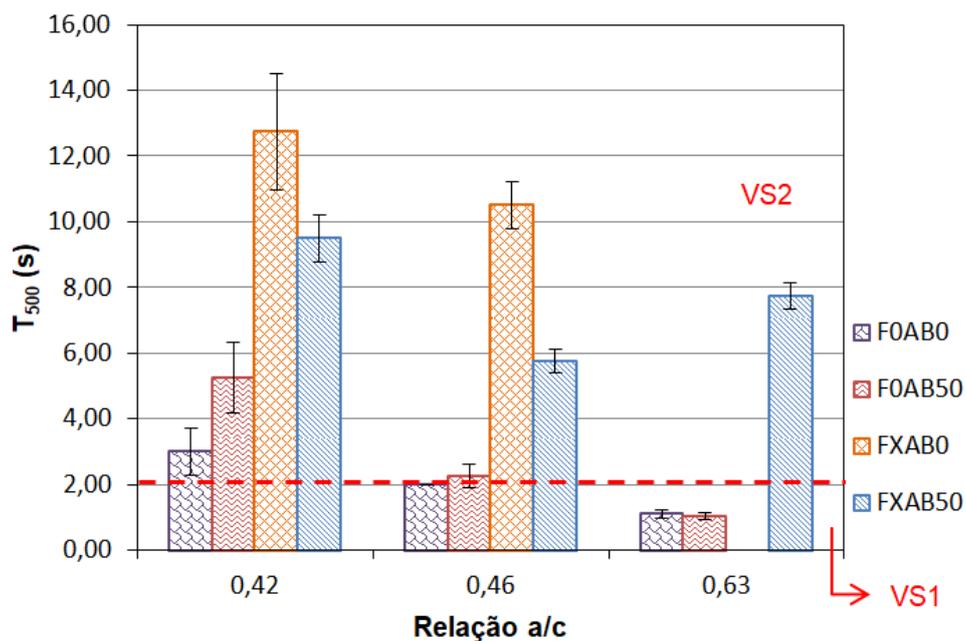
4.5.4. Caracterização dos concretos autoadensáveis no estado fresco

4.5.4.1. Tempo de escoamento

a) T_{500}

A Figura 53 apresenta os tempos de escoamento dos CAAs em fluxo livre (T_{500}), simulando o que ocorre nas concretagens de lajes e pisos. Ao observar os resultados encontrados, percebe-se uma tendência, não significativa (Apêndice B), da incorporação isolada da AB em aumentar o tempo de escoamento das misturas. Este efeito, porém é mais significativo para as misturas de menor relação a/c. Esta tendência ocorre devido à superfície irregular e rugosa das partículas de areia de britagem, quando comparadas ao formato apresentado pela areia natural, que acaba por aumentar o atrito entre os agregados, dificultando o espalhamento das misturas (GÜNEYISI *et al.*, 2016).

Figura 53. Tempo de escoamento (T_{500}) para os CAAs com relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.



Fonte: (A Autora).

Por outro lado, a incorporação isolada do FRG tende a aumentar o tempo de espalhamento de maneira muito mais expressiva do que a incorporação da AB, sendo este aumento considerado significativo pela análise estatística ANOVA (Apêndice B). Isto se deve à redução da quantidade de água presente na mistura, uma vez que a relação água/cimento foi mantida constante, e à consequente redução expressiva do IPS (Tabela 11). Ou seja, com a incorporação do FRG, a quantidade de pasta disponível para lubrificar as partículas de agregados é reduzida, aumentando o atrito e, consequentemente, aumentando o T_{500} .

De maneira similar ao que ocorre para as argamassas autoadensáveis, a incorporação simultânea do FRG e da AB produz um acréscimo intermediário do tempo de escoamento encontrado para as incorporações isoladas. Este resultado pode ser justificado, novamente, pelo aumento do MPT e redução do IPS resultando, assim, em um aumento intermediário do T_{500} . Ressalta-se, porém, que este acréscimo é mais próximo do apresentado pelas misturas com incorporação

isolada de FRG, sendo considerado significativo segundo a análise estatística ANOVA (Apêndice B).

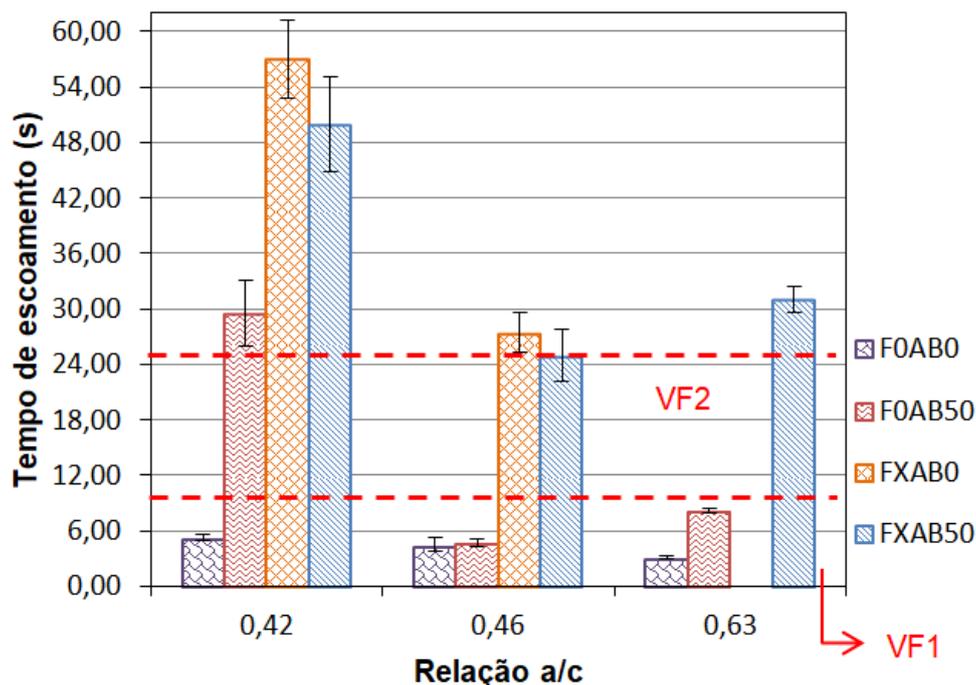
Ao analisar os resultados, percebe-se ainda que, com exceção dos concretos F0AB0 e F0AB50, com relação a/c de 0,63, todos apresentaram um tempo de escoamento maior ou igual a 2 segundos, sendo classificados como VS2 o que, segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2017) é indicado para a maioria das aplicações correntes. Ressalta-se, porém, que concretos com tempo de escoamento muito elevado, como os apresentados pelas misturas com incorporação isolada de FRG, podem acabar tendo um escoamento dificultado, o que pode ocasionar a formação de um bloqueio entre as armaduras ou entre as armaduras e as superfícies das fôrmas, gerando falhas de concretagem. Por outro lado, concretos autoadensáveis com T_{500} inferior a dois segundos, classe VS1, estão mais propensos à apresentarem elevadas segregação e exsudação, devido à sua viscosidade reduzida.

Pode-se observar, ainda, que, com a redução da relação a/c, há um aumento no tempo de escoamento para todas as dosagens estudadas, ressaltando que a quantidade de água presente na mistura é um parâmetro que afeta diretamente o tempo de escoamento das misturas.

b) Funil V

Conforme se pode observar na Figura 54, o tempo de escoamento dos concretos autoadensáveis, medido por meio do funil V, teve o mesmo comportamento do apresentado pelos CAAs no ensaio de T_{500} . Ou seja, ao contrário do que acontece para as argamassas autoadensáveis, a incorporação isolada da areia de britagem tende a aumentar o tempo de escoamento dos concretos pelo interior do funil.

Figura 54. Tempo de escoamento, pelo método do Funil V, para os CAAs com relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.



Fonte: (A Autora).

O aumento do tempo de escoamento dos CAAs como consequência da incorporação isolada da AB deve-se, principalmente, ao elevado atrito existente entre a areia de britagem e a brita, devido à sua superfície irregular, o que dificulta a passagem do concreto por espaços confinados (GÜNEYISI *et al.*, 2016). Assim sendo, a influência da incorporação da AB é mais significativa (Apêndice B) no tempo de escoamento quando o mesmo se dá em espaços confinados do que em fluxo livre.

Segundo um estudo realizado por Khaleel, Al-Mishhadani e Razak (2011), com o aumento da dimensão máxima característica do agregado gráudo utilizado no CAA, observou-se um aumento no tempo de escoamento das misturas pelo ensaio do funil V devido à dificuldade do concreto autoadensável de passar por espaços confinados. Este resultado pode ser estendido à substituição parcial da areia natural pela AB, uma vez que esta é mais grossa do que a areia natural e possui uma superfície mais rugosa, dificultando o escoamento da mistura.

Por outro lado, a incorporação isolada de FRG aumenta de maneira mais significativa o tempo de escoamento dos CAAs devido à redução da quantidade de água livre na mistura e consequente redução do IPS, que acaba por dificultar o escoamento das misturas (Apêndice B). Este aumento significativo do tempo de escoamento é um forte indicativo da eficiência deste material como modificador de viscosidade, mesmo que estas dosagens apresentem um teor mais elevado de aditivo superplastificante (BOUKENDAKDJI *et al.*, 2009; GHOMARI, HACENE e TALEB, 2011).

Percebe-se, também, que, com a redução da relação a/c, ocorre um aumento do tempo de escoamento para todos os CAAs estudados indicando que, apesar de todos atingirem o mesmo espalhamento ideal (entre 660 mm e 750 mm) devido às diferentes dosagens de aditivo superplastificante, a redução da relação a/c dificulta a passagem do concreto por espaços confinados. Assim sendo, a influência da relação água/cimento no tempo de escoamento dos concretos parece ser mais significativa do que o teor do aditivo superplastificante (FELEKOĞLU, TÜRKEL e BARADAN, 2007).

De maneira similar ao comportamento apresentado pelas argamassas autoadensáveis e pelo tempo de escoamento T_{500} dos CAAs, a incorporação simultânea do FRG e areia de britagem resultaram em um tempo de escoamento intermediário pelo funil V devido à ação conjunta da redução do IPS, e aumento do MPT, sendo este aumento considerado significativo, de acordo com a análise estatística ANOVA (Apêndice B).

Ao analisar os limites estabelecidos pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017) todas as dosagens de referência (F0AB0) e todas as dosagens com incorporação isolada da areia de britagem (F0AB50), com exceção da dosada com relação a/c de 0,42, encontram-se dentro da faixa VF1, com um tempo de escoamento inferior a 8 segundos e, consequentemente, apresentando uma baixa viscosidade. Assim sendo, estas formulações são indicadas para elementos estruturais que apresentem elevada taxa de armadura, minimizando a possibilidade da ocorrência de bloqueios, porém, ressaltando-se a necessidade do controle da exsudação e segregação.

A única dosagem de CAA que se adequou à classe VF2 foi a F20AB50, com relação a/c de 0,46, estando no limite superior da classe, com tempo de

escoamento igual a 25 segundos e sendo indicada para a maioria das aplicações correntes por apresentar uma viscosidade moderada. As demais dosagens de CAA ficaram acima do limite máximo sugerido pela norma, indicando uma viscosidade excessivamente elevada e aumentando o risco de bloqueios entre as armaduras e entre as superfícies das fôrmas e as armaduras. Para reduzir o problema da viscosidade elevada, os finos poderiam ser incorporados em um teor intermediário ao invés do teor máximo, reduzindo o consumo de aditivo superplastificante e reduzindo a viscosidade final das misturas para os limites recomendados da norma.

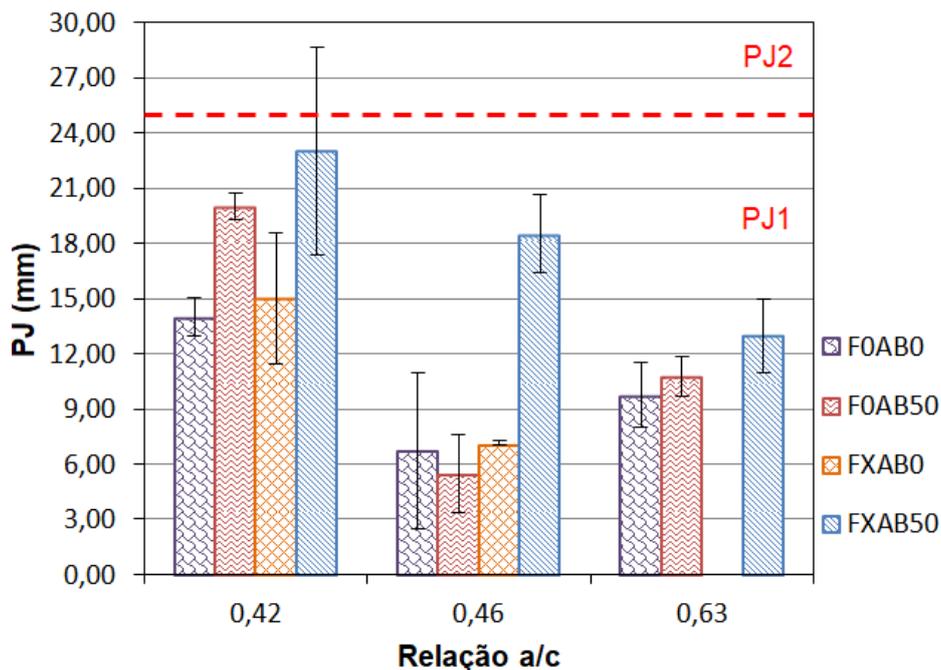
4.5.4.2. Avaliação da Habilidade Passante

a) Anel J

A Figura 55 apresenta os resultados de avaliação da habilidade passante dos concretos autoadensáveis por meio do método do Anel J, que visa simular o que ocorre quando o material está submetido a um fluxo livre, como o que ocorre em vigas e pilares.

Ao analisar os resultados obtidos, percebe-se que a incorporação isolada da AB só alterou significativamente a habilidade passante pelo anel J do concreto com a menor relação a/c estudada (Apêndice B). Isto mostra que, apesar da incorporação da AB aumentar o atrito existente entre os agregados miúdos e graúdos das misturas (GÜNEYISI *et al.*, 2016), este aumento só foi significativo para a formulação que apresentou menor relação a/c. Ou seja, com a redução da quantidade de água livre da mistura, a pasta fica menos fluida, perdendo a mobilidade, e não conseguindo carrear todos os agregados graúdos do interior do anel J como as dosagens com relação a/c mais elevada.

Figura 55. Habilidade passante, avaliada por meio do método do Anel J, para os CAAs com relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.



Fonte: (A Autora).

Por outro lado, nota-se que a incorporação do FRG, isoladamente, não teve influência significativa na habilidade passante dos concretos estudados (Apêndice B). Ou seja, mesmo com a redução do IPS resultante da incorporação dos finos e da redução da quantidade de água livre, o aumento do teor do aditivo superplastificante empregado, quando comparado com as dosagens de referência, foi eficiente em manter a fluidez enquanto o FRG mantinha a viscosidade das misturas, minimizando os riscos de bloqueio entre as armaduras.

