

Rudiele Aparecida Schankoski

**ESTUDO DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL CONTENDO
FÍLER DE BRITAGEM: CARACTERÍSTICAS DAS
PARTÍCULAS, FLOCULAÇÃO E REOLOGIA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutora em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schankoski, Rudiele Aparecida
ESTUDO DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL CONTENDO FÍLER
DE BRITAGEM: CARACTERÍSTICAS DAS PARTÍCULAS,
FLOCULAÇÃO E REOLOGIA / Rudiele Aparecida
Schankoski ; orientador, Luiz Roberto Prudêncio Jr.
- Florianópolis, SC, 2017.
346 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. concreto autoadensável.
3. fíler de britagem. 4. reologia. 5. floculação. I.
, Luiz Roberto Prudêncio Jr. . II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil. III. Título.

Rudiele Aparecida Schankoski

**ESTUDO DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL CONTENDO
FÍLER DE BRITAGEM: CARACTERÍSTICAS DAS
PARTÍCULAS, FLOCULAÇÃO E REOLOGIA**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutor”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, dia 10 de março de 2017.

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Luiz Roberto Prudêncio Jr. Dr.
Orientador - Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Janaíde Cavalcante Rocha, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Wellington Longuini Repette, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fernando Pelisser, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rafael Giuliano Pileggi, Dr.
Universidade de São Paulo

Prof.^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin, Dr.^a
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Videoconferência)

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas foram importantes para o desenvolvimento desta tese, seja pelas discussões sobre o tema, seja pelas orientações, amizades, pelo apoio, pelas doações de material e pela doação de tempo. Gostaria de expressar minha gratidão por estarem comigo nessa jornada.

Ao professor Prudêncio, que, mais que um professor, se tornou um amigo. Obrigada por ter me recebido no GTec e por confiar no meu trabalho para desenvolver muitas pesquisas, além dos meus projetos de dissertação e tese. Tudo o que vivenciei no GTec durante esses anos foi essencial para chegar até aqui. Obrigada por ser realmente um orientador e incentivador desta tese, por facilitar as conversas, pela sua disponibilidade frequente no GTec; por me apoiar a fazer doutorado sanduíche e pelo suporte financeiro para enviar mais de uma tonelada de materiais para os EUA. Enfim, realmente eu não poderia esperar um orientador melhor.

I need to thank Professor Raissa Douglas Ferron, my supervisor in The University of Texas, USA, where I developed an important part of this thesis. Thanks for having received me so friendly in the lab, when I was just a stranger. The year that I stayed in UT was amazing and it was an honor for me.

Agradeço também ao professor Rafael Pileggi, que me recebeu na USP para a realização dos primeiros testes com reômetro. Muito obrigada pela sua disponibilidade em discutir meu trabalho e meus resultados.

Aos professores da banca, que gentilmente aceitaram avaliar o presente trabalho e oferecer suas importantes contribuições: Prof.^a Denise, Prof. Fernando, Prof.^a Janaíde, Prof. Malik, Prof. Rafael e Prof. Wellington.

À Universidade Federal de Santa Catarina, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, a seus professores e funcionários.

Aos amigos do GTec: Eduardo, Felipe, Matheus, Paulo, Lucas, Guilherme, Fernanda, Paula, Regina e Henrique. O nosso convívio diário nos tornou colegas de trabalho e amigos para toda a vida! Agradeço especialmente aos meninos, pela ajuda indispensável nos ensaios laboratoriais. Foi muito esforço envolvido nos meus concretos, eu sei.

À Lidi e ao César, pelas horas de descontração, longas conversas, jantas e *sushis*. Da UFSC para a vida!

Ao Victor, pela sua enorme gentileza em me auxiliar durante meus ensaios na USP.

Ao Felipe, por ter feito os desenhos dos ensaios de CAA.

To my UT co-workers: Niko, Jose, Steven, Fred, Raquel, Mike, Ramya and Trevor. Thank you for welcoming us so well, help us with the equipments and make our stay in Austin more enjoyable.

To Fernando, Dalia, Dorian and Christian, and their dear parents, who made their home, our home.

À toda a minha família, especialmente minha mãe, Maria Helena; meu pai, Hermínio; minha irmã, Rúbia; e meu afilhado, Bernardo. Obrigada pela compreensão por eu estar sempre tão longe, por eu não estar presente nos aniversários, por, na maioria das vezes, eu ser apenas uma imagem e um áudio no celular, e por, principalmente, serem meu porto seguro.

Ao Ronaldo, por compartilhar comigo mais essa etapa, como tantas outras que vivenciamos juntos desde a faculdade. Você fez comigo esse trabalho, desde o início até o fim. Desculpe por ter detonado sua coluna e deixado seus braços roxos por erguer meus pesados concretos nos EUA, sempre evitando que eu fizesse muito esforço. Obrigada pelas ideias, discussões e pelo carinho diário. Sem você, definitivamente, eu não teria conseguido.

À professora Gioavanna Gava, por ter me iniciado na pesquisa, pela amizade, e pelo incentivo de sempre.

À Itambé, pela doação de todo o cimento utilizado nesta pesquisa.

À Grace, na pessoa do Eng.º Denis, pela doação do aditivo, pelo suporte e pelas discussões.

À Infracul Agregados, pela doação do fíler gnáissico, e à LZK Construtora, pela doação do fíler diabásico.

À CAPES, pelo indispensável apoio financeiro.

Por último, mas não menos importante, a Deus, pelas oportunidades que me concedeu, pela família que me deu e pelas pessoas que colocou no meu caminho.

Muito obrigada!

“Não é sobre chegar no topo do mundo e saber que venceu, é sobre escalar e sentir que o caminho te fortaleceu.”

(Ana Vilela, 2017)

RESUMO

Na fabricação de concreto autoadensável (CAA), é necessária grande parcela de finos para promover estabilidade na mistura. Atualmente, o fíler calcário é o único material fino inerte efetivamente empregado em CAA. Fílers de outras origens mineralógicas foram pouco investigados para essa aplicação, e a utilização desse subproduto em pedreiras é um grande problema em relação aos aspectos de armazenamento, poluição ambiental e riscos para a saúde. Nesta tese, foi estudado o emprego de fílers de britagem de origem diabásica e gnáissica em substituição ao fíler calcário em misturas cimentícias. Foram analisadas as propriedades das partículas e a interação delas em pastas e em CAA. A forma das partículas obtidas em imagem de MEV, adsorção superficial, distribuição granulométrica e mineralogia dos fílers de britagem foram analisadas como fatores influentes na hidratação do cimento, reologia e cinética de floculação de pastas. Além disso, foram investigadas a reologia e as propriedades no estado endurecido do CAA: resistência mecânica, módulo de elasticidade e qualidade superficial de peças pré-moldadas. Com esse estudo, pôde-se concluir que a presença dos diferentes tipos de fílers de britagem altera as propriedades físicas e mecânicas das misturas, além de intervir na cinética de reação do cimento. Os fílers diabásicos e gnáissicos apresentam a forma das partículas mais lamelares e maior adsorção do que o fíler calcário. No entanto, essas características desfavoráveis puderam ser compensadas pelo uso de maior teor de aditivo superplastificante, sendo possível produzir misturas com parâmetros reológicos similares àquelas contendo fíler calcário. Em relação à floculação, os ensaios de FBRM (*Focused Beam Reflectance Measurement*) indicaram que a presença de partículas de gnaisse conduz à menor tendência de aglomeração nas misturas, enquanto que o fíler calcário aumenta essa tendência. Concretos contendo fílers diabásico e gnáissico conduziram a maiores módulos de elasticidade, resistência à tração e resistência à compressão (cerca de 20% superior) quando comparados aos concretos contendo fíler calcário. Dessa forma, os resultados mostraram que fílers de origem diabásica e gnáissica podem ser utilizados com sucesso na fabricação de CAA, com potencial inovador para melhorar a sustentabilidade na construção civil.

Palavras-chave: Concreto autoadensável. Fíler de britagem. Reologia. Floculação.

ABSTRACT

In the manufacture of self-compacting concrete (SCC) a large amount of fines is required to promote mixture stability. Nowadays, limestone is the only inert fine material effectively used in SCC. Few or no studies have been conducted on other rock types for this application. In quarries, the utilization of byproducts of stone crushers is a big problem from the aspects of storage, environmental pollution and health hazards. In this work, the effects of limestone filler, diabasic, and gneissic quarry powder on the properties of fresh cement pastes and SCC were investigated. The shape of the particles obtained by SEM, surface adsorption, particle size distribution and mineralogy were evaluated by rheological methods and flocculation kinetics. In addition, properties in the hardened state of SCC were investigated: mechanical strength, elastic modulus and surface quality of precast elements. It can be concluded that the presence of the different types of quarry dusts alters the physical and mechanical properties of the mixtures, besides intervening in the cement hydration. Diabasic and gneissic quarry-dusts have less rounded particles and higher adsorption than the limestone filler. However, these unfavorable characteristics could be compensated by the use of higher superplasticizer admixture content, and it was possible to produce mixtures with rheological parameters very similar to those containing limestone filler. About flocculation, the presence of gneissic particles led to a lower agglomeration tendency, whereas limestone filler increased this tendency. SCC containing diabasic and gneissic powder showed higher compressive strength (20% higher) and elastic modulus than SCC containing limestone filler. It was found that diabasic and gneissic quarry powders could be used successfully for producing SCC, with innovative potential to improve sustainability in construction.

Keywords: Self-compacting concrete. Quarry powder. Rheology. Flocculation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ensaio de Slump Flow.....	36
Figura 2: Funil V	38
Figura 3: Caixa L.....	40
Figura 4: Anel J.....	41
Figura 5: Caixa U.....	42
Figura 6: Coluna de Segregação.....	44
Figura 7: Ensaio rápido de resistência à segregação estática de CAA.....	46
Figura 8: Acabamento superficial das placas de concreto autoadensável.....	59
Figura 9: Falhas (vazios) na superfície – concretos com mesmo teor de argamassa.....	60
Figura 10: Falhas (vazios) na superfície – concretos com teor de argamassa distintos (supondo mesma viscosidade).....	60
Figura 11: Referência para imperfeições no concreto: superfície 1 tem o menor percentual de imperfeições, enquanto que a superfície 7 apresenta o maior percentual.....	62
Figura 12: Comportamento reológico de diferentes fluídos.....	65
Figura 13: Curvas de fluxo e curvas de viscosidade.....	67
Figura 14: Reologia de pastas de cimento convencional e autoadensável, com comportamento não espessante e espessante, respectivamente.....	68
Figura 15: Ações nas partículas (a) durante o fluxo; (b) em repouso.....	74
Figura 16: Representação esquemática baseada em resultados de reometria rotacional do impacto de diferentes teores de água, ar, sílica ativa (partículas ultrafinas) e dispersante sobre a viscosidade e a tensão de escoamento de argamassas. As setas indicam o aumento do parâmetro.....	76
Figura 17: Efeito da forma das partículas na reologia das misturas.....	77
Figura 18: Reômetro ICAR.....	80
Figura 19: Reômetro Poli-USP.....	81
Figura 20: Esquema do mecanismo de repulsão estérica.....	85
Figura 21: Retirada e descarte dos filer por via úmida: (a) roda d'água; (b) bacias de decantação.....	93
Figura 22: Descarte do filer de britagem em pedreiras: processo de retirada do filer por via seca.....	93
Figura 23: Imagens de microscopia eletrônica de varredura para determinação da forma das partículas.....	99
Figura 24: Partículas com formas arredondadas, mas com diferentes angularidades e texturas.....	99
Figura 25: Ilustração de algumas medidas básicas para análise de imagem: a área com traços paralelos (hachura) representa a partícula, e seu contorno representa o perímetro da partícula, o contorno mais externo representa o perímetro do polígono que delimita a partícula.....	101
Figura 26: Imagens de grãos de filers calcário e silicoso obtidas por MEV.	103
Figura 27: Relação entre o tamanho dos flocos e a mudança da velocidade de agitação da suspensão para três tipos de flocos.....	114

Figura 28: Distribuição granulométrica dos agregados.	118
Figura 29: Ensaio de azul de metileno.	121
Figura 30: Ensaio de adsorção de azul de metileno: ponto final da titulação. .	122
Figura 31: Interface do software Image Tool 3.0.	123
Figura 32: Determinação das formas das partículas por imagens de MEV: (a) imagem obtida por MEV; (b) imagem binária com as partículas pré-selecionadas para análise.	124
Figura 33: Seleção das partículas da imagem MEV: (a) imagem obtida por MEV; (b) primeira parte das partículas selecionadas para análise; (c) segunda parte das partículas selecionadas para análise.	124
Figura 34: Esquema explicativo da nomenclatura das pastas unitárias.	127
Figura 35: Esquema explicativo da nomenclatura de pastas binárias (todas com relação água/finos de 1,0).	127
Figura 36: Misturador empregado na confecção de pastas, prescrito pela ASTM C1738.	130
Figura 37: Minislump.	131
Figura 38: Ensaio de minislump em pastas.	132
Figura 39: Calorímetro de condução isotérmico empregado.	133
Figura 40: Determinação do período de indução.	133
Figura 41: Esquema do aparelho FBRM.	137
Figura 42: Esquema da sonda FBRM.	137
Figura 43: Sonda FBRM e misturador utilizado nos ensaios.	138
Figura 44: Ensaios reométricos: (a) reômetro utilizado; (b) recipiente e geometria vane.	139
Figura 45: Componentes do CAA. A seta indica os componentes que serão alterados neste trabalho.	142
Figura 46: Concretos dosados.	142
Figura 47: Esquema explicativo da nomenclatura dos CAAs.	143
Figura 48: Ensaios realizados em concreto.	145
Figura 49: Ensaios tecnológicos: (a) Espalhamento; (b) Anel J; (c) Funil V; (d) Ensaio de resistência à segregação.	146
Figura 50: Cuidados durante a remoção do concreto para reutilização da amostra.	147
Figura 51: Reômetro ICAR.	148
Figura 52: Gráfico típico do teste para a determinação da tensão de escoamento estática.	148
Figura 53: Repetibilidade dos ensaios reológicos: CAA contendo fíler calcário in natura (L0).	151
Figura 54: Repetibilidade dos ensaios reológicos: CAA contendo fíler diabásio in natura (D0).	151
Figura 55: Formas para moldagem das placas de concreto.	152
Figura 56: Processo das placas de concreto para análise da qualidade superficial.	153
Figura 57: Distribuição granulométrica a laser do fíler calcário com D ₅₀ de 38, 25 e 16 µm; e distribuição granulométrica do cimento.	156

Figura 58: Distribuição granulométrica a laser do filer diabásico com D_{50} de 33, 24 e 16 μm ; e distribuição granulométrica do cimento.	156
Figura 59: Distribuição granulométrica a laser do filer gnáissico com D_{50} de 34, 25 e 16 μm ; e distribuição granulométrica do cimento.	157
Figura 60: Imagens de MEV de cada tipo de filer empregado.	158
Figura 61: Ensaio de azul de metileno.	161
Figura 62: Distribuição granulométrica da composição: cimento + filers com D_{50} entre 33-38 μm . Volume de finos de 200 litros/ m^3 , relação água/finos de 1,0.	162
Figura 63: Distribuição granulométrica da composição: cimento + filers com D_{50} entre 24-25 μm . Volume de finos de 200 litros/ m^3 , relação água/finos de 1,0.	163
Figura 64: Distribuição granulométrica da composição: cimento + filers com D_{50} de 16 μm . Volume de finos de 200 litros/ m^3 , relação água/finos de 1,0....	163
Figura 65: Abertura no minislump versus tensão de escoamento estática (medida com 10 minutos) das pastas dosadas com aditivo fixo.	168
Figura 66: Abertura no minislump versus tensão de escoamento dinâmica (medida com 10 minutos) das pastas dosadas com aditivo fixo.	168
Figura 67: Abertura no minislump versus viscosidade (medida com 10 minutos) das pastas dosadas com aditivo fixo.	169
Figura 68: Curvas de calorimetria de condução das pastas analisadas em função da massa de cimento.	171
Figura 69: Modelo de crescimento bidimensional que ilustra o conceito da colisão de partículas, diminuindo a taxa de reação.	177
Figura 70: Resultados de FBRM de pastas contendo calcário: comportamento em relação à intensidade de agitação. (a) número de cordas; (b) tamanho médio das cordas.	180
Figura 71: Resultados de FBRM de pastas com o mesmo D_{50} e mesmo volume de finos, mas diferentes mineralogias. (a) número de cordas; (b) tamanho médio das cordas.	182
Figura 72: Resultados de FBRM para pastas contendo filers com área superficial BET similar. (a) e (c) número de cordas; (b) e (d) tamanho médio das cordas.	183
Figura 73: Resultados de FBRM de pastas dosadas com filers de diferentes D_{50} , mesma mineralogia e mesmo teor de filer. (a) filer calcário; (b) filer diabásico; (c) filer gnáissico.	185
Figura 74: Resultados de FBRM das pastas binárias. (a) e (b) Número de cordas e Tamanho médio das cordas das pastas contendo filer diabásico e calcário; (c) e (d) Número de cordas e Tamanho médio das cordas das pastas contendo filer gnáissico e calcário.	189
Figura 75: Tensão de escoamento estática das pastas dosadas com aditivo variável.	194
Figura 76: Tensão de escoamento dinâmica das pastas dosadas com aditivo variável.	196
Figura 77: Viscosidade plástica das pastas dosadas com aditivo variável.	198

Figura 78: Resultados de FBRM de pastas com diferentes mineralogias de filer, mesmo D_{50} e mesma relação água/finos - (a) e (b): D_{50} de 24-25 μm e relação água finos igual a 1,0; (c) e (d): D_{50} de 15-16 μm e relação água finos igual a 1,1.	201
Figura 79: Resultados de FBRM em função da relação água/finos da pasta (fixando o tipo e o D_{50} dos filers). (a) Número de cordas; (b) Tamanho médio das cordas.	203
Figura 80: Resultados de FBRM em função do D_{50} fixando a relação água/finos em 0,9: (a) e (b) pastas dosadas com filer calcário (L); (c) e (d) pastas dosadas com filer diabásico (D); (e) e (f) pastas dosadas com filer gnáissico (G).	204
Figura 81: Resultados de FBRM para pastas contendo finos com área superficial BET semelhante, fixando a relação água/finos da mistura em 1,0. (a) e (b) $BET \approx 1200 \text{ m}^2/\text{kg}$; (c) e (d) $BET \approx 2.700 \text{ m}^2/\text{kg}$	207
Figura 82: Termogravimetria da pasta L0.2 (com filer calcário).	208
Figura 83: Termogravimetria da pasta D1.2 (com filer diabásico).	209
Figura 84: Termogravimetria da pasta G1.2 (com filer gnáissico).	209
Figura 85: Termogravimetria da pasta C2.2 (dosada somente com cimento).	210
Figura 86: Comparação dos resultados de termogravimetria das pastas testadas.	211
Figura 87: CAA apresentando segregação.	214
Figura 88: Relação entre a demanda de aditivo dos concretos e as características das partículas. Aditivo versus (a) relação de aspecto; (b) angularidade; (c) rugosidade; (d) área superficial BET.	216
Figura 89: Aparência de alguns CAAs dosados com diferentes tipos de filer e mesmo volume de finos.	219
Figura 90: Ensaio de anel J de misturas contendo filer diabásico e gnáissico.	221
Figura 91: Estabilidade da mistura G2.180 – a) borda da mistura no slump flow; b) corpo de prova moldada com concreto G2.180 após o rompimento, sem indícios de segregação.	222
Figura 92: Tensão de escoamento estática dos CAAs.	223
Figura 93: Curvas de fluxo dos CAAs dosados com filer medidas no reômetro ICAR.	225
Figura 94: Curva de fluxo dos CAAs dosados somente com cimento.	227
Figura 95: Tensão de escoamento determinada pelo modelo Bingham modificado.	228
Figura 96: Tensão de escoamento dinâmica dos CAAs determinada pelo modelo de Bingham.	232
Figura 97: Viscosidade plástica dos CAAs determinada pelo modelo de Bingham.	233
Figura 98: Relação entre viscosidade e tensão de escoamento dos CAAs.	234
Figura 99: Relação entre a tensão de escoamento dinâmica determinada pelos modelos de Bingham e Bingham modificado.	236
Figura 100: Relação entre a tensão de escoamento estática e a abertura do slump flow dos CAAs.	237

Figura 101: Relação entre a tensão de escoamento dinâmica determinada por Bingham modificado e a abertura do slump flow dos CAAs.....	238
Figura 102: Relação entre tensão de escoamento dinâmica obtida pelo modelo de Bingham e a abertura no slump flow.....	238
Figura 103: Relação entre viscosidade e abertura no slump flow.	239
Figura 104: Relação entre tensão de escoamento estática e tempo de escoamento no funil V.....	240
Figura 105: Relação entre tensão de escoamento dinâmica calculada por Bingham modificado e tempo de escoamento no funil V.	240
Figura 106: Relação entre tensão de escoamento dinâmica determinada pelo modelo de Bingham e tempo de escoamento no funil V.....	241
Figura 107: Relação entre viscosidade e tempo de escoamento no funil V.	242
Figura 108: Resultados de resistência à compressão dos CAAs.	243
Figura 109: Módulo de elasticidade dos CAAs.	246
Figura 110: Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos CAAs.	248
Figura 111: Placas de CAA moldadas para análise da qualidade superficial.	249
Figura 112: Qualidade superficial das placas de concreto medida por meio da porcentagem de bolhas superficiais.	250
Figura 113: Relação entre a qualidade superficial das placas de concreto e a tensão de escoamento dinâmica das misturas, determinada pelo modelo de Bingham.....	251
Figura 114: Relação entre a qualidade superficial das placas de concreto e a viscosidade das misturas.....	252
Figura 115: Gráfico orientativo para dosagem de CAA em função dos parâmetros reológicos de Bingham.	253
Figura 116: Relação entre o teor de aditivo empregado nos estudos em pastas e em CAAs.	256
Figura 117: Relação entre a reometria de pastas e concretos.	257

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação e aplicações do CAA conforme resultados do slump flow.....	37
Tabela 2: Classificação dos concretos quanto à viscosidade aparente.....	38
Tabela 3: Classificação quanto à habilidade passante.....	41
Tabela 4: Valores do índice de estabilidade visual.....	43
Tabela 5: Classes de resistência à segregação do CAA em função de sua aplicação.....	45
Tabela 6: Grau de resistência à segregação estática.....	46
Tabela 7: Valores típicos de proporcionamento de CAA.....	49
Tabela 8: Resumo e comentários sobre métodos de dosagem para CAA.....	51
Tabela 9: Razões do surgimento de bolhas superficiais e formas de prevenir ou corrigir.....	62
Tabela 10: Casos particulares do modelo HB.....	67
Tabela 11: Características dos principais finos usados em CAA.....	90
Tabela 12: Fenômenos térmicos característicos observados no aquecimento de pastas de cimento em atmosfera inerte.....	111
Tabela 13: Caracterização do aditivo.....	116
Tabela 14: Especificação do aditivo.....	117
Tabela 15: Caracterização física dos agregados utilizados.....	118
Tabela 16: Análise química dos filers de britagem.....	119
Tabela 17: D_{50} do cimento empregado e de amostras de filer calcário.....	119
Tabela 18: Porcentagem passante em determinados tamanhos de partículas de filer diabásico com diferentes ciclos de moagem.....	120
Tabela 19: Proporções dos concretos para 1m^3	125
Tabela 20: Parâmetros fixos entre concretos e pastas.....	126
Tabela 21: Proporções dos materiais para a confecção de pastas unitárias.....	128
Tabela 22: Proporções dos materiais empregados em pastas com dois tipos de filer (pastas binárias).....	129
Tabela 23: Proporcionamento dos materiais para confecção de 1 m^3 de concreto.....	143
Tabela 24: Desvio padrão e coeficiente de variação dos parâmetros reológicos medidos nos ensaios de repetibilidade.....	151
Tabela 25: BET, D_{50} de todos os finos utilizados e o tempo de moagem necessário para a obtenção da granulometria desejada.....	155
Tabela 26: Análise das partículas de filer: relação de aspecto, angularidade e rugosidade.....	158
Tabela 27: ANOVA - influência de mineralogia e do D_{50} na relação de aspecto, angularidade e rugosidade.....	159
Tabela 28: Adsorção por azul de metileno dos filers.....	160
Tabela 29: Resultados do estado fresco das pastas dosadas com aditivo fixo.....	165
Tabela 30: ANOVA - influência da mineralogia, D_{50} e teor de filer presente nos parâmetros reológicos das pastas dosadas com aditivo fixo.....	167

Tabela 31: Resultados numéricos do período de indução e calor total liberado em 40 horas.....	176
Tabela 32: ANOVA - influência da mineralogia, D_{50} e teor de fíler presente nos resultados de calorimetria das pastas dosadas com aditivo fixo.	179
Tabela 33: Resultados do estado fresco das pastas binárias com aditivo fixo. ...	187
Tabela 34: Parâmetros reológicos das pastas dosadas com aditivo variável. ...	190
Tabela 35: ANOVA - influência da mineralogia, D_{50} , e teor de fíler presente no teor de aditivo necessário para manter a mesma abertura no minislump das pastas.	191
Tabela 36: ANOVA para os resultados de tensão de escoamento estática.	195
Tabela 37: ANOVA para os resultados de tensão de escoamento dinâmica das pastas contendo aditivo variável.	197
Tabela 38: ANOVA para resultados de viscosidade de pastas com aditivo variável.	199
Tabela 39: Quantidade de aditivo usado nos CAAs, abertura no slump flow e estabilidade visual.....	213
Tabela 40: Parâmetros reológicos dos CAAs apresentando segregação.	214
Tabela 41: ANOVA - influência da mineralogia, D_{50} e teor de fíler presente na demanda de aditivo dos CAAs.	215
Tabela 42: Resultado dos ensaios tecnológicos dos CAAs.....	218
Tabela 43: ANOVA - influência da mineralogia, D_{50} e volume fíler presente nos parâmetros reológicos dos concretos.	224
Tabela 44: Parâmetros reológicos obtidos pelo modelo Bingham modificado.	227
Tabela 45: ANOVA - influência da mineralogia, D_{50} e volume fíler presente nos parâmetros reológicos obtidos pelo modelo de Bingham modificado.	230
Tabela 46: ANOVA - influência da mineralogia, D_{50} e volume fíler presente nos parâmetros reológicos de Bingham dos CAAs.	235
Tabela 47: ANOVA para resultados de resistência à compressão dos CAAs.	245
Tabela 48: ANOVA para resultados de módulo de elasticidade dos CAAs. ...	247
Tabela 49: ANOVA para resultados de tração por compressão diametral dos CAAs.	248
Tabela 50: ANOVA para as porcentagens de bolhas superficiais dos CAAs.	251
Tabela 51: Impacto no custo de cimento e aditivo superplastificante com a utilização dos filers alternativos em CAAs (preços em dólares - US\$).	255
Tabela 52: Parâmetros reológicos das pastas e dos CAAs estudados.	259

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	relação água/cimento
a/f	relação água/finos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ANOVA	Análise de Variância (Estatística)
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials</i>
CAA	Concreto autoadensável
CCV	Concreto Convencional
CPV ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CPV ARI RS	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial e Resistente a Sulfatos
dTG	Termogravimetria derivada
EFNARC	<i>European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete System</i>
F	Distribuição de Fisher (estatística)
FBRM	<i>Focused Beam Reflectance Measurement</i>
FF	Fator de Forma
GL	Grau de liberdade (estatística)
GTec	Grupo de Tecnologia e Materiais à base de Cimento Portland
HB	Herschel-Bulkley
ICAR	<i>International Center for Aggregates Research</i>
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MF	Módulo de Finura
MQ	Médias quadradas (estatística)
NBR	Norma Brasileira Registrada
Poli-USP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Sp	Superplastificante
SQ	Soma dos quadrados (estatística)
TG	Termogravimetria
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UT	<i>The Univeristy of Texas</i>
VSI	<i>Visual Stability Index Value</i> (valores do índice de estabilidade visual)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 JUSTIFICATIVA	30
1.2 OBJETIVOS.....	32
1.2.1 Objetivo Geral.....	32
1.2.2 Objetivos Específicos	33
2 REVISÃO DA LITERATURA	35
2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL	35
2.2 CAA: PROPRIEDADES E CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO	35
2.2.1 Capacidade de Fluxo.....	36
2.2.2 Habilidade Passante.....	39
2.2.3 Resistência à Segregação	42
2.3 CAA: PROPRIEDADES DO ESTADO ENDURECIDO	46
2.3.1 Resistência à Compressão	47
2.3.2 Resistência à Tração	47
2.3.3 Módulo de Elasticidade	48
2.4 MÉTODOS DE DOSAGEM	49
2.5 USO DE CAA NA INDÚSTRIA DE PRÉ-FABRICADOS.....	57
2.5.1 Defeito na Superfície do CAA	58
2.6 ASPECTOS REOLÓGICOS DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....	63
2.7 CATEGORIAS REOLÓGICAS	64
2.7.1 Perfis Reológicos	65
2.7.2 Tensão de Escoamento e Viscosidade	71
2.7.3 Fatores que Influenciam a Reologia do CAA	75
2.7.4 Reômetros de Concreto	78
2.8 MATERIAIS CONSTITUINTES DO CAA.....	81
2.8.1 Cimento.....	81
2.8.2 Agregados	82
2.8.3 Aditivos	83

2.8.4 Finos.....	87
2.9 USO DE FÍLER DE BRITAGEM.....	92
2.10 PROPRIEDADES DOS FINOS.....	96
2.10.1 Forma das Partículas.....	97
2.10.2 Fenômenos de Superfície.....	103
2.10.3 Influência na Hidratação do Cimento.....	106
2.10.4 Floculação de Partículas.....	111
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	115
3.1 ESTUDOS PRELIMINARES.....	115
3.2 MATERIAIS.....	116
3.2.1 Cimento.....	116
3.2.2 Aditivos.....	117
3.2.3 Agregados.....	117
3.2.4 Finos – Fílers.....	118
3.3 MÉTODOS.....	124
3.3.1 Estudo em Pastas.....	124
3.4 ESTUDO EM CONCRETOS.....	140
3.4.1 Determinação dos Traços.....	140
3.4.2 Mistura.....	144
3.4.3 Ensaios Realizados.....	145
3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	154
4 RESULTADOS.....	155
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS FINOS - FÍLERS.....	155
4.1.1 Forma das Partículas.....	157
4.1.2 Adsorção por Azul de Metileno.....	160
4.1.3 Composição dos Finos nas Misturas.....	162
4.2 RESULTADOS DO ESTUDO DE PASTAS.....	164
4.2.1 Resultado das Pastas Unitárias com Aditivo Fixo.....	164
4.2.2 Resultados das Pastas Binárias com Aditivo Fixo.....	187
4.2.3 Pastas Unitárias com Aditivo Variável.....	190

4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CAA NO ESTADO FRESCO	212
4.3.1 Estabilidade Visual	212
4.3.2 Ensaio Tecnológico	218
4.3.3 Reometria	222
4.3.4 Correlação entre Reologia e Testes Tecnológicos.....	237
4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CAA NO ESTADO ENDURECIDO	242
4.4.1 Resistência à Compressão	242
4.4.2 Módulo de Elasticidade Estático à Compressão.....	245
4.4.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral	247
4.4.4 Qualidade Superficial	249
4.5 SUBSTITUIÇÃO DO FÍLER CALCÁRIO PELOS FÍLERS ALTERNATIVOS	254
4.6 COMPARAÇÃO ENTRE O ESTUDO DE PASTAS E CONCRETOS ...	255
5 CONCLUSÕES	261
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	261
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	265
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	267
7 APÊNDICES E ANEXOS.....	293

1 INTRODUÇÃO

Durante a última década, a tecnologia de concreto sofreu um enorme avanço com a introdução efetiva do concreto autoadensável (CAA) em vários setores da construção civil. Seus vários benefícios impulsionaram o seu emprego de forma ampla em um curto espaço de tempo, uma característica incomum na indústria da construção, dada a complexidade de sua organização. Fica claro, a partir da multiplicação de publicações – tanto em periódicos quanto nas principais conferências internacionais –, que o volume de pesquisas sobre esse tipo de concreto tem sido cada vez maior e vem disseminando-se por todo o mundo.