As dosagens com incorporação simultânea do FRG e AB foram as que apresentaram maior PJ, em comparação às dosagens de referência, indicando que a ação conjunta da redução do IPS, pela incorporação do FRG, com o aumento do atrito resultante da incorporação da areia de britagem, leva a uma redução significativa da habilidade passante dos concretos autoadensáveis (Apêndice B). Ou seja, com a redução do IPS, a pasta fica menos fluida e não consegue vencer o atrito existente entre os agregados de maneira tão efetiva quanto às demais dosagens, apresentando uma maior dificuldade em movimentar todos os agregados graúdos do interior do anel J (NANTHAGOPALAN e SANTHANAM, 2011).

Apesar da redução da habilidade passante apresentada por dosagens com incorporação simultânea de FRG e areia de britagem, todos os CAAs estudados se encontraram dentro dos limites da classe PJ1 segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2017), indicando que todas as formulações apresentaram desempenho satisfatório podendo ser utilizadas para a maioria das aplicações correntes.

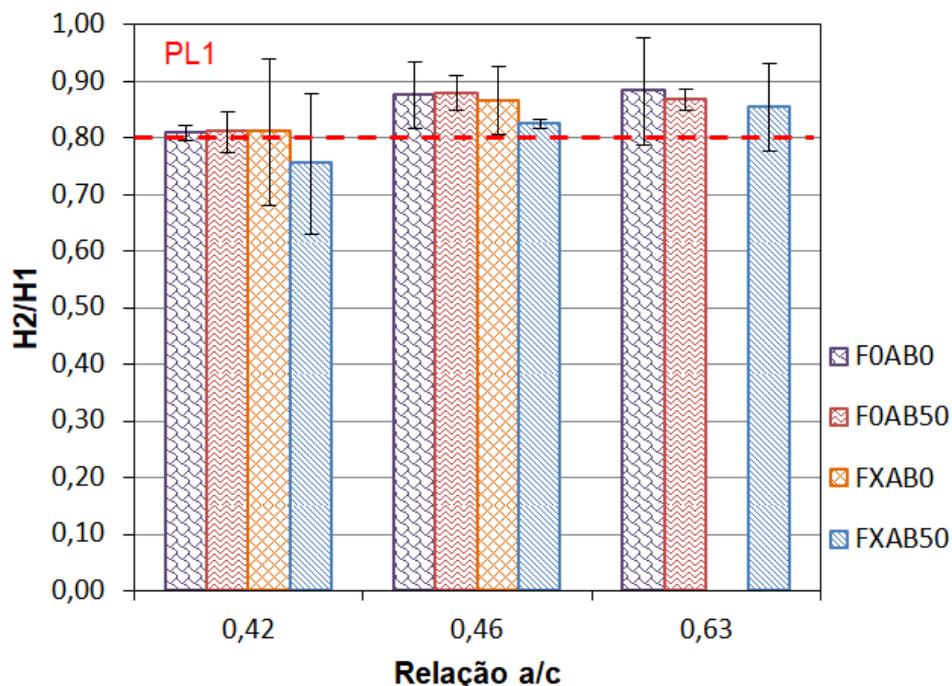
b) Caixa L

Os resultados obtidos para o ensaio de Caixa L estão apresentados na Figura 56. Segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2017), indica-se que existe risco de bloqueio quando a relação $H2/H1$ é inferior a 0,8. Assim sendo, a única dosagem que apresentou uma redução significativa da habilidade passante (Apêndice B), não atingindo este parâmetro foi a que incorporou, simultaneamente, FRG e AB e com relação a/c de 0,42 (F17AB50).

Sendo assim, estes resultados estão de acordo com os apresentados pelo ensaio de Anel J. A redução do IPS, causada pela incorporação do FRG, e o aumento do tamanho dos grãos de agregado miúdo, leva ao aumento do atrito entre estes e as partículas de agregado graúdo, devido à substituição parcial da areia natural pela areia de britagem resultaram em uma redução da habilidade passante da mistura (KHALEEL, AL-MISHHADANI e RAZAK, 2011). Neste caso, a dosagem apresentou uma habilidade passante inferior à sugerida pela norma, indicando a possibilidade da ocorrência de bloqueio entre as armaduras.

Já a incorporação isolada de FRG nas misturas de CAA não afetou de maneira significativa a habilidade passante das misturas. Este resultado está de acordo com pesquisas desenvolvidas que concluíram que o aumento da viscosidade causada pela incorporação dos finos, até certo teor, auxilia na passagem dos agregados graúdos entre os espaços das armaduras mesmo que as dosagens apresentem certa perda de fluidez (HO *et al.*, 2002; TENNICH, KALLEL E OUEZDOU, 2015; TOPÇU, BILIR E UYGUNOGLU, 2009; UYSAL E YILMAZ, 2011).

Figura 56. Habilidade passante, avaliada por meio do método da Caixa L, para os CAAs com relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.



Fonte: (A Autora).

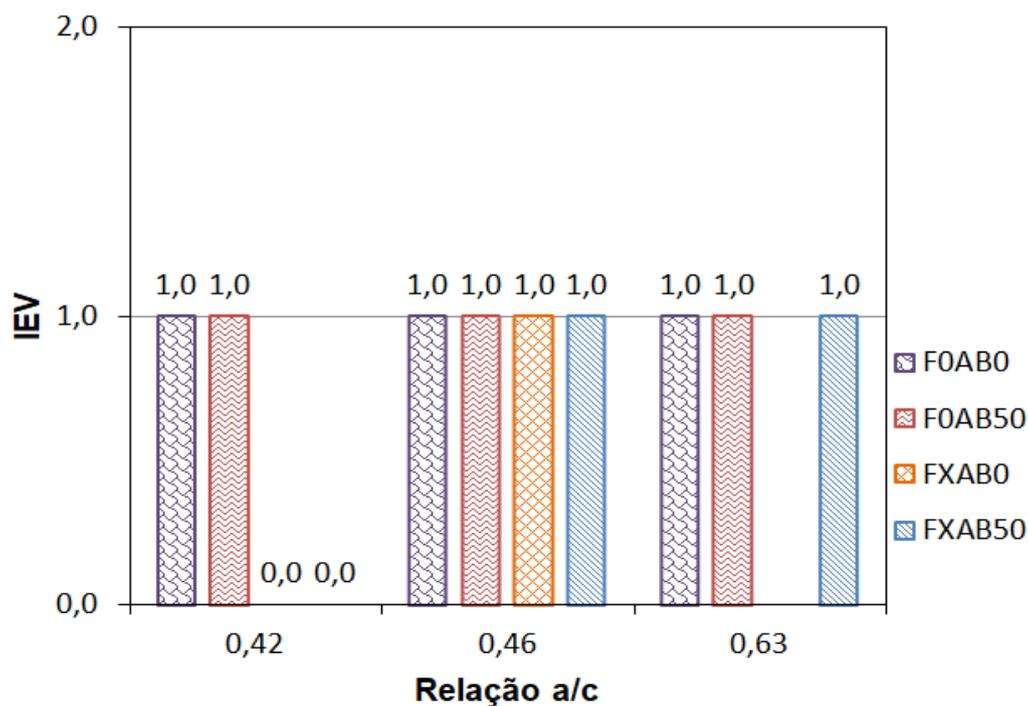
Por outro lado, a incorporação isolada da areia de britagem, apesar de aumentar o atrito entre os agregados, não resultou em uma redução significativa da habilidade passante das misturas. Isso porque, as misturas com IPS mais elevado apresentaram desempenho satisfatório em carrear os grãos de agregado graúdo entre as armaduras, sem a ocorrência de bloqueios.

4.5.4.3. Avaliação da Segregação

a) Índice de Estabilidade Visual (IEV)

A Figura 57 apresenta os resultados encontrados para o índice de estabilidade visual dos concretos autoadensáveis. Como o nome diz, esta é uma análise puramente qualitativa, sendo baseada em registros fotográficos para a análise da segregação das misturas depois de finalizado o espalhamento.

Figura 57. Análise da segregação, pelo IEV, dos CAAs com relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

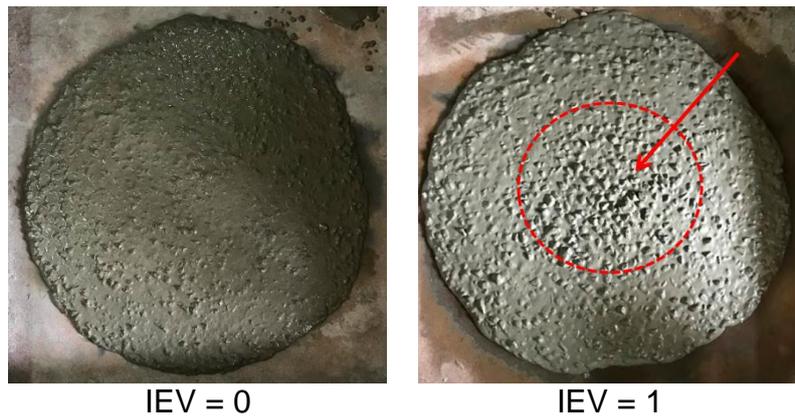


Fonte: (A Autora).

Como é possível se observar através dos dados, todas as dosagens apresentaram um desempenho extremamente satisfatório no quesito de segregação durante o escoamento, variando entre IEV 0, sem evidência de exsudação e/ou segregação, e IEV 1, sem evidência de segregação e com pouca exsudação (ABNT, 2017).

Na Figura 58 está exemplificado o comportamento de uma mistura de CAA com IEV 0 e IEV 1. Percebe-se que na dosagem com IEV 1 inicia-se o processo de acúmulo de agregados graúdos no centro do espalhamento sem, no entanto, ser considerado um empilhamento dos mesmos. Com isso pode-se concluir que nenhuma dosagem estudada apresentou elevada tendência à segregação durante o ensaio de espalhamento.

Figura 58. Exemplos de misturas de CAA com índices de estabilidade visual (IEV) iguais a 0 e 1, respectivamente.

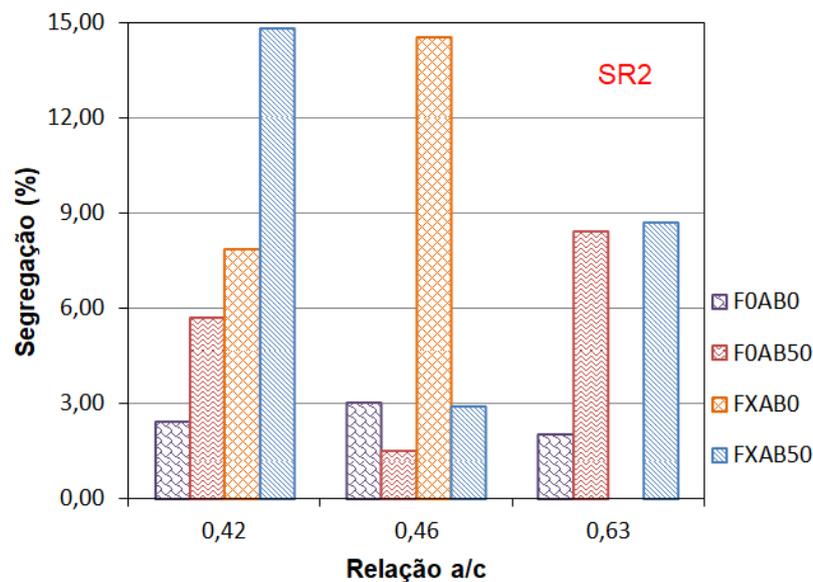


Fonte: (A Autora).

b) Coluna de Segregação

A Figura 57 apresenta os resultados encontrados para a análise de segregação estática por meio do ensaio de coluna de segregação.

Figura 59. Análise da segregação, avaliada pelo ensaio de coluna de segregação, dos CAAs com relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.



Fonte: (A Autora).

Ao analisar os resultados encontrados, percebe-se uma tendência ao aumento da segregação estática das dosagens com incorporação isolada da AB (F0AB50)

quando comparadas às dosagens de referência (F0AB0), com exceção da dosagem de CAA com relação a/c igual a 0,46. Isto se deve ao fato da incorporação de partículas mais grossas e, conseqüentemente, mais pesadas da AB que tendem, por ação do peso próprio, a se acumular na base da coluna. Estes resultados estão de acordo com um estudo realizado por Bhattacharya, Ray e Davalos (2008) que concluiu que o aumento da dimensão máxima característica dos agregados graúdos aumentava a segregação estática das misturas pela ação do peso próprio.

A dosagem de referência com relação a/c 0,46 apresentou uma segregação estática ligeiramente superior à dosagem com incorporação isolada de areia de britagem. Este resultado fora da tendência encontrada pode ser explicado pelo consumo de aditivo superplastificante levemente mais elevado apresentado pela dosagem de referência que resultou em uma pequena exsudação na parte superior da coluna após os 20 minutos de repouso, justificando o aumento da segregação (LIBRE; KHOSHNAZAR e SHEKARCHI, 2010).

Ao analisar os resultados apresentados pela incorporação isolada do FRG e pela incorporação conjunta do FRG e da AB, percebe-se que estas dosagens apresentaram segregação estática superior ou, no caso da relação a/c 0,46, equivalente às dosagens de referência. Este resultado pode ser novamente justificado pelo aumento do teor de aditivo superplastificante destas misturas que acaba por ocasionar uma forte exsudação e conseqüente segregação (LIBRE; KHOSHNAZAR e SHEKARCHI, 2010).

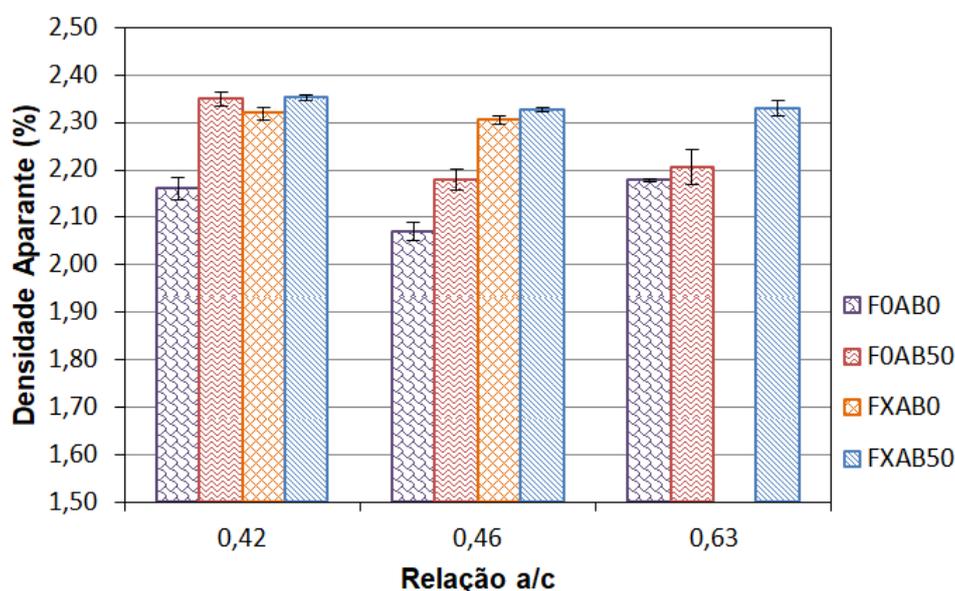
Ressalta-se, porém, que todas as dosagens de concreto autoadensável estudadas apresentaram uma segregação estática inferior a 15%, sendo classificados como SR2 segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2017). Isto quer dizer que todos os concretos autoadensáveis apresentaram comportamento extremamente satisfatório no quesito de segregação estática sendo indicados, inclusive, para utilização em elementos de fundações profundas e elementos estruturais complexos. Ou seja, mesmo que a incorporação do FRG e da AB possam levar a um aumento da segregação estática das dosagens, os concretos apresentam elevados índices de resistência à segregação ressaltando-se a viabilidade da incorporação destes materiais nos CAAs.

4.5.5. Caracterização dos concretos autoadensáveis em estado endurecido

4.5.5.1. Densidade e porosidade aparentes

A Figura 60 apresenta os resultados de densidade aparente dos diferentes concretos avaliados (resultados da análise estatística encontram-se no apêndice B).

Figura 60. Densidade aparente dos concretos autoadensáveis, em função da relação a/c e dos teores de FRG e areia de britagem.



Fonte: (A Autora).

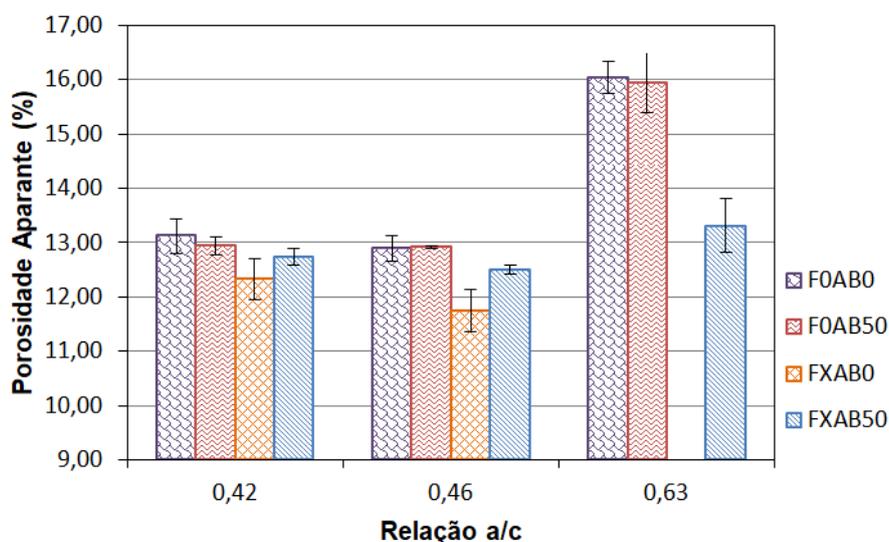
De acordo com os resultados encontrados, similar ao que ocorre para as argamassas autoadensáveis, percebe-se que a influência tanto da incorporação isolada do FRG e da AB, quanto da incorporação simultânea destes materiais tiveram efeito significativo em aumentar a densidade dos CAAs quando comparadas ao CAA de referência (F0AB0), devido à menor quantidade de poros na mistura (Tabela 16), resultando em um melhor empacotamento de partículas. Isto se deve ao fato de as partículas de areia natural, por serem bem menores do que as da areia de britagem acabarem por preencher de maneira mais eficiente os vazios deixados pela mesma. Por outro lado, o elevado teor de material pulverulento presente na areia de britagem também auxilia na densificação da matriz (BEIXING, GUOJU e MINGKAI, 2011; SHEN *et al.*, 2018; SILVA, BUEST e CAMPITELI, 2005)

Já a incorporação isolada de FRG também resulta em uma redução da porosidade das misturas (Tabela 11), resultando em um preenchimento mais eficiente dos vazios deixados pelas partículas do agregado miúdo, melhorando o empacotamento final das dosagens e resultando em uma matriz mais densa (SADEK, EL-ATTAR e ALI, 2016; UYSAL e YILMAZ, 2011).

Já as dosagens com incorporação simultânea de ambos os materiais (FRG e AB) apresentam maior densidade quando comparadas às dosagens de referência devido ao empacotamento mais eficiente de partículas e reduzida quantidade de vazios que esta incorporação simultânea proporciona.

Por outro lado, ao analisar os resultados de porosidade aparente apresentados na Figura 61, percebe-se que os concretos de referência (F0AB0) e com incorporação apenas da areia de britagem (F0AB50) apresentam porosidades aparentes mais elevadas, como apresentado para as argamassas. Assim, pode-se concluir que a incorporação de FRG preenche de maneira mais eficiente os poros das misturas do que a incorporação da areia de britagem, reduzindo a quantidade de poros permeáveis das matrizes.

Figura 61. Porosidade aparente dos concretos autoadensáveis, em função da relação a/c e dos teores de FRG e areia de britagem.



Fonte: (A Autora).

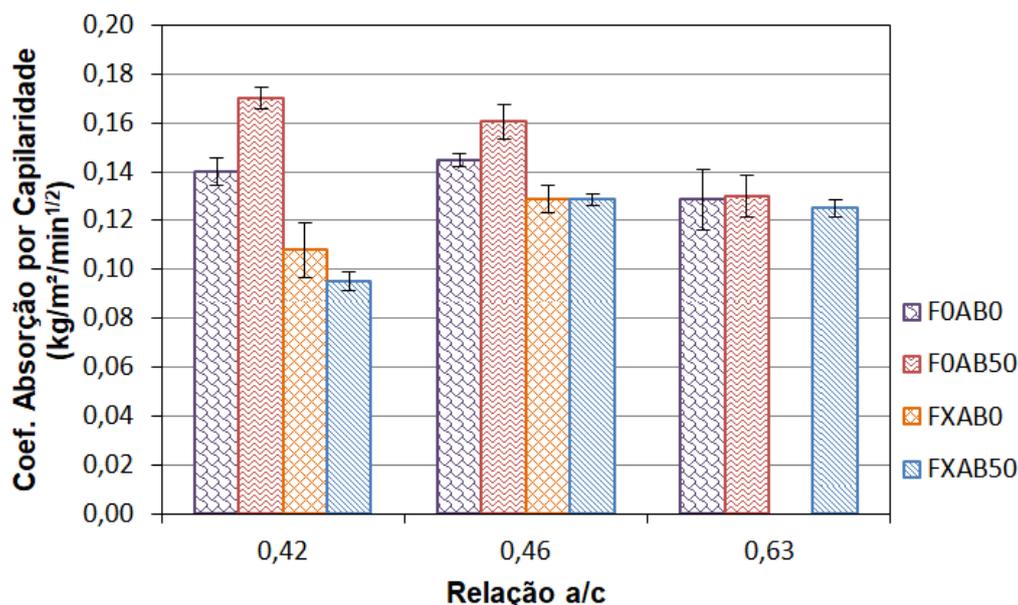
Conclui-se, também, que o teor de material pulverulento presente na areia de britagem não é eficaz no preenchimento dos poros, não reduzindo de maneira

significativa a porosidade aparente dos concretos estudados (Apêndice B). Em contrapartida, a incorporação simultânea de FRG e AB reduz de maneira efetiva a porosidade aparente das misturas devido à melhor distribuição granulométrica que a incorporação dos dois materiais promove. Novamente pode-se concluir que por apresentar uma porosidade aparente reduzida, as dosagens com FRG e areia de britagem tendem a possuir maior durabilidade já que a entrada de agentes agressivos se dá, principalmente, através dos poros permeáveis.

4.5.5.2. Absorção de água por capilaridade

Os resultados de absorção de água por capilaridade dos concretos autoadensáveis estudados estão apresentados na Figura 62 e os resultados da análise estatística ANOVA encontram-se no Apêndice B.

Figura 62. Absorção de água por capilaridade dos concretos autoadensáveis, em função da relação a/c e dos teores de FRG e areia de britagem.



Fonte: (A Autora).

Como era de se esperar, ao analisar os resultados, percebe-se que os concretos que apresentam as maiores absorções de água por capilaridade são os que possuem as maiores porosidades aparentes, ou seja, os concretos de referência (FOAB0) e com incorporação apenas da areia de britagem (F0AB50)

possuem os maiores coeficientes de absorção de água por capilaridade, de maneira similar ao que acontece nas argamassas.

De acordo com estes resultados, percebe-se que a incorporação de FRG é determinante na redução tanto da porosidade aparente quanto da absorção de água por capilaridade, principalmente devido ao seu efeito fíler que resulta na densificação da matriz e na redução da quantidade de poros das misturas (BENABED *et al.*, 2016; SADEK, EL-ATTAR e ALI, 2016; TOPÇU, BILIR e UYGUNOGLU, 2009).

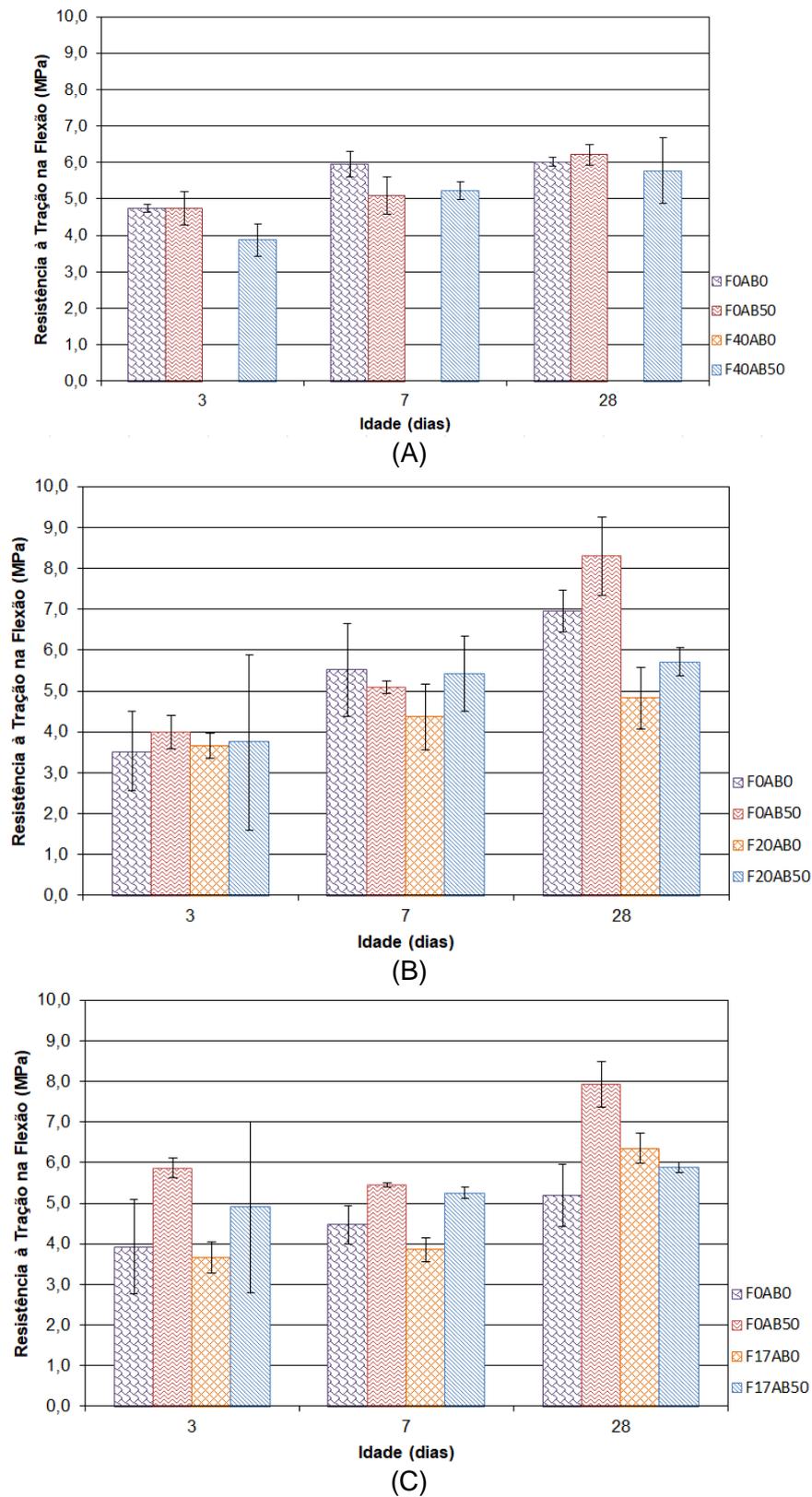
Para os CAAs dosados com relação a/c de 0,63, não houve diferença significativa entre os resultados apresentados, ou seja, para estas dosagens, o fator preponderante na absorção de água por capilaridade foi a relação água/cimento utilizada, indicando que a incorporação dos materiais não foi eficiente em reduzir a absorção de água, porém também não foi prejudicial.

Os resultados encontrados mostram, novamente, os benefícios da incorporação conjunta do FRG e da areia de britagem nos concretos autoadensáveis, reduzindo a porosidade aparente e absorção de água por capilaridade, além de aumentar a densidade do material para a maioria das dosagens estudadas.

4.5.5.3. Resistência à tração na flexão

A Figura 63 apresenta os resultados de resistência à tração na flexão dos CAAs com diferentes relações água/cimento, nas idades de 3, 7 e 28 dias. Ao analisar os resultados encontrados percebe-se uma tendência ao aumento da resistência à tração na flexão quando da incorporação isolada da areia de britagem. No entanto, este aumento é considerado estatisticamente significativo, segundo a ANOVA, apenas para a relação água/cimento de 0,42 (Apêndice B).

Figura 63. Resistência à tração na flexão para os CCAs com relações a/c de (A) 0,63, (B) 0,46 e (C) 0,42.



Fonte: (A Autora).

De maneira similar ao que ocorre para as argamassas autoadensáveis, a incorporação isolada da AB tende a aumentar a resistência da zona de transição devido ao aumento do intertravamento mecânico causado pela superfície irregular das partículas de areia artificial. (BEIXING, GUOJU e MINGKAI, 2011; DONZA, CABRERA e IRASSAR, 2002; KUMAR e RADHAKRISHNA, 2016; YAMEI e LIHUA, 2017)

Para a relação a/c de 0,46, a adição de FRG no teor de 20% resultou em uma queda da resistência à tração na flexão dos concretos devido à subtração de um material ligante por uma adição mineral inerte

Por outro lado, a incorporação de 17%, em volume, de FRG para as dosagens com relação a/c de 0,42 resultou em um aumento significativo da resistência da mistura. Isto se deve a uma melhor distribuição granulométrica resultante da incorporação deste material que resulta em um maior preenchimento dos poros do concreto, tornando a matriz mais densa e resistente. Ou seja, para esta relação a/c , mesmo com a incorporação de uma adição inerte, ocorre um ganho de resistência devido à densificação da matriz, ressaltando que a influência da adição empregada depende não somente de sua composição, mas, também, do teor incorporado (DEHWAH, 2012; SADEK, EL-ATTAR e ALI, 2016).

Ao analisar a influência da incorporação simultânea do FRG e da AB, percebe-se que este comportamento é regido pela influência da incorporação do FRG nas misturas. Ou seja, para formulações em que a adição de FRG resultou em uma perda do desempenho mecânico, como a relação a/c 0,46, a incorporação simultânea dos dois materiais também levou a uma perda de resistência. Por outro lado, quando a incorporação isolada do FRG ocasionou num ganho de resistência, como na relação a/c 0,42, a incorporação em conjunto das duas matérias primas também resultou em uma melhora do desempenho mecânico.

Assim sendo, pode-se concluir que, para as dosagens com incorporação simultânea de FRG e AB, o fator preponderante no ganho ou perda de desempenho mecânico é a quantidade de cimento que foi subtraída devido à adição de FRG e como esta adição influencia na resistência das misturas.