Dadas as suas características, um dos principais vetores do CAA são as indústrias de pré-fabricados, as quais têm experimentado sucessivos aumentos no emprego desse tipo de concreto ao longo dos últimos anos. Para esse setor, o CAA apresenta várias vantagens em relação ao concreto convencional vibrado, resultando em aumento da velocidade de produção de peças; redução das equipes de concretagem; redução de gastos com manutenção de formas, energia elétrica e manutenção de vibradores; melhoria do conforto acústico das fábricas; e melhoria do acabamento superficial das peças, entre outras. A gama de benefícios oferecida pelo CAA vai além dos aspectos fundamentais da qualidade e da produtividade; ele abre caminho para a automação do processo e permite a construção de estruturas de concreto de maneira mais eficiente.

No Brasil, o estado de Santa Catarina apresenta um destaque no uso desse tipo de concreto em indústrias de pré-fabricados. Quatro empresas de médio a grande porte localizadas em diferentes cidades (Criciúma, Chapecó, Ibirama e Ituporanga) e que comercializam seus produtos por toda a Região Sul do Brasil produzem, mensalmente, mais de 10.000 m³ de concreto autoadensável.

Entretanto, apesar dessa substancial produção e de uma vasta bibliografia disponível sobre o tema, muitas questões ainda dificultam a obtenção de um material com a qualidade, a regularidade e a economia que uma indústria necessita. Embora atualmente o custo do CAA esteja muito próximo ao do concreto convencional, ainda existe a falsa impressão de uma elevação nos custos, uma vez que o uso do CAA está associado ao uso de aditivos químicos de última geração e, eventualmente, à utilização de maior quantidade de cimento Portland. Para minimizar esse fator, é comum o uso de adições minerais finamente divididas, visando diminuir a quantidade de cimento necessária para garantir o volume de finos que o CAA demanda.

As pozolanas (cinza volante, metacaulim, sílica ativa, cinza da casca do arroz), as escórias de alto forno, as areias com baixo módulo de finura (abaixo de 1,2) e o fíler calcário são os principais materiais finos empregados em CAA. Apesar de alguns desses materiais serem subprodutos de outros processos industriais, atualmente, eles não representam, necessariamente, um passivo ambiental, pois praticamente todo o volume produzido é absorvido pela indústria cimenteira. Esse cenário atual estimula a busca por novas fontes de matérias-primas que apresentem volume e preço condizentes com a demanda futura, viabilizando seus estudos em concreto. Um dos resíduos industriais que apresenta tais características e que atualmente possui pouca ou nenhuma destinação é o material pulverulento oriundo do processo de britagem de rochas.

Na produção de areia de britagem, para atender à normalização e aos requisitos de desempenho, a maioria das pedreiras retira parte do material pulverulento presente no agregado. Cabe destacar que a produção de material pulverulento dentro da planta de britadores é inerente ao processo, mas acentua-se na fabricação da areia de britagem.

Dados de uma pedreira localizada na Grande Florianópolis indicam que, a cada 50 toneladas de areia de britagem produzida, cerca de 0,7 a 1 tonelada consiste no material fino retirado no processo de beneficiamento. Esse fato não ocorre só no Brasil, mas no mundo todo. Segundo Galetakis, Alevizos e Leventakis (2012), na Grécia, são produzidas cerca de 10 milhões de toneladas por ano de finos de britagem devido à exploração de pedreiras, representando cerca de 10% da produção total de agregados do país. Na Grã-Bretanha, são produzidas, anualmente, 41,3 milhões de toneladas desses finos (MANNING; VETTERLEIN, 2004). Nos Estados Unidos, estima-se que mais de 100 milhões de toneladas de finos são armazenadas como resíduos em cada ano (HUDSON, 2003 apud STEWART et al., 2006).

Na grande maioria dos casos, as pedreiras encontram pouco ou nenhum destino para esse resíduo, que é depositado nos pátios, formando um passivo ambiental. O seu descarte é problemático, o seu armazenamento gera custos e o material pode contaminar o ar e a água devido à sua natureza extremamente fina. Dessa forma, o uso desse subproduto possui importância ambiental, econômica e operacional. Por vezes, é utilizado para compor base e sub-base de pavimentos ou linhas de transmissão subterrâneas, pois trata-se de um material de baixo custo. No entanto, a sua aplicação para fins de concretagem ainda é muito limitada, uma vez que no concreto convencional a incorporação de

grandes volumes de finos é restringida devido à maior demanda de água na mistura.

Vale salientar que esses finos, aqui chamados de fílers de britagem, são o produto final de uma planta de britadores, ou seja, esse material carrega, no seu processo de fabricação, um elevado consumo de energia, sugerindo uma aplicação condizente com seu histórico de produção.

Uma das aplicações possíveis e eficientes para esse material é seu emprego como promotor de viscosidade em CAA, que necessita de uma grande parcela de finos na sua constituição (cerca de 200 litros de finos por m³ de concreto produzido) (EFNARC, 2005; FELEKOGLU, 2007). Alguns estudos já foram realizados sobre tal tema, sendo que a maioria deles se concentra no fíler calcário. Finos de outras rochas foram pouco estudados para CAA e as pesquisas que existem não se concentram em sua mineralogia, na interferência na cinética de hidratação do cimento e nos processos de floculação, tampouco na determinação dos parâmetros reológicos do concreto com eles confeccionados.

Sabe-se que a qualidade do concreto e a garantia da trabalhabilidade e estabilidade adequadas estão intimamente ligadas às propriedades reológicas da mistura fresca. Além disso, a reologia interfere também nas propriedades mecânicas e de durabilidade, já que é possível atenuar falhas devido às propriedades de fluxo.

Apesar de empregarem os conceitos da reologia, os métodos de dosagem mais difundidos atualmente não são capazes de determinar objetivamente faixas de tensão de escoamento e a viscosidade ideais que um CAA deve apresentar para ser adequado a determinada aplicação. Ao invés disso, os métodos preconizam a realização simultânea de diversos ensaios para avaliar a qualidade do material, especialmente durante o processo de dosagem em laboratório. Esses ensaios são morosos, diminuem a produtividade e são muito influenciados pelo operador, dificultando a caracterização da qualidade do concreto durante a sua produção e reduzindo a sua confiabilidade.

Embora os reômetros destinados a misturas de concreto estejam disponíveis há décadas, ainda não há um conhecimento aprofundado da correlação dos valores medidos nesses equipamentos e da qualidade do CAA efetivamente produzido, como sua segregação, seus autoadensamento e sua qualidade superficial. Como o CAA pode ser empregado em diversas aplicações, é razoável pensar que cada aplicação tenha a sua peculiaridade, o que torna necessária a investigação de propriedades reológicas adequadas para aquela situação específica.

Diante do exposto, neste trabalho, foram realizados estudos acerca da utilização de fílers de britagem alternativos na dosagem de concretos

autoadensáveis destinados a fábricas de pré-moldados. Além do fíler calcário, utilizado como material de referência, foram estudados fílers de origem diabásica e gnáissica. Embora existam alguns poucos estudos sobre a incorporação de fíler gnáissico em CAA, não há, até o momento, estudos acerca de fílers de origem diabásica, que é uma formação rochosa muito recorrente no Sul do Brasil.

Os estudos desenvolvidos nesta tese visam melhorar a compreensão das interações das partículas finas no concreto e as propriedades reológicas das misturas, objetivando um aprimoramento das técnicas de processamento e um desempenho satisfatório no estado fresco e endurecido do CAA, além da proposição de um emprego adequado para resíduos das pedreiras.

1.1 JUSTIFICATIVA

A indústria de concreto pré-fabricado tem elevado o uso de CAA para a confecção de elementos estruturais em todo o mundo, inclusive no Brasil. Na Holanda e na França, estima-se que mais de 50% do concreto empregado nessas empresas já sejam autoadensáveis (REPETTE, 2011). No entanto, apesar de ser um material muito estudado nos últimos anos, ainda existem várias lacunas que afetam o custo de produção, a produtividade e os critérios de qualidade. Além disso, fatores ambientais e de sustentabilidade dos processos são importantes na construção civil e devem ser incorporados aos estudos técnicos/científicos. O uso de materiais alternativos para a confecção de CAA visando à redução no uso de recursos naturais ainda é pouco explorado, e pouco sabe-se sobre o comportamento de misturas cimentícias contendo fílers de britagem de diferentes origens mineralógicas, que são resíduos de pedreiras. Esses fatores justificam a tese desenvolvida e, apesar de já terem sido citados durante a introdução, pode-se destacá-los da seguinte forma:

- Aspectos ambientais e de sustentabilidade: atualmente, não existe demanda pelas partículas finas retiradas dos agregados britados, tornando-as um problema para as pedreiras, que passam a estocar grande volume desse material, resultando em um passivo ambiental. O uso de tal material como fíler em CAA pode ser uma solução viável, pois é necessário grande volume de materiais finos para a sua dosagem, sendo que os mais utilizados para essa função, além do próprio aglomerante, são fíler calcário, pozolanas e escórias. No entanto, deve-se notar que esses materiais já possuem um nicho de mercado, que é a produção de cimentos.

Outro aspecto relevante é fato de o fíler calcário não ser, necessariamente, um resíduo industrial, exigindo valores consideráveis de energia para a sua obtenção. Dessa forma, o estudo de viabilidade da utilização de fíler de britagem proveniente de rocha diabásica e gnáissica pode resultar na utilização desse material como uma alternativa na fabricação de CAA. Diante do desempenho no estado endurecido dos CAAs dosados com esses fílers alternativos, há ainda uma possibilidade de redução do consumo de cimento e, conseqüentemente, de redução do clínquer nos CAA contendo fílers de britagem, diminuindo a emissão de CO₂. Segundo Andreola et al. (2010), a indústria cimenteira é responsável por parte considerável da emissão de CO₂ devido às altas temperaturas empregadas no processo, além do elevado uso de CaCO₃, cuja decomposição libera CO₂ na atmosfera. Por essas razões, a indústria de cimento tem sido pressionada nos últimos anos a controlar a poluição gerada. O uso de altos volumes de adições suplementares tem sido encorajado, uma vez que é uma solução prática e econômica, que pode ser aplicada tanto na indústria cimenteira, como na produção do concreto (YANG et al., 2015).

- Proposição de materiais alternativos: já existem estudos acerca do emprego do fíler de britagem em CAA, especialmente em relação ao fíler calcário, e algumas pesquisas com fíler de basalto, granito e mármore, como as de Felekoglu (2007), Uysal e Sumer (2011), Raman et al. (2011), Uysal (2012), Vijayalakshmi, Sekar e Ganesh (2013), Ahmad et al. (2014), Tennich, Kallel e Ouezdou (2015) e Choudhary, Shah e Bishnoi (2016). Fílers de gnaiss foram pouco estudados e não há relatos sobre estudos com fíler diabásico. Essas duas formações geológicas são recorrentes no Sul do Brasil e é importante conhecer seu comportamento como adição em CAA. Além disso, as pesquisas sobre fílers de britagem não se concentraram na análise das partículas dos finos, de sua forma, adsorção, distribuição granulométrica, mineralogia, seus processos de floculação e efeito na hidratação do cimento; tampouco empregam conceitos de reologia para dosar os CAA com eles confeccionados. Um dos principais objetivos do presente trabalho é adquirir um conhecimento aprofundado sobre as características dos fílers de britagem de origem diabásica e gnáissica que influenciam significativamente no desempenho da mistura que os contém, tanto no estado fresco quanto no endurecido.

- Custo de produção: muitas pesquisas mostram que o custo global do processo empregando CAA equivale-se ao custo do concreto convencional. No entanto, o custo do concreto propriamente dito é superior, o que dá a falsa impressão de elevação dos gastos. O uso de fíler

de britagem em CAA, além de todos os benefícios ambientais que proporciona, apresenta grande viabilidade econômica, pois é um material com baixo valor agregado, considerado um resíduo em pedreiras. O conhecimento aprofundado de seu emprego em CAA pode viabilizar o produto tecnicamente, sendo conveniente para pedreiras e dosadoras de concreto.

- Desenvolvimento tecnológico: atualmente, a forma de avaliação de CAA consiste na execução de ensaios empíricos (*slump flow*, caixa L, funil V etc.). A principal vantagem desses procedimentos é a facilidade de execução, podendo ser realizados com equipamentos simples. Contudo, os resultados desses ensaios geralmente dependem, simultaneamente, de vários parâmetros reológicos, especialmente da tensão de escoamento, da viscosidade e dos fenômenos tixotrópicos (FABBRIS; CARVALHO; LOOTENS, 2013). Isso dificulta a avaliação dessas propriedades por meio de ensaios que fornecem uma medida métrica ou de tempo, sem acessar as características intrínsecas do concreto. Dosadores experientes não possuem dificuldades em obter uma mistura que se enquadre nas exigências de um CAA, desde que estejam disponíveis materiais de qualidade. No entanto, o concreto é dosado de forma empírica, na maioria das vezes, pouco otimizado e de difícil replicabilidade, especialmente em situações ou condições diferentes, uma vez que as misturas são sempre ajustadas visualmente. A caracterização de misturas à base de cimento contendo fílers de britagem alternativos (diabásicos e gnáissicos) por meio da reometria possibilita a avaliação precisa das principais propriedades reológicas (tensão de escoamento e viscosidade), podendo colaborar para uma melhora na qualidade e na disseminação do CAA.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica do emprego de fílers de britagem de origem diabásica e gnáissica como material fino em concretos autoadensáveis.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Verificar as características e propriedades de fílers de britagem de diferentes origens mineralógicas (diabásica, gnáissica e calcária): distribuição granulométrica, forma e adsorção das partículas.
- b) Verificar a evolução da microestrutura e do processo de flocculação de misturas à base de cimento, contendo os fílers de britagem de origem calcária, diabásica e gnáissica durante o período de indução.
- c) Verificar a cinética de hidratação de misturas a base de cimento, contendo os fílers de britagem de origem calcária, diabásica e gnáissica.
- d) Comparar os parâmetros reológicos de pastas de cimento dosadas com os diferentes tipos de fíler (calcário, diabásio e gnaisse).
- e) Dosar CAA com resistência à compressão de 50 MPa, contendo fílers de britagem de diferentes mineralogias e granulometrias, garantindo a coesão, resistência à segregação e ao bloqueio, autoadensamento da mistura e uma superfície de qualidade para determinação dos parâmetros reológicos ideais do CAA.
- f) Comparar propriedades do estado fresco, especialmente os parâmetros reológicos, de CAA dosados com fílers de britagem de diferentes origens mineralógicas, e diferentes tamanhos de partículas.
- g) Comparar propriedades do estado endurecido (resistência mecânica e qualidade superficial) de CAA, dosados com fílers de britagem de diferentes origens mineralógicas, e diferentes tamanhos de partículas.
- h) Estudar a correlação entre resultados de ensaios tecnológicos para CAA no estado fresco com a tensão de escoamento e a viscosidade determinada por reômetro de concreto.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Denomina-se concreto autoadensável o concreto que é capaz de fluir, autoadensar pelo seu peso próprio, preencher a fôrma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos) enquanto mantém a sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento (ABNT NBR 15823, 2010; EFNARC, 2005).

Suas primeiras utilizações ocorreram no Japão na década de 1980, baseadas em estudos e metodologia de dosagem propostos pelo professor Okamura (OKAMURA; OUCHI, 2003). O seu desenvolvimento inicial ocorreu pela necessidade de se concretar peças densamente armadas, nas quais a introdução de vibradores convencionais seria inviável. Com o passar do tempo, seu uso disseminou-se em todo o mundo, principalmente na indústria de pré-fabricados, por apresentar várias vantagens em relação ao concreto convencional vibrado.

2.2 CAA: PROPRIEDADES E CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

O concreto autoadensável possui propriedades no estado endurecido que em muito se assemelham às do concreto tradicional vibrado: sua resistência à compressão depende, fundamentalmente, do tipo de cimento e da relação água/cimento empregadas, a sua retração e fluência tendem a ser ligeiramente maiores devido ao volume superior de pasta e a durabilidade dos elementos estruturais com ele confeccionados tende a ser maior pela menor probabilidade de ocorrência de falhas localizadas de concretagem.

Assim sendo, é no estado fresco que ocorrem as principais diferenças entre os dois materiais. Enquanto que no concreto tradicional vibrado é o ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*) que define as características no estado fresco (basicamente sua consistência), no concreto autoadensável é necessária a realização de vários ensaios para a medida de diversas propriedades: consistência, habilidade passante e resistência à segregação. Nos itens que seguem, são apresentadas as principais propriedades, ensaios para determiná-las e os parâmetros de dosagem que influenciam seu resultado. Cabe salientar que tanto os ensaios recomendados quanto a classificação dos concretos por classes preconizadas pela ABNT NBR 15823 (2010) são semelhantes àqueles

que constam na EFNARC SCC28 (2005) e nas ASTM: C1610 (2010); C1611 (2009); C1621 (2009); e C1758 (2013).

2.2.1 Capacidade de Fluxo

A capacidade de fluxo avalia a consistência da mistura e a sua habilidade de preenchimento dos espaços pelo peso próprio do concreto, uma vez que a mistura deve ser capaz de fluir e preencher completamente as fôrmas e os espaços entre armaduras (RILEM, 2006). Essa propriedade pode ser avaliada pelo *slump flow* e pelo funil V.

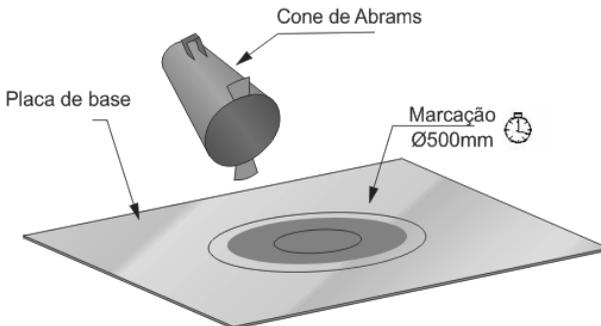
2.2.1.1 Slump flow

Também conhecido como ensaio de espalhamento, o ensaio mede o diâmetro final da amostra após a retirada do molde tronco-cônico (Figura 1). A placa de base usualmente apresenta dimensões de 1x1 m e é constituída por um material não absorvente. Segundo a ABNT NBR 15823 (2010), o CAA pode ser classificado em três classes, conforme o apresentado na Tabela 1.

Além da medida do diâmetro de espalhamento, o ensaio mede também o tempo para que o diâmetro de espalhamento chegue a 500 mm (t_{500}). Este resultado mede indiretamente a viscosidade do CAA. A classificação dos concretos com relação ao resultado do t_{500} pode ser observada na Tabela 2 no item 2.2.1.2.

O valor do *slump flow* é influenciado pelo consumo de água do concreto, volume de finos presente, distribuição granulométrica dos agregados e tipo e teor de aditivo superplastificante empregado (EFNARC, 2005).

Figura 1: Ensaio de *Slump Flow*.



Fonte: Adaptada da ABNT NBR 15823 (2010).

Tabela 1: Classificação e aplicações do CAA conforme resultados do *slump flow*.

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

Fonte: ABNT NBR 15823 (2010).

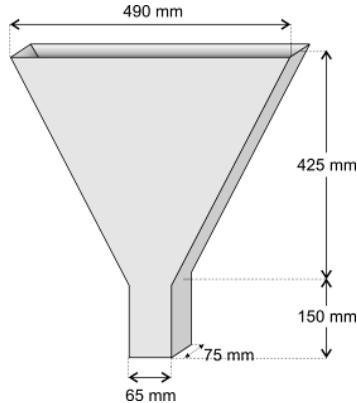
2.2.1.2 Funil V

O ensaio mede o tempo necessário para que o concreto escoe por um funil de dimensões padronizadas, conforme apresentado na Figura 2. Este ensaio mede indiretamente a viscosidade aparente do material (quanto mais viscoso, maior o tempo de escoamento) (EFNARC, 2005). A Tabela 2 apresenta a classificação dos CAA quanto à viscosidade, baseada tanto nos resultados do Funil V quanto do t_{500} , citado anteriormente, conforme especifica a ABNT NBR 15823 (2010).

Vale salientar que, embora a ABNT NBR 15823 (2010) classifique os concretos pela classe de viscosidade, em função dos resultados do Funil V e t_{500} , esses ensaios não medem viscosidade, e sim tempos de escoamento do concreto que podem ser correlacionados a esse parâmetro reológico.

O tempo de escoamento no funil V é muito influenciado pelo consumo de água e teor de finos da mistura. CAA com consumos de água inferiores a 180 l/m^3 tendem a ser muito viscosos. Esta característica tende a se acentuar quando o consumo de finos (cimento, adições e material pulverulento dos agregados) passa de 500 kg/m^3 (DACZO, 2014).

Figura 2: Funil V



Fonte: Adaptada da ABNT NBR 15823 (2010).

Tabela 2: Classificação dos concretos quanto à viscosidade aparente.

Classe de viscosidade aparente	T_{500} (s)	Funil-V (s)	Aplicação	Exemplo
VS1 / VF1	≤ 2	≤ 8	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação. Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.	Lajes, paredes diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente.
VS2 / VF2	> 2	9 a 25	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação.	Vigas, pilares e outras.

Classe de viscosidade aparente	T ₅₀₀ (s)	Funil-V (s)	Aplicação	Exemplo
			Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas	

Fonte: ABNT NBR 15823 (2010).

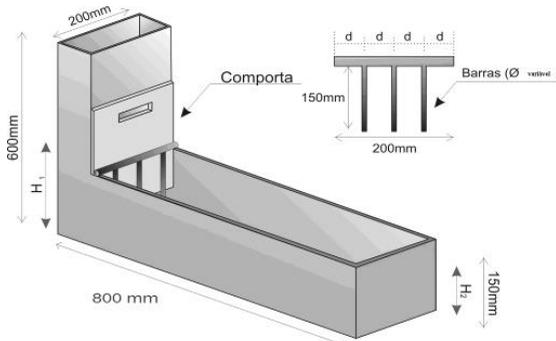
2.2.2 Habilidade Passante

A habilidade passante descreve a capacidade do concreto fresco de fluir através de aberturas estreitas, como espaços entre as barras de aço, sem apresentar segregação ou bloqueio (EFNARC, 2005). Os principais ensaios que avaliam essa propriedade são: caixa L, anel J e caixa U.

2.2.2.1 Caixa L

O ensaio da Caixa L determina a facilidade com que o concreto, sob pressão, consegue escoar entre as armaduras de um componente estrutural. A Figura 3 mostra o equipamento empregado. O concreto é colocado na câmara vertical, com a comporta fechada. Na frente da comporta, dentro da câmara horizontal, é posicionada uma grade composta por duas ou três barras. Quando se utiliza duas barras, o espaçamento deve ser de (58 ± 1) mm e, no caso de três barras, (40 ± 1) mm. Quando a comporta é aberta, o concreto é forçado a escoar através da grade. Ao final do ensaio, é anotada a altura da camada de concreto nas extremidades da câmara horizontal (H_1 , H_2). A habilidade passante (HP) é calculada pela razão H_2/H_1 .

Figura 3: Caixa L.



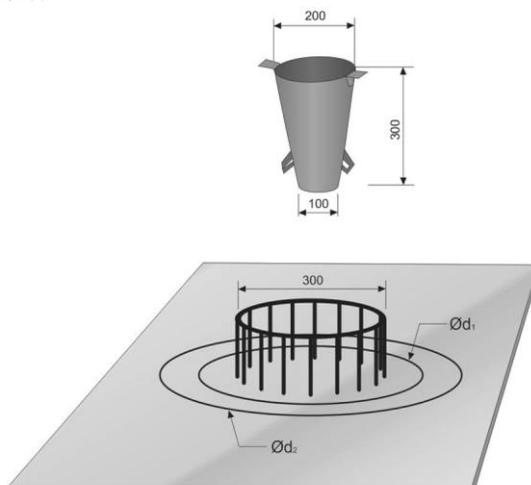
Fonte: Adaptada da ABNT NBR 15823 (2010).

2.2.2.2 Anel J

Outro ensaio para medir a habilidade passante é o ensaio do Anel J. A diferença deste ensaio para o da Caixa L é a pressão a que o concreto está submetido para escoar por entre as barras. O ensaio é similar ao do *slump flow*, mas, por fora do molde tronco cônico, é posicionado um anel metálico que possui barras regularmente espaçadas. Quando o cone é içado, o concreto se espalha e é forçado a passar pelas barras do anel. A habilidade passante, neste caso, é medida pela redução do diâmetro de espalhamento do concreto no ensaio de *slump flow* (com o cone invertido) com e sem o anel J. A Figura 4 mostra o ensaio do Anel J e a Tabela 3 apresenta a classificação dos concretos segundo os resultados dos dois ensaios citados.

Este ensaio avalia a resistência ao bloqueio da mistura. Segundo Daczo (2014), a realização do ensaio de Anel J pode indicar se o tipo e a quantidade de agregado graúdo empregado pode dificultar o escoamento do concreto, gerando falhas de concretagem.

Figura 4: Anel J.



Fonte: Adaptada da ABNT NBR 15823 (2010).

Tabela 3: Classificação quanto à habilidade passante.

Classe de viscosidade aparente	Anel-J (mm)	Caixa-L (H_2/H_1)	Aplicação	Exemplo
PJ1 / PL1	0 a 25 mm com 16 barras de aço	$\geq 0,80$ com duas barras de aço	Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm	Lajes, painéis, elementos de fundação
PJ2 / PL2	25 mm a 50 mm com 16 barras de aço	$\geq 0,80$ com três barras de aço	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamento de armadura de 60 mm a 80 mm	Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-moldados

Fonte: ABNT NBR 15823 (2010).

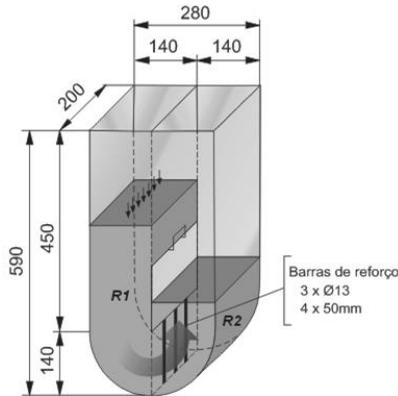
2.2.2.3 Caixa – U

O ensaio é utilizado para medir a capacidade de enchimento do CAA e fornece indicativos sobre a viscosidade. O aparelho consiste em uma caixa com dois compartimentos, cada um deles com seção transversal de 20x14 cm e altura de 59 cm, conforme a Figura 5. Uma

abertura com um portão deslizante une os dois compartimentos. Neste ponto, são instalados vergalhões com diâmetro nominal de 13 mm com espaçamento de centro a centro de 50 mm. O ensaio consiste em preencher o lado esquerdo com cerca de 20 litros de concreto e, sem seguida, é permitida a passagem para o outro lado. Mede-se então a altura do concreto nas duas seções e verifica-se a diferença entre elas. Quanto menor for essa diferença, melhor é a capacidade de fluxo e de passagem do concreto.

A norma brasileira, ABNT NBR 15823 (2010), assim como a EFNARC (2005), não cita valores para a classificação do ensaio Caixa U. A EFNARC (2002) prescreve que a diferença entre as alturas deve ser, no máximo, 30 mm.

Figura 5: Caixa U.



Fonte: Adaptada de EFNARC (2002).

2.2.3 Resistência à Segregação

A resistência à segregação é a capacidade do concreto de permanecer homogêneo no seu estado fresco. A mistura pode sofrer segregação durante ou após a moldagem e esta é uma propriedade fundamental para a qualidade do CAA (EFNARC, 2005).

Existem duas formas de segregação; na primeira, as partículas maiores (agregados) tendem a se separar, porque sedimentam mais facilmente que as partículas menores. Já a segunda forma de segregação, chamada de exsudação, se caracteriza pela ascensão da água da mistura pelos poros capilares. A exsudação dificulta a aderência dos agregados e armaduras à argamassa do concreto. Aliado a isso, essa água deixa vazios

e, como todos esses vazios são orientados em uma mesma direção, a permeabilidade do concreto no plano horizontal pode ser aumentada (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Além disso, o CAA sofre segregação dinâmica durante o lançamento e segregação estática após o lançamento, quando está em repouso. A segregação estática é mais danosa em elementos estruturais altos, mas também em lajes pouco espessas, podendo levar a defeitos como fissuração e enfraquecimento da superfície.

A coluna de segregação e testes de penetração são os principais ensaios para avaliar a segregação de CAAs. Além deles, a ABNT NBR 15558 (2008) prescreve métodos para a determinação da exsudação em concretos. A ASTM C1611 prescreve o método de slump flow para CAA, conforme explanado no item 2.2.1.1, e classifica a mistura em relação à segregação. Segundo essa norma, a estabilidade do CAA pode ser observada visualmente após a realização do ensaio de slump flow, e é atribuído um valor de controle para a mistura, em função de seu comportamento, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Valores do índice de estabilidade visual

VSI	Critério
0: muito estável	Sem evidências de segregação ou exsudação.
1: estável	Sem evidências de segregação e com um brilho na massa de concreto.
2: instável	Um leve anel de argamassa na extremidade e/ou agregados em maior quantidade no centro da massa de concreto.
3: muito instável	Segregação clara, com argamassa na extremidade e/ou grande concentração de agregados no centro da massa de concreto.

VSI: *Visual Stability Index Value*: valores do índice de estabilidade visual.

Fonte: ASTM C1611.

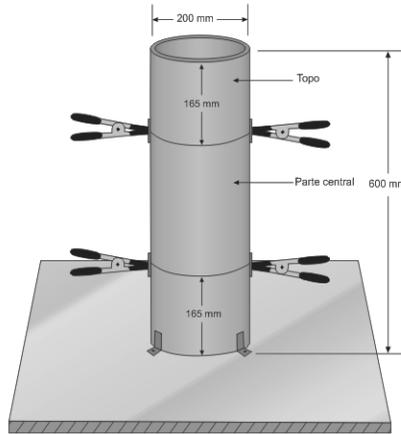
2.2.3.1 Coluna de Segregação

Constitui-se de um tubo de PVC, de diâmetro nominal de 200 mm de diâmetro e 660 mm de altura total, seccionado em três partes. O topo e a base devem ter altura de 165 mm e a parte central do tubo deve ter altura de 330 mm. Estas seções são geralmente unidas por grampos ou fita adesiva, conforme a Figura 6. O conjunto deve ser adequadamente apoiado em uma base que garanta um perfeito nivelamento.

O ensaio se inicia com o preenchimento da coluna de segregação com a amostra de concreto sem adensamento, de forma uniforme e sem interrupção, em tempo não superior a cinco minutos após a sua coleta.

Aproximadamente 20 minutos após a moldagem devem ser retiradas porções de concreto do topo e da base da coluna. Esse procedimento deve ser realizado com o auxílio de uma chapa metálica, que deve ser colocada entre a união das seções do tubo para facilitar a extração.

Figura 6: Coluna de Segregação.



Fonte: Adaptada da ABNT NBR 15823 (2010).

Cada amostra deve ser lavada individualmente sobre uma peneira com abertura de malha de 5 mm, de forma a remover totalmente a argamassa, limpando os agregados graúdos. Os agregados graúdos devem ser submetidos a uma secagem superficial, com utilização de pano ou papel absorvente (condição saturado superfície seca, SSS) e, em seguida, devem ser pesados, obtendo-se as massas m_B e m_T para cada amostra, conforme a Equação 1. A resistência à segregação do concreto é determinada em função da diferença percentual entre a quantidade de agregado graúdo da porção de concreto retirada da base e do topo da coluna de segregação.

$$SR = \frac{2 \times (m_B - m_T)}{m_B + m_T} \times 100 \quad (1)$$

Onde,

SR : é a resistência à segregação do concreto, expressa em porcentagem (%);

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

m_T : é a massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retirada do topo da coluna, expressa em gramas (g); e

Caso m_T seja maior ou igual a m_B , a segregação é nula.

As classes de resistência à segregação são típicas para as aplicações apresentadas na Tabela 5. A resistência à segregação é fundamental para a homogeneidade e a qualidade do CAA e é particularmente importante em concretos autoadensáveis de maior fluidez e baixa viscosidade. A classe SR1 atende à maioria das aplicações.

Tabela 5: Classes de resistência à segregação do CAA em função de sua aplicação.

Classe de resistência à segregação	Coluna de segregação (%)	Distância a ser percorrida	Espaçamento entre armaduras	Exemplo
SR 1	≤ 20	< 5 m	> 80 mm	Lajes de pequena espessura. Estruturas convencionais de pouca complexidade.
SR 2	≤ 15	> 5 m	> 80 mm	Elementos de fundações profundas. Pilares, paredes e elementos estruturais complexas. Elementos pré-moldados.
		< 5 m	< 80 mm	
NOTA 1 SR 2 ou um valor limite mais rigoroso pode ser especificado se a resistência ou a qualidade da superfície for particularmente crítica. NOTA 2 Quando a distância a ser percorrida pelo concreto for maior que 5 m e espaçamento inferior a 80 mm deve ser especificado um valor de SR menor que 10 %.				