4.5.5.4. Resistência à compressão axial

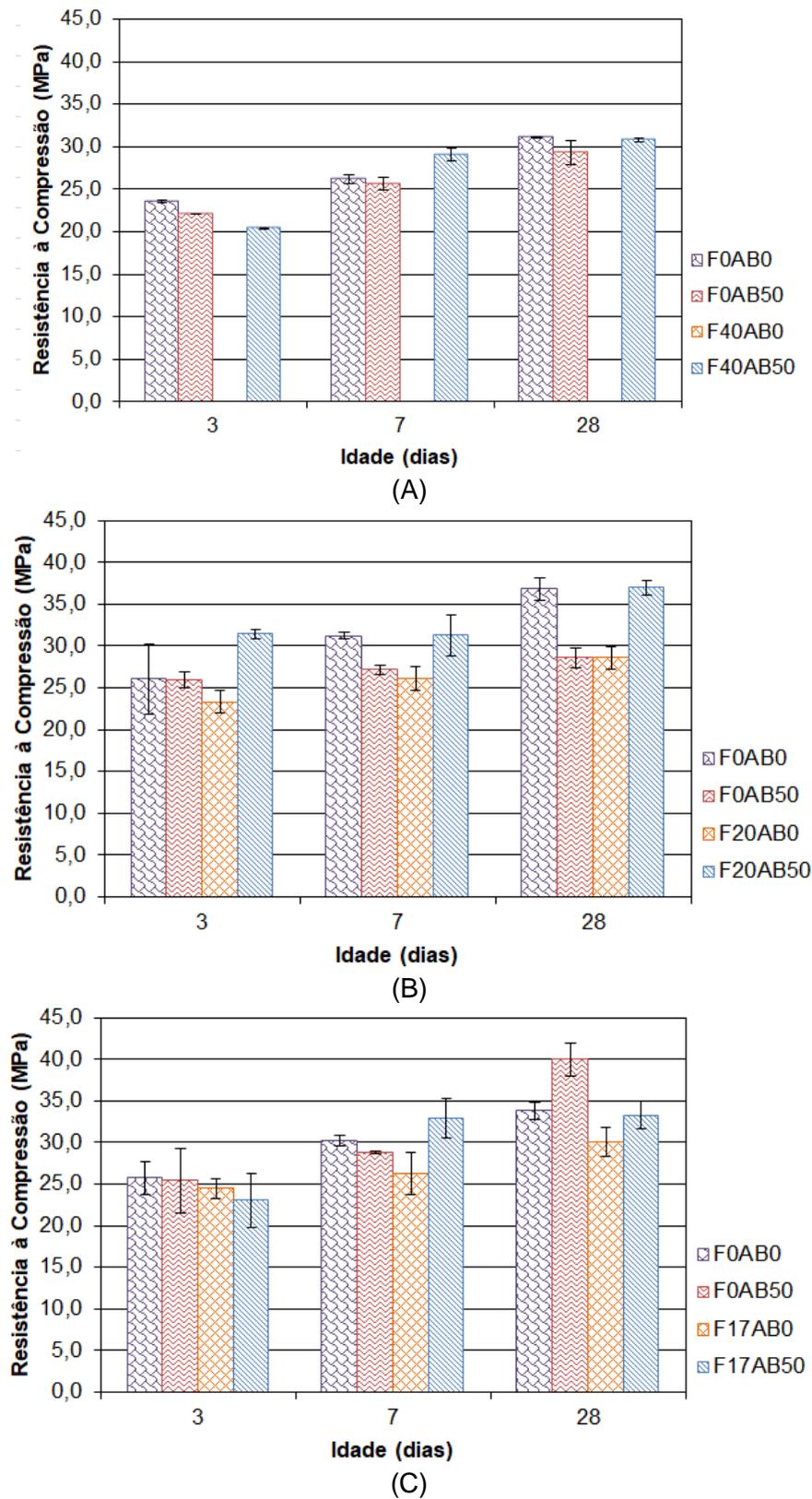
Ao analisar os resultados encontrados para o ensaio de resistência à compressão axial, apresentados na Figura 64, percebe-se que tanto a incorporação isolada do FRG ou da AB levam a uma perda do desempenho mecânico apresentado pelas misturas, com exceção da dosagem F0AB50 de relação a/c 0,42.

Isto pode ser explicado pelo fato de que as partículas de AB, por apresentarem um tamanho médio de partícula muito superior ao apresentado pela areia natural, tendem a formar zonas de transição mais espessas que podem resultar em uma perda do desempenho mecânico das misturas. Além disso, por apresentarem uma superfície muito mais irregular do que a areia natural, a incorporação da AB resulta em um aumento do atrito existente entre o agregado miúdo e o agregado graúdo o que pode resultar na formação de pequenos espaços vazios no interior do corpo de prova.

Por outro lado, a dosagem F0AB50 da relação a/c 0,42 apresentou um ganho expressivo de resistência quando comparada à dosagem de referência. Este aumento pode ser explicado pelo fato de, por possuir um menor teor de água na mistura e, conseqüentemente, uma maior viscosidade do que as dosagens F0AB50 com relação a/c 0,63 e 0,46, a pasta desta mistura conseguiu carrear de maneira mais eficiente os agregados graúdos, vencendo o acréscimo de atrito proveniente da incorporação da AB garantindo, assim, uma melhor distribuição das britas no interior do corpo de prova com uma menor incidência de falhas de concretagem, auxiliando no ganho de resistência.

Este resultado está de acordo com o encontrado para densidade aparente das dosagens (Figura 60), que mostra que o aumento da densidade pela incorporação isolada de AB foi muito mais significativo para a dosagem com relação a/c de 0,42 do que para as demais dosagens. Esta densificação otimizada resultou em um ganho de desempenho mecânico.

Figura 64. Resistência à compressão axial dos CCAs com relações a/c de (A) 0,63, (B) 0,46 e (C) 0,42.



Fonte: (A Autora).

Percebe-se, também, que a supressão da quantidade de cimento para incorporação do FRG levou a uma queda de desempenho das misturas. Este resultado está de acordo com diversos estudos feitos sobre a influência da incorporação de adições inertes em concretos e argamassas. Esta queda no desempenho mecânico é justificada pela redução do consumo do cimento, material que é responsável pelo desenvolvimento da resistência das matrizes, por uma adição inerte que tem como principal efeito o de preenchimento dos poros. Porém, mesmo com a influência positiva da incorporação dos finos na densificação da matriz, a redução na quantidade de cimento empregado nas misturas resulta em uma perda do desempenho mecânico (ANWAR *et al.*, 2014; FELEKOGLU *et al.*, 2006; GUNEYISI, GESOGLU e OZBAY, 2009; HO *et al.*, 2002; TOPÇU, BILIR e UYGUNOGLU, 2009; UYSAL e YILMAZ, 2011).

Porém, ao analisar as resistências apresentadas pelas dosagens com incorporação simultânea de FRG e AB, percebe-se que o desempenho apresentado foi equivalente às dosagens de referência para todas as relações a/c estudadas. Ou seja, a incorporação dos dois materiais resultou em uma otimização da distribuição granulométrica das misturas a tal ponto que a supressão de 40%, 20% e 17% de volume de cimento das relações a/c 0,63, 0,46 e 0,42, respectivamente, não afetaram de maneira significativa o desempenho das misturas.

Ou seja, a incorporação conjunta de FRG e AB resulta em dosagens com redução expressiva da quantidade de cimento, em comparação às dosagens de referência, além de apresentar uma maior viscosidade sem a necessidade da incorporação de aditivos modificadores de viscosidade mostrando que, ao utilizar as duas materiais primas consegue-se tanto manter o desempenho mecânico quanto melhorar as propriedades reológicas dos concretos autoadensáveis.

Assim sendo, ressalta-se mais uma vez a viabilidade técnica da incorporação simultânea dos finos de rocha granítica e da areia de britagem para confecção de concretos autoadensáveis com desempenho satisfatório e resistências usualmente empregadas nas construções brasileiras.

4.5.5.5. Retração por secagem

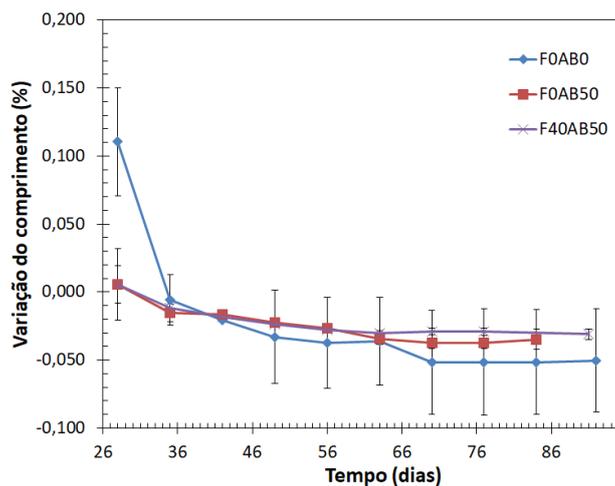
Os resultados encontrados para o ensaio de retração por secagem dos CAAs estudados estão apresentados na Figura 65. Ao analisar os resultados, percebe-se que, com a incorporação de FRG, há uma diminuição da retração apresentada pelos corpos de prova. Esta diminuição se deve, principalmente, à redução da quantidade de água livre presente na mistura. Ou seja, com menor quantidade de água livre na mistura, há menor perda de umidade por secagem e, conseqüentemente, menor variação de volume dos corpos de prova.

Os resultados apresentados na Figura 65 estão de acordo com os encontrados por Li *et al.*, (2018) que estudaram a influência da incorporação de finos de rocha da estabilidade dimensional de argamassas e verificaram uma maior redução na retração apresentada pelas argamassas como consequência do aumento do teor de incorporação dos finos.

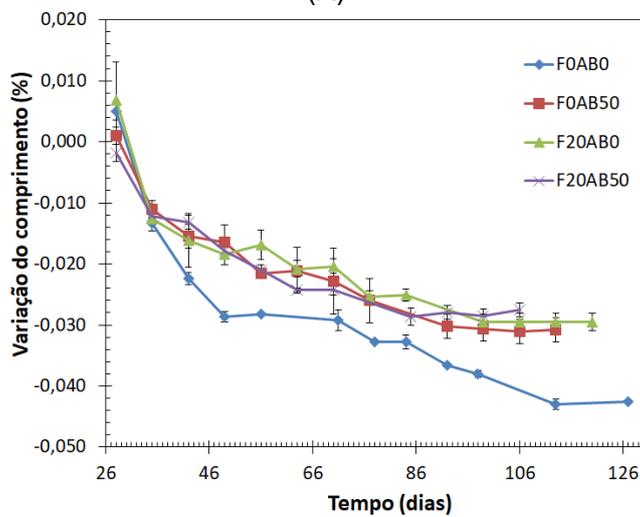
A incorporação da AB em substituição parcial à areia natural também resultou em uma redução da retração apresentada pelos CAAs. Isto pode ser explicado pelo fato de a AB, por ser mais grossa do que a areia natural, possuir a capacidade de restringir a variação de volume dos corpos de prova de maneira mais efetiva. Ou seja, a incorporação de partículas maiores de agregados à mistura pode resultar em maior restrição à variação do volume e, conseqüentemente, menor retração do concreto. O mesmo ocorre quando existe uma variação no tamanho do agregado gráúdo utilizado, pois, quanto menor o agregado, maior a retração (ZHU *et al.*, 2016).

Outro fator que pode afetar a retração dos corpos de prova quando da incorporação da AB é a diferença entre a dureza das diferentes areias empregadas na mistura. Um estudo realizado por Gupta e Vyas (2018) concluiu que o aumento da retração apresentada pelas argamassas estudadas foi devido à substituição da areia natural, que possuía dureza 7, por finos de rocha com dureza 6. Ou seja, materiais mais duros tendem a restringir de maneira mais eficiente a retração dos corpos de prova.

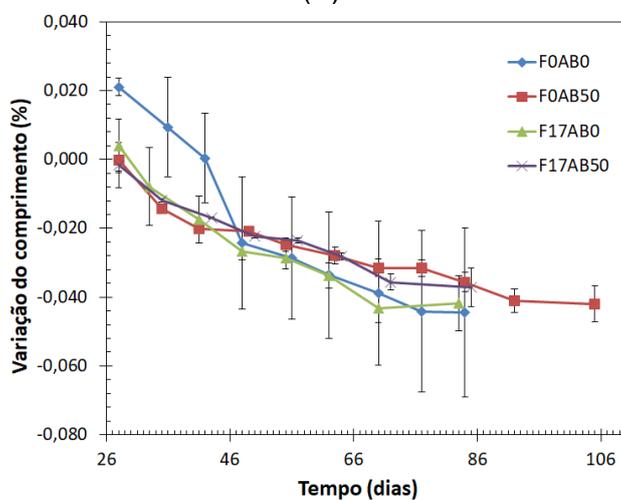
Figura 65. Retração por secagem dos CAAs com relações a/c iguais a (A) 0,63, (B) 0,46 e (C) 0,42.



(A)



(B)



(C)

Fonte: (A Autora).

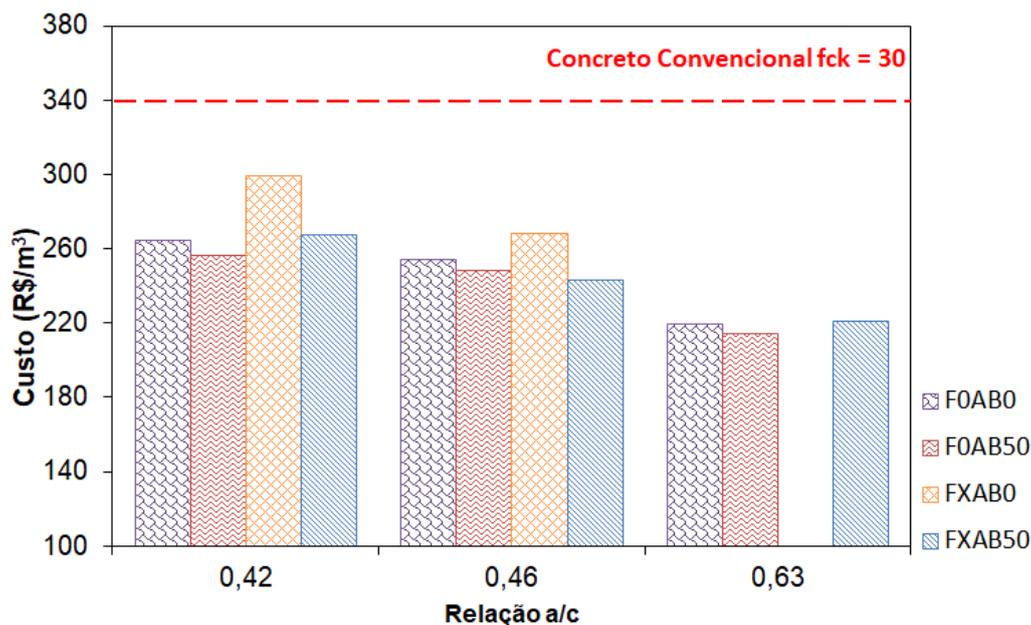
Percebe-se, também, que as dosagens com incorporação simultânea de FRG e AB apresentaram as menores retrações por secagem para todas as relações a/c estudadas. Este resultado é proveniente da ação conjunta da redução da quantidade de água livre na mistura, proveniente da adição de FRG, com a maior restrição à variação de volume imposta pela incorporação da areia de britagem. Assim sendo, ressalta-se mais uma vez a viabilidade técnica da incorporação conjunta destes resíduos de maneira a trazer benefícios às dosagens de concreto autoadensável e reduzir os riscos de fissuração proveniente da variação volumétrica por perda de umidade para o ambiente.

Por fim, nota-se que, as misturas com maior relação água/cimento apresentaram as maiores retrações quando comparadas às demais relações estudadas. Estes resultados estão de acordo com a literatura, que aponta a relação a/c como um dos principais fatores que afetam a retração por secagem das matrizes cimentícias (BISSONNETTE, PIERRE e PIGEON, 1999; *LI et al.*, 2018; NUNES e FIGUEREDO, 2007; OLIVEIRA, RIBEIRO e BRANCO, 2017).

4.5.6. Análise do custo dos concretos estudados

Com base nos valores apresentados na Tabela 5, foram calculados os custos dos CAAs estudados (Figura 64). Ao analisar os resultados, percebe-se que os concretos dosados com incorporação isolada de areia de britagem e com incorporação simultânea de ambos os materiais tendem a ter um custo inferior ou equivalente aos concretos de referência. Esta manutenção do custo por m³ de concreto é de extrema importância na viabilidade econômica da utilização destes materiais em conjunto para formulações de concretos autoadensáveis. A economia apresentada pelas dosagens com incorporação simultânea de FRG e AB não foi mais expressiva devido ao fato de estas misturas apresentarem uma maior quantidade de aditivo superplastificante, material que possui elevado valor agregado, quando comparadas às dosagens de referência.

Figura 66. Custo final dos concretos estudados.



Fonte (A Autora).

Já a incorporação isolada do FRG tende a aumentar o custo do CAA devido ao aumento expressivo no teor de aditivo superplastificante necessário para garantir um mesmo espalhamento. Pode-se concluir, então, que para as argamassas e concretos estudados, o fator mais impactante no custo final do material é o teor de aditivo superplastificante, destacando a necessidade de estudos que visem minimizar a incorporação deste material.

Vale ressaltar, que todos os concretos de referência (F0AB0) foram classificados, de acordo com a análise do tempo de escoamento, como classe VF1, apresentando tempo de escoamento, pelo método do funil-V, inferior a 8 segundos e exibindo baixa viscosidade. Assim, sua utilização é recomendada apenas para elementos estruturais com elevada taxa de armadura. Com isso, para adequar a viscosidade destas misturas para a classe VF2, que atende à maioria das aplicações correntes, seria necessária a incorporação de aditivo modificador de viscosidade que, assim como aditivo superplastificante, apresenta um elevado valor agregado. Com isso, o custo por m³ de concreto autoadensável das dosagens de referência seria expressivamente superior ao calculado na presente pesquisa, indicando uma economia ainda mais significativa proveniente da incorporação destes dois materiais em conjunto.

Além disso, como discutido anteriormente, a incorporação do FRG em seu teor máximo resultou em um aumento exagerado da viscosidade da mistura estando, por diversas vezes, acima do necessário para que o CAA apresente um comportamento reológico satisfatório. Com isso, conclui-se que existe a possibilidade de reduzir o teor de finos incorporado, com o intuito de reduzir o consumo de aditivo superplastificante e, concomitantemente, reduzir a viscosidade das misturas, enquadrando-as dentro dos limites sugeridos pela norma. Assim, o custo destas dosagens seria minimizado pela redução expressiva do consumo de aditivo superplastificante.

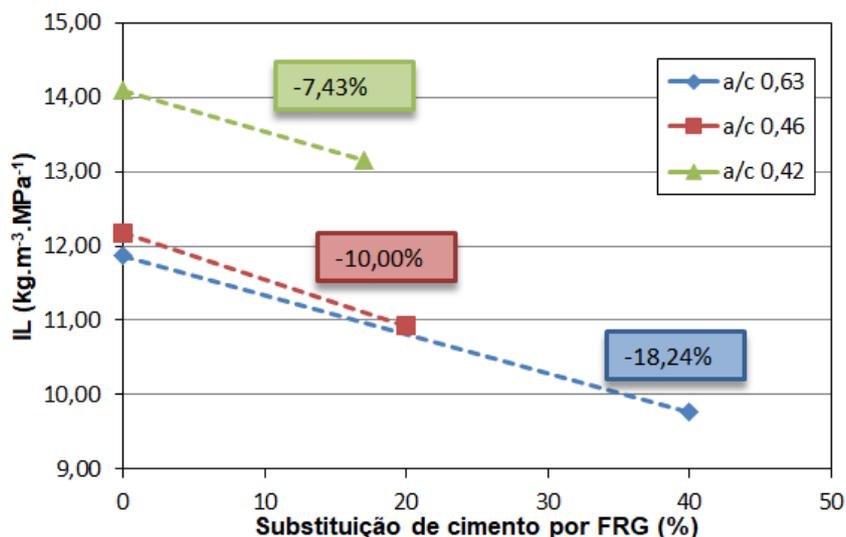
Outro ponto a se destacar é que todos os concretos autoadensáveis estudados apresentaram um custo igual ou inferior a R\$340,00/m³, estando abaixo do valor comercial normalmente encontrado para concretos convencionais usinados e dosados em obra, com resistência de 30 MPa, segundo a tabela SINAPI, indicando a completa viabilidade da incorporação deste tipo de concreto das obras atuais. Ressalta-se novamente que no levantamento de custo não foi avaliado o custo com transporte dos materiais, redução da mão de obra e da duração das concretagens proveniente da utilização de CAAs nas construções o que resultaria em uma economia ainda mais significativa.

4.5.7. Indicadores intensidade de ligante (IL) e intensidade de CO₂ (IC) dos concretos autoadensáveis

Os indicadores de intensidade de ligante (IL) do CAAs estudados estão apresentados na Figura 67.

Percebe-se que todas as dosagens com adição de FRG apresentaram ILs inferiores às misturas de referência, mostrando que mesmo quando da supressão expressiva do cimento, como no caso da relação *a/c* 0,63, os concretos apresentaram um bom desempenho mecânico, reduzindo significativamente o consumo de cimento para atingir uma mesma resistência à compressão.

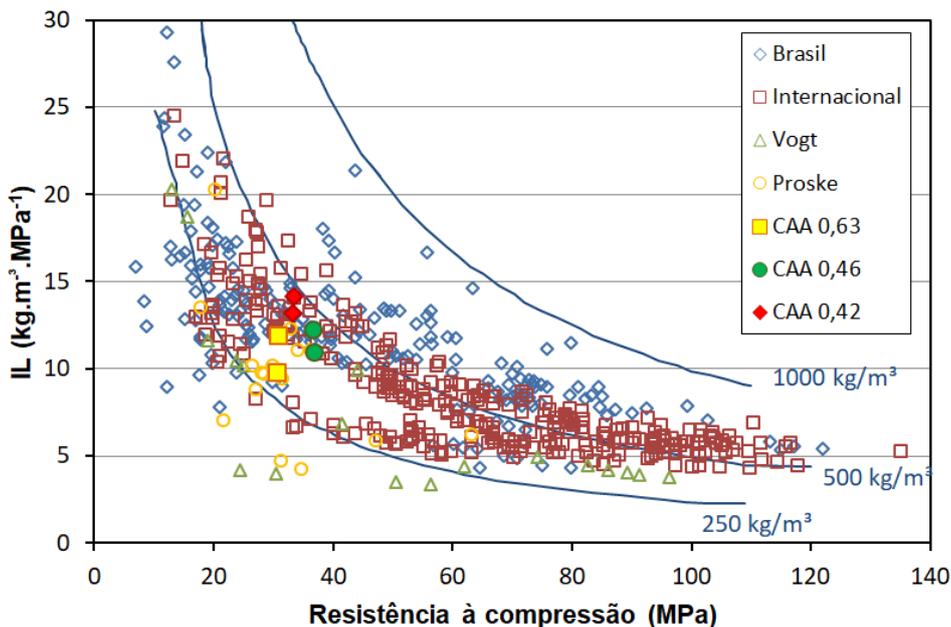
Figura 67. Índice IL dos concretos autoadensáveis estudados.



Fonte: (A Autora).

Ao analisar a Figura 68 percebe-se que os índices de ligante apresentados pelas formulações desta pesquisa (CAA 0,63, 0,46 e 0,42) encontram-se dentro da média encontrada para estudos nacionais e internacionais de concreto, indicando que as misturas de concreto autoadensável apresentaram desempenho satisfatório.

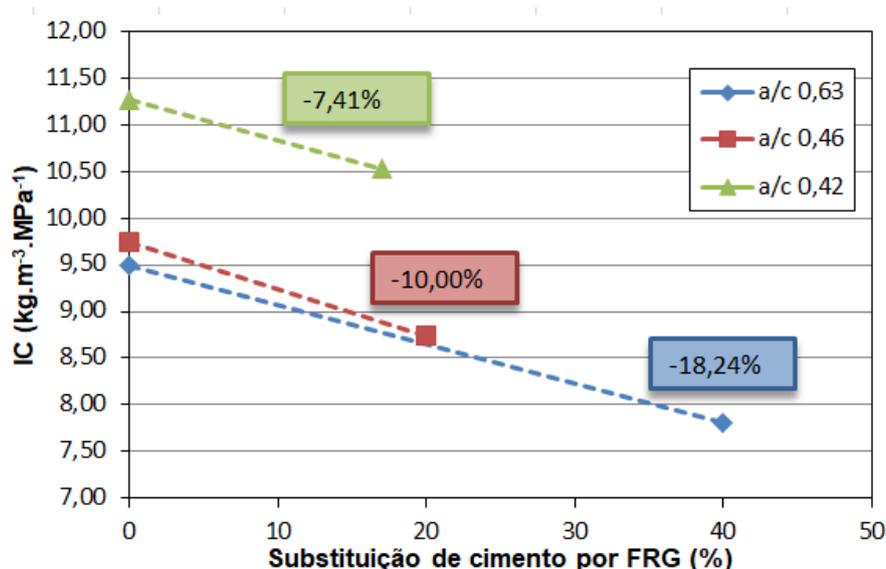
Figura 68. Índice IL para dados internacionais, brasileiros e da presente pesquisa.



Fonte: (Adaptado de DAMINELI, 2013).

A intensidade de geração de CO₂, medida através do índice IC, correlaciona o consumo de cimento e desempenho mecânico apresentado pelas misturas com quantidade de dióxido de carbono emitido na atmosfera (Figura 69). Ao analisar os resultados encontrados, percebe-se que estes seguem a mesma tendência apresentada pelo IL. Ou seja, a adição de FRG, e conseqüente redução do consumo de cimento, resulta em uma redução expressiva da quantidade de CO₂ liberado na atmosfera, variando entre uma redução de 7,41%, a 18,24%. Percebe-se, também, que a relação a/c que apresentou o maior teor de adição de FRG teve a maior redução na quantidade de CO₂ liberada.

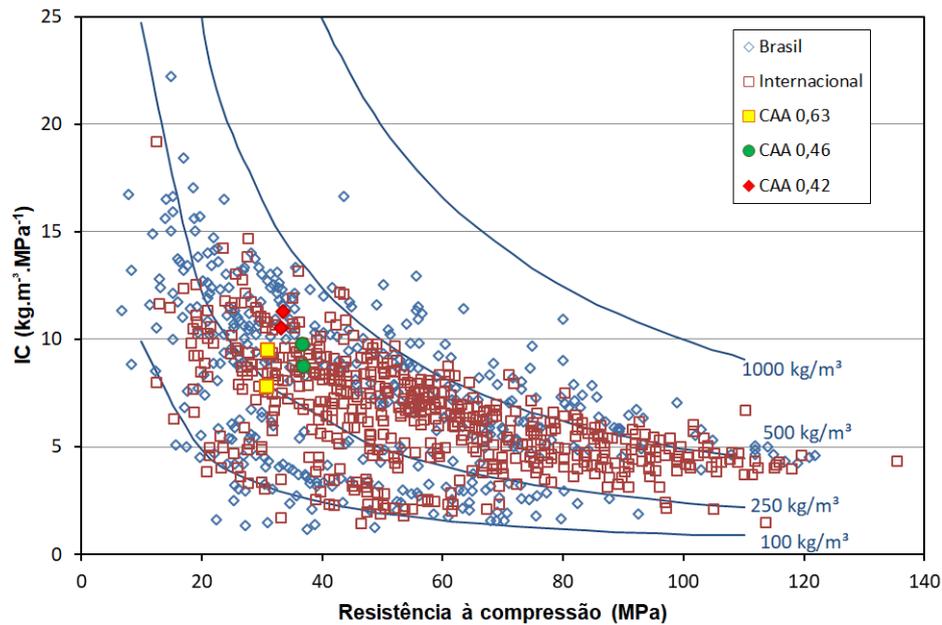
Figura 69. Índice IC dos concretos autoadensáveis estudados.



Fonte: (A Autora).

Os resultados obtidos encontram-se dentro da faixa usual de IC apresentada por Daminieli (2013), como ilustrado na Figura 70. Pode-se concluir, novamente, que as formulações encontradas apresentam desempenho satisfatório quando comparadas ao desempenho apresentado por concretos tradicionais no cenário nacional e internacional.

Figura 70. Índice IC para dados internacionais, brasileiros e da presente pesquisa.



Fonte: (Adaptado de DAMINELI, 2013).