Fonte: ABNT NBR 15823 (2010).

2.2.3.2 Avaliação rápida da resistência à segregação estática do CAA utilizando o teste de penetração (ASTM C1712)

Este método de ensaio consiste em uma estimativa rápida de resistência à segregação de CAA de forma indireta. É empregado um aparelho de penetração padronizado, e o molde de abatimento do tronco de cone invertido. Uma amostra de CAA é colocado no molde invertido

sem vibração. Posteriormente, é acoplado o equipamento de penetração, conforme Figura 7. A profundidade de penetração é determinada e utilizada para avaliar a resistência à segregação estática da mistura, mediante a diferença da leitura inicial e leitura final (após penetração e estabilização). A classificação da mistura quanto à resistência à segregação estática está apresentada na Tabela 6.

Figura 7: Ensaio rápido de resistência à segregação estática de CAA.

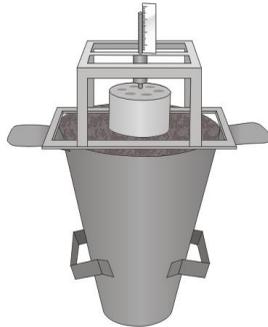


Tabela 6: Grau de resistência à segregação estática.

Profundidade de penetração ($P = L_{final} - L_{inicial}$)	Grau de resistência à segregação estática
$P \leq 10$ mm	Resistente
$10 < P < 25$ mm	Moderadamente resistente
$P \geq 25$ mm	Não resistente.

Fonte: ASTM 1712 (2014).

2.3 CAA: PROPRIEDADES DO ESTADO ENDURECIDO

Geralmente considera-se que as propriedades mecânicas do CAA e do concreto convencional tendem a ser semelhantes. No entanto, as opiniões sobre o assunto não são unânimes. De acordo com Vilanova, Gomez e Landsberger (2011), podem ocorrer diferenças significativas nas propriedades do estado endurecido de CAA quando comparado ao concreto convencional. Isso pode ser atribuído às modificações na composição da mistura, à melhoria da microestrutura do concreto e à ausência de vibração com o uso do CAA. Nos tópicos que seguem são explanadas brevemente três propriedades do estado endurecido.

2.3.1 Resistência à Compressão

A resistência à compressão é a principal propriedade do concreto e é a única característica especificada e testada rotineiramente. O comportamento do CAA à compressão é bastante similar ao dos concretos convencionais. No entanto, é comum que, para uma mesma relação água/cimento e mesmo teor de vazios, a resistência à compressão do CAA seja ligeiramente superior à do concreto convencional vibrado. Isso ocorre porque a falta de vibração melhora a ligação entre a pasta e os agregados, beneficiando a zona de transição (EFNARC, 2005).

Tal fato é comprovado por Druta, Wang e Lane (2014). Os autores concluíram que, para relações água/cimento entre 0,40 a 0,60, a resistência mecânica do CAA mostrou-se maior que aquela obtida em concreto convencional, considerando a relação água/cimento fixa entre os dois tipos de mistura. Por meio de microscopia eletrônica de varredura, notou-se que os CAAs apresentaram fissuras menores e menos numerosas na interface entre a pasta endurecida e os agregados.

Apesar disso, vale salientar que em CAA com alta viscosidade, a eliminação ou o desprendimento das bolhas de ar da mistura pode ser prejudicada, causando decréscimos na resistência mecânica pelo aumento do teor de vazios presentes (DACZKO, 2012). Isso pode ser facilmente corrigido pela adição de aditivo desincorporador de ar, juntamente com uma maior quantidade de aditivo redutor de água, uma vez que a diminuição do teor de vazios é acompanhada por uma redução da fluidez da mistura.

Em relação ao avanço da resistência mecânica, o CAA não difere significativamente dos concretos convencionais produzidos com os mesmos cimentos e superplastificantes (REPETTE, 2011).

Apesar de a relação água/cimento ser o fator principal que governa a resistência mecânica de um concreto, o emprego de adições minerais pode melhorar o empacotamento do material, reduzindo a porosidade, além de aumentar os pontos de nucleação e, conseqüentemente, aumentar a resistência mecânica do mesmo (UYSAL, YILMAZ, 2011).

2.3.2 Resistência à Tração

Segundo Walraven (2010 apud REPETTE, 2011), no escopo geral, a resistência à tração do CAA não é significativamente maior do que a do concreto convencional. A norma da Nova Zelândia (NZS 3106:2009) também considera a resistência à tração do CAA e do concreto

convencional equivalentes. No entanto, segundo Holschemacher (2004 apud REPETTE, 2011) e Druta, Wang e Lane (2014), a resistência à tração do CAA tende a ser maior, podendo chegar a valores até 40% maiores do que o concreto convencional de mesma resistência à compressão.

2.3.3 Módulo de Elasticidade

Em um material multifásico como o concreto, a fração volumétrica, densidade e módulo de elasticidade dos constituintes, além das características da zona de transição, determinam o comportamento elástico do compósito (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Uysal (2012) e Mehta e Monteiro (2014), a composição e o tipo de agregado utilizado na dosagem exerce uma ação expressiva no módulo de elasticidade dos concretos com eles confeccionados. Rochas pouco porosas, como o basalto, apresentam módulo de elasticidade da ordem de 70 – 140 GPa, enquanto rochas mais porosas, como calcário e arenito, apresentam módulo na ordem de 20 – 50 GPa. Dessa forma, quando maior a rigidez e teor de agregado graúdo, maior o módulo de elasticidade do concreto. Em concordância, a ABNT NBR 6118 (2014) prescreve equações para determinação do módulo de elasticidade do concreto, em função do f_{ck} e da presença de diferentes tipos de rochas, sendo que o fator de ponderação é maior para agregados basálticos e diabásicos.

Sendo assim, a inclinação da curva tensão *versus* deformação do concreto tende a ser maior que a inclinação referente à pasta de cimento e menor que à referente aos agregados (MEHTA, MONTEIRO, 2008). Como o concreto convencional possui um maior volume de agregados, o módulo de elasticidade do concreto tende a se aproximar ao dos agregados. Já no CAA, que possui um maior volume de pasta, o módulo de elasticidade tende a ser menor que o do concreto convencional.

Attigbe, See e Daczko (2002) concluíram que o concreto convencional e o CAA possuem módulos de elasticidade equivalentes para uma mesma resistência à compressão. Por outro lado, Leemann e Hoffmann (2005) observaram em seus estudos que o módulo de elasticidade médio do CAA foi cerca de 16% menor do que o do concreto convencional para a mesma resistência à compressão. Da mesma forma, em estudos de Domone (2007), o valor do módulo de elasticidade de CAA chegou a ser 40% menor que o valor obtido para concreto convencional para classes de baixa resistência à compressão. Para classes de resistência

maiores, a redução foi de cerca de 5%, tal como estudos de Parra, Valcuende e Gómez (2011).

Repette (2011) salienta que a variação do módulo de elasticidade depende, entre outros fatores, do nível de resistência do concreto e da sua composição, não sendo possível fazer uma comparação generalizada.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), espaços vazios, microfissuras e cristais orientados de hidróxido de cálcio são relativamente mais comuns na zona de transição do que na matriz da pasta de cimento; portanto, eles afetam de forma significativa na relação tensão-deformação. O uso de adições em CAA, como a sílica ativa e outras pozolanas finamente divididas, pode densificar a zona de transição e, conseqüentemente, melhorar as propriedades do estado endurecido. Aliado a isso, a resistência mecânica e o módulo de deformação do concreto não são influenciados no mesmo grau pelo tempo de cura, sendo que em idades mais avançadas o módulo de elasticidade tende a aumentar a uma taxa mais alta do que a resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.4 MÉTODOS DE DOSAGEM

Para dosagem de CAA, a maioria dos pesquisadores se vale de métodos baseados em tabelas prontas (Exemplo: Tabela 7), que foram produzidas há anos, muitas vezes em outros países e com materiais diferentes. Sendo assim, é comum a necessidade de adaptações durante a dosagem, baseadas no método da tentativa e erro, para que se obtenha um concreto econômico, que apresente as vantagens de ser autoadensável e livre de manifestações patológicas futuras.

Tabela 7: Valores típicos de proporcionalamento de CAA.

Constituinte	Faixa típica em massa (kg/m ³)	Faixa típica em Volume (litros/m ³)
Finos (< 0,125mm)	380 - 600	
Pasta		300 – 380
Água	150 - 210	150 – 210
Agregado graúdo	750 - 1000	270 – 360
Agregado miúdo	Teor depende do volume dos outros constituintes, tipicamente 48-55% do peso total do agregado	
Água/finos (em volume)		0,85 – 1,10

Fonte: EFNARC (2005).

Embora pouco utilizado atualmente, um dos métodos de dosagem mais difundidos no meio científico é conhecido como método de Okamura (OKAMURA; OUCHI, 2003), que é, provavelmente, o primeiro método de dosagem racional desenvolvido para CAA. Este é um método relativamente simples, que se baseia nos seguintes princípios:

- fixação do teor de agregado graúdo em cerca de 50 – 60% do volume de sólidos do concreto;
- fixação do teor de agregado miúdo em cerca de 40 – 50% do volume de argamassa;
- relação água/cimento baixa, estando na ordem de 0,9 – 1,0 em volume, dependendo das características dos finos presentes;
- teor de aditivos superplastificantes alto, determinado experimentalmente, de forma a atingir as características desejadas; e
- teor de ar incorporado de 2%.

De acordo com o método, a proporção de água, finos e aditivos superplastificantes é determinada em pastas e avaliada com o *minislump* e o mini funil-V. O método de Okamura indica também ensaios para verificar se o CAA cumpre todos os requisitos para determinada estrutura. Em misturas de concreto, devem ser realizados os ensaios de *slump flow*, funil-V e caixa-U e realizar os ajustes necessários.

Obviamente, esse método possui uma série de pontos falhos, que foram sendo corrigidos em outros métodos que foram surgindo com o tempo. Na Tabela 8, são explanados os pontos mais importantes dos principais métodos de dosagem para CAA, em ordem cronológica. Explicações mais detalhadas encontram-se no Anexo A deste documento.

Existem muitos métodos de dosagem para CAA, propostos por vários autores em todo o mundo. Optou-se por explicar 10 métodos bastante referenciados na comunidade técnica (9 métodos na Tabela 8 e método EFNARC na Tabela 7), apesar de haverem outros razoavelmente utilizados, como (reproduzidos com seus nomes em inglês): *ACBM Paste Rheology Model*, *Minimum Paste Volume Method*, *Compressible Packing Model*, *Concrete Manager Software*, *Densified Mixture Design Algorithm Method*, *Particle-Matrix Model*, *Statistical Design of Experiments Approach*, *Technical Center of Italcementi Group (CTG) Method*, *University of Rostock (Germany) Method*, *Sedran et al. (LCPC, Paris) Method*, *Vengala et al. Method*, entre outros. Além destes, EFNARC (2005) cita alguns trabalhos desenvolvidos em instituições acadêmicas sobre teorias de mistura e dosagem para CAA.

As descrições de cada método foram baseadas nas informações disponíveis nas referências citadas e, portanto, podem não representar plenamente todos os aspectos dos métodos.

Tabela 8: Resumo e comentários sobre métodos de dosagem para CAA.

MÉTODO	DESCRIÇÃO	LIMITAÇÕES
OKAMURA E OUCHI (MÉTODO JAPONÊS)	O teor de agregado graúdo é definido como 50-60% do volume de sólidos do concreto. O teor de agregado miúdo é definido em 40-50% do volume da argamassa. Baixa relação água/cimento (na ordem de 0,3). A proporção de finos e superplastificante é determinada experimentalmente.	Relação água/cimento muito baixa, dificultando a ação do aditivo e forçando a utilizá-lo em grande quantidade. Não considera finos pozolânicos (cinza volante, sílica ativa, metacaulim etc). Não considera o uso de aditivo promotor de viscosidade.
BUI E MONTGOMERY 1999	Estima-se, por equações, o volume mínimo de pasta e o volume máximo de agregados que não cause bloqueio. O método se propõe a determinar alguns parâmetros teoricamente para reduzir o tempo de ajuste do concreto experimentalmente, mas não contempla a parte experimental.	Método numérico, com abordagem computacional intensiva. Não faz referência a determinação de aditivos. Como não contempla os ajustes na fase experimental, os valores obtidos teoricamente podem não resultar em uma mistura adequada.
PETERSSON E BILLBERG – CBI 1996	A combinação de agregados miúdos e graúdos é determinada a fim de obter-se um teor mínimo de vazios. O volume de pasta é definido com base nos espaços vazios entre os agregados e da capacidade passante (resistência ao bloqueio) da mistura. A composição da pasta é selecionada com base em parâmetros reológicos. Os ajustes devem ser realizados em misturas de concreto.	Uso de parâmetros reológicos em pastas e argamassas, não apresentando nenhuma correlação com o concreto propriamente empregado. Utiliza o método do empacotamento, que em CAA pode não ser eficiente. Não considera o uso de aditivo promotor de viscosidade.

MÉTODO	DESCRIÇÃO	LIMITAÇÕES
OH, NOGUCHI E TOMOSAWA (EXCESSO DE PASTA) 1999	A espessura relativa do excesso de pasta é calculada e utilizada para prever a tensão de escoamento e a viscosidade plástica do concreto. O método baseia-se nas propriedades dos agregados (área superficial e número de partículas), volume da pasta e reologia da pasta.	O modelo emprega outros métodos para calcular a área superficial e o número de partículas de agregados e não esclarece o procedimento. A abordagem sugerida é computacionalmente intensiva. A tensão de escoamento e a viscosidade plástica da pasta e do concreto podem não ser correlacionáveis. Não faz referência a determinação de aditivos.
SU, HSU CHAI 2001	Os agregados miúdos e graúdos são definidos objetivando o menor teor de vazios. Para isso, os autores empregam o PF (fator de empacotamento), definido pela razão da massa unitária compactada e a massa unitária solta. O teor de cimento e a relação água/cimento é definida com base nos requisitos de resistência. Cinza volante e escória são adicionadas posteriormente para garantir a resistência à segregação. Ajustes no teor dos materiais são realizados nos concretos testes.	Nem todos os valores necessários para selecionar as proporções iniciais são bem definidos. Vários fatores, como fator de empacotamento, proporcionamento dos agregados e quantidades relativas de escória e cinza devem ser escolhidos, a priori, pelo dosador; no entanto, pouca ou nenhuma informação é dada. Para o cálculo do consumo de cimento, o método considera uma equação pronta, que não leva em consideração o tipo de cimento, tampouco sua interação com aditivos. O método prevê o uso de cinza volante e escória. Não faz referência à determinação do teor de aditivos.

MÉTODO	DESCRIÇÃO	LIMITAÇÕES
GOMES 2002	<p>Destina-se à CAA de elevada resistência (relação água/cimento menor ou igual a 0,40). A composição da pasta, formada por cimento, adições, aditivos e água, é determinada por meio dos ensaios de funil de Marsh e <i>minislump</i>.</p> <p>Os agregados são definidos pelo esqueleto granular, visando ao menor teor de vazios. Vários volumes de pasta são testados em concreto para alcançar as adequadas propriedades do estado fresco e endurecido.</p>	<p>O método é exclusivo para concretos de elevada resistência.</p> <p>Determina-se as fases do concreto (pasta e agregado) de forma separada e, apesar do autor citar que pode haver variações, não é estudada a interação entre elas no concreto propriamente dito.</p> <p>Utiliza o método do empacotamento que, em CAA, pode não ser eficiente.</p> <p>Não considera o uso de aditivo promotor de viscosidade.</p>
REPETTE- MELO 2005	<p>A relação água/cimento é determinada pela resistência à compressão requerida, por meio de curvas de dosagem do cimento empregado. Na fase pasta, determina-se o teor de adições (fíler), visando o controle da segregação. Na fase argamassa, determina-se o volume de agregado miúdo, por meio do espalhamento e do funil V.</p> <p>O agregado graúdo é determinado em relação ao volume total de concreto.</p> <p>O teor de aditivo é ajustado em concreto (preferencialmente menor que 0,3% da massa de cimento). São realizados os ensaios padrões para avaliar e corrigir a mistura.</p>	<p>Destina-se a concretos com resistência à compressão entre 20 e 45 MPa.</p> <p>A única adição estudada é o filer calcário.</p> <p>A separação dos materiais para definição do proporcionamento pode não resultar em uma dosagem adequada em concreto.</p> <p>O método propõe a determinação dos constituintes da mistura de forma separada, utilizando pastas, argamassas e concreto, mas, ao final, todos os constituintes acabam sendo ajustados no concreto.</p>

MÉTODO	DESCRIÇÃO			LIMITAÇÕES	
ACI Committee 237 2007	Determina parâmetros iniciais de dosagem e, dependendo dos resultados dos primeiros testes e da observação do dosador, são realizados os ajustes necessários.			Consiste em uma técnica experimental, fundamentalmente dependente do dosador. Não cita nenhum procedimento para determinar o tipo ou teor de aditivo.	
	<i>Componentes</i>	<i>Consideração</i>	<i>Quantidade (volume total)</i>		
	Agregados gráudos	Dim. Max:12,5 mm	28-32%		
		Dim Máx: 10,0 mm	Até 50%		
	Finos ≤0,125 mm	Slump flow <55 cm	355-385 kg/m ³		
		Slump flow: 55-60 cm	385-445 kg/m ³		
		Slump flow >65 cm	≥458 kg/m ³		
	Pasta				34-40%
	Argamassa				38-72%
Relação água/materiais cimentícios			0,32-0,45		

MÉTODO	DESCRIÇÃO	LIMITAÇÕES
<p>TUTIKIAN E DALMOLIN 2008</p>	<p>Utiliza o modelo de empacotamento para resultar em um menor consumo de pasta. O único material que não é empacotado é o cimento. Inicia-se o processo, com os agregados de maior diâmetro e finaliza-se com as adições (finos). A relação água/cimento é determinada pela resistência à compressão requerida. Dosa-se um concreto com traço intermediário para definição do teor de aditivo. Mantendo o esqueleto granular e o teor de aditivo, realiza-se a mistura dos traços rico, intermediário e pobre, para construção do diagrama de dosagem de forma análoga ao método IPT/EPUSP criado para concreto convencional.</p>	<p>Baseia-se, quase que totalmente, no empacotamento dos materiais, a fim de obter o menor volume de vazios e, conseqüentemente, de pasta.</p> <p>A garantia de capacidade de passagem e resistência à segregação é atribuída à compactidade dos agregados e os autores dosam CAA com teor de argamassa mais baixo (menores que 60%) do que a maioria dos pesquisadores. Como a pasta influencia fortemente na mobilidade, essas considerações podem dificultar o autoespalhamento da mistura.</p> <p>Após a etapa de empacotamento, o método torna-se empírico e baseado em tentativa e erro, o que o torna fortemente dependente da experiência do dosador.</p> <p>Aplica-se o método IPT/EPUSP, que é consagrado para concretos convencionais, mas pouco estudado para CAA.</p>

Embora cada método de dosagem apresente uma abordagem diferente, eles compartilham algumas semelhanças. Basicamente, os procedimentos visam estabelecer o volume da pasta, a composição da pasta e a combinação dos agregados.

Os métodos CBI; NanSu e Hsu Chai; Gomes e Tutikian e Dal Molin empregam o conceito de compactação dos agregados a fim de diminuir o volume de vazios. No entanto, o empacotamento dos materiais pode não ocorrer efetivamente em uma mistura extremamente fluida como o CAA, na qual os agregados possuem grande mobilidade.

Aliado a isso, de acordo com Romano, Cardoso e Pileggi (2011), o máximo empacotamento resulta em uma menor distância entre os grãos grossos e um baixo volume de matriz nos sistemas, inibindo o escoamento por meio da grande interferência física entre os agregados. Os autores ainda salientam que os fatores que proporcionam valores elevados de fluidez resultam em um maior teor de matriz quando comparados a concretos dosados pelo critério do máximo empacotamento.

Em alguns métodos, como por exemplo Gomes; Melo-Repette e Oh, Noguchi e Tomosawa, o volume de pasta é determinado de forma independente do resto da mistura com base em medições das propriedades no estado fresco.

Segundo Tattersall e Banfill (1983), as propriedades reológicas do concreto e da pasta de cimento no estado fresco são complexas em diferentes maneiras e as avaliações em pasta nem sempre predizem as determinações nos concretos correspondentes. A principal razão para isso é que a reologia da pasta de cimento é medida sob condições nunca experimentadas por esta no concreto e os valores não consideram a participação dos agregados, que agem como redutores de calor e cisalham a pasta durante o processo de mistura (FERRARIS, OBLA e HILL, 2001).

De acordo com Koehler (2007), quando o volume e a composição da pasta são determinados separadamente e, posteriormente, usados em concreto, a reologia da mistura pode não ser a ótima (ou a ideal). Além disso, quando a combinação dos agregados é realizada com base na minimização do teor de vazios, as propriedades de fluxo do concreto podem não ser adequadas.

Pode-se dizer ainda, que todos os métodos sugerem testes em concreto para verificar as propriedades e proceder as correções e ajustes necessários. De fato, é irracional esperar que um método de dosagem não necessitará de ajustes, pois, em geral, é formulado com outros materiais e em outras condições. No entanto, a maioria dos métodos fornece pouca ou nenhuma orientação sobre como modificar ou ajustar as proporções inicialmente estipuladas.

Cabe salientar que todos os métodos citados apresentam qualidade técnica e que os comentários sobre cada um deles visam fornecer informações para a seleção do método mais adequado para uma determinada aplicação.

Diante do exposto, é importante notar que os métodos de dosagem não preconizam a utilização de equipamentos reométricos para dosar CAA. O estudo da reologia de CAA é capaz de avaliar a mistura com maior acurácia (quando comparada com testes tecnológicos), determinar fatores influentes no concreto e prever respostas no estado endurecido, como a presença de imperfeições na peças concretadas. Explicações sobre a reologia do CAA são apresentadas na seção 2.6.

2.5 USO DE CAA NA INDÚSTRIA DE PRÉ-FABRICADOS

Nos últimos anos, o Brasil tem apresentado um grande desenvolvimento na construção civil, demandando uma procura por técnicas de construção que atendam, de forma simultânea, às exigências de custo, de durabilidade e de prazos para execução das obras. O emprego de elementos pré-fabricados de concreto é uma alternativa para esses propósitos. Essa técnica permite aos construtores encomendar as peças (vigas, pilares, lajes, paredes), que devem chegar prontas para serem fixadas no local definitivo, ou que podem ser produzidas no próprio canteiro de obras, conforme a necessidade de cada caso.

De acordo com a ABNT NBR 9062 (2006), os elementos pré-moldados e pré-fabricados são definidos da seguinte forma:

- pré-moldado: elemento que é executado fora do local definitivo de utilização, para o qual se dispensa a existência de laboratório e demais instalações congêneres próprias; e
- pré-fabricado: elemento produzido fora do local definitivo da estrutura, em usina ou instalações análogas que disponham de mão de obra treinada e especializada, e instalações laboratoriais permanentes para controle de qualidade.

O fato de que os elementos pré-fabricados são submetidos a exigências mais rigorosas não indica, necessariamente, que a qualidade dos elementos pré-moldados seja negligenciada. Em ambos os casos, os elementos construtivos devem atender às especificações de projeto e normalizações (DONIAK e GUTSTEIN, 2011).

A utilização de pré-fabricados nas obras de engenharia contribui para a racionalização da construção, uma vez que emprega etapas

definidas e automatizadas, especialização da mão de obra, uso intensivo da tecnologia na produção e, especialmente, controle de qualidade dos elementos.

Além da resistência mecânica e da durabilidade, os elementos pré-fabricados devem apresentar bom acabamento superficial. Todo processo de produção das peças deve apresentar controle da aparência. Aspectos como geometria, quinas, manchas e quantidade de bolhas na superfície devem ser controlados peça a peça.

No caso específico das bolhas superficiais, quando empregado concreto convencional para moldagem dos elementos pré-fabricados, é necessário o uso de vibradores por longo período de tempo para permitir a saída das bolhas. Segundo Terzian (2005), experiências em campo mostraram que, para se obter um acabamento superficial otimizado, são necessários, pelo menos, dois equipamentos de vibração tipo imersão em uma mesma peça. Aliado a isso, os operários encarregados desta atividade devem ser adequadamente treinados e instruídos sobre a melhor inclinação do vibrador, tempo de vibração e demais peculiaridades.

Atualmente, muitas empresas que produzem e comercializam peças pré-fabricadas têm empregado CAA na confecção de seus produtos. O seu uso aumenta a produtividade da fábrica e possui a vantagem de não necessitar de vibração, especialmente quando se concretiza peças densamente armadas, nas quais o uso de vibradores ficaria inviável.

Estudos de Camacho et al. (2009) em indústria de pré-fabricados mostraram que, durante a moldagem de vigas, a produtividade foi de 29 m³/h quando fez-se uso do CAA e de 10 m³/h com concreto convencional. Além disso, os autores observaram que, para a concretagem de peças com concreto convencional, eram necessárias cerca de nove pessoas dedicadas a essa atividade. Esse número foi reduzido para duas com o emprego de CAA.

O emprego de CAA na indústria de pré-fabricados tem potencial para aumentar a produtividade, acelerar a produção, diminuir o esforço físico e o número de trabalhadores para a obtenção de elementos com maior qualidade de acabamento, resistência mecânica e durabilidade.

2.5.1 Defeito na Superfície do CAA

Um dos apelos ao uso do CAA é a possibilidade de obtenção de peças com superfícies livres de defeitos. A obtenção de superfícies “perfeitas” não é tarefa simples e depende de diversos fatores associados ao concreto e à técnica construtiva (REPETTE, 2011).

Os aspectos de qualidade de superfície variam conforme a aplicação do concreto. Quando são empregadas peças pré-moldadas, especialmente placas para paredes, é comum que elas sejam utilizadas de forma aparente. Concretos que serão permanentemente expostos requerem um cuidado especial no acabamento da peça. De acordo com ACI 303R-04 (2008), superfícies de concreto arquitetônico (ou concreto aparente) não devem apresentar variações de textura e cor, tampouco defeitos superficiais perceptíveis a uma distância de cerca de 6 m.

Segundo EFNARC (2005), os principais problemas que afetam a aparência e o acabamento da superfície do CAA são: bolhas de ar na superfície, “favos de mel” na peça, listras verticais e outras variações de cores e fissuração por secagem. Este trabalho irá concentrar-se em um defeito superficial específico e muito recorrente nas peças pré-fabricadas em CAA: bolhas de ar na superfície.

2.5.1.1 Bolhas de Ar na Superfície do Concreto

Um dos principais problemas associados a utilização de concreto pré-moldado refere-se a presença de bolhas de ar (ou vazios) na superfície do elemento estrutural, que aparecem após a desmoldagem. Mesmo com os métodos de construção avançados e o uso de aditivos químicos, as imperfeições na superfície ainda persistem (OZKUL; KUCUK, 2011; SILVA; STEMBERK, 2013).

As bolhas de ar, furos ou vazios de superfície são pequenas cavidades que variam a partir de quase invisíveis até 25 mm de diâmetro, resultantes do aprisionamento de bolhas de ar na superfície do concreto (MEGID, 2012). A Figura 8 mostra exemplos de elementos moldados com CAA com bolhas de ar na superfície.

Figura 8: Acabamento superficial das placas de concreto autoadensável.



Embora essas imperfeições não afetem a integridade estrutural do concreto, a sua presença provoca atrasos na produção, uma vez que há a necessidade de tratamento apropriado para superfície antes que a estrutura seja considerada pronta. Como resultado, o custo de produção é afetado (SILVA; STEMBERK, 2013).

O ar é introduzido no concreto durante o processo de mistura, transporte e moldagem. A estabilização do ar e a sua eliminação durante a moldagem dependem da coesão da mistura. Concretos com alto abatimento (*slump flow* elevado) e de baixa viscosidade plástica facilitam a eliminação do ar, consequentemente alcançando superfícies mais regulares com menos imperfeições. De acordo com EFNARC (2005), uma mistura que está perto de segregar costuma resultar em superfícies melhores. Isso também está atrelado ao teor de argamassa da mistura, sendo que teores mais elevados tendem a resultar em superfícies melhores. As Figuras 9 e 10 mostram a influência da viscosidade e do teor de argamassa no teor de vazios superficiais, respectivamente.

Figura 9: Falhas (vazios) na superfície – concretos com mesmo teor de argamassa.

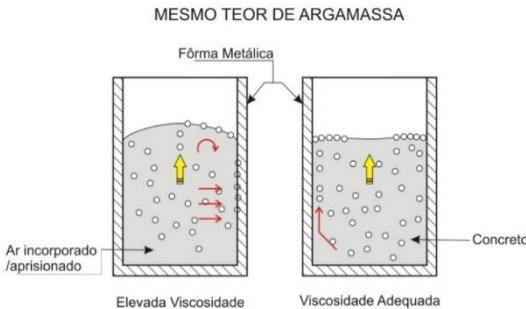
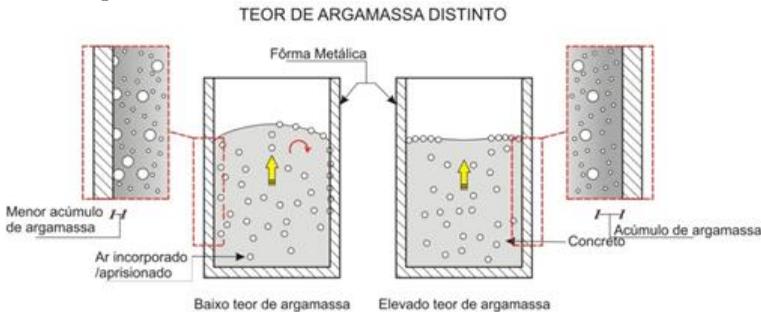


Figura 10: Falhas (vazios) na superfície – concretos com teor de argamassa distintos (supondo mesma viscosidade).



Quando as bolhas de ar pequenas ficam presas ou aderem à superfície do molde dão origem a defeitos de superfície que devem ser reparados, especialmente, em peças de concreto aparente. A qualidade da superfície do molde e o tipo e/ou teor de agente desmoldante utilizados são fatores que influenciam no acabamento superficial e estão relacionados aos métodos construtivos.

Para reduzir o problema com medidas construtivas, durante a moldagem é importante que a vazão do concreto na fôrma seja limitada e que o concreto tenha possibilidade de mover-se lateralmente dentro do molde por vários metros. Aliado a isso, bombeamento a partir do fundo do molde ou da caixaria geralmente produz melhor acabamento superficial. Se isso não for possível, a mangueira de vazamento deve ser mantida abaixo da superfície do concreto, pois se a mistura é vertida em queda livre, o número de grandes bolhas de ar aprisionadas sobre a superfície e dentro do corpo do concreto tende a aumentar (MEGID, 2012).

No sistema pré-fabricado, o aparecimento de bolhas superficiais pode ser intensificado pelo material utilizado nas fôrmas que, muitas vezes, é o metal. Segundo Paul (2005), fôrmas de madeira tendem a produzir menos bolhas superficiais quando comparadas a fôrmas metálicas. Isso ocorre porque a madeira absorve rapidamente o excesso de desmoldante. De acordo com o autor, o excesso de óleo em fôrmas de aço tende a reagir com a mistura de concreto e pode criar pequenas cavidades ou furos nas superfícies. Dessa forma, pode-se dizer que as fôrmas de aço exigem uma maior atenção para garantir uma superfície limpa e lisa do CAA.

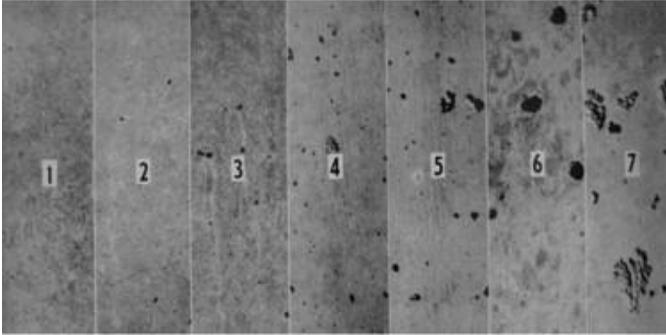
Suspeita-se também que superfícies não absorventes tendem a gerar mais bolhas superficiais por não apresentarem capacidade drenante. As bolhas de ar que migram para as laterais das fôrmas ficam presas no local, diferente de superfícies absorventes, como madeira ou geotêxtil, que absorvem essas bolhas de ar.