Pode-se concluir, então, que a incorporação dos finos de rocha granítica resulta em dosagens de concreto autoadensável mais eco-eficientes, reduzindo não apenas o consumo de cimento como, também, minimizando expressivamente a quantidade de dióxido de carbono liberado na atmosfera para alcançar um desempenho mecânico equivalente. Tendo em vista que o concreto é o material produzido pelo homem mais consumido do mundo (NAIK, 2008), esforços para a redução da liberação de CO₂ proveniente do excessivo consumo de cimento destas construções merece total atenção e importância, indicando a relevância que a diminuição no consumo do cimento por incorporação de resíduos apresenta para o futuro das construções mundiais no caminho para se tornarem menos poluentes.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que:

- A incorporação conjunta dos finos de rocha granítica e da areia de britagem resultou em argamassas e concretos com desempenho equivalente ou superior às dosagens de referência no estado endurecido, ressaltando a viabilidade técnica da utilização conjunta de ambas as matérias-primas, enquanto reduz o consumo de cimento e o impacto ambiental da produção dos concretos autoadensáveis. Estes resultados indicam que a incorporação simultânea desses materiais traz diversas vantagens técnicas e ambientais para a produção de concretos autoadensáveis mais sustentáveis;
- O volume ideal de agregado miúdo foi definido como 50% do volume total da argamassa de forma a garantir que o tempo de escoamento das argamassas se enquadre nas faixas aceitável ou ideal preconizadas pelo método empregado;
- Apesar de reduzir a porosidade das misturas e promover uma melhor distribuição granulométrica, a incorporação de FRG reduz drasticamente a distância de separação entre partículas da pasta (IPS), devido à redução da quantidade de água adicionada nas dosagens;
- A substituição parcial da areia natural por areia de britagem reduz a porosidade das misturas, uma vez que as partículas de areia natural tendem a preencher os vazios deixados pela AB. Esta redução da porosidade resultou em um aumento da espessura de pasta (MPT) ao redor dos agregados ocasionando em uma maior quantidade pasta livre nas misturas o que tende a facilitar o escoamento dos concretos e argamassas;
- A incorporação do FRG tende a aumentar o teor de aditivo superplastificante necessário para atingir o espalhamento ideal das argamassas e concretos estudados, devido à redução do IPS, enquanto a incorporação da AB tende a reduzir este teor, devido ao aumento do MPT. Assim sendo, a incorporação simultânea dos materiais atinge um teor intermediário de aditivo superplastificante para alcançar a mesma fluidez das misturas;
- As argamassas dosadas com FRG e com incorporação simultânea de FRG e AB obtiveram tempo de escoamento pelo ensaio de mini Funil-V dentro das

faixas aceitável ou ideal enquanto as argamassas de referência e com substituição parcial da areia natural por areia de britagem encontraram-se abaixo da faixa considerada como aceitável;

- A substituição parcial da areia natural por AB nos concretos autoadensáveis resultou em um aumento significativo do tempo de escoamento das misturas pelo Funil-V, devido ao aumento do atrito existente entre as partículas da areia artificial e o agregado graúdo. Por outro lado, o aumento apresentado pela incorporação do FRG foi mais significativo devido à redução do IPS. As dosagens com incorporação simultânea de FRG e AB apresentaram tempo de escoamento intermediário.
- Quanto ao ensaio de T_{500} dos CAAs, a incorporação de FRG resultou em um aumento expressivo do tempo de escoamento, enquanto a incorporação da areia de britagem não teve influência significativa, indicando que a AB só influencia de maneira significativa o escoamento dos concretos em espaços confinados. Mais uma vez, as dosagens com incorporação simultânea dos dois materiais obtiveram tempo de escoamento intermediário;
- A variação do IPS, ou seja, a incorporação ou não de FRG afeta mais significativamente o tempo de escoamento das misturas do que a variação do MPT (incorporação ou não de areia de britagem);
- A areia de britagem só afeta significativamente a habilidade passante dos CAAs quando a relação a/c é baixa e a pasta não apresenta fluidez suficiente para carrear os agregados graúdos. A incorporação isolada de FRG não afeta significativamente a habilidade passante das misturas, por outro lado, a incorporação simultânea dos materiais aumentou o PJ, reduzindo a habilidade passante pela ação conjunta da redução do IPS e aumento do atrito causado pela incorporação da AB;
- Todas as misturas de CAA apresentaram excelente desempenho quando à resistência à segregação tanto na análise visual quanto pelo ensaio de coluna de segregação;
- Com exceção da mistura de referência, uma relação direta entre o teor de ar incorporado com o teor de aditivo empregado nas misturas. Ou seja, a incorporação de aditivo superplastificante gera como efeito colateral o aumento

da quantidade de ar incorporado nas misturas, devido à redução da tensão superficial da fase líquida;

- A incorporação isolada ou simultânea dos materiais (FRG e AB) tende a aumentar a densidade aparente das misturas. Quanto à porosidade aparente, as argamassas e concretos dosados com incorporação de FRG obtiveram os melhores desempenhos devido ao melhor preenchimento dos vazios;
- A absorção de água por capilaridade das argamassas e concretos é significativamente menor nas dosagens com incorporação de FRG, de maneira similar aos resultados encontrados para porosidade aparente;
- A incorporação isolada da AB não afeta significativamente a resistência à tração dos CAAs e a incorporação do FRG tende a reduzir a resistência das dosagens, quando empregado em teores elevados ($\geq 20\%$), devido à supressão do cimento por uma adição mineral inerte, enquanto tende a aumentar a resistência pela densificação da matriz para teores inferiores. Ao analisar a influência da incorporação simultânea do FRG e da AB, percebe-se que este comportamento é regido pela influência da incorporação do FRG nas misturas;
- Analisando os resultados de resistência à compressão dos CAAs percebe-se que tanto a incorporação isolada de FRG quanto a incorporação isolada de AB levam a uma perda de desempenho mecânico. Porém, ao analisar as resistências apresentadas pelas dosagens com incorporação simultânea de FRG e AB, percebe-se que o desempenho apresentado foi equivalente às dosagens de referência para todas as relações a/c estudadas;
- Quanto ao desempenho frente à retração por secagem, tanto a incorporação isolada de FRG e AB quanto a incorporação simultânea destas duas matérias primas resulta em uma redução da retração por secagem, indicando uma menor probabilidade do aparecimento de fissuras relacionado com a perda de água para o ambiente;
- A adição de FRG reduz o consumo de ligante (IL) das misturas e a liberação de CO_2 (IC) associada, aumentando a eco-eficiência das dosagens e minimizando seu impacto ambiental;

- Quanto à viabilidade econômica da incorporação do FRG pode-se concluir que, desde que empregado em teores ótimos e, conseqüentemente, reduzindo o consumo de aditivo superplastificante da incorporação isolada do fino os mesmos se apresentam como material extremamente promissor para confecção de concretos autoadensáveis mais competitivos comercialmente, uma vez que se adequa a viscosidade das misturas sem a necessidade da incorporação de aditivo modificador de viscosidade;
- Já a incorporação da areia de britagem tende a reduzir o custo final do CAA pela redução do consumo de aditivo superplastificante;
- Por fim, conclui-se que, quando utilizados de maneira conjunta, os finos de rocha granítica e a areia de britagem auxiliam na obtenção de concretos autoadensáveis mais competitivos comercialmente, com valores abaixo dos encontrados para concretos convencionais, sem que haja perda significativa de desempenho mecânico e com desempenho reológico mais adequado do que as dosagens de referência.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a perda de trabalhabilidade com o tempo das argamassas e concretos autoadensáveis incorporando FRG e areia de britagem, através da análise do processo de hidratação das formulações e variando a sequência de mistura;
- Avaliar a durabilidade dos concretos e argamassas autoadensáveis frente à penetração de íons cloreto, carbonatação e reação álcali-agregado;
- Avaliar o ciclo de vida, em relação ao custo, das dosagens de concretos e argamassas autoadensáveis com incorporação de FRG e areia de britagem;
- Avaliar o ciclo de vida ambiental das dosagens de concretos e argamassas autoadensáveis com incorporação de FRG e areia de britagem.

7. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, S. L. M.; SAMPAIO, J. A. Obtenção de areia artificial com base em finos de pedreiras. n: **Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, XIX, 2002, Recife, p.263-268.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C157**: Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. 2017
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1712**: Standard Test Method for Rapid Assessment of Static Segregation Resistance of Self-Consolidating Concrete Using Penetration Test. 2009
- ANWAR, A.; AHMAD, J.; KHAN, M.A.; AHMAD, S.; AHMAD, S.A. Study of Compressive Strength of Concrete by Partial Replacement of Cement with Marble Dust Powder. **IRD India**, v. 2, n. 3, p. 1–4, 2014
- ARDALAN, R. B.; JOSHAGHANI, A.; HOOTON, R. D. Workability retention and compressive strength of self-compacting concrete incorporating pumice powder and silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 116–122, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto Autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-3**: Concreto Autoadensável – Parte 3: Determinação da habilidade passante – Métodos do anel J. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4**: Concreto Autoadensável – Parte 4: Determinação da habilidade passante – Métodos da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5**: Concreto Autoadensável – Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do Funil V. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-6**: Concreto Autoadensável – Parte 6: Determinação da resistência à segregação – Métodos da coluna de segregação e da peneira. Rio de Janeiro, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7225**: Materiais de pedra e agregados naturais. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7681-3**: Calda de cimento para injeção Parte 3: Determinação dos índices de exsudação e expansão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

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

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 52**: Agregado miúdo – 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 76**: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método e permeabilidade ao ar – Método de Blaine. Rio de Janeiro, 1998.

ASSUNÇÃO, M. E. P. **Estudo de argamassa com finos de pedreira para a produção de concreto autoadensável**. .: Dissertação - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 118p., 2014.

ATIS, C. D. Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete , and influence of curing condition. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1112–1121, 2005.

AVELAR, M. G. DE. **Estudo das propriedades reológicas do concreto autoadensável de alta resistência com fíler de escória de aciaria LD**. Dissertação - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 241p., 2008.

BAKER, W. F.; PAWLIKOWSKI, J. J.; YOUNG, B. S. The Challenges in Designing the World ' s Tallest Structure : The Burj Dubai Tower. **Structures**, p. 1471–1480, 2009.

BALAJI, K.; BHASKAR, V.; MOHAN, D. J. Experimental Investigations on Mode II Fracture of Concrete with Crushed Granite Stone Fine Aggregate Replacing Sand.

Materials Research, v. 15, n. 1, p. 41–50, 2012.

BANFILL, P. F. G. **The Rheology of Fresh Mortar - A Review**. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. **Anais...**2005

BARBOSA, W. DA S. **Alteração do comportamento reológico da suspensão cimentícia aplicada sobre substratos porosos**. Dissertação - Universidade de São Paulo, São Paulo, 152p., 2010.

BARBOZA, L. S. **Estudo sobre o impacto da redução de consumo de cimento na resistência à compressão do concreto autoadensável**. Dissertação – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 176p., 2016.

BEIXING, L.; GUOJU, K.; MINGKAI, Z. Influence of manufactured sand characteristics on strength and abrasion resistance of pavement cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 10, p. 3849–3853, 2011.

BENABED, B.; KADRI, E.; AZZOUZ, L.; KENAI, S. Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 10, p. 1167–1173, 2012.

BENABED, B.; SOUALHI, H.; BELAIDE ASE.; AZZOUZ, L.; KADRI, E.; KENAI S. Effect of limestone powder as a partial replacement of crushed quarry sand on properties of self-compacting repair mortars. **Journal of Building Materials and Structures**, p. 15–30, 2016.

BHATTACHARYA, A.; RAY, I.; DAVALOS, J. F. Effects of Aggregate Grading and Admixture/Filler on Self-Consolidating Concrete. **The Open Construction and Building Technology Journal**, v. 2, n. 1, p. 89–95, 2008.

BISSONNETTE, B.; PIERRE, P.; PIGEON, M. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 10, p. 1655–1662, 1999.

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

BOUKENDAKDJI, O.; KENAI, S.; KADRI, E.H.; ROUIS, F. Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 7, p. 2593–2598, 2009.

BRASIL. **LEI N. 4.771, DE 15 DE SETEMBRO DE 1965**. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1960-1969/lei-4771-15-setembro-1965-369026-publicacaooriginal-1-pl.html>>. Acesso em: 9 maio. 2019.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. .: Tese - Universidade de São Paulo, São Paulo, 158 p., 2009.

CASTRO, A. L. D. E. **Aplicação de Conceitos Reológicos na Tecnologia dos Concretos de Alto desempenho**. .: Tese - Universidade de São Paulo, São Carlos, 334p., 2007.

CASTRO, A. L. DE; PANDOLFELLI, V. C. Revisão : Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18–32, 2009.

CBIC. Utilização de concreto auto-adensável em estruturas de edifícios com custos inferiores ao concreto tradicional. **12 Concurso Falcão Bauer**, p. 1–15, 2005.

CELIK, T.; MARAR, K. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 7, p. 1121–1130, 1996.

CORRÊA, A. C. A. **Estudo do desempenho dos aditivos plastificantes e polifuncionais em concretos de cimento Portland tipo CPIII-40**. .: Dissertação - Universidade Federal Fluminense, Niteroi, 149p., 2010.

COUTINHO, B. S. **Propriedades e comportamento estrutural do concreto auto-adensável**. Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 240p., 2011.

CUCHIERATO, G. **Caracterização tecnológica de resíduos da mineração de agregados da região metropolitana de São Paulo (RMSP), visando seu aproveitamento econômico**. Dissertação - Universidade de São Paulo, São Paulo, 232p., 2000.

D'AGOSTINO, L. Z.; SOARES, L. O uso de finos de pedreira de rocha granítico-gnáissica em substituição às areias naturais na elaboração de argamassa. **Geociências**, v. 22, p. 65–73, 2003.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo**

de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas. .:

Tese - Universidade de São Paulo, São Paulo, 265 p., 2013.

DE LENA, E.; SPINELLI, M.; GATTI, M.; SCACCABAROZZI, R.; CAMPANARI, S.; CONSONNI, S.; CINTI, G.; ROMANO, M.C. Techno-economic analysis of calcium looping processes for low CO₂ emission cement plants. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 82, n. October 2018, p. 244–260, 2019.

DEHWAH, H. A. F. Corrosion resistance of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 37, n. 1, p. 277–282, 2012b.

DEHWAH, H. A. F. Mechanical properties of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 37, n. 1, p. 277–282, 2012a.

DOMONE, P. L. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, p. 1–12, 2007.

DOMONE, P. L. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 2, p. 197–208, 2006.

DONZA, H.; CABRERA, O.; IRASSAR, E. F. High-strength concrete with different fine aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1755–1761, 2002.

EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. **The European Guidelines for Self Compacting Concrete**, n. May, p. 63, 2005.

EL-GAMAL, S. M. A.; AL-NOWAISER, F. M.; AL-BAITY, A. O. Effect of superplasticizers on the hydration kinetic and mechanical properties of Portland cement pastes. **Journal of Advanced Research**, v. 3, n. 2, p. 119–124, 2012.

ELYAMANY, H. E.; ABD ELMOATY, A. E. M.; MOHAMED, B. Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and Flow-able concrete. **Alexandria Engineering Journal**, v. 53, n. 2, p. 295–307, 2014.

FELEKOGLU, B. Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case). **Resources, Conservation and Recycling**, v. 51, n. 4, p. 770–791, 2007.

FELEKOĞLU, B.; TOSUN, K.; BARADAN, B.; ALTUN, A.; UYULGAN, B. The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 1719–1726, 2006.

FELEKOĞLU, B.; SARIKAHYA, H. Effect of chemical structure of polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 9, p. 1972–1980, 2008.

FELEKOĞLU, B.; TÜRKEL, S.; BARADAN, B. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Building and Environment**, v. 42, n. 4, p. 1795–1802, 2007.

FERRARIS, C. F. Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 104, n. 5, 1999.

FIGUEIREDO, S. C.; ÇOPUROĞLU, O.; SCHLANGEN, E. Effect of viscosity modifier admixture on Portland cement paste hydration and microstructure. **Construction and Building Materials**, v. 212, n. 1, p. 818–840, 2019.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions Applied to Ceramic Manufacturing**. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 1994.

GAO, X.; YUAN, B.; YU, Q.L.; BROUWERS, H.J.H. Characterization and application of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash and waste granite powder in alkali activated slag. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 410–419, 2017.

GESOĞLU, M.; GUNEYISI, E.; KOCABAG, M.E.; BAYRAM, V.; MERMERDAS, K. Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 160–170, 2012.

GHOMARI, F.; HACENE, B.; TALEB, O. Study of limestone addition on the mechanical and rheological characteristics in the SCC. **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 5, n. 3, p. 412–423, 2011.

GOBBO, L. DE A. **Os compostos de clínquer Portland: sua caracterização por**

difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld. Dissertação - Universidade de São Paulo, São Paulo, 119p., 2003.

GOMES, P. C. C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L. Uma Nova metodologia para Obtenção de Concreto Auto-adensável de Alta Resistência Com Aditivos Minerais. **V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**, n. 1, p. 1–14, 2003.

GONÇALES, M.; ARTHUSO, V.; DEGUTI, R.; OHASHI, T. Produção de areia de brita com qualidade. **Revista Areia & Brita**. Associação Nacional de Entidades, v. 2, n.10, 2000, p.20- 25.

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

GUNEYISI, E.; GESOGLU, M.; OZBAY, E. Effects of marble powder and slag on the properties of self compacting mortars. **Materials and Structures**, p. 813–826, 2009.

GUPTA, L. K.; VYAS, A. K. Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 155–164, 2018.