Para analisar a qualidade da superfície de concretos, frequentemente é utilizado o método sugerido por Thomson (1970), que propôs uma análise da qualidade da superfície do concreto baseada na comparação de fotografias da superfície e posterior contagem e medição das cavidades presentes.

Fotos de referência recomendadas pelo CIB (*Concrete International Board*) são apresentadas na Figura 11. Vários *softwares* disponíveis atualmente são capazes de analisar essas fotografias, e fornecer resultados rápidos e objetivos sobre a porcentagem de

imperfeições presentes, para o monitoramento da qualidade superficial (MEGID, 2012; SILVA; STEMBERK, 2013)

Figura 11: Referência para imperfeições no concreto: superfície 1 tem o menor percentual de imperfeições, enquanto que a superfície 7 apresenta o maior percentual.



Fonte: CIB (2003)

EFNARC (2005) cita uma série de razões que podem levar ao surgimento de bolhas na superfície e algumas formas de corrigir os problemas e melhorar o acabamento do CAA, conforme pode ser visualizado na Tabela 9.

Percebe-se que, segundo EFNARC, além das razões construtivas (que podem facilmente ser corrigidas), muitas das razões do surgimento de bolhas na superfície de CAA estão relacionadas aos parâmetros reológicos do material. E, quando o problema se concentra na reologia da mistura, é necessário um esforço maior para corrigi-lo, pois é necessário o emprego da reometria e a sua correta interpretação.

Tabela 9: Razões do surgimento de bolhas superficiais e formas de prevenir ou corrigir.

Razões práticas	Formas de prevenir ou corrigir
Excessiva quantidade de finos e/ou área superficial elevada dos finos.	Redução dos finos.
Óleo desmoldante aplicado em excesso ou de forma irregular nas fôrmas.	Aplicar somente uma fina camada de óleo desmoldante uniformemente nas fôrmas.
Fôrmas com superfícies ásperas.	Limpas as superfícies do molde; usar revestimento geotêxtil para absorver o ar.
Concretagem muito rápida (vazão elevada).	Assegurar uma descarga constante nas formas.

Razões práticas	Formas de prevenir ou corrigir
Comprimento do fluxo muito longo.	Limitar a distância de fluxo em 5 metros.
Extensão do fluxo muito curto.	Estender a distância do fluxo para 1 metro.
Altura de lançamento muito elevada.	A descarga do concreto deve ser realizada na altura máxima de 1 metro; enchimento das fôrmas de baixo para cima, facilita a retirada do ar.
Temperatura do concreto muito elevada.	A temperatura do concreto deve ser de no máximo 25°C.
Taxa de colocação do concreto muito lenta.	Planejar a concretagem e os equipamentos necessários para não ocorrer interrupção durante a moldagem.
Alta viscosidade da mistura	Reduzir o teor de VMA; ajustar a proporção dos materiais.
Graduação dos agregados inadequada.	Usar VMA ou incorporador de ar.
Tempo de mistura muito longo (incorpora mais ar).	Reduzir o tempo de mistura.
Interação do cimento e do aditivo.	Avaliar a compatibilidade cimento-aditivo antes da produção do concreto.

Fonte: Adaptada de EFNARC (2005).

2.6 ASPECTOS REOLÓGICOS DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

De acordo com Ferraris (1999), o concreto pode ser entendido como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em um fluido (pasta de cimento), sendo que, em escala macroscópica, o concreto fresco flui como um líquido. Dessa forma, o comportamento da mistura fresca deve ser estudado a partir dos conceitos da reologia, que é a ciência voltada ao fluxo e à deformação da matéria sob a influência de tensões (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

O conhecimento das propriedades reológicas do concreto fresco é fundamental para a indústria de concreto, pois estas afetam a trabalhabilidade, a colocação do concreto (transporte, bombeamento e lançamento) e a resistência à segregação e ao bloqueio da mistura. Além disso, estas propriedades influenciam a produtividade e a qualidade das peças produzidas, além de interferir nas suas propriedades mecânicas e de

durabilidade, já que é possível atenuar falhas devido às propriedades de fluxo (CHIDIAC; MAHMOODZADEH, 2009).

Da mesma forma que o concreto convencional, quando se emprega CAA, são comumente utilizados ensaios empíricos para descrever o comportamento no estado fresco das misturas produzidas, como citado no item 2.1: abatimento do tronco de cone (espalhamento e tempo para atingir uma abertura de 500 mm, t_{500}), funil V, caixa L, caixa U, anel J, entre outros. No entanto, cada um desses métodos determina apenas um ou no máximo dois tipos específicos de propriedades do CAA, sendo necessária a utilização simultânea de vários métodos para melhor se conhecer as propriedades da mistura em questão, e, em geral, esses ensaios refletem pontos de vista pessoais e pouca precisão científica.

Aliado a isso, muitos destes ensaios podem ser classificados como monopontos, ou seja, caracterizam o material em uma única condição de tensão ou taxa de cisalhamento, o que não fornece uma caracterização reológica completa dos concretos, que são fluidos não newtonianos. Isso pode gerar interpretações equivocadas sobre o comportamento da mistura em diferentes condições de aplicação (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011). Diante do exposto e sendo o concreto um fluido, nada mais adequado do que aplicar os conceitos da reologia ao estudo do seu comportamento no estado fresco (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

2.7 CATEGORIAS REOLÓGICAS

O campo da reologia caracteriza e quantifica diferentes comportamentos viscosos existentes em fluidos e suspensões. Existem duas categorias gerais de propriedades reológicas: independentes do tempo e dependentes do tempo (ROUSSEL, 2006).

A categoria é considerada como tempo-independente quando a duração do cisalhamento não afeta as propriedades reológicas. Fluidos newtonianos, dilatantes e pseudoplásticos são reologias independentes do tempo que não apresentam tensão de escoamento; enquanto fluidos viscoplásticos, descritos por Bingham, Bingham modificado e Herschel-Bulkley, por exemplo, apresentam tensão de escoamento. A tensão de escoamento é a resistência do material ao cisalhamento e, teoricamente, é a força que deve ser excedida para que o fluxo comece (IRGENS, 2008).

Na categoria tempo-dependente, os fluidos apresentam dois comportamentos. O fenômeno através do qual a viscosidade diminui com o tempo ao aplicar uma taxa de cisalhamento constante, chama-se

tixotropia. Pelo contrário, o aumento da viscosidade com o tempo, sob ação de uma taxa de cisalhamento constante, chama-se reopexia (BOTELLA, 2005).

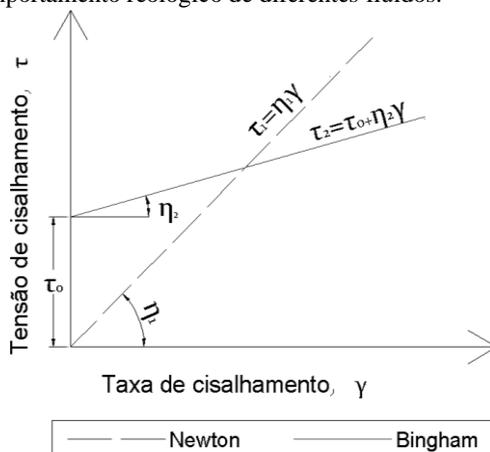
Os estudos realizados neste trabalho concentram-se no comportamento reológico independente do tempo, e seus aspectos são discutidos nos próximos tópicos.

2.7.1 Perfis Reológicos

Tattersall e Banfill escreveram o primeiro livro abrangente sobre reologia da pasta de cimento e do concreto em 1983. Neste texto clássico, os autores afirmam que o concreto e a pasta de cimento devem ser descritos usando, no mínimo, dois parâmetros. O comportamento de fluxo de materiais a base de cimento é frequentemente modelado como fluidos de Bingham (dois parâmetros: tensão de escoamento e viscosidade). Segundo muitos pesquisadores, entre eles Tattersall (1991) Banfill (2003), Wallevik (2006) e Esping (2008) há evidências consideráveis de que a reologia dessas misturas está em conformidade com esse modelo.

O modelo de Bingham, que é descrito por meio da tensão de escoamento e viscosidade plástica, pode ser observado na Figura 12, que também apresenta o modelo matemático de Newton. A única diferença entre esses dois modelos é a ausência de tensão de escoamento inicial no modelo de Newton.

Figura 12: Comportamento reológico de diferentes fluidos.



Fonte: Adaptada de Botella (2005).

A explicação para o comportamento de um fluido plástico ou binghamiano é que o material, em repouso, apresenta uma estrutura tridimensional com rigidez suficiente para resistir a qualquer tensão inferior ao ponto de fluxo (tensão de escoamento), e se comporta como um sólido elástico rígido. Caso a tensão aplicada ultrapasse a tensão de escoamento, a estrutura se desintegra e a mistura se comporta como um fluido newtoniano (TANNER, 1988 apud CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

Tal comportamento (plástico de Bingham) é um caso particular da equação de Herschel-Bulkley (HB), descrita na Equação 2, e que é considerada adequada para CAA segundo muitos pesquisadores, entre eles De Larrard, Ferraris, Sedran (1998); Barriga (2003); Senff, Hotza, Repette (2010); Pilar et al. (2011).

$$\tau = \tau_0 + k \times \gamma^n \quad (2)$$

Onde,

τ : tensão de cisalhamento (Pa);

τ_0 : tensão de escoamento (Pa);

γ : taxa de cisalhamento (1/s);

k : índice de consistência; e

n : índice de comportamento do fluido.

O modelo de HB é válido para uma ampla gama de materiais e outros modelos derivam dele, como pode-se observar na Tabela 10 e na Figura 13. De Larrard, Ferraris e Sedran (1998) demonstraram a possibilidade de se determinar os dois principais parâmetros reológicos (tensão de escoamento e viscosidade) mantendo o modelo de HB. Nesse caso, a tensão de escoamento é definida pela equação HB, enquanto que a viscosidade é calculada segundo a Equação 3.

$$\mu' = \frac{3k}{n+2} \gamma_{max}^{n-1} \quad (3)$$

Onde,

μ' : viscosidade plástica;

γ_{max} : taxa máxima de cisalhamento alcançada no ensaio; e

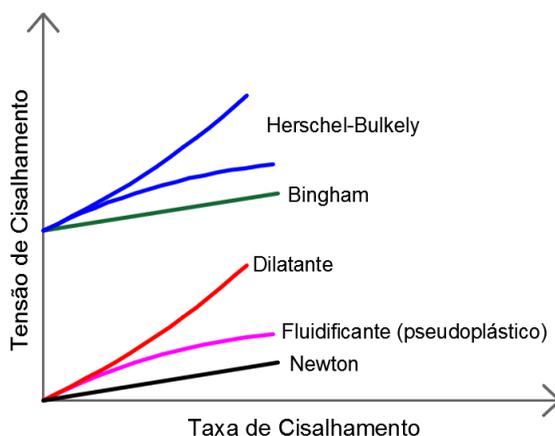
k e n : são retirados da equação de ajuste do HB (determinados por mínimos quadrados).

Tabela 10: Casos particulares do modelo HB.

Modelo	K	n	σ_0
Herschel-Bulkely	>0	$0 < n < \infty$	>0
Newton	>0	1	0
Fluidificante (pseudoplástico)	>0	$0 < n < 1$	0
Dilatante (espessante)	>0	$1 < n < \infty$	0
Plástico de Bingham	>0	1	>0

Fonte: Botella (2005).

Figura 13: Curvas de fluxo e curvas de viscosidade.



Fonte: Adaptada de Botella (2005) e Irgens (2008).

Da mesma forma que outras suspensões concentradas, os fluidos cimentícios podem apresentar comportamentos reológicos complexos, incluindo fluidez por cisalhamento, e espessamento por cisalhamento. Estes comportamentos reológicos surgem devido à heterogeneidade multiescala do concreto (heterogeneidade em relação às escalas macro e nano) (SHAH et al., 2009).

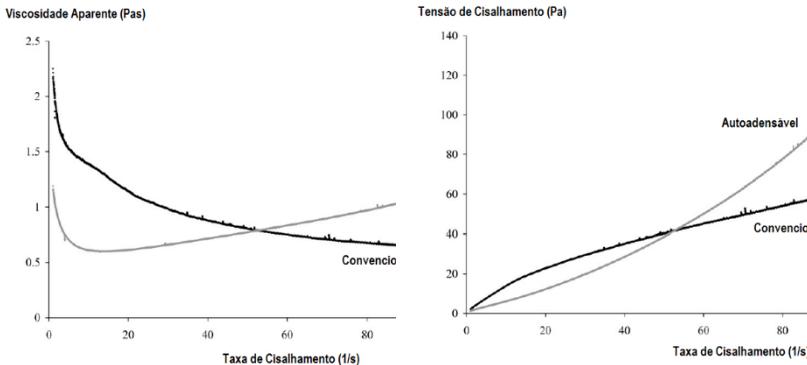
Os líquidos que exibem uma redução de viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento são caracterizados como pseudoplásticos ou fluidificantes. Por outro lado, o comportamento dilatante (espessante) consiste no aumento da viscosidade aparente com o aumento da velocidade de cisalhamento. Essa propriedade torna-se importante em operações que ocorrem em altas taxas de cisalhamento, tais como mistura e bombeamento. Nestes casos, o espessamento de

cisalhamento não deve ser esquecido, a fim de evitar problemas com o misturador, bombas e tubos (FEYS; VERHOEVEN; SHUTTER, 2009). À medida que a viscosidade (aparente) aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento, um aumento de energia será necessário para que a mistura flua.

Desta forma, segundo Shah et al. (2009) e Romano, Cardoso e Pileggi (2011), concretos transportados por bombeamento devem, preferencialmente, apresentar comportamento pseudoplástico, enquanto que o perfil dilatante não é indicado para lançamento com bomba, mas tem a vantagem conceitual de reduzir a segregação.

A Figura 14 mostra duas misturas: uma pasta com consistência convencional e outra autoadensável. Percebe-se que a pasta convencional apresenta um comportamento de Bingham, enquanto que a autoadensável apresenta um aumento de viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, ou seja, é um típico comportamento espessante.

Figura 14: Reologia de pastas de cimento convencional e autoadensável, com comportamento não espessante e espessante, respectivamente.



a) Curva viscosidade aparente x taxa de cisalhamento

Comportamento espessante em pastas autoadensáveis, a partir da taxa de 12 s^{-1} e comportamento não espessante em pastas convencionais.

b) Curva tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento

Pasta de cimento convencional apresenta comportamento semelhante ao modelo de Bingham (viscosidade praticamente constante), enquanto que a pasta autoadensável apresenta um comportamento dilatante.

Fonte: Feys, Verhoeven e Shutter (2009).

Embora existam outras explicações, uma das principais teorias sobre o fenômeno do espessamento por cisalhamento é a formação de aglomerados. De acordo com essa teoria, o cisalhamento induz a ordenação de partículas e, principalmente, é influenciado pelas elevadas forças hidrodinâmicas entre as partículas (lubrificação), que supera as forças de repulsão entre elas, formando conjuntos de partículas temporários, chamados de aglomerados. Com o tempo, as partículas podem entrar e sair do aglomerado, fazendo com que este fenômeno seja transitório e puramente hidrodinâmico. Se um aglomerado é formado na zona de cisalhamento, pode ocorrer bloqueio e interrupção do fluxo. Esse congestionamento leva a um aumento repentino da viscosidade aparente. O espessamento por cisalhamento começa em uma tensão de cisalhamento crítica, na qual a razão entre as forças hidrodinâmicas e as forças repulsivas torna-se maior do que um. A partir dessa tensão crítica, o tempo de relaxamento das forças de repulsão é demasiadamente grande em comparação às forças hidrodinâmicas, fazendo com que a partícula permaneça no aglomerado. Se a tensão aplicada é reduzida (abaixo da tensão crítica), as forças repulsivas dominam as forças hidrodinâmicas, fazendo com que os aglomerados desapareçam (comportamento reversível) (BRADY; BOSSI, 1988).

Segundo Barnes (1989), os principais parâmetros que controlam o espessamento por cisalhamento são:

- concentração de partículas: quanto maior o volume de partículas na suspensão, mais severo é o espessamento;
- interação entre as partículas;
- forma da partícula: formas irregulares tendem a gerar comportamentos mais espessantes; e
- tamanho das partículas: partículas menores favorecem o espessamento, sendo que a presença de agregados graúdos maiores que 8 mm pode quebrar os aglomerados formados, causando uma redução do espessamento (FEYS, VERHOEVEN, SHUTTER, 2009).

Como o comportamento dilatante ou espessante é uma reologia independente do tempo, que não apresenta tensão de escoamento, Yahia e Khayat (2001), Feys et al. (2013) e Wallevik et al. (2015) aplicaram o modelo de Bingham modificado para investigar a tensão de escoamento de misturas a base de cimento com comportamento não-linear. Esse modelo é descrito pela Equação 4:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} + c \cdot \dot{\gamma}^2 \quad (4)$$

Onde:

τ : tensão de cisalhamento (Pa);
 τ_0 : tensão de escoamento (Pa);
 γ : taxa de cisalhamento (1/s);
 μ : termo linear de primeira ordem; e
 c : termo de segunda ordem.

Quando $c/\mu < 0$ ocorre fluidez por cisalhamento (*shear-thinning*). O espessamento por cisalhamento (*shear-thickening*) é descrito quando $c/\mu > 0$. Logicamente, quando $c/\mu = 0$, é obtido o modelo de Bingham.

Segundo Yahia e Khayat (2001) o modelo de Bingham modificado atende à três critérios importantes para descrever o comportamento reológico de CAA:

- resultar em tensão de escoamento positiva;
- ter um termo linear positivo na taxa de cisalhamento (evita que a inclinação seja zero); e
- ter parâmetros com dimensões fixas, que podem ter um significado físico.

Feys et al. (2013) e Wallevik et al. (2015) compararam os valores de tensão de escoamento para misturas de CAA utilizando o modelo de Bingham modificado e Herschel-Bulkley, e concluíram que, no caso da não linearidade dos dados, a aplicação do modelo de Bingham modificado fornece o valor mais estável e confiável para determinar a tensão de escoamento.

Além dos modelos reológicos citados (Newton, Bingham, Bingham modificado e Herschel-Bulkley), existem muitos outros que tentam descrever o fluxo de fluidos. A escolha do perfil mais adequado a determinada situação é muito importante, pois os parâmetros obtidos são dependentes do modelo adotado, além das condições de ensaio (taxa de cisalhamento, temperatura, energia de mistura, histórico de cisalhamento, etc) (FERRARIS, 1999; LOMBOY; WANG; WANG, 2014).

Nehdi e Rahman (2004) estudaram o comportamento reológico de pastas de cimento com diversas combinações de relações água/aglomerante, adições minerais e aditivos, determinando a viscosidade plástica e/ou tensão de escoamento por diferentes modelos reológicos: Bingham, Herschel-Bulkley, Casson, Bingham modificado, Sisko e Williamson. As propriedades reológicas variaram fortemente dependendo do modelo adotado: o modelo de Bingham modificado forneceu os menores valores de tensões de escoamento; já o modelo de Herschel-Bulkley forneceu os maiores valores de tensão de escoamento e, em alguns casos, os menores valores de viscosidade plástica. Alguns modelos apresentaram valores inconsistentes: Sisko determinou valores

de viscosidade plástica na ordem de 10^7 vezes menor que os demais, enquanto Williamson determinou viscosidades 10^5 vezes maior. Apenas os modelos de Bingham e Bingham modificado apresentaram aumento da tensão de escoamento com a redução da relação água/aglomerante.

Por fim, de acordo com estudos de Wallevik et al (2015), modelos reológicos não-lineares só devem ser considerados quando necessário, já que a inclusão de um termo adicional no modelo reológico aumenta a sensibilidade de todos os parâmetros a pequenos erros de medição. Os autores salientam que a forma da curva causa dificuldades adicionais na definição da viscosidade, e o valor estimado da tensão de escoamento é fortemente dependente da escolha do modelo.

2.7.2 Tensão de Escoamento e Viscosidade

Conforme citado anteriormente, segundo Tattersall e Banfill (1983), misturas à base de cimento devem ser descritas usando, no mínimo, dois parâmetros: tensão de escoamento e viscosidade. Desta forma, apesar de alguns aspectos já terem sido explanados nos tópicos anteriores, é importante um maior esclarecimento sobre esses parâmetros e seus fatores influentes.

A tensão de escoamento (τ_0) e a viscosidade (η) são duas grandezas básicas que definem o comportamento dos fluidos. De forma geral, a primeira indica a tensão mínima para o início do escoamento, enquanto a segunda é a constante de proporcionalidade que relaciona a taxa ($\dot{\gamma}$) com a tensão de cisalhamento (τ).

A despeito dessas definições, a tensão de escoamento e a viscosidade não são parâmetros intrínsecos e constantes do material, e sim valores matemáticos dependentes das condições às quais as misturas são solicitadas (taxa de cisalhamento, temperatura, pressão, tempo de aplicação, etc.).

A maioria das equações usadas para descrever o fluxo de suspensões, como o concreto, relaciona a concentração de uma suspensão com a sua viscosidade ou a tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento, assumindo que exista apenas um valor de viscosidade para todo o sistema (FERRARIS, 1999), o que não ocorre na realidade (em fluidos não newtonianos).

Da mesma forma, a determinação da tensão de escoamento também pode ser questionada, pois pode-se dizer que existe fluxo tanto acima quanto abaixo dessa tensão. Historicamente, a ideia do ponto de fluxo surgiu pela incapacidade de os equipamentos disponíveis realizarem

medidas em taxas de cisalhamento muito pequenas, aparentando a existência de um esforço crítico, abaixo do qual a viscosidade era infinita. No entanto, dispendo da precisão adequada e do tempo suficiente, observa-se que, abaixo da chamada tensão de escoamento, a viscosidade pode aumentar muitas ordens de magnitude em um intervalo de esforço muito pequeno (BOTELLA, 2005).

Apesar disso, reconhece-se que a definição da tensão de escoamento é muito útil para uma grande variedade de aplicações, desde que definida com cautela. BOTELLA (2005) sugere que o ponto de fluxo de um líquido seja definido como o ponto em que, ao diminuir o esforço aplicado, o líquido parece mostrar um comportamento similar a um sólido, em que a deformação é muito sutil.

Também é possível estabelecer uma viscosidade geral para uma determinada variação da taxa de cisalhamento, que facilita a interpretação do comportamento reológico do material, denominado viscosidade plástica, obtida pelo modelo de Bingham (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011). Além desse parâmetro, outro termo utilizado é a viscosidade aparente, na qual se supõe que o comportamento de fluxo de um material não newtoniano se compara a um newtoniano, mas somente em um ponto singular da curva, não sendo capaz de descrever o comportamento a taxas de cisalhamentos distintas (BOTELLA, 2005).

Dito isso, pode-se explicar a tensão de escoamento e a viscosidade em termos práticos, para possibilitar o melhor entendimento do comportamento de misturas de concretos.

Segundo Tattersall (1991), Banfill (2003) e Roussel (2012), para uma ampla variação de consistência, o concreto fresco se comporta como um fluido plástico ou binghamiano (conforme explicado no item 2.7.1), resultando em uma reta com um coeficiente linear diferente de zero, sendo que, em um gráfico tensão de cisalhamento por taxa de cisalhamento, a intersecção da reta com o eixo da tensão de cisalhamento corresponde à tensão de escoamento, e a inclinação da reta à viscosidade plástica.

O concreto possui uma resistência inicial ao movimento, ou seja, o material fluirá tanto mais quanto menor for a sua tensão de escoamento. Já o valor da viscosidade está associado à velocidade e à dissipação de energia no fluxo. Quanto menor for a viscosidade, menor a dissipação de energia e mais rápido o sistema se movimentará, o que, em tese, resultará em melhores características de moldagem. Contudo, essa propriedade também está relacionada à resistência à segregação, uma vez que, se a viscosidade da pasta for muito reduzida, o concreto poderá apresentar separação de fases (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).

Como a concentração de sólidos em um concreto é muito alta e estes possuem tamanhos e morfologias muito variáveis, a tensão de escoamento poderá originar-se, principalmente, em três fontes: intertravamento dos agregados; forças de atração entre o cimento e outras pequenas partículas, provocando floculação; ou reações de hidratação do cimento (PETROU et al., 2000 apud CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

A tensão de escoamento pode ser estática ou dinâmica. A tensão de escoamento estática é a tensão necessária para iniciar o fluxo, quando a microestrutura está bem conectada (QIAN, KAWASHIMA, 2016). A tensão de escoamento estática é uma propriedade importante para definição da pressão lateral nas fôrmas, e é função do grau de floculação das partículas presentes na mistura. Quando o concreto é deixado em repouso, desenvolve uma resistência ao cisalhamento, que aumenta com o tempo. Consiste em uma evolução reversível do comportamento reológico do material durante o período de dormência da reação de hidratação, que evolui continuamente. Como esse comportamento pode ser revertido por imposição de tensão de cisalhamento elevada, esse estado é muitas vezes descrito como tixotropia (BILLBERG, 2012).

Em contrapartida, a tensão de escoamento dinâmica é obtida a partir da curva de fluxo em estado estacionário, de acordo com o modelo de Bingham, por exemplo. A tensão de escoamento dinâmica determina até que ponto um material pode fluir, antes que as tensões na mistura se tornem menores do que a referida tensão de escoamento dinâmica, passando de um estado de movimento para um estado de repouso (OVARLEZ, 2012), ou seja, é a tensão necessária para terminar o fluxo, medido após o material ter sido cisalhado (QIAN, KAWASHIMA, 2016).

A viscosidade, por sua vez, consiste na percepção macroscópica do escoamento da água nos poros de um sistema granular (DE LARRARD; SEDRAN, 2002), sendo dependente da quantidade de água livre (que também está relacionada aos finos presentes), podendo ser manipulada através de aditivos redutores de água (PIEKARCZYK, 2013).

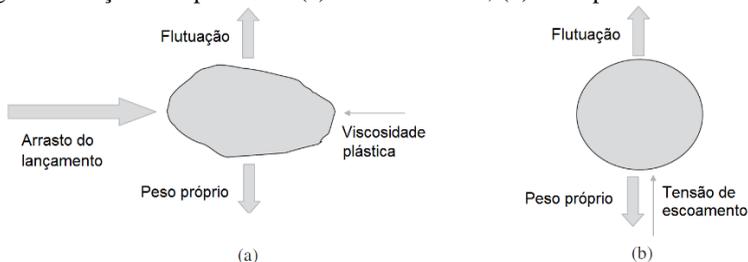
No CAA, a tensão de escoamento deve ser baixa, garantindo o aumento da fluidez, e a viscosidade deve ser moderada, para promover a estabilidade necessária. Níelsson e Wallevik (2003) indicam que a tensão de escoamento e a viscosidade podem atuar juntas na garantia da resistência à segregação, de forma que, quando a viscosidade for muito baixa, a tensão de escoamento deve ser alta, sendo o contrário válido.

Segundo Shah et al. (2009), na segregação estática a viscosidade tem um papel pequeno em comparação à tensão de escoamento. No entanto, para a segregação dinâmica, na qual o fluido se encontra em

movimento, a viscosidade tem um papel importante. Durante o movimento, a estrutura do fluido pode quebrar e não ser mais capaz de sustentar os agregados caso a tensão de escoamento seja muito reduzida. Neste caso, a viscosidade mais elevada da mistura manterá o concreto coeso até a paralisação do movimento, quando a estrutura do fluido é reconstruída, restaurando a tensão de escoamento e aumentando o impedimento à segregação.

Nota-se na Figura 15a que, durante o movimento, as partículas estão submetidas a diversos esforços tais como o arrasto devido ao lançamento, peso próprio e a flutuação (empuxo), podendo gerar segregação dinâmica. A segregação estática, por sua vez, se manifesta pelo afundamento dos agregados e/ou pela ascensão da fase líquida (exsudação), com o concreto em repouso. Na Figura 15b, pode-se observar que as partículas estão submetidas apenas ao peso próprio e a flutuação. A propriedade que se opõe ao início do fluxo, garantindo que o agregado permaneça estável, é a tensão de escoamento.

Figura 15: Ações nas partículas (a) durante o fluxo; (b) em repouso.



Fonte: Adaptada de Bonen e Shah (2005).

Como o uso de reômetros para a determinação dos parâmetros reológicos ainda é restrito, muitos estudos foram realizados objetivando correlacionar os resultados dos testes em campo à tensão de escoamento e à viscosidade da mistura.

Wallevik (2006) realizou tentativas de encontrar uma relação entre a viscosidade plástica e o espalhamento do tronco de cone. No entanto, o autor não encontrou boas correlações para essas variáveis. Sabe-se, porém, que a viscosidade da mistura pode ser estimada em função do tempo de escoamento do concreto no funil V.

Alguns autores, entre eles Murata e Kikukawa (1992), De Larrard (1999) e Wallevik (2006), propuseram equações ou gráficos de correlação entre a tensão de escoamento do concreto e seu abatimento no tronco de cone, mostrando que, quanto maior é o abatimento do tronco de cone,

menor é a tensão de escoamento da mistura. Sua-iam e Makul (2013) afirmam que o espalhamento de um concreto convencional se correlaciona bem com a tensão de escoamento inicial. De acordo com Kovler e Roussel (2011), durante o *slump* teste, o fluxo estaciona quando a tensão de cisalhamento na amostra torna-se igual ou menor do que a tensão de escoamento. Consequentemente, a forma de paralisação está diretamente relacionada à tensão de escoamento do material.

Por outro lado, segundo Roussel (2006), no caso de CAA, o espalhamento medido pelo *slump flow* não pode ser correlacionado com a tensão de escoamento da mistura testada porque o teste do *slump flow* não proporciona um fluxo homogêneo da mistura, devido à baixa relação entre a espessura do concreto no final do teste e o diâmetro das partículas presentes. Segundo Coussot e Ancey (1999), a espessura da amostra quando o escoamento cessa deve ser, no mínimo, cinco vezes maior do que o diâmetro máximo dos agregados, para que seja considerado o fluxo homogêneo de uma mistura.

2.7.3 Fatores que Influenciam a Reologia do CAA

Dependendo das particularidades de cada suspensão e da magnitude da taxa de cisalhamento aplicada, um ou mais fatores pode prevalecer e comandar o comportamento reológico do fluido (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

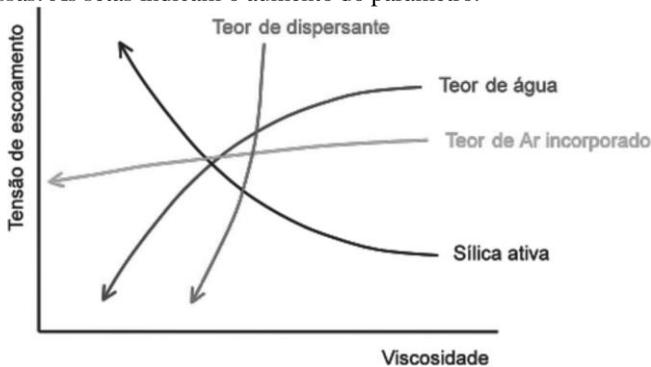
A Figura 16 apresenta uma representação esquemática baseada em resultados de reometria rotacional em argamassas. O gráfico, publicado por Banfill (2005), mostra o impacto de vários fatores sobre a tensão de escoamento e viscosidade da mistura.

Para desenvolver essa representação, Banfill (2005) fez uso de dados de um número significativo de fontes, das quais os efeitos das composições puderam ser resumidos. No entanto, não há um consenso no meio técnico em relação a alguns desses parâmetros e a imposição de uma determinada forma de influência pode gerar conclusões equivocadas, uma vez que os materiais apresentam uma gama de fatores que interferem nas propriedades reológicas das misturas com eles confeccionadas.

O gráfico orientativo de Banfill apresenta somente o impacto dos constituintes do concreto na tensão de escoamento e viscosidade. De fato, os materiais constituintes são considerados os principais influentes nas propriedades reológicas do concreto fresco. O cimento e o aditivo são componentes de grande influência neste quesito, especialmente no que tange à composição química e à interação entre eles. A granulometria do

cimento, a quantidade e o tipo de sulfato de cálcio presentes no mesmo, a natureza química e o peso molecular do superplastificante, a sua dosagem e forma de adição, também devem ser levados em consideração. As adições minerais também produzem efeitos intensos sobre as propriedades do concreto ao qual são incorporadas, especialmente porque possuem partículas muito pequenas, que podem adsorver água e/ou aditivo.

Figura 16: Representação esquemática baseada em resultados de reometria rotacional do impacto de diferentes teores de água, ar, sílica ativa (partículas ultrafinas) e dispersante sobre a viscosidade e a tensão de escoamento de argamassas. As setas indicam o aumento do parâmetro.



Fontes: Banfill (2005) adaptada por Romano, Cardoso e Pileggi (2011).

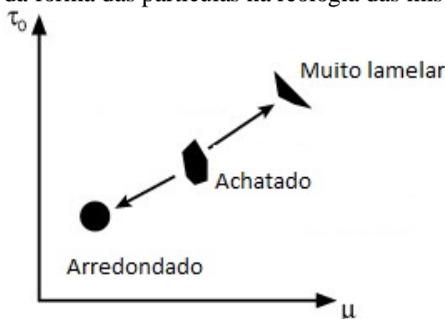
A influência nos parâmetros reológicos da presença de sílica ativa, que segundo Banfill (2005) aumenta a tensão de escoamento e diminui a viscosidade conforme o seu teor é aumentando, pode variar de forma significativa, dependendo do formato, área superficial e origem do material e do cimento utilizado, assim como do perfil reológico empregado para a determinação dos parâmetros. De acordo com Park, Noh e Park (2005), o aumento do teor de sílica ativa presente em pastas de cimento (0, 5, 10 e 15% de substituição ao cimento) causa um acréscimo na tensão de escoamento e na viscosidade da mistura de forma proporcional. Por outro lado, Zhang e Han (2000) verificaram que uma substituição de 10% de sílica ativa reduziu a tensão de escoamento e a viscosidade de pastas quando comparadas com a mistura referência.

Segundo Banfill (2005), o aumento do teor de dispersante diminui a tensão de escoamento de forma significativa, mas pouco altera a viscosidade da mistura. Em geral, isso ocorre em superplastificante a base de policarboxilato-poliéteres (REPETTE, 2011), não sendo,

necessariamente, válido para aditivos com outras bases químicas. Nos estudos realizados por Camões (2005), por exemplo, o aumento no teor de aditivo superplastificante (naftaleno formaldeído sulfonado) diminui ambos os parâmetros, apesar de alterar de forma mais acentuada a tensão de escoamento.

Além desses fatores, pode-se citar a dosagem do concreto, especialmente a relação água/cimento, além da composição, morfologia e distribuição granulométrica dos agregados (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011). Wallevik e Wallevik (2011) mostraram a relação entre a forma das partículas de agregados e o comportamento reológico de misturas com elas dosadas. De acordo com a Figura 17, percebe-se que quanto mais arredondada for a partícula, menor é a tensão de escoamento e a viscosidade da mistura com ela confeccionada, sendo o contrário válido.

Figura 17: Efeito da forma das partículas na reologia das misturas.



Fonte: Adaptada de Wallevik e Wallevik (2011).

Segundo Tregger, Pakula e Shah (2010), a reologia do concreto está relacionada com o grau de floculação da matriz da pasta. O grau de floculação, por sua vez, é função das forças interpartículas. De forma simplificada, as partículas irão agregar quando as forças atrativas excederem as forças repulsivas, ou seja, a floculação é um processo durante o qual as partículas dispersas se aglomeram por uma combinação de forças de Van de Waals e forças eletrostáticas (BANFILL, 2006). Uma suspensão com partículas de cimento floculadas possui alta viscosidade, e é uma das razões para a pasta de cimento apresentar tixotropia (YIM, KIM, SHAH, 2013).

Como o processo de mistura de uma suspensão a base de cimento envolve a quebra de aglomerados de partículas, a reologia dessa suspensão é sensível à sequência e à intensidade da mistura (WILLIAMS,

SAAK e JENNINGS, 1999; HAN e FERRON, 2016). O aumento da taxa de cisalhamento reduz a viscosidade plástica e diminui a área de histerese formada entre as partes ascendente e descende da curva (WILLIAMS, SAAK e JENNINGS, 1999).

Apesar de a reologia de fluidos plásticos não ser muito sensível à temperatura, em concretos esse fator pode ter um efeito marcante sobre a taxa de adsorção do superplastificante sobre os grãos de cimento (CLAISSE; LORIMER; OMARI, 2001 apud CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011). Sob altas temperaturas, o concreto fresco endurece em um intervalo de tempo menor quando comparado às condições normais e apresenta perda rápida de trabalhabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Por fim, a reologia da pasta de cimento influencia no comportamento do concreto com ela confeccionado. Como a pasta de cimento corresponde à maior parte da área superficial do concreto e é responsável pela sua fluidez e pela coesão, a trabalhabilidade e demais propriedades reológicas do concreto são dependentes de suas características. Apesar disso, vale salientar que existe uma percepção geral de que estabelecer uma conexão entre a reologia de um concreto e a reologia de uma pasta de cimento está fora da capacidade da reometria (TATTERSALL; BANFILL, 1983).

2.7.4 Reômetros de Concreto

Reômetros são equipamentos destinados à avaliação de propriedades reológicas de fluidos e suspensões. Permitem estudar o comportamento da viscosidade e da tensão de escoamento em função de outras variáveis, como tempo e temperatura. Eles permitem uma compreensão detalhada em relação à influência de cada componente no comportamento da mistura.

Os reômetros são aparelhos precisos não apenas para pesquisa, mas também para estudos práticos e medidas de controle de qualidade do material. Eles fornecem mais informações do que os ensaios empíricos convencionais e os dados obtidos são mais objetivos, uma vez que o ensaio é totalmente automatizado e controlado por computador (HU; DE LARRARD, 1996 apud CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

No entanto, os reômetros mais difundidos só definem parâmetros de suspensões homogêneas. O concreto, devido à sua grande extensão granulométrica, com partículas com dimensões que variam desde a faixa

micrométricas até a ordem de milímetros, não pode ser considerado suspensão homogênea (PILEGGI; PAIVA; PANDOLFELLI, 1999).

Os primeiros reômetros para concretos datam das décadas de 1960 e 1970, sendo que o primeiro deles foi desenvolvido por Powers em 1968 (CASTRO, LIBANO, PANDOLFELLI, 2009). Atualmente, existe uma ampla variedade de modelos capazes de medir as propriedades reológicas de um fluido que contém uma grande porcentagem de partículas sólidas. Existem vários reômetros de concreto utilizados em todo o mundo e com diferenças significativas em seu *design*, sem nenhum método padrão para se comparar os seus resultados.

Em 2004, nos Estados Unidos, o Instituto Nacional de Normas e Tecnologia (*National Institute of Standards and Technology* - NIST) comparou oito modelos de reômetros em um mesmo local e com as mesmas misturas de concreto. Os reômetros estudados foram:

- BML (Islândia);
- BTRHEOM (França);
- CEMAGREF-IMG – Reômetro coaxial (França);
- IBB (Canadá) em duas versões: modelo de laboratório e portátil;
- Dois-Pontos (Reino Unido);
- UIUC (EUA);
- FHPCM – Fluxo de concreto de alta performance; e
- Aparelho Berta.

Entre as conclusões obtidas pelo Instituto constatou-se que, apesar das diferenças absolutas entre os valores medidos, os reômetros avaliam e classificam, de maneira semelhante, o comportamento reológico de concretos. Isso torna viável a elaboração de curvas de correlação entre diferentes aparelhos.

Detalhes sobre esses equipamentos podem ser analisados no documento original. Depois da publicação dessa comparação de equipamentos, outros reômetros de concreto foram desenvolvidos. Cita-se, neste trabalho, o reômetro desenvolvido pelo ICAR, na Universidade do Texas, e o desenvolvido na Universidade Politécnica de São Paulo (Poli-USP).

2.7.4.1 Reômetro ICAR

O reômetro ICAR é um instrumento portátil para medir as propriedades reológicas do concreto fresco. O instrumento foi desenvolvido no *International Center for Aggregate Research* (ICAR), localizado na Universidade do Texas, em Austin.

O equipamento é composto de um recipiente para armazenar o concreto fresco, um controlador com motor elétrico e torquímetro, pá misturadora de quatro palhetas, um quadro para prender o conjunto e um computador portátil com o *software* do reômetro para operar o controlador, gravar os dados e calcular os parâmetros de fluxo, conforme pode ser visualizado na Figura 18. O recipiente contém uma série de hastes verticais em torno do perímetro para evitar o escorregamento do concreto ao longo da parede do recipiente durante o ensaio. O tamanho do recipiente e o comprimento do eixo do misturador são selecionados com base na dimensão nominal máxima do agregado. A empresa fornecedora do equipamento disponibiliza cinco tamanhos de recipientes, sendo o maior para agregados de dimensão máxima nominal de 32 mm. A velocidade de rotação do misturador compreende de 0,001 até 0,6 rot/s.

Dois tipos de testes podem ser realizados no equipamento. O primeiro é um teste de crescimento de tensão, em que o misturador apresenta velocidade lenta e constante de 0,025rot/s. O aumento inicial de torque é medido como uma função do tempo. O torque máximo é utilizado para calcular a tensão de escoamento estática. O outro tipo de teste, chamado de curva de fluxo, determina a tensão de escoamento dinâmica e a viscosidade plástica. Esse ensaio começa com um período de desagregação, no qual o misturador está em velocidade máxima. Isso é feito para “quebrar” qualquer estrutura tixotrópica da mistura e proporcionar um histórico de cisalhamento consistente antes de medir os parâmetros de Bingham. A velocidade do misturador é então diminuída em um determinado número de passos definidos pelo operador. Durante cada etapa, a velocidade é mantida constante e grava-se a velocidade média e o torque para plotagem do gráfico de curva de fluxo.

Figura 18: Reômetro ICAR.



Fonte: Adaptado de Germann Instruments (2013).

2.7.4.2 Reômetro Pheso POLI-USP

O reômetro Pheso para argamassas e concretos desenvolvido na Poli-USP permite a utilização de dois conceitos de aplicação de cisalhamento: rotação concêntrica ou planetária. Imagens do equipamento, disponível no Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais, podem ser visualizadas na

Figura 19.

O equipamento varia controladamente a rotação, em RPM, transferindo-a, por meio de uma raquete dentada, para a mistura a ser analisada. Para cada rotação é medido o torque, ou seja, mede-se a resistência do material ao fluxo imposto sob diferentes condições. Esta medição é realizada a partir da variação de energia elétrica consumida para a movimentação da raquete (DAMINELI, 2013).

Figura 19: Reômetro Poli-USP.



a) Reômetro Pheso Poli-USP

b) Ensaio em execução.

Fonte: a) ROMANO; CARDOSO; PILEGGI (2011); b) DAMINELI (2013).

2.8 MATERIAIS CONSTITUINTES DO CAA

Os materiais utilizados para dosagem de CAA, na prática, são os mesmos utilizados para o CCV (concreto convencional vibrado), porém, com maior quantidade de finos (adições minerais quimicamente ativas ou fílers) e de aditivos redutores de água e/ou modificadores de viscosidade.

2.8.1 Cimento

A princípio, todos os tipos de cimento Portland empregados na produção de concretos convencionais podem ser empregados na produção de CAAs. Entretanto, os cimentos de maior finura (450 m²/kg, por exemplo) são mais indicados por promoverem maior coesão à mistura,

apesar de demandarem maior quantidade de superplastificante (REPETTE, 2011).

O tipo e quantidade de cimento afetam diretamente as propriedades do CAA no estado fresco e endurecido. A composição química, quantidade e finura do mesmo influencia fortemente na demanda de água e eficiência dos aditivos: cimentos com elevados teores de C_3A , assim como elevados teores de álcalis, podem ocasionar pequena manutenção de fluidez dos concretos. Já no estado endurecido, tais características do cimento têm papel fundamental na evolução da resistência à compressão e durabilidade do material (RAMACHANDRAN, 1995; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Leeman, Loser e Munch (2010) avaliaram a durabilidade de CAAs produzidos com diferentes tipos de cimento: cimento Portland comum, com adição de fíler calcário e cimento de escória. Para mesma relação a/c, os concretos contendo cimento de escória apresentaram porosidade da pasta e da zona de transição significativamente mais baixas, além da resistência à penetração de cloretos bastante inferior aos demais.

2.8.2 Agregados

O CAA é muito sensível às mudanças nas características dos agregados (forma, textura, tamanho máximo, entre outras) e, por isso, os testes de granulometria e teor de umidade devem ser realizados com mais frequência do que o habitual (para CCV) (EFNARC, 2005; KHALEEL; MISHHADANI; RAZAK, 2011).

Aliado a isso, a fração volumétrica dos agregados está relacionada, principalmente, ao módulo de elasticidade do concreto e à retração por secagem, sendo menos deformáveis e com menos fissuração por retração os concretos com mais agregados e com menor teor de argamassa (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De forma geral, as areias adequadas para concretos convencionais também serão adequadas para concreto autoadensável, podendo ser utilizadas tanto areias naturais (depósitos eólicos aluviais) quanto areias obtidas de processos industriais. As primeiras são mais recomendadas por possuírem forma uniforme, mais arredondada, e textura lisa. As areias de britagem são geralmente menos indicadas por apresentarem composição granulométrica com descontinuidade (lacunas em frações), grãos com elevada angulosidade e aspereza superficial, o que causa maior intertravamento das partículas e maior adsorção de água, aumentando a demanda por pasta e aditivos na composição do concreto. Segundo

Okamura e Ouchi (2003), quanto mais lamelares forem as partículas, maior será a resistência de cisalhamento das argamassas, dificultado a deformabilidade da mistura.

Quanto ao tamanho das partículas, areias grossas promovem a necessidade de aumento do teor de pasta, pois podem levar à segregação e, por isso devem ser evitadas. As areias mais recomendadas são as médias finas ($MF^1 = 2,4$) e finas ($MF=1,0$). Vale salientar também que, segundo EFNARC (2005), as frações inferiores a 0,125 mm dos agregados miúdos podem ser consideradas como parte da parcela de finos do concreto.

Da mesma forma, os agregados graúdos empregados são os mesmos usados em CCV, sendo preferíveis os de forma regular e mais arredondados. Para garantir a passagem do concreto por todos os obstáculos durante o lançamento e reduzir a segregação, recomenda-se que a dimensão máxima seja de 19 mm, sendo habituais os tamanhos compreendidos entre 12,5 e 19 mm.

2.8.3 Aditivos

O desenvolvimento do CAA só foi possível com o uso de aditivos, especialmente os superplastificantes, que são um componente essencial do CAA para fornecer a funcionalidade necessária. Outros tipos de aditivos podem ser incorporados ao concreto, como agentes modificadores de viscosidade, para melhorar a estabilidade da mistura; desincorporadores de ar, para evitar a perda de resistência à compressão em concretos com alta viscosidade; retardadores de pega; estabilizadores de hidratação, usados, principalmente, para manutenção da trabalhabilidade das misturas e; em alguns países, incorporadores de ar para melhorar a resistência ao congelamento e ao descongelamento.

Como os aditivos mais empregados para CAA são redutores de água (superplastificantes) e modificadores de viscosidade (promotores de viscosidade), neste documento somente estes dois tipos de aditivos serão discutidos.

2.8.3.1 Redutores de Água

As partículas de cimento Portland, quando entram em contato com a água, que tem molécula polar, tendem a se flocular e aprisionar água

¹ MF: módulo de finura (somatório das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal dividido por 100).

entre seus grãos, reduzindo a disponibilidade de água e a lubrificação da mistura. Isso resulta em um aumento da viscosidade da pasta e na redução da área específica dos grãos de cimento disponíveis para as reações de hidratação (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). Em função disso, nos CAAs, o uso de aditivos dispersantes é essencial.

Entre os aditivos dispersantes redutores de água estão os plastificantes, os superplastificantes tipo I e os superplastificantes tipo II (ABNT NBR 11768, 2011). Os primeiros são aqueles que são capazes de reduzir cerca de 10 a 15% da água da mistura e dificilmente são utilizados de forma isolada em um CAA, que necessita de uma eficiência muito maior. No entanto, podem ser usados em conjunto com superplastificantes.

De acordo com EFNARC (2005), os superplastificantes são redutores de água de alta eficiência, utilizados quando é necessária uma redução de água superior a 20%. O nível de fluidez do CAA é governado, principalmente, pela dosagem do superplastificante. No entanto, uma quantidade muito alta deste aditivo pode conduzir ao risco de segregação e ao bloqueio.

Os superplastificantes do tipo I contêm sais condensados sulfonados de naftaleno-formaldeído e/ou condensados sulfonados de melamina-formaldeído (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). São produtos sintéticos obtidos a partir de técnicas de polimerização e geralmente promovem a dispersão das partículas finas por meio de repulsão eletrostática. Estes aditivos também causam diminuição da tensão superficial do meio aquoso, diminuindo a viscosidade da mistura e aumentando o risco de segregação (REPETTE, 2011).

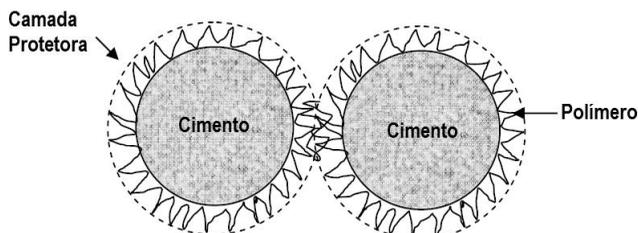
Já os do tipo II são a base de policarboxilato-poliéteres (PCE) e são os aditivos mais indicados para CAA (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). Eles são conhecidos por proporcionarem uma melhor manutenção da trabalhabilidade (desempenho superior e melhor manutenção da fluidez) e por serem mais previsíveis sobre os tempos de pega (HARTMANN et al., 2011). Além disso, a dispersão das partículas ocorre, principalmente, por repulsão estérica, sem causar diminuição expressiva da viscosidade da pasta (REPETTE, 2011).

As propriedades dos PCE são determinadas por parâmetros moleculares, como o comprimento da cadeia e sua frequência e o tamanho e a composição das cadeias laterais, anexadas à cadeia principal (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). De acordo com Yamada et al. (2000 apud HARTMANN et al., 2011), para uma mesma dosagem de aditivo, quanto maior o tamanho da cadeia do polímero, maior a fluidez da mistura.

Os produtos à base de melamina, naftaleno ou lignossulfonato atuam, principalmente, por repulsão eletrostática. Na repulsão eletrostática, os grupos polares do aditivo são atraídos e adsorvidos pelas regiões carregadas eletricamente nas partículas de cimento. Ocorre, então, a dispersão das partículas pelo efeito das cargas opostas (FERRON, 2008).

Aditivos à base de policarboxilato também atuam por repulsão eletrostática, mas não é esse o seu mecanismo principal de ação. Os agentes tensoativos são moléculas orgânicas que possuem a capacidade de adsorver-se nas interfaces, alterando as suas propriedades físicas (COSGROVE, 2005 apud FERRON, 2008). Dessa forma, além da repulsão eletrostática, a dispersão das partículas de cimento pode ser relacionada à repulsão estérica, que é produzida pela presença de uma longa cadeia lateral ligada em vários pontos na cadeia central do polímero. Esta arquitetura produz forte efeito dispersante, pois o impedimento do entrelaçamento das cadeias laterais de diferentes moléculas de aditivo cria uma camada de adsorção de grande volume, que impede a aproximação das partículas de cimento (HARTMANN; HELENE, 2003), conforme pode ser visualizado na Figura 20 (ação dos aditivos superplastificantes do tipo I e do tipo II em misturas cimentícias).

Figura 20: Esquema do mecanismo de repulsão estérica.



Fonte: Adaptado de FERRON (2008).

2.8.3.2 Modificadores de Viscosidade – VMA

A principal função dos aditivos modificadores de viscosidade (*Modifying Viscosity Admixtures* – VMA) é alterar as propriedades reológicas da pasta de cimento.

Aditivos modificadores de viscosidade são polissacarídeos solúveis em água, usados para aumentar a coesão e a estabilidade dos sistemas à base de cimento, especialmente aplicados em CAA visando melhorar a homogeneidade, a deformabilidade, a robustez e a estabilidade da mistura (KHAYAT, 1998).

Para se obter um concreto com reologia apropriada à determinada aplicação, é necessário alcançar um equilíbrio entre o ponto de escoamento e a viscosidade plástica. Os VMA modificam as propriedades reológicas do concreto, aumentando a viscosidade plástica, e, geralmente, causam apenas um pequeno aumento na tensão de escoamento. O uso de aditivos redutores de água (plastificantes e superplastificantes) influencia fortemente na tensão de escoamento, e, na maioria das vezes, é empregado em conjunto com um VMA para otimizar esse parâmetro (EFNARC, 2006).

Em CAA, os promotores de viscosidade mais utilizados são os polímeros semissintéticos derivados de éteres de celulose e biopolímeros (FERRON, 2008). Segundo Khayat (1998), o modo de ação do VMA depende do tipo e da concentração do polímero que os constituem. Os derivados de éteres de celulose possuem três formas de ação:

- adsorção ou ligação: as moléculas dos polímeros de cadeia longa aderem às moléculas de água e fixam parte da água;
- associação: as moléculas dos polímeros podem desenvolver forças de atração, bloqueando, assim, o movimento da água, causando a formação de um gel e, conseqüentemente, aumentando a viscosidade; e
- entrelaçamento: em baixas taxas de cisalhamento e especialmente em concentrações elevadas, as cadeias de polímeros podem entrelaçar e emaranhar, resultando em um aumento na viscosidade aparente.

No CAA, o VMA é utilizado para substituir componentes finos do concreto, em especial em regiões nas quais adições minerais são indisponíveis ou apresentam elevado custo. Vale salientar que o VMA não é um substituto para componentes de baixa qualidade. Agregados com uma boa curva granulométrica devem ser sempre utilizados para CAA (EFNARC, 2006). Mesmo que o emprego desse aditivo não seja imprescindível em CAA, quando utilizado de forma conjunta com os superplastificantes tende a produzir misturas estáveis e de elevada fluidez. Vale salientar que, quando emprega-se VMA, deve-se estudar a sua compatibilização com o cimento e com o aditivo superplastificante (TUTIKIAN, 2007).

De acordo com EFNARC (2006), os benefícios potenciais de um VMA em CAA podem ser resumidos da seguinte forma:

- reduz a necessidade de grande teor de finos na mistura;
- diminui o risco de segregação e exsudação em misturas muito fluidas;
- a mistura fica menos sensível a variações no teor de umidade dos agregados: variações de 1,5% do teor de umidade nos agregados leva a mudanças de 10 a 15 litros/m³ de água livre na mistura de concreto;

- os efeitos de pequenas alterações nas propriedades dos materiais são minimizados;
- reduz a pressão nas fôrmas pelo efeito tixotrópico;
- melhora a aparência superficial; e
- em combinação com um superplastificante, diminui o atrito interno, facilitando o bombeamento do concreto.

A dosagem de VMA geralmente varia 0,1-1,5% em massa de cimento. A maioria dos VMA tem pouco efeito em outras propriedades do concreto, quer no estado fresco ou endurecido, mas alguns, se utilizados em doses elevadas, podem resultar em uma perda de trabalhabilidade, retardo de pega e aumento de bolhas de ar (EFNARC, 2006).

2.8.4 Finos

Uma das principais diferenças entre a composição do CCV e CAA é a necessidade de uma grande parcela de finos dentre os materiais constituintes do CAA para garantir a coesão e dificultar a segregação da mistura. Para isso, geralmente são incorporadas à mistura adições com o objetivo de aumentar a quantidade destes finos em oposição ao aumento do teor de cimento Portland.

De acordo com EFNARC (2005), considera-se finos os materiais com partículas menores que 0,125 mm, sendo indicado que mais de 70% tenham dimensões menores que 0,063 mm. Repette (2011) recomenda que sejam considerados finos as partículas menores que 0,150 mm e que 75% delas passem na peneira 0,075mm.

Zhang e Han (2000) estudaram o comportamento reológico de pastas de cimento autoadensáveis (a/c de 0,25 e 5% de superplastificante) com a substituição de cimento por adições finas: escória de alto forno, sílica ativa, cinza volante, fíler calcário e gesso anidro. Todas as substituições foram realizadas em massa e todas as adições apresentavam maior área superficial que o cimento e massa específica entre 2,28 e 2,96 kg/dm³. Os autores concluíram que adições menores que 15% de sílica ativa, cinza volante e fíler calcário reduzem a viscosidade da pasta quando comparadas à mistura referência (somente cimento). Substituições de até 35% de escória também reduzem a mesma propriedade. Por outro lado, adições iguais ou superiores a 10% de gesso anidro aumentam a viscosidade das misturas estudadas.

Diamantonis et al. (2010) testaram a substituição em massa de cimento por cinza volante, fíler calcário e sílica ativa em pastas de cimento autoadensáveis. Todas as adições apresentavam mesma área superficial (conseguida através de moagem controlada), bem maiores que a do cimento. As misturas com 20 e 40% de substituição de cimento por cinza volante ou sílica ativa apresentaram um incremento na viscosidade quando comparadas com a mistura de controle, enquanto que substituições de até 40% de fíler calcário diminuíram tal propriedade.

Além disso, Rahman, Baluch e Malik (2014) estudaram o comportamento tixotrópico de CAAs com substituição em massa de cimento por diferentes adições minerais: sílica ativa, fíler calcário e cinza volante. A avaliação foi feita utilizando o reômetro ICAR. Foi constatado que todas as misturas com adições minerais apresentaram aumento no comportamento tixotrópico. Os autores observaram que, além da finura dos materiais, a interação entre as partículas (cimento, adição e aditivos) tem papel importante no comportamento tixotrópico da mistura.

Por fim, Ahari, Erdem e Ramyr (2015) avaliaram as propriedades reológicas de CAAs confeccionados com combinações de uma, duas e três adições minerais (sílica ativa, metacaulim, cinza volante e escória de alto-forno) em substituição parcial ao cimento Portland, em teores que variaram de 4 a 54%. O teor de aditivo superplastificante foi ajustado para que todas as misturas apresentassem abertura no *slump flow* de 650 ± 10 mm. Os autores verificaram que a viscosidade plástica das misturas com cinza volante e metacaulim mostraram-se até 90% maiores em comparação com o concreto referência (sem adições), enquanto os concretos com sílica ativa e escória de alto forno apresentaram redução significativa deste parâmetro (até 2,3 vezes). Já a tensão de escoamento aumentou em todas as misturas com adições, sendo o aumento mais pronunciado nos concretos com adições muito finas (sílica ativa e metacaulim).

Esses estudos servem para exemplificar a influência das adições finas na mistura. Percebe-se que, além da área superficial e do teor de material adicionado, outras características parecem influenciar, tais como: microforma, textura superficial, angulosidade, distribuição granulométrica e origem mineralógica.

Os finos têm sido incorporados ao concreto há muito tempo. Os mais conhecidos são os pozolânicos (cinza volante, metacaulim, sílica ativa, cinza da casca do arroz), escórias de alto forno e o fíler calcário. Muitos desses materiais são resíduos ou subprodutos de processos industriais e todos eles apresentam características adequadas para serem incorporados a misturas de concreto. Atualmente, os resíduos

pozolânicos, especialmente a cinza volante, e a escória de alto forno não causam impactos ambientais importantes, pois praticamente todo o volume produzido é absorvido pela indústria cimenteira. Por fim, o filler calcário é outra adição mineral utilizada na fabricação de cimento e que não representa um passivo ambiental.

Na Tabela 11 são apresentados os principais fins empregados em CAA com algumas características médias, retiradas de diversas literaturas. As propriedades conferidas às misturas relacionam-se com a faixa de teor empregados. Algumas características podem divergir entre autores, mas procurou-se considerar a conclusão da maioria deles e seus respectivos valores médios.

Tabela 11: Características dos principais finos usados em CAA.

Adição Mineral	Cinza Volante	Escória de alto forno	Sílica ativa	Metacaulim	Cinza da casca de arroz	Fíler
Origem	Calcinação de carvão pulverizado em usinas termoelétricas	Subproduto do processo de obtenção do ferro gusa	Subproduto do processo de obtenção do ferro-silício e do silício metálico	Calcinação de argilas	Calcinação da casca do arroz	Material finamente moído proveniente de rochas (principalmente rocha calcária)
Forma e Textura	Esférica e lisa	Prismática e áspera	Esférica e lisa	Prismática e áspera	Alveolar e áspera	Prismática com faces retangulares
Massa Específica (kg/dm ³)	2,35	2,00 - 3,50	2,20	2,40	2,20 - 2,60	Próximo da rocha proveniente.
Superfície Específica (m ² /kg)	300-700	300-700	13.000-30.000	850-3.500	50.000-100.000	350-600
Percentual de substituição em relação ao cimento	30-60%	15-30%	2-10%	5-15%	15-30%	30-55%

Adição Mineral	Cinza Volante	Escória de alto forno	Sílica ativa	Metacaulim	Cinza da casca de arroz	Fíler
Efeito no CAA fresco	↑ coesão ↓ exsudação ↓ segregação ↑ condições de fluidez ↑ viscosidade ↓ consumo de aditivo sp	↑ coesão ↓ exsudação ↓ segregação ⇔ condições de fluidez ↓ viscosidade ⇔ consumo de aditivo sp	↑↑ coesão ↓ exsudação ↓ segregação ↑ condições de fluidez ↑ consumo de aditivo sp	↑ coesão ↓ exsudação ↓ segregação ⇔ condições de fluidez ↑ viscosidade ↑ consumo de aditivo sp	↑↑ coesão ↓ exsudação ↓ segregação ↓ condições de fluidez ↑ consumo de aditivo sp	↑ coesão ↓ exsudação ↓ segregação ⇔ condições de fluidez ↓ viscosidade ↑ consumo de aditivo sp
Efeito no CAA endurecido	⇔ resistência à compressão ↑ durabilidade	⇔ resistência à compressão ↑ durabilidade	↑ resistência à compressão ↑ durabilidade	↑ resistência à compressão ↑ durabilidade	↑ resistência à compressão ↑ durabilidade	↑ resistência à compressão ⇔ durabilidade

Legenda:

↑ Aumento ou melhora	⇔ Não interfere ou pouco interfere
↓ Redução ou piora	↑ Bibliografias muito contraditórias.

Fontes: EFNARC (2005); BANFILL (2006); DIAMANTONIS et al. (2010); REPETTE (2011); RAMAN et al. (2011); UYSAL (2012); DEHWAH (2012); DAMINELLI (2013); RAHMAN, BALUCH e MALIK (2014); MEHTA e MONTEIRO (2014); AHARI, ERDEM e RAMYR (2015); NEVILLE (2016).

2.9 USO DE FÍLER DE BRITAGEM

Atualmente, um dos resíduos industriais que ainda não possui uma destinação específica é o material pulverulento oriundo do processo de britagem. Na produção de areia de britagem ou areia industrial, a maioria das pedreiras retira parte do pó presente. Este processo pode ser feito por via úmida ou via seca. O processo por via úmida mais empregado consiste em uma roda d'água metálica (Figura 21a), dotada de caçambas vazadas, ou seja, o fundo da caçamba consiste em uma peneira (de pequeno diâmetro) que, através do seu movimento de giro, separa parte do material pulverulento, que fica em suspensão na água e vai para bacias de decantação, conforme pode ser visualizado na Figura 21b. O processo por via seca, geralmente, é realizado por meio de exaustores e ciclones, que recolhem o material pulverulento suspenso. Algumas pedreiras também utilizam o peneiramento por via seca, no qual o pó de pedra passa por uma peneira com abertura de 0,40 mm disposta a 45° ou com abertura e ângulo próximos a isso (Figura 22). O processo por via úmida é mais eficiente do que o por via seca, ou seja, retira mais material pulverulento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Considerando que grande quantidade de pó é retida no processo, a utilização deste subproduto é um grande desafio. A maioria desse material fica disposto em aterros sanitários, aterros de resíduos não controlados ou em áreas abertas. Além desse material ser um problema ambiental e causar poluição devido à sua natureza extremamente fina, a indústria encontra dificuldades para estocá-lo.

Se, por um lado, esses finos prejudicam o desempenho de concretos convencionais, para CAA eles são fundamentais e podem ser uma alternativa eficiente. Alguns estudos já foram realizados com filer de britagem, sendo que a maioria se concentra no filer calcário.

Figura 21: Retirada e descarte dos fíler por via úmida: (a) roda d'água; (b) bacias de decantação.



Figura 22: Descarte do fíler de britagem em pedreiras: processo de retirada do fíler por via seca.