HADDAD, L. D.; COSTA, C.M.; LOPES, P.H.P.; CARVALHO JÚNIOR, A.N.; SANTOS, W.J. Análise da influência da granulometria do agregado miúdo nas propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas de revestimento. **Science & Engineering Journal**, v. d, n. 1, p. 7–16, 2016.

HALIM, M. A.; TAHA, R. The properties of concrete made with fine dune sand. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1803–1808, 2007.

HO, D.W.S.; SHEINN, A.M.M.; NG, C.C.; TAM, C.T. The use of quarry dust for SCC applications. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 4, p. 505–511, 2002.

HOLSCHEMACHER, K.; KLUG, Y. A Database for the Evaluation of Hardened Properties of SCC. **LACER**, n. December 2002, p. 123–134, 2002.

HU, C.; DE LARRARD, F.; GJØRV, O. E. Rheological testing and modelling of fresh high performance concrete. **Materials and Structures**, v. 28, n. 1, p. 1–7, 1995.

HWANG, S.-D.; KHAYAT, K. H. Effect of Various Admixture-Binder Combinations on

Workability of Ready-Mix Self-Consolidating Concrete. **Special Publication**, v. 233, n. March, p. 25–44, 2006.

ILANGOVARA, R.; MAHENDRANA, N.; NAGAMANIB, K. Strength and Durability Properties of Concrete Containing Quarry Rock Dust As Fine Aggregate. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 3, n. 5, p. 20–26, 2008.

JAIN, A.; CHOUDHARY, R.; GUPTA, R.; CHAUDHARY, S. Abrasion resistance and sorptivity characteristics of SCC containing granite waste. **Materials Today: Proceedings**, n. xxxx, 2019.

JAIN, A.; GUPTA, R.; CHAUDHARY, S. Performance of self-compacting concrete comprising granite cutting waste as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 539–552, 2019.

JI, T.; CHEN, C.; ZHUANG, Y.; CHEN, J. A mix proportion design method of manufactured sand concrete based on minimum paste theory. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 422–426, 2013.

JIN, J. Properties of mortar for self-compacting concrete. p. 398, 2002.

KARISIDDAPPA, M. R. G. M. C. N. Development and Study of the Strength of Self-Compacting Mortar Mixes Using Local Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. May, p. 526–532, 2011.

KARMEGAM, A.; KALIDASS, A.; ULAGANATHAN, D. Utilization of granite sawing waste in self compacting concrete. **Gradjevinar**, v. 66, n. 11, p. 997–1006, 2014.

KHALEEL, O. R.; AL-MISHHADANI, S. A.; RAZAK, H. A. The effect of coarse aggregate on fresh and hardened properties of Self-Compacting Concrete (SCC). **Procedia Engineering**, v. 14, p. 805–813, 2011.

KHAYAT, K.; SCHUTTER, G. DE. **State-of-the-Art Report on the Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete (SCC)**. [s.l: s.n.].

KHRAPKO, M. **Maintaining required workability of SCC in time**. p. 43, 2001.

KLEIN, N. S. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável**. Dissertação - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 180p., 2008.

- KRAUS, Z. F. **Investigação de misturas de argamassas para dosagem do concreto auto-adensável contendo ora fíler calcário, ora aditivo promotor de viscosidade em substituição ao fíler**. Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 154p., 2006.
- KUMAR, P.; RADHAKRISHNA. Characteristics of SCC with Fly Ash and Manufactured Sand. **Materials Science and Engineering**, v. 149, 2016.
- LARRARD, F. DE. **Concrete mixture proportioning: A scientific approach**. v. 9, 2011, 440p.
- ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK, B. The influence of chemical admixtures on cement hydration and mixture properties of very high performance self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 49, n. January, p. 643–662, 2013.
- LI, L. G. et al. Adding granite dust as paste replacement to improve durability and dimensional stability of mortar. **Powder Technology**, v. 333, p. 269–276, 2018.
- LIBRE, N. A.; KHOSHNAZAR, R.; SHEKARCHI, M. Relationship between fluidity and stability of self-consolidating mortar incorporating chemical and mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p. 1262–1271, 2010.
- LOHANI, T.K.; PADHI, M.; DASH, K.P.; JENA, S. Optimum utilization of quarry dust as partial replacement of sand in concrete. **International Journal of Applied Science and Engineering Research**, v. 1, n. 2, p. 391–404, 2012.
- LOSER, R.; LEEMANN, A. Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 42, n. 1, p. 71–82, 2009.
- MACIEL, M. H. et al. Efeito da variação do consumo de cimento em argamassas de revestimento produzidas com base nos conceitos de mobilidade e empacotamento de partículas. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 245–259, 2018.
- MELO, K. A. DE. **Contribuição À Dosagem De Concreto Auto-Adensável Com Adição De Fíler Calcário**. Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 183p., 2005.
- MENEZES, C. M. T. DE. **Concreto auto-adensável utilizando metacaulim e pó de pedra como adições minerais**. Dissertação - Universidade Federal de

Pernambuco, Recife, 122p., 2006.

MENOSSE, R. T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. Dissertação - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 110p., 2004.

MORAES, K. A. DE M. **Otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto auto-adensável**. : Tese - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 212p., 2010.

NAIK, T. R. Sustainability of concrete construction. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 13, n. 2, p. 98–103, 2008.

NANTHAGOPALAN, P.; SANTHANAM, M. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete produced with manufactured sand. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 3, p. 353–358, 2011.

NEHDI, M. L. Only tall things cast shadows : Opportunities , challenges and research needs of self-consolidating concrete in super-tall buildings. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 80–90, 2013.

NUNES, N. .; FIGUEREDO, A. . Retração do concreto de cimento portland. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil**, v. BT/PCC/452, n. 59, p. 59, 2007.

NUNES, S. C. B. **Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades**. Dissertação - Universidade do Porto, Porto, 198p., 2001.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of advanced concrete technology**, v. 1, n. 1, p. 5–15, 2003.

OKAMURA, H.; OZAWA, K. Self-compacting high performance concrete. **Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)**, v. 6, n. 4, p. 269–270, 1996.

OLIVEIRA, I.R.; STUDART, A.R.; PILEGGI, R.G.; PANDOLFELLI, V.C. **Dispersão e Empacotamento de Partículas: Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000.

OLIVEIRA, M. J.; RIBEIRO, A. B.; BRANCO, F. G. Shrinkage of self-compacting

concrete. A comparative analysis. **Journal of Building Engineering**, v. 9, n. June 2016, p. 117–124, 2017.

OUCHI, M.; NAKAMURA, S.; OSTERBERG, T.; HALLBERG, S.; LWIN, M. Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and The United States. **ISHPC**, v. 53, n. 4, p. 246–248, 2003.

PERIUS, G. R. **Influência das propriedades físicas de agregados reciclados sobre a retração por seca em concreto auto-adensável**. .: Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 131p., 2009.

POPPE, A.; DE SCHUTTER, G. Cement hydration in the presence of high filler contents. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. March, p. 2290–2299, 2005.

POZO-ANTONIO, J. S.; FIORUCCI, M.P.; RAMIL, A.; LÓPEZ, A.J.; RIVAS, T. Evaluation of the effectiveness of laser crust removal on granites by means of hyperspectral imaging techniques. **Applied Surface Science**, v. 347, p. 832–838, 2015.

PRAKASH, K. S.; RAO, C. H. Study on Compressive Strength of Quarry Dust as Fine Aggregate in Concrete. **Advances in Civil Engineering**, v. 2016, 2016.

PUERTAS, F.; SANTOS, H.; PALACIOS, M.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S. Polycarboxylate superplasticiser admixtures : effect on hydration , microstructure and rheological behaviour in cement pastes. **Advances in Cement Research**, v. 17, n. 2, p. 77–89, 2005.

REPETTE, W. L.; MELO, K. A. DE. Método de Repette-Melo. In: GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. DE (Eds.). . **Métodos de Dosagem de Concreto Autoadensável**. São Paulo, Pini, 2009. p. 172.

RIZWAN, S. A.; BIER, T. A. Blends of limestone powder and fly-ash enhance the response of self-compacting mortars. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 398–403, 2012.

RIZWAN, S. A.; BIER, T. A. Self-consolidating mortars using various secondary raw materials. **ACI Materials Journal**, v. 106, n. 1, p. 25–32, 2009.

RODRIGUES, G. L.; MANTOVANI, L. E.; LOPES, K. Um estudo da poeira respirável de basalto , na produção de brita , e sua influência para o sistema respiratório do

trabalhador . **XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, p. 2586–2592, 2004.

ROJAS-RAMÍREZ, R. A. et al. The impact of vermiculite residual fines in the rheological properties of cement pastes formulated with different waste contents. **Applied Clay Science**, v. 170, n. May 2018, p. 97–105, 2019.

ROMANO, R. C. DE O.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Incorporação de ar em materiais cimentícios: uma nova abordagem para o desenvolvimento de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 289–308, 2018.

RONCERO, J. **Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states: Implications for high performance concretes.** .. Tese - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 208p., 2000.

ROUSSEL, N. The LCPC BOX: A cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC. **Materials and Structures**, v. 40, n. 9, p. 889–896, 2007.

ROY, R. LE; ROUSSEL, N. The Marsh cone as a viscometer: Theoretical analysis and practical limits. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 37, p. 25–30, 2004.

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, H. A. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 19–32, 2016.

SALVADOR, G. A. B. **Otimização da distribuição granulométrica do agregado miúdo para o uso em revestimentos de argamassa na cidade Sant’ana do Livramento - RS.** Dissertação - Universidade Federa do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 130p., 2005.

SCHANKOSKI, R. A.; PILAR, R.; PILEGGI, R.; PRUDÊNCIO JR., L.R. Avaliação da reologia de concretos autoadensáveis contendo filers de britagem. **Revista Matéria**, v. 22, n. 2, 2017.

SCHWARTZENTRUBER, L. D. A.; ROY, R. LE; CORDIN, J. Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC). **Cement and Concrete Composites**, v. 36, p. 1203–1213, 2006.

SHEN, L.; JOVEIN, H. B.; LI, M. Measuring static stability and robustness of self-

consolidating concrete using modified Segregation Probe. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 210–216, 2014.

SHEN, W.; LIU, Y.; WANG, Z.; CAO, L.; WU, D.; WANG, Y.; JI, X. Influence of manufactured sand ' s characteristics on its concrete performance. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 574–583, 2018.

SILVA, A. S. M. DA. **Dosagem De Concreto Pelos Métodos De Empacotamento Compressível E Aitcin-Faury Modificado**. .: Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 152p., 2004.

SILVA, N. G.; BUEST, G.; CAMPITELI, V. C. Argamassas Com Areia Britada : Influência dos finos e da forma das partículas. **VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas**, p. 12–22, 2005.

SONG, T.; LEE, S.; KIM, B. Recycling of crushed stone powder as a partial replacement for silica powder in extruded cement panels. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 105–115, 2014.

SZWABOWSKI, J.; PIEKARCZYK, B. L. Air entrainment problem in self compacting concrete. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 15, n. 2, p. 137–147, 2010.

TENNICH, M.; KALLEL, A.; OUEZDOU, M. BEN. Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 65–70, 2015.

TOPÇU, I. B.; BILIR, T.; UYGUNOGLU, T. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p. 1947–1953, 2009.

TULJARAMSA, B. K.; GUNDAKALLE, V. D. A study on strength properties of SCC with M-Sand. **Indian Journal of Scientific Research**, v. 12, n. 1, p. 370–374, 2015.

TÜRKEK, S.; KANDEMIR, A. Fresh and Hardened Properties of SCC Made with Different Aggregate and Mineral Admixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 10, p. 1025–1032, 2010.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. Dissertação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 149p.,

2004.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Autoadensável**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2015.

UYSAL, M.; YILMAZ, K. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 7, p. 771–776, 2011.

VARHEN, C.; DILONARDO, I.; ROMANO, R.C.O.; PILEGGI, R.G.; FIGUEIREDO, A.D. Effect of the substitution of cement by limestone filler on the rheological behaviour and shrinkage of microconcretes. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 375–386, 2016.

VISEDO, G.; PECCHIO, M. **Roadmap Tecnológico do Cimento**. 2019.

WANG, X.; WANG, K.; TAYLOR, P.; MORCOUS, G. Assessing particle packing based self-consolidating concrete mix design method. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 439–452, 2014.

WBCSD. The Cement Sustainability Initiative, Cement Industry Energy and CO₂ Performance: “Getting the Numbers Right”.

[Http://Www.Wbcscement.Org/Index.Php](http://www.wbcscement.org/index.php), p. 44, 2016.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland**. Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 295p., 2008.

YAMEI, H.; LIHUA, W. Effect of Particle Shape of Limestone Manufactured Sand and Natural Sand on Concrete. **Procedia Engineering**, v. 210, p. 87–92, 2017.

YE, G.; LIU, X.; DE SCHUTTER, G.; POPPE, A.M.; TAERWE, L. Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, 2007.

ZEGHICHI, L.; BENGHAZI, Z.; BAALI, L. The effect of the kind of sands and additions on the mechanical behaviour of S.C.C. **Physics Procedia**, v. 55, p. 485–492, 2014.

ZERBINO, R.; BARRAGÁN, B.; GARCIA, T.; AGULLÓ, L.; GETTU, R. Workability tests and rheological parameters in self-compacting concrete. **Materials and Structures**, p. 947–960, 2009.

ZHU, W.; WEI, J.; LI, F.; ZHANG, T.; CHEN, Y.; HU, J.; YU, Q. Understanding restraint effect of coarse aggregate on the drying shrinkage of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 458–463, 2016.

APÊNDICE A

Este apêndice apresenta as análises estatísticas das propriedades analisadas para as argamassas autoadensáveis.

Tabela 17 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento das argamassas com incorporação de FRG em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG (a/c 0,42)	17,405	1	17,405	142,082	2,11E-05	5,987	Sim
Incorporação de FRG (a/c 0,46)	7,263	1	7,263	83,643	0,000262	6,608	Sim
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 18 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento das argamassas com incorporação de areia de britagem em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de AB (a/c 0,42)	3,125	1	3,125	138,889	2,25E-05	5,987	Sim
Incorporação de AB (a/c 0,46)	0,880	1	0,880	13,076	0,015282	6,608	Sim
Incorporação de AB (a/c 0,63)	0,551	1	0,551	9,800	0,020312	5,987	Sim
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 19 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento das argamassas com incorporação de areia de britagem e FRG em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,42)	5,78	1	5,78	256,889	3,75E-06	5,987	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,46)	8,172	1	8,172	129,030	9,25E-05	6,608	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,63)	18,107	1	18,107	362,143	7,38E-06	6,608	Sim

Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Fonte (A Autora).

Tabela 20 - Análise ANOVA dos resultados de teor de ar incorporado das argamassas estudadas.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Teor de ar inc. a/c 0,63	38,047	2	19,023	63,990	1,2E-0,5	4,459	Sim
Teor de ar inc. a/c 0,46	58,382	3	19,461	132,433	3,71E-07	4,066	Sim
Teor de ar inc. a/c 0,42	124,499	3	41,500	231,692	2,3E-07	4,347	Sim

Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Fonte (A Autora).