Estudos realizados por Ho et al. (2002) mostraram que o uso fíler de britagem de origem calcária em pastas autoadensáveis tendem a resultar em viscosidades e tensões de escoamento mais baixas do que pastas dosadas com fílers graníticos quando utilizados no mesmo teor de substituição de cimento. Quando utilizados em CAA, o fílers graníticos demandaram quantidade de superplastificante equivalente ao dobro dos

CAA dosados com filers calcários para obter os mesmos parâmetros no estado fresco (*slump flow*, funil V e caixa L). Por outro lado, os concretos dosados com filers graníticos apresentaram um incremento de cerca de 15% na resistência à compressão aos 28 dias de idade, quando o teor de substituição foi de 35% em massa de cimento para ambas as adições. Os autores creditam o desempenho inferior no estado fresco dos filers de granito à sua textura e forma. No entanto, a área superficial do filer granítico utilizado era de 674 m²/kg, enquanto que a do calcário era de 594 m²/kg. Além disso, a massa específica do calcário era maior que a do granito e, como as substituições foram realizadas em massa, as misturas (pastas e concretos) dosadas com filer de granito continham maior volume de partículas do que aquelas dosadas com calcário.

Raman et al. (2011) prepararam concretos de alta resistência com finos compostos por 10% de cinza da casca de arroz (em substituição ao cimento) e filers gnáissicos em substituição aos agregados miúdos nos teores de 10, 20, 30 e 40% em massa. A mistura controle (sem nenhuma adição) apresentou menor resistência à compressão (60 MPa) do que as misturas contendo os finos anteriormente citados (65 MPa, em média). No entanto, conforme aumentava-se o teor de filers de britagem, a fluidez do concreto diminuía.

Uysal (2012) realizou um estudo com filers de britagem provenientes de calcário, basalto e mármore para dosagem de concreto autoadensável. Cada filer foi utilizado em substituição ao cimento nos teores de 10, 20 e 30% em massa. O autor avaliou somente as propriedades mecânicas dos concretos, pois o objetivo era analisar o comportamento dos elementos submetidos a altas temperaturas. Em relação à mistura controle (somente cimento), que obteve resistência à compressão de 75 MPa, os concretos dosados com filer de basalto não apresentaram queda na resistência. As misturas feitas com 30% de filer de mármore apresentaram uma queda de resistência à compressão na ordem de 7%. No entanto, a substituição de 10 e 20% de cimento por finos de mármore não causou variações nesta propriedade. Já as misturas que continham filer calcário, independente do teor utilizado, apresentaram quedas na resistência à compressão conforme o teor de filer aumentava, chegando a valores cerca de 20% inferiores em relação ao concreto referência.

Dehwah (2012) estudou as propriedades mecânicas de CAA com a incorporação de filer calcário, sílica ativa e cinza volante e pôde concluir que os concretos dosados com filer calcário reduziram a demanda de água para dada fluidez, considerando os requisitos de fluidez prescritos na EFNARC (2005). A redução da relação água/cimento melhorou as

propriedades mecânicas dos concretos dosados com o fíler (compressão, tração e flexão). No entanto, cabe salientar que o autor, quando testou as pozolanas, fez uma substituição em massa de cimento, e, quando testou o fíler calcário, este foi considerado parte do agregado miúdo.

Damineli (2013) estudou fílers de origem calcária e silicosa e constatou que esses últimos, por apresentarem grãos mais alongados, afetaram negativamente a reologia das misturas cimentícias. De acordo com o autor, mesmo sob dispersão total, durante sua movimentação, partículas com esta forma alteram a reologia porque colidem em direções distintas, provocando o bloqueio de acordo com as posições de colisão. Por outro lado, o uso de fíler calcário, que apresentava grãos mais arredondados, melhorou as propriedades reológicas da mistura.

Estudos realizados por Tennich, Kallel e Ouezdou (2015) indicaram que a substituição de fíler calcário por fíler de mármore em CAA provocou uma diminuição da fluidez da mistura e aumentou a resistência à compressão em cerca de 6,7%.

Segundo Sadek, Attar e Ali (2016), a incorporação de fílers de mármore e granito em CAA melhora as propriedades mecânicas, físicas e durabilidade dos concretos em comparação com misturas contendo somente cimento como material fino. Os autores concluíram que o uso dessas adições minerais, especialmente o granito, foi muito eficaz para aumentar a resistência ao ataque de sulfatos. Além disso, foi observado que a mistura binária com incorporação simultânea de granito e mármore, resultou em uma menor zona de transição e um refinamento dos poros da matriz, quando comparada com CAA dosado somente com cimento e com o mesmo teor de finos. Esse fato causou um aumento da resistência à compressão dos concretos contendo fílers de forma binária.

Da mesma forma, Singh et al. (2016) observaram que a substituição de agregado miúdo (areia) por resíduos finos de pedreiras (fílers graníticos) aumentou a compacidade da matriz, diminuiu a quantidade de cristais de Ca(OH)_2 formados na zona de transição (observados por imagem de MEV) e, conseqüentemente, aumentou a resistência dos concretos.

Diante disso, percebe-se que os fílers de britagem possuem potencial para serem empregados em concretos autoadensáveis, desde que suas propriedades sejam conhecidas por meio de caracterizações prévias e de testes de desempenho em concretos.

De acordo com as pesquisas anteriormente relatadas, alguns autores expuseram algumas desvantagens com o emprego de fílers de britagem nas misturas, como por exemplo, perda de trabalhabilidade. No entanto, muitos desses resultados podem ser questionáveis. A substituição

de cimento por finos alternativos, na grande maioria das pesquisas, é realizada em massa, resultando em maior volume de material fino, quando os materiais alternativos apresentam massa específica inferior à do cimento. O maior volume de material provoca um aumento na demanda de água, o que mascara os resultados quando se avalia a fluidez e a resistência à compressão das misturas. O contrário ocorre quando o agregado miúdo é substituído em massa por fílers de maior massa específica. Além disso, os autores apresentam pouca ou nenhuma discussão sobre área superficial, textura, forma, adsorção, floculação e outras características dos materiais finos empregados.

Diante disso e com base na bibliografia sobre o uso de fílers de britagem em CAA, pode-se afirmar que o meio técnico e científico ainda carece de informações sobre alguns aspectos referentes a esses materiais. Os produtos alternativos ao cimento Portland frequentemente estudados são as pozolanas, escórias (discutidos no item 2.8.4) e fíler calcário, sendo poucos os estudos com fílers de diferentes mineralogias. Existem alguns estudos com fíler granítico e basáltico. Fíler gnáissicos foram pouco estudados e não há publicações referentes a fílers diabásicos em CAAs.

A realização de estudos adequados pode promover a viabilidade do uso de fílers de britagem alternativos ao fíler calcário, e entender a sua influência nos parâmetros reológicos da mistura, para que possa ser trabalhado e aplicado de maneira mais otimizada e com a confiabilidade desejada.

É importante mencionar que estes finos, da forma na qual se encontram, podem não apresentar o desempenho desejado no CAA por não possuírem uma curva granulométrica adequada (grãos com finura insuficiente ou faixas granulométricas deficientes), partículas muito lamelares ou pouco adsorventes, entre outras razões. Isso pode requerer beneficiamentos no material ou incorporação de outros materiais para compor um fíler de melhor qualidade.

2.10 PROPRIEDADES DOS FINOS

Muitas são as propriedades dos finos, especialmente dos fílers de britagem, que podem influenciar no desempenho das misturas com eles confeccionadas. Neste tópico, serão abordadas as características e as propriedades consideradas nos estudos do presente trabalho.

2.10.1 Forma das Partículas

Sabe-se que a forma das partículas de agregados exerce grande influência na trabalhabilidade do concreto. Quanto mais arredondado ou cúbico for o grão do agregado, menor a demanda de água para um mesmo abatimento de tronco de cone e, conseqüentemente, menor a quantidade de pasta necessária para envolver os grãos e promover a mobilidade da mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O método clássico para medir distribuições dos tamanhos dos grãos é o peneiramento. No entanto, o método não é adequado para frações muito finas. Além disso, a método apenas fornece uma medida aproximada da largura das partículas, o que é insuficiente para uma boa caracterização. Existem muitos parâmetros geométricos que podem ser definidos por medições nas partículas. A geometria dos grãos é tradicionalmente expressa pelo alongamento da partícula (relação entre o comprimento e a espessura) e pela razão entre a largura e a espessura. Existem diferentes métodos de análise para medir esses parâmetros de forma, como ABNT NBR 7809 (2006), DIN 52 114, BS 812 (1990) e EN 933-4 (1993). No entanto, estes métodos não são adequados para a análise de materiais finos (PERSSON, 1998).

Existem muitos trabalhos (OLIVEIRA, 2004; WEIDMANN, 2008; DAMO, 2011) que prescrevem metodologias para a determinação da forma de agregados miúdos por meio de imagens digitais obtidas pelo escaneamento de grãos maiores que 0,3 mm. Com grãos menores não é possível obter a precisão desejada nas imagens e acreditava-se que a forma de grãos muito pequenos tinha pouca ou nenhuma influência na mistura. No entanto, a forma de grãos menores que 0,3 mm e, até mesmo, menores que 0,075 mm, está sendo estudada atualmente e os resultados indicam que a geometria das partículas apresenta influência significativa nas propriedades das misturas cimentícias (STEWART et al., 2006; FELEKOGLU, 2009; DAMINELI, 2013). Segundo Ho et al. (2002) e Koehler e Fowler (2007), problemas relativos à trabalhabilidade e acabamento do concreto são influenciados diretamente pela forma, granulometria e mineralogia das partículas microfinas utilizadas.

Especialmente no CAA, que contém grande quantidade de partículas finas, o conhecimento da forma dos grãos dos microfinos é de grande importância para a compreensão dos efeitos que estes causam na viscosidade e na tensão de escoamento da mistura, pois, além das implicações já mencionadas sobre a mobilidade (rolamento e lubrificação), a forma dos grãos finos pode influenciar na adsorção das partículas (STEWART et al., 2006).

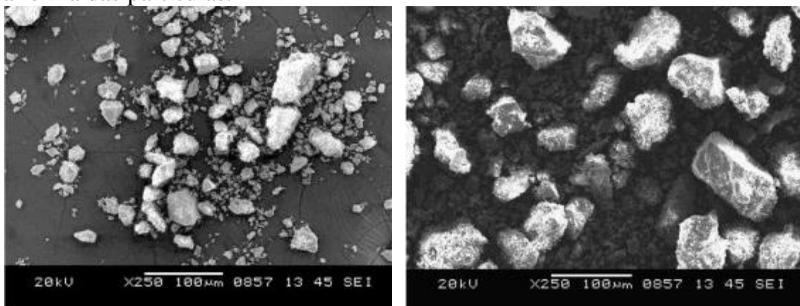
Imagens ampliadas obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) têm sido um bom indicador dos parâmetros de forma de materiais finos e, segundo Stewart et al. (2006), os resultados são pouco afetados pela orientação das partículas na preparação da amostra. Segundo Mehta e Monteiro (2014), através do MEV é possível caracterizar a forma, angularidade e textura superficial de materiais microfinos, em 2-D, com capacidade de ampliação de até 10^5 vezes.

Felekoglu (2009) utilizou MEV para caracterizar microfinos de quartzo e de calcário e concluiu que as imagens determinam, de forma qualitativa satisfatória, o tamanho e a forma das partículas e a morfologia de sua superfície. Segundo o autor, o sucesso do procedimento depende significativamente da preparação das amostras e do cuidado com alguns aspectos durante o procedimento. Em particular, a concentração de partículas na área da captura e a magnitude de ampliação da imagem desempenham um papel significativa no resultado da análise.

Para a realização do ensaio, geralmente, utiliza-se uma fita adesiva de carbono, na qual as partículas de pó são despejadas. Em seguida, com um papel não adesivo, deve-se pressionar suavemente a fita de carbono. O objetivo desta operação de prensagem suave (sem causar quaisquer danos mecânicos às partículas) é garantir a aderência do pó com fita adesiva e minimizar o bombardeamento de feixes de elétrons, que reduzem a qualidade da imagem. Além disso, é necessário controlar a concentração de material na superfície da fita de carbono, pois, se for excessiva, causa prejuízos no contato (FELEKOGLU, 2009). A Figura 23 mostra exemplos que ilustram essas situações.

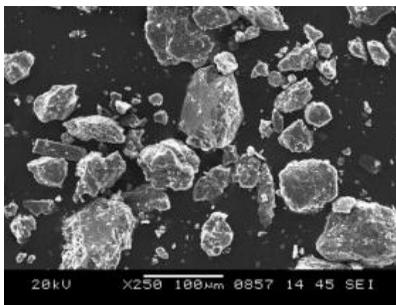
De acordo com Masad et al. (2001) e Stewart et al. (2006), quando realizadas de forma adequada, as imagens podem determinar vários fatores relacionados ao desempenho dos microfinos em concreto, como as propriedades morfológicas, representadas pela forma da partícula; a angularidade, que reflete o número e a nitidez dos cantos na superfície da partícula; e a textura ou aspereza superficial. Masad et al. (2005) mostram a diferença entre essas três características dos finos na Figura 24. Pode-se notar que as três partículas têm, essencialmente, o mesmo formato, ou seja, as três podem ser consideradas arredondadas. No entanto, a partícula B tem uma angularidade maior que a partícula A, enquanto que a partícula C apresenta aspereza maior que as demais, já que possui pequenas alterações na superfície em intervalos muito menores que a partícula B.

Figura 23: Imagens de microscopia eletrônica de varredura para determinação da forma das partículas.



a) Imagem com partículas coladas inadequadamente na fita de carbono (baixa aderência).

b) Imagem realizada com elevada concentração de partículas.



c) Imagem adequada.

Fonte: Felekoglu (2009).

Figura 24: Partículas com formas arredondadas, mas com diferentes angularidades e texturas.



Fonte: Masad et al. (2005).

Kuo e Freeman (2000 apud KUO, 2002), propuseram três índices de caracterização de partículas por meio de imagens. Os correspondentes índices da imagem 2-D são chamados de relação de aspecto (alongamento da partícula), angularidade e rugosidade e são determinados de acordo

com as Equações 5, 6 e 7. Outras fórmulas e conceitos para caracterizar partículas quanto à sua forma e morfologia podem ser consultados em detalhes em Stewart et al. (2006) e Rousan et al. (2007).

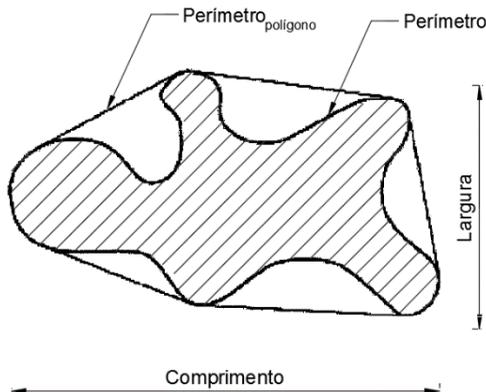
$$\text{Relação de aspecto} = \frac{\text{Comprimento}}{\text{Largura}} \quad (5)$$

$$\text{Angularidade} = \left(\frac{\text{Perímetro}_{\text{polígono}}}{\text{Perímetro}_{\text{elipse}}} \right)^2 \quad (6)$$

$$\text{Rugosidade} = \left(\frac{\text{Perímetro}}{\text{Perímetro}_{\text{polígono}}} \right)^2 \quad (7)$$

A relação de aspecto ou alongamento da partícula é definida pela razão entre o maior comprimento entre dois planos paralelos que contenham a partícula e a distância entre dois planos paralelos que a contenham na sua menor dimensão. Essa relação será próxima de 1 para agregados equidimensionais ou esféricos e terá valores maiores para agregados alongados ou planos. A angularidade é definida pela relação ao quadrado entre o perímetro do polígono que delimita a partícula e o perímetro de uma elipse equivalente, ou seja, uma elipse fictícia que possua a mesma área e a mesma relação de aspecto que a partícula de agregado analisada. A angularidade de um círculo ou de uma elipse será 1, enquanto que, para partículas angulares, esse valor será maior que 1. Já a rugosidade, definida pela relação ao quadrado do perímetro do agregado e o perímetro do polígono delimitador do mesmo, vai aumentar a medida que a superfície do agregado apresente incrementos (KUO, 2002). Na Figura 25 é possível observar as variáveis das equações, como largura, comprimento, perímetro e perímetro do polígono que delimita a partícula.

Figura 25: Ilustração de algumas medidas básicas para análise de imagem: a área com traços paralelos (*hachura*) representa a partícula, e seu contorno representa o perímetro da partícula, o contorno mais externo representa o perímetro do polígono que delimita a partícula.



Fonte: Adaptada de Kuo (2002).

Sterwart et al. (2006) utilizaram imagens de MEV para caracterização de partículas finas, menores que 0,075 mm, e empregaram os conceitos de relação de aspecto, angularidade e rugosidade no estudo, obtendo valores que auxiliaram no entendimento do desempenho dos finos em concretos. Os autores verificaram que microfinos de gnaíse e de calcário com a mesma superfície específica Blaine apresentavam diferenças significativas nos três índices 2-D calculados. Enquanto os microfinos de gnaíse possuíam relação de aspecto de 2,31, angularidade de 8,15 e rugosidade de 0,59, os de calcário apresentavam valores de 1,70, 7,89 e 0,40, respectivamente. Esses resultados indicam que os filers de calcário apresentam morfologia e forma mais favorável do que os filers de gnaíse. Os autores também verificaram uma correlação entre os valores dos índices e a viscosidade da mistura de concreto. Foram dosados concretos com diferentes tipos de finos e, quanto maior os índices (aspecto de forma, angularidade e rugosidade) das partículas dos microfinos, maior era a viscosidade do concreto com eles confeccionados.

Felekoglu (2007) estudou a demanda de água em concretos com diferentes microfinos e percebeu que, além da superfície específica, a forma e a superfície das partículas são importantes e estão em igualdade de influência. Os estudos do autor mostraram que concretos confeccionados com fíler calcário e de quartzo com a mesma finura demandaram diferentes quantidades de aditivo plastificante para uma

trabalhabilidade constante, sendo esta quantidade 30% superior em misturas com fíler calcário. O autor creditou este resultado à textura superficial acentuada do calcário, verificada por imagens de MEV.

Outro método para avaliar a forma da partícula na reologia da mistura é o fator de forma (FF), descrito por Damineli (2013). Este indicador é definido pela relação entre a área superficial real da partícula (obtida por BET) e sua área teórica (calculada a partir dos tamanhos de partículas determinados na distribuição granulométrica, considerando-as esferas perfeitas), conforme a Equação 8. Quanto menor essa relação ou mais próxima 1, menor é a angulosidade e a rugosidade da partícula, ou seja, mais esférico ela é.

$$FF = \frac{SSA_{medida}}{SSA_{teórica}} \quad (8)$$

Onde,

SSA_{medida} : área superficial específica determinada por ensaio de BET; e
 $SSA_{teórica}$: área superficial específica teórica, determinada pela Equação 9.

$$SSA_{teórica} = \frac{VSA}{\gamma} \quad (9)$$

Onde,

γ : massa específica; e

VSA: área superficial volumétrica, calculada pela Equação 10.

$$VSA = \sum \left[\frac{(\pi \times \phi^2) \times (\%DG)}{\left(\frac{\pi \times \phi^3}{6}\right)} \right] \quad (10)$$

Onde,

ϕ : diâmetro da partícula; e

%DG: percentual do diâmetro de partículas encontrado na distribuição granulométrica.

Damineli (2013) analisou o FF de finos calcários e silicosos juntamente com imagens obtidas por MEV e constatou que ambas as interpretações conduziam a uma mesma conclusão sobre a forma das partículas. Conforme pode ser visualizado na Figura 27, o fíler silicoso apresenta grãos mais alongados. Este formato lhe conferiu um alto índice de FF, 6,95, enquanto que para o fíler calcário foi de 2,90. Isso resultou

em alta demanda de água e dispersante, quando do uso deste fíler, além de uma maior viscosidade da mistura.

Figura 26: Imagens de grãos de fílers calcário e silicoso obtidas por MEV.



a) Fíler Calcário.



b) Fíler Silicoso.

Fonte: Damineli (2013).

2.10.2 Fenômenos de Superfície

Os átomos da superfície de uma partícula não estão ligados ao número máximo de vizinhos mais próximos, e estão, portanto, em um estado de maior energia do que os átomos nas posições interiores. As ligações destes átomos da superfície que não estão completados dão origem a uma energia de superfície, que é expressa em unidades de energia por unidade de área (J/m^2) (CALLISTER, 2002).

Os materiais finos possuem alta superfície específica, podendo provocar características diferenciadas nas misturas devido à energia de superfície. Uma superfície consiste no limite entre duas fases adjacentes, sendo que a interação de superfícies com líquidos ou gases leva à adsorção física ou quimissorção² de moléculas ou átomos na superfície sólida. O caráter desta adsorção depende da natureza química dos adsorventes e da energia superficial dos sólidos. A adsorção química aparece devido às forças de dispersão, como a de Van der Waals (KAUFMANN; WINNEFELD; ZURBRIGGEN, 2012).

Materiais finamente divididos, em geral, adquirem carga na superfície, tornando-se eletricamente carregados em contato com um meio polar (aquoso, por exemplo). A carga da superfície influencia a distribuição espacial dos íons próximos à superfície, atraindo íons de carga oposta e repelindo os íons de mesma carga. Este efeito, somado ao

² A quimissorção, ou adsorção química, corresponde à união das moléculas (ou átomos) à superfície do adsorvente através da formação de ligações químicas.

atrito das partículas devido ao movimento Browniano³, leva à formação da dupla camada elétrica (SANTOS, 2008; KAUFMANN; WINNEFELD; ZURBRIGGEN, 2012). Esta dupla camada consiste em uma camada fixa de íons de carga contrária à da superfície da partícula (camada de Stern) e em uma camada móvel de íons (camada difusa) (HOTZA, 1997). A diferença de potencial entre a camada difusa e a dispersão eletricamente neutra é chamada de potencial Zeta (ζ).

A determinação do potencial zeta indica o estado de aglomeração da suspensão. Segundo Cyr (1999), quanto maior o potencial zeta, positivo ou negativo, maior a estabilidade da suspensão, superando a tendência natural de aglomeração.

Outra técnica utilizada no estudo de superfícies de partículas finas é o ensaio de adsorção por azul de metileno. Esse teste determina a quantidade de uma solução, constituída por água e azul de metileno, que determinados finos podem adsorver (STEWART et al., 2006).

O azul de metileno ou cloridrato de metiltiamina trata-se de um corante catiônico, muito utilizado em análise de solos, e é considerado uma técnica simples e confiável para a caracterização de argilo-minerais (YOOL; LEES; FRIED, 1998; YUKSELEN; KAYA, 2008). A molécula de azul de metileno ($C_{16}H_{18}N_3SCl \cdot 3H_2O$) é constituída por uma base orgânica em combinação com um ácido. O teste baseia-se no princípio que cátions inorgânicos permutáveis, Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ e Na^+ , nas posições superficiais de algumas argilas, podem ser trocados por moléculas de azul de metileno (BELLEW, 2001). Segundo Bellew (2001) e Stewart et al. (2006), o ensaio de adsorção por azul de metileno tem sido utilizado com sucesso para avaliação de agregados (BELLEW, 2001).

O ensaio de azul de metileno pode ser particularmente importante para avaliar a adsorção de aditivo pelas partículas finas. Segundo Marchon et al. (2016), superplastificantes, em especial policarboxilatos, podem ficar adsorvidos em argilominerais. Se tais minerais estiverem presentes em qualquer componente de uma mistura de concreto (agregado, areia, fíler, etc), uma grande porção de superplastificante será, portanto, mobilizada, e não estará mais disponível para dispersar os sólidos da mistura. De acordo com Svensson e Hansen (2010), o efeito da adsorção de aditivo ocorre de forma predominante com o uso de superplastificante a base de policarboxilato, uma vez que as cadeias laterais desse aditivo podem intercalar-se entre as camadas dos minerais,

³ Movimento Browniano é o movimento aleatório de partículas em um fluido, no qual ocorrem choques entre todas as moléculas ou átomos presentes.

causando um aumento excessivo de adsorção em relação à superfície específica do mineral.

A magnitude da adsorção de aditivos depende não só da sua composição química, tamanho, estrutura molecular e dosagem, mas também das características da superfície adsorvente. A adsorção é um fenômeno fundamental para controle da eficiência de aditivos e adições (como os fílers de britagem) em misturas cimentícias (MARCHON, et al., 2016).

A ABNT NBR 14949 (2003) prescreve um procedimento para a caracterização da fração fina (menor que 0,075mm) de microrrevestimentos asfálticos por meio do teste de adsorção do azul de metileno, no qual o resultado é expresso em mililitros de solução de azul de metileno por grama da fração fina do agregado. Outras normas internacionais, como EN 933-9 (1998), AASHTO TP-57 (2000) e ASTM C 837, prescrevem procedimentos semelhantes. Independente da norma, o método é baseado na habilidade de partículas finas (argila) trocarem cátions e então adsorverem o azul de metileno. Neste trabalho, será empregada a norma americana AASHTO TP-57 pois, diferente da norma brasileira, o documento é direcionado a microfinos de agregados de britagem; portanto, é mais indicada para avaliação dos fílers estudados neste trabalho.

O ensaio de adsorção do azul de metileno está incluído nas caracterizações europeias para determinação de finos prejudiciais presentes em agregados para concreto e argamassa, especialmente para identificar minerais argilosos deletérios (YOOL; LEES; FRIED, 1998).

O aumento da demanda de água e/ou aditivo que um material fino provoca na mistura não ocorre somente pelo tamanho dos minerais constituintes, mas também pela propensão de troca catiônica. Isso explica o fato de argilas provocarem uma adsorção de água mais elevada que outros microfinos com a mesma distribuição granulométrica (STEWART et al., 2006).

De acordo com Bodenheimer e Heller (1968), o grau de dispersão dos finos, especialmente da argila, e dos cátions que estão presentes na região interlamelar, influenciam na quantidade de corante adsorvido. Dependendo do material, os cátions podem ser facilmente trocados com água e compostos orgânicos, como aditivos superplastificante, o que torna o fino de qualidade inferior, pois vai resultar em um concreto mais caro. Desta forma, a característica mais nociva de um argilo-mineral é a sua facilidade em trocar cátions (TOPÇU, DEMIR, 2008).

Aliado a isso, segundo Topçu e Demir (2008), a quantidade de microfinos de uma areia não determina a quantidade de argilo-minerais

presentes, uma vez que o valor do azul de metileno de uma areia com baixo teor de microfinos pode ser alto. Os autores constataram que uma areia contendo 5% de material pulverulento apresentou azul de metileno de 1,45 mg/g, valor maior do que outra areia com 10% de pulverulento, que resultou em 1,0 mg/g. Isso indica que o valor do azul de metileno varia, independente do teor de microfinos.

Da mesma forma, Stewart et al. (2006) testaram a adsorção de azul de metileno em microfinos de diferentes rochas. Os autores utilizaram os finos *in natura*, com diferentes finuras. Finos de gnaisse e de calcário com área superficial em torno de 243 cm²/g resultaram em adsorções de 1,75 e 1,88 mg/g, respectivamente, enquanto que finos de calcário dolomítico e de rocha diabásica com área superficial de 140 cm²/g apresentaram adsorções de 0,75 e 2,92 mg/g, respectivamente. Percebe-se que os finos diabásicos, apesar de apresentarem partículas maiores que os demais finos, são mais adsorventes que os finos gnáissicos e calcários. Isso indica que a adsorção por azul de metileno depende, não somente da finura do material, mas especialmente, da sua composição mineralógica.

Damo (2011) realizou o ensaio de azul de metileno com areias de britagem de diferentes origens e pôde perceber diferenças significativas na adsorção o azul de metileno em finos com aproximadamente o mesmo diâmetro médio de partículas e a mesma área superficial, mas de origem mineralógica distinta. O fino de basalto com diâmetro médio de 275,9 µm e área superficial Blaine de 234,5 cm²/g apresentou uma adsorção de 9,0 mg/g, enquanto que finos de gnaisse com diâmetro médio de 265,8 µm e área superficial de 281,5 cm²/g apresentaram adsorção de apenas 2,0 mg/g. A autora percebeu que o basalto, de forma geral, apresentou maiores adsorções de azul de metileno quando comparado a rochas gnáissicas e calcárias.

2.10.3 Influência na Hidratação do Cimento

Materiais finos adicionados ao concreto, também chamados de materiais cimentícios complementares, podem alterar a cinética de reação do cimento e modificar as propriedades físicas e mecânicas do concreto com eles confeccionado. Além da eventual reação química que produzem, especialmente quando se trata de pozolana ou escória, esses materiais têm um impacto na hidratação dos componentes do clínquer simplesmente pela sua presença física, por meio da formação de pontos de nucleação (NEVILLE, 1997).

Segundo Berodier e Scrivener (2014), o efeito fíler é mais importante no primeiro dia de hidratação, quando a microestrutura se desenvolve rapidamente. Os hidratos, principalmente o C-S-H, desenvolvem conexões entre os grãos de cimento. A presença de fíler contribui para a formação de uma configuração que contribui para a resistência mecânica, uma vez que resultam em uma distribuição mais homogênea do C-S-H e, assim, em uma menor estrutura de poros na matriz (HAWKING; TENNIS; DETWILER, 2003). Como nessa idade precoce os materiais suplementares ainda não estão reagindo, a finura e o teor de material adicionado são os principais fatores que afetam a cinética de hidratação (KADRI et al., 2010).

Com base nessas observações, alguns mecanismos têm sido relatados para explicar o efeito fíler no processo de desenvolvimento de resistência mecânica de compostos cimentícios. O primeiro mecanismo está relacionado com a diluição do cimento. A substituição do clínquer moído por outros materiais significa que existe relativamente mais espaço disponível para a formação de hidratos, que é equivalente a um aumento da proporção entre a água e o cimento (LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2003).

Outro mecanismo é atribuído ao efeito da distribuição granulométrica das partículas, que depende da finura e da quantidade de fíler utilizado. A sua influência sobre a hidratação do cimento não está documentada de forma clara na literatura, mas acredita-se que seu efeito está relacionado com a modificação da porosidade inicial da mistura (LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2003).

Aliado a isso, a nucleação heterogênea é um processo físico que conduz a uma ativação química da hidratação do cimento. A presença de fíler catalisa o processo de nucleação por meio da redução da barreira de energia. Segundo Stumm (1992 apud LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2003), a energia interfacial entre dois sólidos é menor do que a energia interfacial entre o cristal e a solução. Dessa forma, há uma nucleação do C-S-H na superfície do fíler.

Segundo Tutikian e Dalmolin (2008), o efeito físico pode ser dividido em três ações principais: o efeito fíler, pelo aumento da densidade da mistura, resultante do preenchimento dos vazios pelas partículas finas; o refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento, causados pela formação de pontos de nucleação para os produtos de hidratação; e a alteração da microestrutura da zona de transição, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que, normalmente, fica retida ao redor dos agregados.

Estudos realizados por Cyr, Lawrence e Ringot (2006) mostraram que, para tempos curtos de hidratação, a natureza da adição mineral não é um parâmetro importante, uma vez que as argamassas contendo as mesmas quantidades de quartzo moído, fíler calcário e cinzas volantes com finuras equivalentes apresentaram resistências à compressão semelhantes. Os autores também concluíram que o aumento da finura das adições (maior área específica) acelera a cinética de reação, pois facilita a germinação.

Kadri, Aggoun e Schutter (2010), por sua vez, concluíram que tanto a natureza química quanto a finura dos fílers são importantes na aceleração do processo de hidratação do cimento. Os autores verificaram que a presença de fíler de quartzo não afetou significativamente o processo de hidratação, independentemente da sua finura. Por outro lado, a presença de pó de alumina fino e fíler calcário promoveram a multiplicação de núcleos nos quais os hidratos poderiam crescer. Já com o uso de pó de alumina grosso, esse efeito não foi observado.

Além do efeito físico, o efeito químico dos fílers também é um fator importante na cinética de hidratação do cimento. Sabe-se que materiais com atividades pozolânicas aumentam a resistência à compressão dos materiais à base de cimento. Seu efeito é notado após alguns dias (sílica ativa, por exemplo) ou vários meses (cinzas volantes ou outras pozolanas naturais), dependendo principalmente da quantidade e da solubilidade da sílica amorfa presente no material (NEVILLE, 2016).

Outras atividades químicas podem modificar a cinética de hidratação do cimento e, conseqüentemente, afetar a resistência à compressão do elemento. Isso pode acontecer na presença de alguns elementos químicos, conhecidos como aceleradores (Cl, por exemplo) ou retardadores (Zn, por exemplo). Esses efeitos podem ser difíceis de quantificar, especialmente quando os elementos são considerados impurezas presentes nos fílers (LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2003).

Embora existam estudos a respeito da influência na cinética de hidratação de cimento de diversas adições minerais, pouco foi publicado sobre a influência de fílers de britagem nessa questão. As pesquisas nesse tópico concentram-se principalmente no fíler calcário, sobre o qual parece haver um consenso de que a sua presença finamente moída acelera a hidratação do cimento, oferecendo superfícies adicionais para a nucleação e o crescimento de produtos de hidratação (PERA; HUSSON; GUILHOT, 1999).

De acordo com Bonavetti, Rahhal e Irassar (2001), as reações de hidratação entre o C3A e a gipsita, que formam a etringita, são modificadas pela presença de fíler calcário. Primeiro, a formação de

etringita é acelerada pela presença de CaCO_3 . Segundo, a conversão de etringita para monossulfato é atrasada ou interrompida. Isso ocorre pela troca iônica entre íons sulfato e carbonato durante a hidratação do C3A.

Adições de carbonato também influenciam a hidratação do C3S. Ramachandran e Zhang (1986) reportaram que a taxa de hidratação do C3S é acelerada quando a quantidade e a finura do CaCO_3 aumenta. Eles descobriram que o C-S-H incorpora uma quantidade significativa de CaCO_3 em sua estrutura, o que é benéfico para a estrutura da pasta de cimento hidratada.

Choudhary, Shah e Bishnoi (2016) estudaram o efeito do pó de mármore na cinética de hidratação do cimento e perceberam que a substituição de aglomerante por pó de mármore, em teores entre 1 e 10% em massa, conduziu a um aumento sensível da taxa de hidratação, observado por ensaios de calorimetria isotérmica e confirmado pelas maiores resistências das argamassas contendo pó de mármore. Segundo os autores, esse aumento na taxa de hidratação do cimento indica que a nucleação dos produtos de hidratação sobre o pó de mármore conduz a hidratos mais uniformemente distribuídos na microestrutura e a efetivo aproveitamento (utilização) de grãos de cimento.

A evolução da hidratação do cimento pode ser determinada por diferentes meios, como uma medida de quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na pasta; calor de hidratação liberado; massa específica da pasta; quantidade de água quimicamente combinada; total de cimento anidro; indiretamente pela resistência da pasta; além da análise da microestrutura da pastas e técnicas termogravimétricas (NEVILLE, 2016).

A seguir, serão explanadas duas técnicas empregadas para avaliar a hidratação do cimento: calorimetria de condução e termogravimétrica.

2.10.3.1 Calorimetria de Condução

A hidratação do cimento é uma reação fortemente exotérmica e que ocorre em vários estágios: diluição inicial, período de indução, período de aceleração das reações, período de diminuição das reações e reações a longo prazo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Dessa forma, uma maneira simplificada e eficiente de monitorar o processo de hidratação dos cimentos Portland é acompanhar o desenvolvimento das reações por meio de curvas da evolução do fluxo de calor e pela quantidade total de calor liberado (LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2003; KADRI et al., 2010; BERODIER; SCRIVENER, 2014; JUENGER; SIDDIQUE, 2015; AQEL; PANESAR, 2016). Essa técnica

tem particular importância na verificação do efeito de adições minerais no decurso do processo de hidratação do cimento.

Na calorimetria de condução isotérmica, o calor liberado na hidratação dos compostos cimentícios é quantificado diretamente pelo monitoramento do fluxo de calor da pasta, quando este e o seu meio ambiente circundante são, simultaneamente, mantidos em condições isotérmicas, sem que haja alteração na cinética de reação pelo calor liberado (QUARCIONI, 2008).

2.10.3.2 Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Diferencial (DTG)

Termogravimetria é a técnica na qual a mudança da massa de uma substância é medida em função da temperatura enquanto esta é submetida a uma programação controlada (TAYLOR, 1997).

O equipamento utilizado na análise termogravimétrica é basicamente constituído por uma microbalança, um forno, termopares e um sistema de fluxo de gás. Utiliza-se, para tanto, uma termobalança para medir a variação de massa de uma amostra em relação à temperatura. A termobalança é uma combinação de uma balança analítica eletrônica apropriada com um forno, um programador de temperatura e um computador para o controle, e que permite que a amostra seja pesada continuamente enquanto ela é aquecida, resfriada ou mantida sob uma isoterma de uma maneira controlada (DAL MOLIN, 2007).

Enquanto os perfis das curvas de liberação de calor retratam a cinética de hidratação, a termogravimetria permite analisar o desenvolvimento da hidratação do cimento por quantificação dos compostos hidratados formados. Conhecendo-se a temperatura em que ocorre determinado evento químico, é possível estimar a quantidade de determinado composto químico na amostra a partir de dados de perda de massa (TAYLOR, 1997). Na Tabela 12, pode-se verificar a faixa de temperatura em que ocorrem alguns fenômenos térmicos observados em pastas de cimento.

Para quantificar com precisão os teores de perda de massa nas curvas de TG, é aconselhável registrar a curva da termogravimetria derivada (dTG), que fornece a derivada primeira da curva termogravimétrica em função do tempo ou da temperatura. Com a dTG, é possível obter um resultado mais detalhado do comportamento da amostra, indicando com precisão, por exemplo, a determinação da temperatura em que a velocidade de perda de massa é máxima (HASPARIK, 2005).

Tabela 12: Fenômenos térmicos característicos observados no aquecimento de pastas de cimento em atmosfera inerte.

Composto	Faixa de temperatura (°C)
Evaporação da água livre	~100
Desidratação parcial do C-S-H	115 a 125
Desidratação parcial das Fases AFt	135 a 140
Desidratação da gipsita	145 a 165
Desidratação parcial das fases AFm	185 a 200
Desidratação do C_3AH_6	250 a 310 e 450 a 550
Desidratação do $Ca(OH)_2$	425 a 550
Decomposição do $CaCO_3$	500 a 700
Desidratação do $Mg(OH)_2$	350 a 420
Decomposição do $MgCO_3$	450 a 520

Fonte: Biernacki et al., 2001; Silva, 2001; Paama et al., 1998; Taylor, 1997.

2.10.4 Floculação de Partículas

A compreensão de muitas das propriedades físicas dos materiais está baseada no conhecimento das forças interatômicas que unem os átomos. As ligações iônicas, covalentes e metálicas são consideradas ligações primárias fortes, nas quais os elétrons orbitais externos são transferidos ou compartilhados entre átomos. A força de Van der Waals é o termo geral para todas as forças atrativas intermoleculares secundárias, que consistem em ligações mais fracas quando comparadas às ligações primárias. Essas ligações secundárias são significativas somente quando as moléculas estão muito próximas, pois são resultado de uma atração sutil entre cargas positivas e negativas, sem transferência real ou compartilhamento de elétrons (CALLISTER, 2002). Segundo Ferron (2008), as ligações secundárias são responsáveis pela formação dos flocos em uma suspensão composta por partículas finas.

A pasta de cimento é uma densa suspensão floculada. Como tal, o seu comportamento de fluxo será influenciado pelo grau de floculação de suas partículas, dependendo das forças atrativas e repulsivas entre as moléculas (FERRON, 2008). A floculação é um processo em que partículas finas em suspensão se agregam para formar flocos maiores, que melhoram a separação de sólidos da fase líquida (ROUSSEL, 2006).

Muitas vezes utilizados como sinônimos, os termos agregação, coagulação e floculação apresentam diferentes significados. A agregação é geralmente um termo de conexão, ou seja, qualquer conexão entre partículas é expressada como agregação. A coagulação é uma ligação

mais forte, normalmente produzida pela hidratação do cimento. Finalmente, a floculação é uma ligação fraca; é sempre reversível e produzida principalmente pelas forças interpartículas em um sistema coloidal (HAN, 2014).

Segundo Banfill (2006), a floculação é um processo durante o qual as partículas formam aglomerados por uma combinação de forças eletrostáticas e de Van der Waals. A intensidade dessas forças vai definir o tamanho do floco, ou seja, um floco vai quebrar se a tensão aplicada na sua superfície for maior do que a resistência de ligação entre suas partículas. O aumento da compactação dos flocos tende a aumentar a sua resistência interna devido a uma elevação no número de ligações que mantém o conjunto (BOLLER; BLASER, 1998).

Segundo Roussel (2006), do ponto de vista teórico, existem dois potenciais estados de referência de misturas: completamente floculado; ou completamente defloculado. No entanto, na prática, nenhum desses estados pode ser alcançado. O material em repouso, especialmente materiais à base de cimento, continua sua floculação deliberadamente. Por outro lado, nenhum misturador é capaz de produzir uma mistura que atinja o estado completamente defloculado. As situações práticas ocorrem entre esses dois extremos:

- moldagem de um CAA: durante a moldagem, o CAA fresco comporta-se como um fluido, mas, se descarregado de forma lenta, constrói uma estrutura interna por meio da floculação;
- repouso: se ocorre grande e rápida floculação durante o repouso, há um pequeno período de tempo para que aconteça a moldagem da segunda camada de concreto. Como a vibração é proibida no caso de CAA, isso pode causar uma junta fria de baixo desempenho estrutural. Por outro lado, a rápida floculação diminui a pressão nas formas; e
- estabilidade do CAA: durante o transporte e a moldagem, ocorre defloculação pela mistura e adensamento do concreto, facilitando o processo de concretagem. Quando em repouso, a ação da gravidade pode conduzir à segregação das partículas mais grossas. Se o processo de floculação for mais rápido que o de sedimentação, evita-se a separação de fases.

Uma suspensão com partículas de cimento floculadas possui alta viscosidade, diminuindo o valor conforme ocorre defloculação (YIM; KIM; SHAH, 2013). A floculação é uma das razões de a pasta de cimento apresentar tixotropia. Segundo Roussel (2006), a floculação também explica o fenômeno do espessamento por cisalhamento e a pseudoplasticidade, quando o concreto está em mistura e fluxo.

Segundo Ferron et al. (2013), as cinéticas de floculação e defloculação de pastas de cimento são altamente influenciadas pela história de cisalhamento e pelos materiais constituintes. Os autores estudaram a substituição de cimento por argilas e materiais pozolânicos e observaram que a presença de argila resulta em uma maior floculação do que os outros materiais, além de formar flocos com grande força de ligação interpartículas.

O estudo do processo de floculação de misturas à base de cimento promove um conhecimento sobre a evolução da microestrutura durante o período de indução (FERRON; NEGRO; SHAH, 2009). A floculação afeta de maneira geral o fluxo de uma mistura e está relacionada com o processo de construção. Em concretos autoadensáveis, a pressão nas formas e a estabilidade do material são influenciadas pela floculação (FERRON, 2008).

Segundo Blanco et al. (2002), o parâmetro mais representativo para estudar o processo de floculação é o monitoramento do tamanho dos agregados de partículas (comprimento dos flocos).

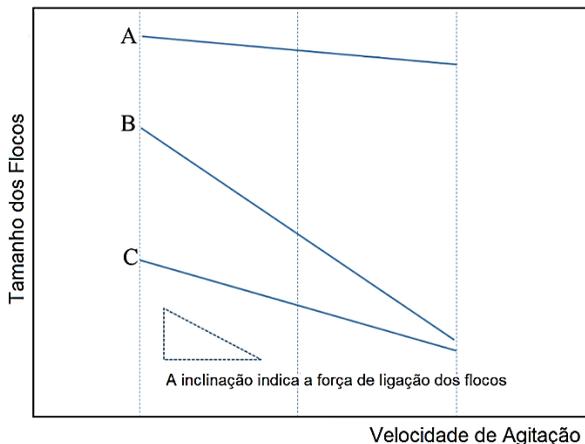
De acordo com Jarvis et al. (2005), existem muitas técnicas para medir o tamanho e a distribuição de partículas em suspensão, como microscópio, análise de imagens dinâmicas (DIA), medição de visão de partículas (PVM) e medição de refletância de feixe localizado (FBRM). No entanto, poucas podem ser aplicadas na mistura real ou usadas para materiais com alta concentração de sólidos. A vantagem significativa do método FBRM é a não necessidade de diluição ou amostragem da suspensão, conduzindo a menores erros de medição (FERRON, 2008).

O FBRM baseia-se na medida do tempo de duração da reflexão de um feixe de luz *laser* altamente focalizado, que incide sobre a amostra a ser analisada. O comprimento do floco é definido como a interseção do plano de varredura com a área projetada no plano focal. Outras informações sobre a cinética de aglomeração podem ser obtidas por meio da modelagem do processo de agregação e quebra, a partir de forças de induzidas de cisalhamento (BLANCO et al., 2002). Mais explicações a respeito do método e do procedimento de ensaio são apresentadas no item 3.3.1.4.4.

A técnica FBRM permite a verificação do comportamento das partículas em suspensão sob várias velocidades de agitação. Com base em uma abordagem de Jarvis et al. (2005), a velocidade de agitação e os comprimentos das cordas de partículas (partículas aglomeradas) podem estimar a resistência dos flocos presentes. Na Figura 27, pode-se observar o conceito da força de ligação dos flocos durante a agitação da suspensão, na qual a inclinação das retas indica a força de ligação dos flocos. A

mistura “A” contém o maior número de partículas aglomeradas e a ligação entre elas é forte. A mistura “B” contém o número intermediário de partículas aglomeradas, mas a ligação entre elas é fraca. Por fim, a mistura “C” contém o menor número de partículas aglomeradas, mas a ligação é relativamente forte.

Figura 27: Relação entre o tamanho dos flocos e a mudança da velocidade de agitação da suspensão para três tipos de flocos.



Fonte: Adaptada de Jarvis et al. (2005).

Ferron (2008), Ferron, Negro e Shah (2009) e Kim, Noemi e Shah (2012) estudaram o efeito da floculação de materiais finos em CAA sobre a reologia e pressão nas formas por meio do equipamento FBRM. Os autores concluíram que essa técnica pode ser utilizada eficientemente para avaliar os mecanismos de floculação de materiais à base de cimento e contendo aditivos químicos.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nesta seção, serão abordados os materiais e os métodos de análise empregados neste estudo, objetivando o avanço do conhecimento no tema proposto, assim como a promoção da reprodutibilidade desta pesquisa. Na seção “Materiais”, é apresentada a caracterização dos materiais empregados neste trabalho; já a seção “Métodos” está subdividida em dois seguimentos: estudos em pastas e estudos em concreto.

O programa experimental desta tese foi realizado com o apoio de três instituições de Ensino Superior: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Universidade de São Paulo (USP) e The University of Texas (UT), de Austin, EUA.

A preparação e a caracterização dos materiais, especialmente dos fílers de britagem, foram realizadas no Brasil; os estudos em pasta foram realizados na sua totalidade na UT (*Civil, Architectural and Environmental Engineering Department*); os estudos em concreto, por sua vez, foram iniciados no Brasil, mas os testes principais foram realizados na UT. No Brasil, foi realizada a curva de dosagem para a determinação da relação água/cimento, definidas as proporções de agregados e os primeiros ajustes de aditivos. Cimento, aditivo e fílers empregados para essas determinações foram enviados para os EUA; nesse país, procedeu-se todos os demais estudos, utilizando os agregados locais.

3.1 ESTUDOS PRELIMINARES

Os primeiros estudos reológicos foram realizados na USP, com o reômetro Pheso Poli-USP. Foram produzidos 18 CAAs, com diferentes tipos e teores de finos, e medidas as suas propriedades reológicas. O estudo visou, principalmente, o primeiro contato com um equipamento destinado a reometria de concreto e, posterior análise das leituras obtidas.

Através dos experimentos realizados na USP, identificou-se a viabilidade do estudo da reologia do CAA contendo fílers de britagem, e permitiu elaborar o programa experimental a ser realizado na UT. Com os resultados obtidos, pode-se perceber que os fílers de britagem diabásicos e gnáissicos apresentavam potencial para serem utilizados como materiais alternativos ao filer calcário em CAA.

Os materiais, métodos e resultados desse estudo preliminar estão apresentados no Apêndice A, e serão objeto de artigo a ser publicado. Optou-se por não apresentá-los no texto principal, pois os materiais utilizados não foram os mesmos empregados nos demais testes

reológicos. O cimento, o aditivo e os fílers, apesar de serem do mesmo tipo, não eram do mesmo lote; e os agregados (miúdos e graúdos) foram outros.

Apesar disso, o estudo preliminar foi importante para identificar a exequibilidade da realização dos testes previstos dentro do prazo estipulado, obter conhecimento sobre o funcionamento de um reômetro de concreto, e ter uma prévia sobre a hipótese levantada neste trabalho.

3.2 MATERIAIS

Neste tópico, serão descritos os materiais empregados no trabalho: cimento, aditivo, agregados e fílers.

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado nesse trabalho foi o CP V ARI (cimento Portland de alta resistência inicial), uma vez que o estudo se destinou a CAA dosado em indústrias de pré-fabricados, as quais utilizam cimento de alta resistência inicial. No estado de Santa Catarina, o cimento CP V ARI RS é o mais empregado pelas fábricas, devido, principalmente, a questões de disponibilidade do material, uma vez que esse cimento Portland tem, na sua composição, uma fração de pozolana, conforme prescrito pela ABNT NBR 5737 (1992). No entanto, como o presente trabalho foca no estudo de finos para CAA, o uso de cimentos com teor de adições pode prejudicar a análise dos resultados, razão pela qual se optou por empregar o CP V ARI. A caracterização do cimento encontra-se na Tabela 13.

Tabela 13: Caracterização do cimento.

Ensaio	NBR	Especificações	Unidade	CP VARI
Al ₂ O ₃	NM 14	não aplicável	%	3,67
SiO ₂	NM 14	não aplicável	%	18,84
Fe ₂ O ₃	NM 14	não aplicável	%	2,71
CaO	NM 14	não aplicável	%	61,92
MgO	NM 14	≤ 6,5	%	4,21
SO ₃	NM 14	não aplicável	%	3,05
K ₂ O	NM 14	não aplicável	%	0,47
TiO ₂	NM 14	não aplicável	%	0,26
Resíduo insolúvel	NM 22	não aplicável	%	1,0

Ensaio	NBR	Especificações	Unidade	CP VARI
Área Superficial Blaine	16372	≥ 300	m ² /kg	399
Massa específica	NM 23	Não aplicável	g/cm ³	3,10
Resíduo #200	11579	$\leq 6,0$	%	0,46
Início de pega	NM65	≥ 60	min	120
Fim de pega	NM65	≤ 480	min	150
Resistência 1 dia	7215	≥ 11	MPa	20,7
Resistência 3 dias	7215	≥ 24	MPa	35,2
Resistência 7 dias	7215	≥ 34	MPa	42,5
Resistência 28 dias	7215	Não aplicável	MPa	51,9

3.2.2 Aditivos

Foi empregado um aditivo superplastificante à base de policarboxilato, recomendado para uso em pré-fabricados e concreto autoadensável. Na Tabela 14, encontra-se o nome comercial dos aditivos e as especificações disponibilizadas pelo fabricante.

Tabela 14: Especificação do aditivo.

Categoria	Aditivo	Sigla	Base	(kg/dm ³)	Teor
Superplastificante	ADVA Cast 500	SP	Policarboxilato	1,05	0,2-0,8% m _c

3.2.3 Agregados

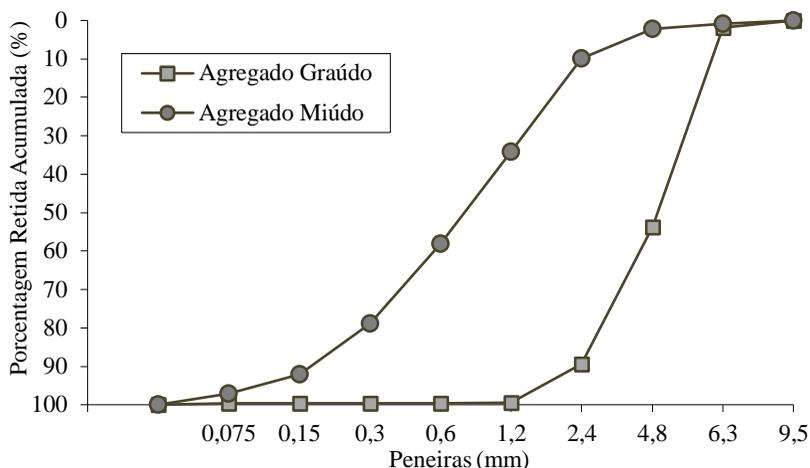
Nesse trabalho, os agregados não são considerados variáveis. Foi utilizado agregado gráudo natural (seixo rolado) na classificação granulométrica de 4,75/12,5 (conforme ABNT NBR 7211, 2009), também chamado comercialmente de brita 0. Como agregado miúdo, utilizou-se uma areia natural de granulometria média.

Apesar de os agregados gráudos de origem natural (seixo rolado), serem atualmente pouco utilizados no Brasil, e de a areia de britagem ser uma alternativa para a composição de agregados miúdos, optou-se por não os utilizar nesse trabalho, uma vez que foram empregados finos (fílers) de diferentes origens mineralógicas e que o uso de agregado britado, que contém esses finos, poderia gerar distorção nas análises. A caracterização física dos agregados pode ser observada na Tabela 15 e na Figura 28.

Tabela 15: Caracterização física dos agregados utilizados.

Materiais	d (kg/dm ³)	Módulo de Finura	Material Pulverulento (%)
Areia Natural Média	2,62	2,7	1,70
Brita 0	2,67	5,8	0,57

Figura 28: Distribuição granulométrica dos agregados.



3.2.4 Finos – Fílers

Foram utilizados fílers de britagem de três origens mineralógicas: calcário, diabásio e gnaiss. O fíler calcário já é amplamente empregado em CAA e foi usado nesse trabalho como balizador para o desempenho dos demais fílers. A caracterização química dos fílers utilizados são apresentadas na Tabela 16.

Os fílers de britagem foram caracterizados sem passar por nenhum processo de beneficiamento (moagem ou peneiramento) e também após a realização de artifícios que visaram melhorar o desempenho desse material (moagem). Isso foi necessário porque os processos de retirada dos finos variam entre as diferentes pedreiras, resultando em materiais de diferentes granulometrias, o que dificulta a análise do desempenho dos finos no que tange à sua mineralogia e às características de superfície. Dessa forma, antes de iniciar os ensaios de caracterização dos finos, foi necessária a preparação destes.

Tabela 16: Análise química dos filers de britagem

Fíler	L	D	G
Origem	Calcário	Diabásio	Gnaisse
CaO	51,03	8,48	1,12
Al ₂ O ₃	0,31	15,46	15,95
Fe ₂ O ₃	0,22	2,10	0,90
SiO ₂	0,85	51,88	70,13
MgO	3,8	4,58	0,69
K ₂ O	0,02	0,76	6,22

3.2.4.1 Moagem dos finos

Os três tipos de finos testados foram moídos em moinho de bolas AMEF, modelo AMBI 480X400, com um padrão de massa de 6 kg de material *in natura*, 28 esferas de aço e 60 rotações por minuto, disponível no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSC. Para atingir as granulometrias desejadas, foram impostos diferentes números de ciclos para cada amostra, sendo que cada ciclo correspondia a um período de 100 minutos. As granulometrias utilizadas foram baseadas na finura do cimento usado e na finura do fíler calcário, conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17: D₅₀⁴ do cimento empregado e de amostras de fíler calcário.

Material	Diâmetro médio das partículas (µm)
Cimento CP V ARI	15
Fíler Calcário	30-40

Com base nos valores da Tabela 17, o número de ciclos de moagem foi definido objetivando a formação de partículas com os seguintes D₅₀:

- D₅₀: 15-16 µm (valores próximos aos cimentos);
- D₅₀: 30-40 µm (valores próximos ao fíler calcário); e
- D₅₀: 20-30 µm (valores intermediários entre cimento e fíler calcário).

Dessa forma, além da mineralogia dos materiais, foi estudada a influência da granulometria dos filers de britagem em misturas de CAA. A determinação da granulometria ideal ocorreu da seguinte forma: uma amostra de material era colocada no moinho e, a cada ciclo, retirava-se 20 g de material para a realização da distribuição granulometria a *laser*. Com esses resultados, determinou-se quantos ciclos eram necessários para cada amostra apresentar o D₅₀ previamente estipulado.

⁴ D₅₀: 50% das partículas apresentam diâmetro abaixo do D₅₀.

A Tabela 18 traz o exemplo de determinação do número de ciclos para o filer diabásio. O diabásio *in natura* já apresentava D_{50} dentro de uma faixa estipulada (valor próximo ao filer calcário). Para alcançar a faixa intermediária (D_{50} entre 20-30 μm), foi necessário um ciclo de moagem e, por fim, para atingir valores próximos ao cimento, foram necessários quatro ciclos de moagem.

Tabela 18: Porcentagem passante em determinados tamanhos de partículas de filer diabásico com diferentes ciclos de moagem.

Porcentagem passante (%)	Tamanho (μm)						
	0 ciclos	1 ciclo	2 ciclos	3 ciclos	4 ciclos	5 ciclos	6 ciclos
10	6,17	2,973	2,232	1,995	1,695	1,559	1,458
20	13,72	8,41	6,16	5,07	3,63	2,968	2,565
30	19,97	14,07	11,38	9,82	7,67	6,37	5,27
40	26,22	19,13	16,10	14,27	12,06	10,47	9,14
50	33,01	24,22	20,51	18,22	16,12	14,09	12,79
60	40,64	29,70	25,14	22,27	20,00	17,76	16,23
70	49,82	36,13	30,70	27,22	24,32	22,12	20,21
80	61,63	44,50	38,15	34,18	30,10	28,22	25,95
90	80,33	60,55	51,16	47,26	41,33	38,90	37,05
95	98,80	86,07	65,19	61,61	56,42	50,44	50,18

3.2.4.2 Ensaios de Caracterização

Com o objetivo de entender o comportamento dos filers de britagem incorporados na mistura, foram realizados os seguintes ensaios de caracterização:

- Massa Específica Aparente: realizada de acordo com a ABNT NM 52 (2009) utilizando picnômetro de 100 ml.
- Granulometria a *laser*: a distribuição do tamanho dos diâmetros médios das partículas dos filers foi obtida por granulometria a *laser*, um método bastante preciso para pequenos diâmetros de partícula. O equipamento empregado foi o granulômetro a *laser* Microtrac s3500, sem meio dispersante, disponível no Laboratório de Nano Tecnologia (Nanotec), na UFSC.
- Área superficial: para a determinação da área superficial dos filers, foi empregado o método da área específica BET.

• Azul de Metileno: para a determinação da adsorção superficial das partículas, foi empregado o método prescrito pela norma americana AASHTO TP57 (2000). O método consiste na preparação de uma solução de azul de metileno (Figura 29a) na concentração de 5g/L (azul de metileno e água destilada) para titular uma solução contendo o material fino a ser analisado de acordo com o seguinte procedimento:

- Preparação da amostra de agregado: secar a amostra e peneirá-la em abertura de 0,075 mm. Peser 10 g da fração passante em um béquer de 500 ml. Adicionar 30 ml de água destilada no béquer contendo a amostra e proceder à dispersão com o auxílio do agitador magnético por cinco minutos.

- Com o auxílio de uma bureta, adicionar ao béquer 0,5 ml de solução de azul de metileno e continuar a agitação por mais um minuto (Figura 29b).

- Introduzir um bastão de vidro na mistura sem desligar o agitador magnético, retirar uma pequena porção dessa suspensão e deixar pingar uma gota sobre a superfície de um papel filtro.

- Observar a difusão da gota no papel filtro e verificar o aparecimento do halo azulado em torno da borda que circula o núcleo escuro da mancha onde estarão as partículas sólidas da suspensão (Figura 29c).

- O ponto final da titulação é obtido quando o halo se transforma em uma iridescência e permanece azulado em um prazo mínimo de cinco minutos (conforme pode ser visualizado na Figura 30). Caso contrário, continuar a titulação com alíquotas de 0,5 ml até que isso ocorra.

Figura 29: Ensaio de azul de metileno.



(a) Solução de azul de metileno na concentração de 5g/L.



(b) Agitação magnética da solução com filer.



(c) Difusão no papel filtro.

O resultado do teste do azul de metileno é apresentado como o valor do azul de metileno em miligramas de solução por grama do material passante na peneira 0,075 mm, conforme a Equação 11.

$$M = \frac{C \times V}{W} \quad (11)$$

Onde:

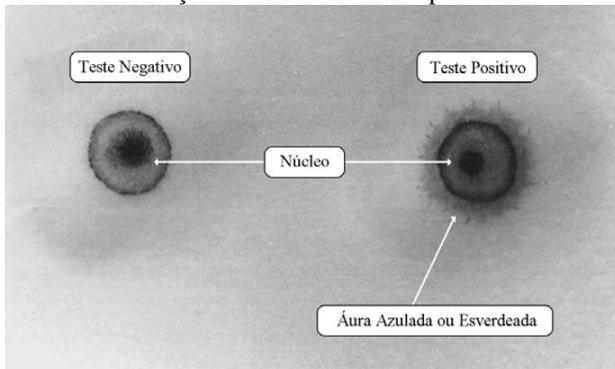
M: valor de azul de metileno (mg) de solução por grama de material passante na peneira 0,075 mm;

C: mg de azul de metileno por ml de solução;

V: ml de solução de azul de metileno necessária para a titulação; e

W: gramas de material seco.

Figura 30: Ensaio de adsorção de azul de metileno: ponto final da titulação.



Fonte: Fabbri (1994).

Nesse trabalho, por meio do ensaio de adsorção de azul de metileno, desejava-se identificar os níveis de adsorção dos diferentes finos de britagem, uma vez que essa adsorção é influenciada não só pela área superficial das partículas, mas também pela sua mineralogia, textura ou pelo formato dos grãos (STEWART et al., 2006).

- Forma das partículas: a forma das partículas foi determinada utilizando-se o método de análise de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As imagens foram obtidas no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME), localizado na UFSC. Com as imagens obtidas por MEV, utilizou-se o *software* Image tool 3.0 (Figura 31) para a realização de uma abordagem morfológica, a fim de segmentá-las. O processo de segmentação computacional teve por objetivo dividir a imagem em

regiões (conjuntos de *pixels*) para simplificar a análise e permitir a localização de delimitação das partículas.

O método de segmentação utilizado foi a binarização. O processo de segmentação binária dividiu uma imagem em duas regiões homogêneas (preto e branco) de acordo com um critério estabelecido. A Figura 32 mostra um exemplo de uma imagem de MEV transformada em uma imagem binária. Percebe-se que não foi possível quantificar todas as partículas presentes em cada imagem pelos seguintes motivos: as partículas sobrepostas foram excluídas para evitar erros de contorno; não foi possível selecionar partículas de contrastes muito diferentes em uma única imagem; e partículas com contornos imperfeitos foram excluídas. Em imagens nas quais esses problemas foram muito pronunciados e poucas partículas puderam ser identificadas, a imagem de MEV foi analisada em duas partes, conforme Figura 33, na qual uma mesma figura foi transformada em duas imagens de binário, a fim de analisar partículas diferentes em cada imagem. Com a imagem binária e o auxílio do *software* Image Tool 3.0, foi possível a determinação das dimensões e do contorno das partículas para a aplicação das Equações 4, 5 e 6. Para cada tipo de fino, no mínimo 10 imagens diferentes de MEV foram utilizadas e, em média, 200 partículas foram analisadas. Foi também determinado o fator de forma (FF), de acordo com as Equações 8, 9 e 10.

Figura 31: Interface do *software* Image Tool 3.0.

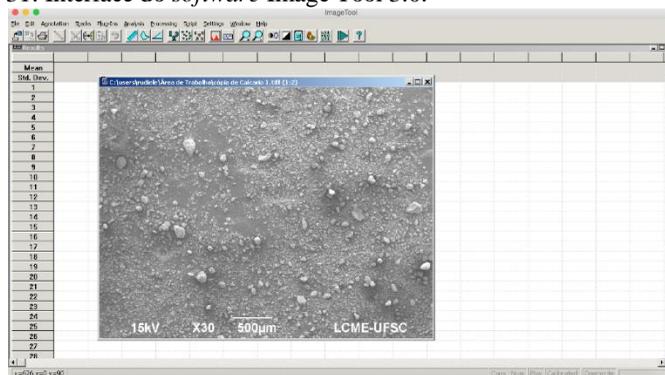


Figura 32: Determinação das formas das partículas por imagens de MEV: (a) imagem obtida por MEV; (b) imagem binária com as partículas pré-selecionadas para análise.