Tabela 21 - Análise ANOVA dos resultados de densidade aparente das argamassas com incorporação de FRG em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG (a/c 0,42)	0,038	1	0,038	327,008	1,84E-06	5,987	Sim
Incorporação de FRG (a/c 0,46)	0,0386	1	0,0386	74,543	0,0001	5,987	Sim
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 22 - Análise ANOVA dos resultados de densidade aparente das argamassas com incorporação de AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de AB (a/c 0,42)	0,148	1	0,148	410,694	9,38E-07	5,987	Sim
Incorporação de AB (a/c 0,46)	0,047	1	0,047	197,071	7,15E-06	5,987	Sim
Incorporação de AB (a/c 0,63)	0,012	1	0,012	121,161	3,34E-05	5,987	Sim
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 23 - Análise ANOVA dos resultados de densidade aparente das argamassas com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,42)	0,129	1	0,129	1250,899	3,41E-08	5,987	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,46)	0,031	1	0,031	161,700	1,45E-05	5,987	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,63)	0,003	1	0,003	29,479	0,003	6,608	Sim

Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Fonte (A Autora).

Tabela 24 - Análise ANOVA dos resultados de porosidade aparente das argamassas com incorporação de FRG em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG (a/c 0,42)	0,0225	1	0,225	5,215	0,084	7,709	Não
Incorporação de FRG (a/c 0,46)	3,654	1	3,654	13,124	0,011	5,987	Sim

Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Fonte (A Autora).

Tabela 25 - Análise ANOVA dos resultados de porosidade aparente das argamassas com incorporação de AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de AB (a/c 0,42)	0,502	1	0,502	2,905	0,149	6,608	Não
Incorporação de AB (a/c 0,46)	0,022	1	0,022	0,105	0,757	5,987	Não
Incorporação de AB (a/c 0,63)	0,230	1	0,230	3,610	0,106	5,987	Não

Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Fonte (A Autora).

Tabela 26 - Análise ANOVA dos resultados de porosidade aparente das argamassas com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,42)	2,310	1	2,310	70,946	0,0004	6,608	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,46)	8,422	1	8,422	50,013	0,0004	5,987	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,63)	19,440	1	19,440	115,520	3,83E-05	5,987	Sim

Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Fonte (A Autora).

Tabela 27 - Análise ANOVA dos resultados de absorção de água por capilaridade das argamassas com incorporação de FRG em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG (a/c 0,42)	0,001	1	0,001	18,299	0,051	18,513	Não
Incorporação de FRG (a/c 0,46)	0,003	1	0,003	21,520	0,019	10,128	Sim

Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Fonte (A Autora).

Tabela 28 - Análise ANOVA dos resultados de absorção de água por capilaridade das argamassas com incorporação de AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de AB (a/c 0,42)	0,002	1	0,002	25,583	0,037	18,513	Sim
Incorporação de AB (a/c 0,46)	0,001	1	0,001	4,915	0,091	7,708	Não
Incorporação de AB (a/c 0,63)	0,002	1	0,002	2,581	0,249	18,513	Não

Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Fonte (A Autora).

Tabela 29 - Análise ANOVA dos resultados de absorção de água por capilaridade das argamassas com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,42)	0,0001	1	0,0001	0,243	0,656	10,128	Não
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,46)	0,003	1	0,003	18,923	0,012	7,709	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,63)	0,016	1	0,016	24,838	0,038	18,513	Sim
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 30 - Análise ANOVA dos resultados de resistência à tração na flexão das argamassas com diferentes relações a/c.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
a/c = 0,63							
Resist. Tração 3 dias	0,781	2	0,391	0,395	0,704	9,552	Não
Resist. Tração 7 dias	0,854	2	0,427	3,711	0,123	6,944	Não
Resist. Tração 28 dias	2,079	2	1,040	1,476	0,285	4,459	Não
a/c = 0,46							
Resist. Tração 3 dias	5,400	3	1,800	15,333	0,006	5,409	Sim
Resist. Tração 7 dias	4,725	3	1,575	1,150	0,403	4,757	Não
Resist. Tração 28 dias	3,754	3	1,251	1,341	0,316	3,708	Não
a/c = 0,42							
Resist. Tração 3 dias	47,590	3	15,863	57,850	0,000	4,347	Sim
Resist. Tração 7 dias	19,998	3	6,666	28,829	0,001	5,409	Sim
Resist. Tração 28 dias	45,190	3	15,063	60,315	0,000	3,587	Sim
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 31 - Análise ANOVA dos resultados de resistência à compressão das argamassas com diferentes relações a/c.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
$a/c = 0,63$							
Resist. Comp. 3 dias	27,997	2	13,998	8,562	0,00331	3,682	Sim
Resist. Comp. 7 dias	68,070	2	34,035	17,227	0,0003	3,885	Sim
Resist. Comp. 28 dias	132,100	2	66,050	36,002	8,5E-06	3,885	Sim
$a/c = 0,46$							
Resist. Comp. 3 dias	140,745	3	46,915	27,214	2,6E-06	3,287	Sim
Resist. Comp. 7 dias	80,846	3	26,949	7,589	0,00416	3,490	Sim
Resist. Comp. 28 dias	231,471	3	77,157	26,921	1,1E-06	3,197	Sim
$a/c = 0,42$							
Resist. Comp. 3 dias	460,361	3	153,454	45,533	7,2E-09	3,127	Sim
Resist. Comp. 7 dias	626,570	3	208,587	138,778	1,2E-11	3,239	Sim
Resist. Comp. 28 dias	777,593	3	80,296	80,296	3,1E-10	3,197	Sim
<p>Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.</p>							

Fonte (A Autora).

APÊNDICE B

Este apêndice apresenta as análises estatísticas das propriedades analisadas para os concretos autoadensáveis.

Tabela 32 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento (T_{500}) dos CAAs com incorporação de FRG em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG (a/c 0,42)	95,063	1	95,063	52,448	0,019	18,513	Sim
Incorporação de FRG (a/c 0,46)	72,250	1	72,250	289,00	0,003	18,513	Sim
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 33 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento (T_{500}) dos CAAs com incorporação de AB em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de AB (a/c 0,42)	5,063	1	5,063	6,231	0,130	18,513	Não
Incorporação de AB (a/c 0,46)	0,063	1	0,063	1,00	0,423	18,513	Não
Incorporação de AB (a/c 0,63)	0,031	1	0,006	0,36	0,609	18,513	Não
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 34 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento (T_{500}) dos CAAs com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,42)	42,25	1	42,25	84,5	0,012	18,513	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,46)	14,063	1	14,063	225,000	0,004	18,513	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,63)	44,223	1	44,223	28,122	0,338	18,513	Sim
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 35 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento pelo funil V dos CAAs com incorporação de FRG em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG (a/c 0,42)	2678,063	1	2678,063	295,510	0,003	18,513	Sim
Incorporação de FRG (a/c 0,46)	529,00	1	529,00	211,60	0,005	18,513	Sim
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 36 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento pelo funil V dos CAAs com incorporação de AB em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de AB (a/c 0,42)	588,0625	1	588,0625	93,15842	0,010565	18,51282	Sim
Incorporação de AB (a/c 0,46)	0,04	1	0,04	0,118	0,764	18,513	Não
Incorporação de AB (a/c 0,63)	25,00	1	25	555,556	0,002	18,513	Sim
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 37 - Análise ANOVA dos resultados do tempo de escoamento pelo funil V dos CAAs com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,42)	2002,563	1	2002,563	20,013	0,047	18,513	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,46)	420,25	1	420,25	98,883	0,010	18,513	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,63)	775,623	1	775,623	758,556	0,001	18,513	Sim
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 38 - Análise ANOVA dos da habilidade passante pelo método do anel J dos CAAs com incorporação de FRG em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG (a/c 0,42)	1,000	1	1,000	0,500	0,553	18,513	Não
Incorporação de FRG (a/c 0,46)	26,266	1	26,266	1,085	0,407	18,513	Não
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 39 - Análise ANOVA dos da habilidade passante pelo método do anel J dos CAAs com incorporação de AB em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de AB (a/c 0,42)	42,250	1	42,250	33,800	0,028	18,513	Sim
Incorporação de AB (a/c 0,46)	1,563	1	4,563	0,074	0,811	18,513	Não
Incorporação de AB (a/c 0,63)	1,000	1	1,000	8,000	0,106	18,513	Não
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 40 - Análise ANOVA dos da habilidade passante pelo método do anel J dos CAAs com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,42)	81,000	1	81,000	24,923	0,038	18,513	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,46)	138,063	1	138,063	18,880	0,049	18,513	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,63)	10,563	1	10,563	33,800	0,028	18,513	Sim

Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Fonte (A Autora).

Tabela 41 - Análise ANOVA dos da habilidade passante pelo método da caixa L dos CAAs com incorporação de FRG em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG (a/c 0,42)	6,75E-06	1	6,75E-06	0,0007	0,981	18,513	Não
Incorporação de FRG (a/c 0,46)	0,0001	1	0,0001	0,007	0,941	18,513	Não

Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Fonte (A Autora).

Tabela 42 - Análise ANOVA dos da habilidade passante pelo método da caixa L dos CAAs com incorporação de AB em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de AB (a/c 0,42)	5,74E-07	1	5,47E-07	0,0008	0,980	18,513	Não
Incorporação de AB (a/c 0,46)	1,28E-05	1	1,28E-05	0,006	0,946	18,513	Não
Incorporação de AB (a/c 0,63)	0,0004	1	0,0004	0,899	0,793	18,513	Não
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se P<5% e Fc<F o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 43 - Análise ANOVA dos da habilidade passante pelo método da caixa L dos CAAs com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem FRG e sem AB para as relações a/c de 0,46 e 0,42

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,42)	0,003	1	0,003	0,400	0,592	18,513	Não
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,46)	0,003	1	0,003	1,471	0,349	18,513	Não
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,63)	0,0009	1	0,0009	0,124	0,758	18,513	Não
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se P<5% e Fc<F o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 44 - Análise ANOVA dos resultados de densidade aparente dos CAAs com incorporação de FRG em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG (a/c 0,42)	0,056	1	0,056	164,288	4,08E-06	5,591	Sim
Incorporação de FRG (a/c 0,46)	0,162	1	0,162	878,134	4,47E-11	4,964	Sim
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 45 - Análise ANOVA dos resultados de densidade aparente dos CAAs com incorporação de AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de AB (a/c 0,42)	0,072	1	0,072	181,793	1,03E-05	5,987	Sim
Incorporação de AB (a/c 0,46)	0,027	1	0,027	71,724	2,89EE-05	5,318	Sim
Incorporação de AB (a/c 0,63)	0,002	1	0,002	2,353	0,164	5,318	Não
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 46 - Análise ANOVA dos resultados de densidade aparente dos CAAs com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,42)	0,073	1	0,073	246,256	4,24E-06	5,987	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,46)	0,154	1	0,154	793,628	2,72E-09	5,318	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,63)	0,055	1	0,055	335,231	8,15E-0,8	5,312	Sim

Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Fonte (A Autora).

Tabela 47 - Análise ANOVA dos resultados de porosidade aparente dos CAAs com incorporação de FRG em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG (a/c 0,42)	1,085	1	1,085	8,579	0,033	6,608	Sim
Incorporação de FRG (a/c 0,46)	3,283	1	3,283	27,555	0,0008	5,318	Sim

Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Fonte (A Autora).

Tabela 48 - Análise ANOVA dos resultados de porosidade aparente dos CAAs com incorporação de AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de AB (a/c 0,42)	0,056	1	0,056	1,042	0,354	6,608	Não
Incorporação de AB (a/c 0,46)	0,001	1	0,001	0,025	0,880	6,608	Não
Incorporação de AB (a/c 0,63)	0,031	1	0,031	0,142	0,717	5,591	Não
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 49 - Análise ANOVA dos resultados de porosidade aparente dos CAAs com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,42)	0,218	1	0,218	3,520	0,134	7,709	Não
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,46)	0,285	1	0,285	7,446	0,034	5,988	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,63)	17,970	1	17,970	95,767	9,97E-0,6	5,318	Sim
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 50 - Análise ANOVA dos resultados de absorção de água por capilaridade dos CAAs com incorporação de FRG em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG (a/c 0,42)	0,001	1	0,001	10,667	0,047	10,128	Sim
Incorporação de FRG (a/c 0,46)	0,0003	1	0,0003	20,379	0,020	10,128	Sim

Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Fonte (A Autora).

Tabela 51 - Análise ANOVA dos resultados de absorção de água por capilaridade dos CAAs com incorporação de AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de AB (a/c 0,42)	0,001	1	0,001	12,475	0,039	10,128	Sim
Incorporação de AB (a/c 0,46)	0,0004	1	0,0004	13,143	0,022	7,709	Sim
Incorporação de AB (a/c 0,63)	2,95E-06	1	2,95E-06	0,230	0,889	10,128	Não

Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Fonte (A Autora).

Tabela 52 - Análise ANOVA dos resultados de absorção de água por capilaridade dos CAAs com incorporação de FRG e AB em relação à referência sem AB e sem FRG para as relações a/c de 0,63, 0,46 e 0,42.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,42)	0,003	1	0,003	46,588	0,002	7,709	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,46)	0,0004	1	0,0004	61,913	0,001	7,709	Sim
Incorporação de FRG e AB (a/c 0,63)	1,29E-05	1	1,29E-05	0,121	0,751	10,128	Não
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 53 - Análise ANOVA dos resultados de resistência à tração na flexão dos CAAs com diferentes relações a/c.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
a/c = 0,63							
Resist. Tração 3 dias	1,311	2	0,655	2,597	0,189	6,944	Não
Resist. Tração 7 dias	0,916	2	0,458	1,916	0,261	6,944	Não
Resist. Tração 28 dias	0,188	2	0,094	0,153	0,864	9,552	Não
a/c = 0,46							
Resist. Tração 3 dias	0,300	3	0,100	0,050	0,984	4,757	Não
Resist. Tração 7 dias	2,358	3	0,786	0,622	0,626	4,757	Não
Resist. Tração 28 dias	6,073	3	2,024	1,113	0,426	5,426	Não
a/c = 0,42							
Resist. Tração 3 dias	7,120	3	2,373	1,062	0,432	4,757	Não
Resist. Tração 7 dias	4,570	3	1,523	11,102	0,005	4,347	Sim
Resist. Tração 28 dias	10,697	3	3,566	9,494	0,007	4,347	Sim
Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.							

Fonte (A Autora).

Tabela 54 - Análise ANOVA dos resultados de resistência à compressão das argamassas com diferentes relações a/c.

Parâmetro Avaliado	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F crítico	Efeito Significativo
a/c = 0,63							
Resist. Comp. 3 dias	12,422	2	6,211	230,797	738E-05	6,944	Sim
Resist. Comp. 7 dias	20,622	2	10,311	14,021	0,005	5,143	Sim
Resist. Comp. 28 dias	3,696	2	1,848	1,289	0,394	9,552	Não
a/c = 0,46							
Resist. Comp. 3 dias	79,770	3	26,590	3,044	0,102	4,347	Não
Resist. Comp. 7 dias	42,674	3	14,225	3,313	0,139	6,591	Não
Resist. Comp. 28 dias	153,794	3	51,265	21,526	0,003	5,409	Sim
a/c = 0,42							
Resist. Comp. 3 dias	35,626	3	11,875	1,885	0,220	4,347	Não
Resist. Comp. 7 dias	68,912	3	22,970	3,617	0,084	4,757	Não
Resist. Comp. 28 dias	119,288	3	39,763	12,020	0,010	5,409	Sim
<p>Nota: SQ - Soma quadrada; GL - Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada; F- Valor Calculado de F; Valor p - Nível de Significância; Fc - F crítico; Se $P < 5\%$ e $F_c < F$ o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.</p>							

Fonte (A Autora).