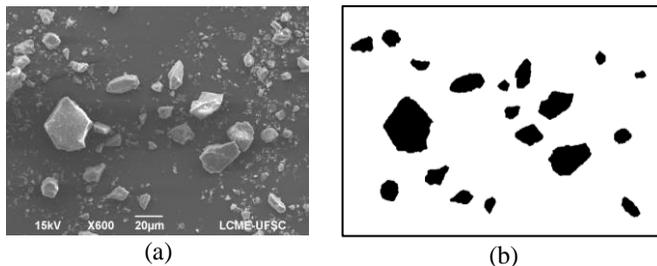
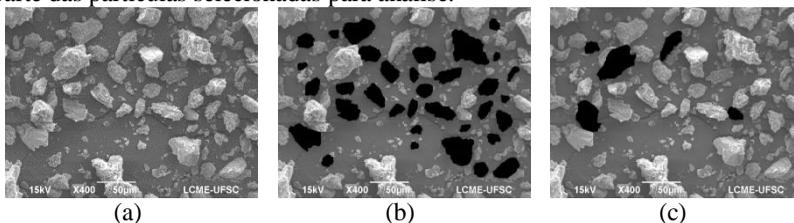


Figura 33: Seleção das partículas da imagem MEV: (a) imagem obtida por MEV; (b) primeira parte das partículas selecionadas para análise; (c) segunda parte das partículas selecionadas para análise.



3.3 MÉTODOS

O estudo da influência dos diferentes tipos de fílers em misturas cimentícias foram divididos em duas partes: estudos em pastas e estudos em concretos.

3.3.1 Estudo em Pastas

Como a reologia do concreto é fortemente relacionada com a aglomeração das partículas finas, em especial as partículas de cimento, foram realizados estudos em pastas, a fim de verificar a influência dos finos na cinética de hidratação do cimento, no processo de floculação e nos parâmetros reológicos das misturas. Para isso, os estudos em pastas englobaram ensaios de calorimetria isotérmica, termogravimetria, FBRM (*Focused Beam Reflectance Measurement*) e reometria.

3.3.1.1 Proporções da Mistura

Os traços das pastas foram baseados nas proporções de CAA previamente definidas para os estudos em concreto e utilizando as recomendações europeias (EFNARC, 2005). Todas as substituições de cimento por fíler foram feitas em volume.

Para compreender os traços adotados para as pastas, é necessária uma breve explicação das proporções empregadas nos CAAs, que serão explanadas em detalhes na seção 3.4. Para os traços em concreto, fixou-se previamente três volumes de finos totais (cimento mais fíler de britagem): 180, 200 e 220 litros/m³. Como optou-se por não variar a resistência à compressão dos concretos, a relação água/cimento das misturas é fixa e, conseqüentemente, a parcela de finos oriundos do cimento mantém-se inalterada em todas as misturas. Descontando a contribuição do cimento, os três volumes de fílers utilizados nos concretos foram 59, 79 e 99 litros/m³, conforme pode ser visualizado na Tabela 19.

Tabela 19: Proporções dos concretos para 1m³.

Características gerais dos concretos	a/c	0,53	
	Água (dm ³)	200	
	Consumo de cimento (kg)	377	
	Volume de cimento (dm ³)	121	
Concretos Série 1	Volume total de finos (dm ³)	180	
	Volume de fíler (dm ³)	59	
	Fíler/finos vol (%)	33	
	Massa de fíler (kg)	Calcário	165
		Diabásio	167
Gnaisse		164	
Concretos Série 2	Volume total de finos (dm ³)	200	
	Volume de fíler (dm ³)	79	
	Fíler/finos vol (%)	40	
	Massa de fíler (kg)	Calcário	221
		Diabásio	223
Gnaisse		219	
Concretos Série 3	Volume total de finos (dm ³)	220	
	Volume de fíler (dm ³)	99	
	Fíler/finos vol (%)	45	
	Massa de fíler (kg)	Calcário	277
		Diabásio	279
Gnaisse		274	

Como as substituições foram feitas em volume, as massas de fíler apresentam pequenas variações em função das diferentes massas específicas; o calcário apresentava massa específica de 2,80 kg/dm³; o diabásio, de 2,82 kg/dm³; e o gnaïsse, de 2,77 kg/dm³.

Para a confecção das pastas contendo fíler, foram mantidas constantes a proporção água/cimento em massa (0,53), a proporção de fíler/cimento e a relação água/finos em volume utilizada nos concretos. A Tabela 20 mostra os parâmetros fixos entre concretos e pastas.

Tabela 20: Parâmetros fixos entre concretos e pastas.

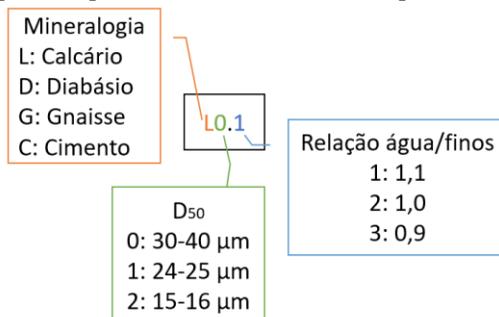
Volume de fíler em 1m ³ de concreto (l)	Relação água/finos em volume	Proporção de cimento em relação aos finos totais em volume	Denominação das pastas
180	1,1	67%	XX.1
200	1,0	60%	XX.2
220	0,9	55%	XX.3

Os estudos em pastas foram divididos em três partes:

- Pastas unitárias com aditivo fixo: quando se utilizou somente um tipo de fíler em cada mistura e fixou-se o teor de superplastificante entre amostras com diferentes mineralogias de fílers. Foram preparadas 30 misturas de pastas, variando mineralogia, D₅₀ e volume (relação água/finos) de fíler presente.
- Pastas unitárias com aditivo variável: quando se utilizou somente um tipo de fíler em cada mistura e fixou-se a abertura no *minislump* para todas as amostras, com ajuste do superplastificante. Foram preparadas 30 misturas de pastas com aditivo variável, alterando mineralogia, D₅₀ e volume (relação água/finos) de fíler presente.
- Pastas binárias com aditivo fixo: quando se utilizou uma composição de fílers (calcário com diabásio; calcário com gnaïsse) e fixou-se o teor de superplastificante entre as amostras. Foram preparadas 12 pastas binárias com aditivo fixo, variando a mineralogia do fíler e o D₅₀, mas mantendo constante a relação água/finos em 1,0.

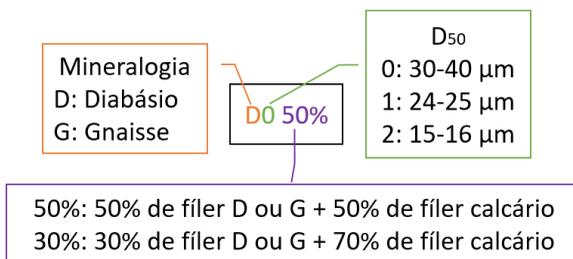
Com o objetivo de facilitar a identificação das pastas, o nome das misturas foi abreviado em função da mineralogia, D₅₀ e teor de fíler adicionado. A Figura 34 mostra um esquema explicativo da nomenclatura adotada nas pastas, contendo somente um tipo de fíler, por meio do exemplo L0.1, que se refere a pastas contendo calcário (L), sem moagem, ou seja, D₅₀ entre 30-40 µm (série 0), e com relação água/finos em volume de 1,1 (série 1).

Figura 34: Esquema explicativo da nomenclatura das pastas unitárias.



A Figura 35 mostra a explicação da nomenclatura das pastas binárias pelo exemplo D0 50%, que se refere a pastas contendo 50% de fíler diabásico e 50% de fíler calcário, e com D₅₀ de 30-40 μm para ambos os fílers.

Figura 35: Esquema explicativo da nomenclatura de pastas binárias (todas com relação água/finos de 1,0).



Os traços empregados nas pastas unitárias (contendo somente um tipo de fíler) são apresentados na Tabela 21. Conforme explanado anteriormente, cada traço foi testado de duas formas: a primeira foi utilizando um teor de aditivo constante entre séries contendo diferentes mineralogias de fíler; a segunda foi variando a demanda de superplastificante para obter um diâmetro no *minislump* de 110 ± 5 cm. O primeiro procedimento teve por objetivo comparar quantitativamente o desempenho das pastas com os diferentes fílers, enquanto que o segundo visou verificar se os diferentes tipos de fílers seriam capazes de produzir pastas com propriedades reológicas similares quando somente o teor de aditivo fosse alterado.

Vale salientar que cada traço de pasta contendo teor de aditivo variável foi realizado, no mínimo, duas vezes, a fim de acertar o teor de aditivo ideal para a abertura no *minislump* fixada e verificar a reprodutibilidade dos resultados.

Tabela 21: Proporções dos materiais para a confecção de pastas unitárias.

Pastas	Cimento	Fíler	Aditivo fixo*	Aditivo variável*	Água/finos vol.
L0.1	1	0,44	0,07%		1,1
L0.2	1	0,59	0,13%		1,0
L0.3	1	0,73	0,16%		0,9
D0.1	1	0,44	0,07%	0,02%	1,1
D0.2	1	0,59	0,13%	0,05%	1,0
D0.3	1	0,74	0,16%	0,09%	0,9
G0.1	1	0,43	0,07%	0,19%	1,1
G0.2	1	0,58	0,13%	0,28%	1,0
G0.3	1	0,73	0,17%	0,33%	0,9
L1.1	1	0,44	0,11%		1,1
L1.2	1	0,59	0,16%		1,0
L1.3	1	0,73	0,19%		0,9
D1.1	1	0,44	0,11%	0,18%	1,1
D1.2	1	0,59	0,16%	0,28%	1,0
D1.3	1	0,74	0,19%	0,32%	0,9
G1.1	1	0,43	0,11%	0,21%	1,1
G1.2	1	0,58	0,16%	0,28%	1,0
G1.3	1	0,73	0,19%	0,36%	0,9
L2.1	1	0,44	0,12%		1,1
L2.2	1	0,59	0,17%		1,0
L2.3	1	0,73	0,22%		0,9
D2.1	1	0,44	0,12%	0,21%	1,1
D2.2	1	0,59	0,17%	0,29%	1,0
D2.3	1	0,74	0,22%	0,35%	0,9
G2.1	1	0,43	0,12%	0,20%	1,1
G2.2	1	0,58	0,17%	0,26%	1,0
G2.3	1	0,73	0,22%	0,36%	0,9
C2.1	1	0,00	0,12%	0,20%	1,1
C2.2	1	0,00	0,16%	0,28%	1,0
C2.3	1	0,00	0,21%	0,44%	0,9

*em função da massa total de finos.

As pastas com fíler calcário foram utilizadas como referência, uma vez que esse material é frequentemente empregado em concretos autoadensáveis. Dessa forma, nas primeiras séries de pastas (com aditivo fixo), ajustou-se a quantidade de aditivo das pastas com fíler calcário objetivando uma abertura no *minislump* de 110 ± 5 cm e fixou-se esse teor de aditivo para as pastas contendo os outros fílers nas mesmas proporções e tamanhos de partículas. Na segunda série de pastas, a quantidade de aditivo foi ajustada para que todas as misturas apresentassem a mesma abertura no *minislump* (110 ± 5 cm).

Além das pastas com fílers, foram testadas misturas contendo apenas cimento, denominadas de C2 (Tabela 21); e misturas compostas por dois tipos de fíler, conforme proporções apresentadas na Tabela 22. As substituições dos fílers foram realizadas em volume, motivo pelo qual os traços em massa apresentados na tabela não são constantes. Nas misturas binárias, optou-se por testar somente a relação água/finos igual a 1,0 (teor intermediário de finos).

Tabela 22: Proporções dos materiais empregados em pastas com dois tipos de fíler (pastas binárias).

Pastas	Cimento	L0	Fíler	Aditivo	Água/finos vol
D0 50%	1	0,29	0,30	0,21%	1,0
D0 30%	1	0,18	0,41	0,21%	1,0
D1 50%	1	0,29	0,30	0,25%	1,0
D1 30%	1	0,18	0,41	0,25%	1,0
D2 50%	1	0,29	0,30	0,27%	1,0
D2 30%	1	0,18	0,41	0,27%	1,0
G0 50%	1	0,29	0,29	0,21%	1,0
G0 30%	1	0,18	0,41	0,21%	1,0
G1 50%	1	0,29	0,29	0,25%	1,0
G1 30%	1	0,18	0,41	0,25%	1,0
G2 50%	1	0,29	0,29	0,27%	1,0
G2 30%	1	0,18	0,41	0,27%	1,0

Exemplo de nomenclatura: D0 30%: 30% Diabásio 0 + 70% Calcário 0;

3.3.1.2 Procedimento de Mistura

Cada suspensão foi preparada seguindo as recomendações da ASTM C1738, que prescreve os procedimentos de mistura de pastas de cimento submetidas a elevada taxa de cisalhamento. Esse procedimento simula a reologia de uma pasta com propriedades similares às aquelas obtidas em um concreto do qual os agregados tivessem sido removidos.

O misturador utilizado pode ser visualizado na Figura 36. Além do misturador, o equipamento dispunha de um sistema regulador de temperatura, a qual permitia a realização da mistura a 23°C. O misturador consistiu em duas lâminas posicionadas no inferior do recipiente. A lâmina era substituída sempre que ocorria uma perda de massa igual a 10%.

Resumidamente, o procedimento prescrito pela norma consiste em:

- adicionar a água no recipiente do misturador e iniciar agitação de 4.000 rpm;
- esperar até que o conjunto atinja a temperatura adequada para o ensaio;
- iniciar a colocação dos materiais secos sem desligar o misturador. Essa operação deve ser concluída em aproximadamente 60 segundos;
- assim que todo o material seco é adicionado, aumentar a velocidade de mistura para 10.000 rpm e manter durante 30 segundos;
- desligar o misturador por 150 segundos (período de repouso). Nos primeiros 15 segundos, raspar as laterais do recipiente;
- adicionar o aditivo durante o período de repouso;
- misturar por 30 segundos na velocidade de 10.000 rpm.

Figura 36: Misturador empregado na confecção de pastas, prescrito pela ASTM C1738.



3.3.1.3 Procedimento de Ensaio

Logo após a mistura, foi realizado o teste do *minislump*. Posteriormente, iniciou-se o ensaio de FBRM, que durou cerca de 60 minutos. A reometria das pastas foi feita 10 minutos depois do início da

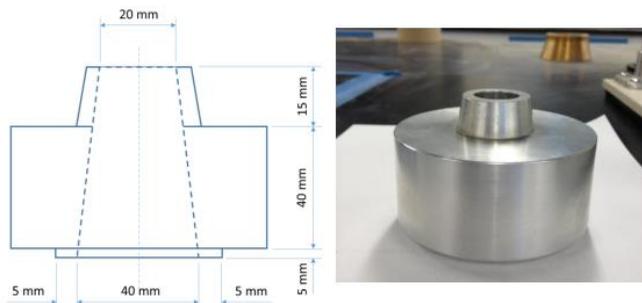
mistura (trabalhabilidade inicial) e também passados 40 minutos do início mistura, a fim de verificar a perda de fluidez com o tempo. Foi realizada ainda a calorimetria das pastas unitárias contendo aditivo fixo para verificar a interferência dos finos no processo de hidratação. Além desses ensaios, quatro pastas foram submetidas a análises termogravimétricas, para melhor compreender a cinética de hidratação do cimento na presença dos diferentes tipos de fillers.

3.3.1.4 Ensaios

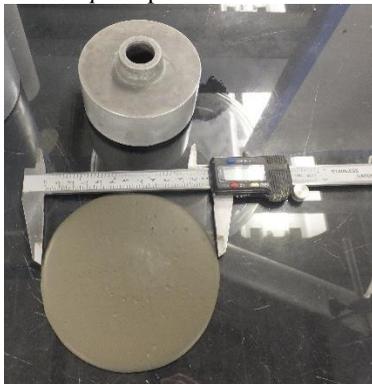
3.3.1.4.1 *Minislump*

O *minislump* consiste em um tronco cônico com as dimensões apresentadas na Figura 37. O ensaio de *minislump* tem como resultado a média aritmética de duas medidas perpendiculares do diâmetro da abertura das pastas em uma superfície horizontal plana. Um exemplo da realização do ensaio pode ser visualizado na Figura 38.

Figura 37: *Minislump*.



Fonte: Han (2014).

Figura 38: Ensaio de *minislump* em pastas.

3.3.1.4.2 Calorimetria de Condução

O ensaio de calorimetria de condução é frequentemente utilizado para avaliar a cinética de hidratação do cimento (LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2003; KADRI et al., 2010; BERODIER; SCRIVENER, 2014; JUENGER; SIDDIQUE, 2015; AQEL; PANESAR, 2016) e, nesse trabalho, foi realizado visando avaliar a influência da incorporação dos fillers de diferentes mineralogias e tamanhos de partículas nessa questão.

O perfil de liberação de calor na hidratação do cimento foi monitorado por aproximadamente 48 h, em calorímetro de condução isotérmico Thermometric TAM AIR (Figura 39), disponível no *Civil, Architectural and Environmental Engineering Department - UT*, com sistema informatizado de aquisição de dados e frequência média de leitura a cada 60 s.

Os ensaios foram realizados com porções entre 14 e 18 g de pasta para todas as misturas contendo teor de aditivo fixo. Durante todo o período de aquisição dos dados, a temperatura do equipamento foi mantida constante a 23°C. O início do registro dos dados de calor liberado deu-se, em média, após 12 minutos do primeiro contato da água com os materiais secos. Dessa forma, não foi possível quantificar o calor liberado nos primeiros minutos da reação, atribuídos, principalmente, conforme Mostafa e Brown (2005), à molhagem dos grãos, à solubilização dos aluminatos e sulfatos, à hidratação da cal livre e à formação de etringita.

Com os resultados do ensaio de calorimetria, é possível comparar a duração do período de indução das pastas, a inclinação da curva no período de aceleração pós-indução, a taxa máxima de calor no pico pós-

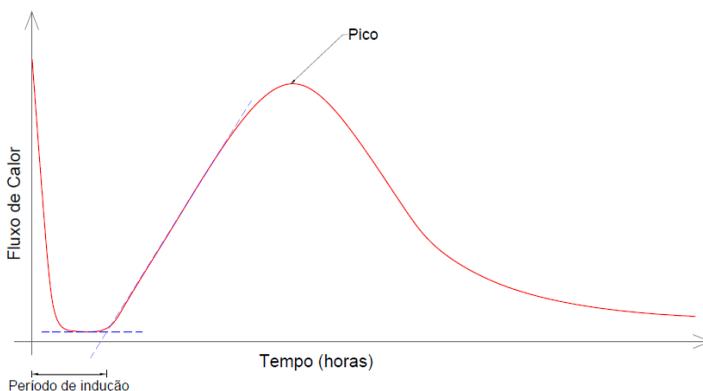
indução e o calor total liberado em dado momento do ensaio para as pastas contendo os diferentes materiais empregados.

Figura 39: Calorímetro de condução isotérmico empregado.



A determinação do período de indução foi realizada graficamente, conforme procedimento utilizado por Betioli et al. (2009) e mostrado na Figura 40. O calor total liberado foi analisado por grama de cimento contido na amostra, calculado em função da quantidade de pasta ensaiada e do traço inicial.

Figura 40: Determinação do período de indução.



Fonte: Adaptada de Betioli et al. (2009).

3.3.1.4.3 Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Diferencial (dTG)

Os ensaios de termogravimetria (TG) determinam a perda de massa das amostras em função da temperatura. Por meio da termogravimetria

diferencial ou primeira derivada da TG em função da temperatura (dTG), são identificados os limites das parcelas de perda de massa. Conforme a faixa de temperatura de cada pico (Tabela 12), atribui-se à decomposição térmica dos hidratos⁵ (C-S-H, aluminatos entre outros), à desintegração do hidróxido de cálcio e à volatilização do gás carbônico do carbonato de cálcio (TAYLOR, 1997). Portanto, para verificar se a presença de fílers de britagem de origem diabásica e gnáissica influencia na cinética de hidratação das pastas, foi realizado o quantitativo do hidróxido de cálcio e hidratos.

O equipamento utilizado para as análises conjugadas de TG e dTG foi um analisador térmico Q50, da marca TA *instruments*, disponível no Laboratório de Materiais Poliméricos – LabPol-UFRGS. Foram utilizados cadinhos de platina e amostras com massa variando entre 15,0 e 15,6 mg. Como condicionante do ensaio, foi utilizado gás nitrogênio 5.0 analítico para proteção da balança (fluxo de 10 ml/minuto) e purga dos gases volatilizados (fluxo de 90 ml/minuto). A taxa de aquecimento foi de 10°C/minuto entre 30°C e 925°C.

O ensaio de termogravimetria foi realizado apenas para quatro pastas, sendo uma pasta com cada tipo de fino: L0.2, D1.2, G1.2 e C2.2 (ver traço apresentado na Tabela 21 para aditivo variável). O fíler calcário *in natura* foi selecionado por ser o material de referência deste trabalho. O fíler diabásico e gnáissico com D_{50} de 24-25 μm foram selecionados devido aos resultados observados em CAA contendo esses materiais. Conforme será explanado no capítulo “Resultados”, os concretos dosados com D1 e G1 foram os que apresentaram propriedades reológicas mais próximas às misturas contendo fíler calcário, e também apresentaram ótimo desempenho no estado endurecido.

Utilizou-se recipientes cilíndricos plásticos de 2x4 cm para a moldagem dos exemplares a serem submetidos a análise termogravimétrica. Na idade de 28 dias, as amostras foram moídas em moinho vibratório de bola por aproximadamente 30 minutos (FRITSCH, modelo micro Pulverisette 0). Antes de iniciar a moagem no moinho, foi realizada uma pré-moagem dos corpos-de-prova com almofariz e pistilo de ágata. Para cada nova amostra, o moinho e a sua bola eram limpos com álcool e secos ao ar.

Para a determinação do teor de hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, basta aplicar o fator que relaciona a massa

⁵ Quando se tratar dos resultados de TG/dTG, o termo hidratos refere-se a todos os compostos produzidos na hidratação do cimento, exceto o hidróxido de cálcio.

molecular do hidróxido de cálcio e a massa molecular da água, conforme a Equação 12 (HOPPE, 2008; PILAR et al., 2016).

$$Ca(OH)_2 = \frac{M_{Ca(OH)_2}}{M_{H_2O}} \cdot H_2O = \frac{74}{18} \cdot H_2O = 4,11 \cdot H_2O \quad (12)$$

Onde:

$Ca(OH)_2$: teor de hidróxido de cálcio (%);

$M_{Ca(OH)_2}$: massa molecular do hidróxido de cálcio (74);

M_{H_2O} : massa molecular da água (18);

H_2O : perda de massa de água referente à decomposição do hidróxido de cálcio (%).

O teor de carbonato de cálcio presente nas amostras foi determinado de forma análoga ao teor de hidróxido de cálcio, conforme a Equação 13 (HOPPE, 2008; PILAR et al., 2016).

$$CaCO_3 = \frac{M_{CaCO_3}}{M_{CO_2}} \cdot CO_2 = \frac{100}{44} \cdot CO_2 = 2,27 \cdot CO_2 \quad (13)$$

Onde:

$CaCO_3$: teor de carbonato de cálcio (%);

M_{CaCO_3} : massa molecular do carbonato de cálcio (100);

M_{CO_2} : massa molecular do dióxido de carbono ou anidro carbônico (44);

CO_2 : perda de massa referente à decomposição do dióxido de carbono (%).

A comparação dos resultados termogravimétricos requer a correção das perdas de massa para a base de não voláteis (TAYLOR, 1997). O fator de correção é obtido pela Equação 14.

$$FC = \frac{100}{M_{\text{residual}}} \quad (14)$$

Onde M_{residual} corresponde à massa residual após perda de massa até 925°C.

Não foi realizada correções para carbonatação, pois todas as pastas foram moldadas, moídas e ensaiadas em um mesmo dia, e como o objetivo desse ensaio foi apenas a comparação dos resultados obtidos pelas misturas contendo os diferentes tipos de finos, não houve a necessidade dessa correção.

O resíduo da pasta L0, que contém fíler calcário, precisou ser corrigido para o cálculo dos hidratos e hidróxido de cálcio. Como não se tem a mesma base calcinada, na presença de fíler diabásico e gnáissico o percentual obtido na TG para o carbonato de cálcio é menos representativo (PILAR, 2012). Para a correção, foi calculada a quantidade de fíler calcário presente na amostra ensaiada. Essa massa foi multiplicada pela perda ao fogo a 1000°C do fíler calcário e somada a massa residual do ensaio de termogravimetria.

3.3.1.4.4 Floculação de partículas - FBRM

O conhecimento da microestrutura de misturas a base de cimento durante o período de indução é especialmente importante em misturas fluidas, como o CAA, uma vez que é neste período que o concreto é transportado e moldado. Com base nisso, a técnica do FBRM permite obter informações sobre os mecanismos de floculação das partículas durante os primeiros estágios da hidratação (FERRON, NEGRO, SHAH, 2009).

O FBRM, *Focused Beam Reflectance Measurement*, é um instrumento com base em sensores que utiliza uma técnica de medição conhecida como medida de refletância por um feixe de luz focalizado.

O sensor é inserido diretamente na pasta fresca, em um determinado ângulo, para garantir que as partículas possam fluir por toda a extensão do sensor no qual a medição é realizada. Um feixe de *laser* é lançado no tubo do sensor por meio de um conjunto de lentes e depois atinge um formato mais concentrado na janela de safira. As lentes giram em uma velocidade fixa de 2 m/s, criando um feixe que examina rapidamente as partículas conforme estas fluem pela janela.

Enquanto o feixe concentrado faz a varredura, as partículas ou estruturas de partículas refletem a luz do *laser* no detector. Esses pulsos distintos de luz retrodispersa são detectados e contados, e a duração de cada pulso é multiplicada pela velocidade da varredura para calcular a distância em cada partícula.

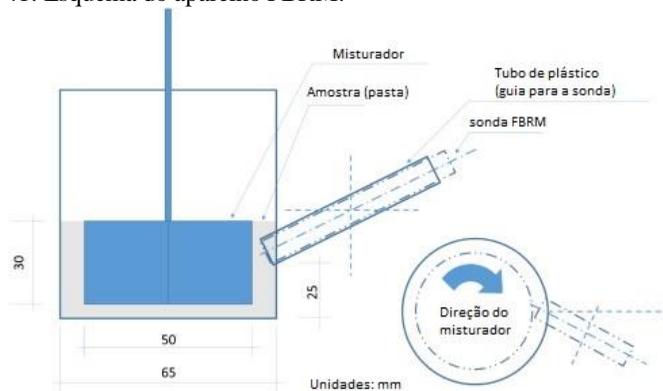
Essa distância é definida como o comprimento da corda, uma medição relacionada ao tamanho da partícula ou ao tamanho da aglomeração de partículas. Geralmente, milhares de partículas são contadas e medidas por segundo, permitindo que o comprimento de corda preciso e sensível seja informado em tempo real.

Dessa forma, devido à variação das condições experimentais, as partículas e as estruturas de partículas presentes nas pastas são

monitoradas, permitindo uma análise sobre o processo de floculação das misturas contendo os diferentes tipos de finos (HAN, 2014).

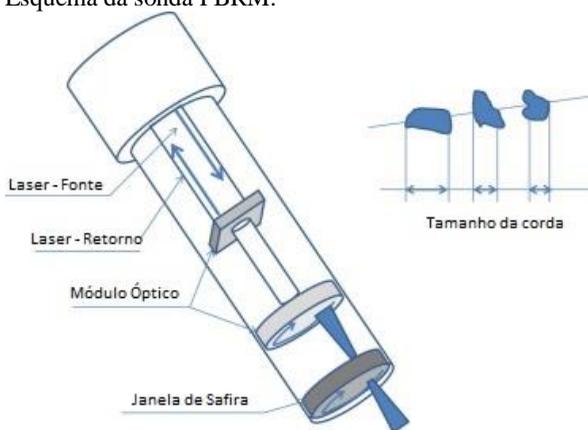
Como pode ser visto nas Figuras 41, 42 e 43, a configuração do ensaio inclui um recipiente que contém a amostra, a sonda FBRM e o misturador.

Figura 41: Esquema do aparelho FBRM.



Fonte: Adaptada de Han e Ferron (2016).

Figura 42: Esquema da sonda FBRM.



Fonte: Adaptada de Han e Ferron (2016).

O ensaio FBRM foi realizado na UT (*Civil, Architectural and Environmental Engineering Department*). Após a preparação da pasta, 60 ml

da mistura eram transferidos para o recipiente do ensaio. Duas velocidades de agitação (40 e 400 rpm) foram utilizadas para examinar o comportamento microestrutural e a aglomeração entre partículas no estado fresco das pastas de cimento. As medições foram registradas a cada 5 s e a pasta foi mantida por 30 minutos em cada rotação.

Figura 43: Sonda FBRM e misturador utilizado nos ensaios.



3.3.1.4.5 Ensaios Reológicos

Os testes reológicos foram conduzidos com o reômetro rotacional Anton Paar MCR 301 (Figura 44a), disponível no *Civil, Architectural and Environmental Engineering Department* - UT. O equipamento foi configurado com uma geometria vane, de quatro lâminas, 22 mm de diâmetro (largura) e 40 mm de altura (Figura 44b). O vane foi selecionado para evitar deslizamento na parede (SAAK; JENNINGS; SHAH, 2001), permitir a determinação da tensão de escoamento estática (via *stress growth*) e porque o reômetro de concreto empregado no trabalho (ICAR) e explanado posteriormente (seção 3.4) também possuía a geometria vane. O diâmetro do copo era de 28,9 mm e a temperatura do sistema foi mantida a $23 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ com um sistema Peltier.

Figura 44: Ensaios reométricos: (a) reômetro utilizado; (b) recipiente e geometria vane.



(a)



(b)

A rotina no reômetro foi configurada para a medição de três propriedades reológicas: tensão de escoamento estática; tensão de escoamento dinâmica; e viscosidade. A tensão de escoamento estática foi medida por meio de *stress growth experiment*. Nessa técnica, o material é submetido a uma baixa taxa de cisalhamento, monitorada ao longo do tempo (NGUYEN; BOGER, 1985; SAAK; JENNINGS; SHAH, 2001). A tensão de escoamento dinâmica e a viscosidade foram calculadas com as curvas de fluxo descendentes de acordo com o modelo de Bingham. Dessa forma, a rotina do reômetro foi a seguinte:

- taxa de rotação fixa de 0,2 rpm por 60 segundos (medição da tensão de escoamento estática);
- período de repouso de 10 s;
- pré-cisalhamento na taxa de 50 s^{-1} durante 60 s;
- período de repouso de 30 s;
- curva de aceleração e desaceleração em nove patamares de 30 s cada: 10, 20, 30, 40, 50, 40, 30, 20, 10 s^{-1} .

Os dados da curva de fluxo descendente foram ajustados pelo modelo de Bingham para a determinação dos parâmetros reológicos fundamentais, conforme a Equação 15.

$$\tau = \tau_0 + \eta \times \dot{\gamma} \quad (15)$$

Onde:

τ : tensão de cisalhamento (Pa);

τ_0 : tensão de escoamento (Pa);

γ : taxa de cisalhamento (1/s);

η : viscosidade (Pa.s).

Para cada mistura, foram realizados dois ensaios reológicos: um 10 minutos após o primeiro contato da água com o(s) cimento/finos; e o outro passados 40 minutos, a fim de verificar a influência do tempo nas propriedades reológicas. O recipiente (copo) do reômetro era preenchido com 40 ml de pasta, posicionado no equipamento e era então iniciado o ensaio, que durava cerca de sete minutos. Após a execução da rotina do primeiro ensaio reológico, a amostra utilizada era descartada. A nova amostra de pasta era protegida para evitar a saída de água até o momento do próximo ensaio. Três minutos antes de iniciar o ensaio reológico com 40 minutos, a amostra era agitada manualmente durante aproximadamente um minuto.

3.4 ESTUDO EM CONCRETOS

Os estudos em concreto foram iniciados no Brasil, mas os testes principais foram realizados na Universidade do Texas, em Austin, EUA. No Brasil, foi feita a curva de dosagem para a determinação da relação/água cimento, definidas as proporções de agregados e os primeiros ajustes de aditivos. Foram preparados 18 concretos no Brasil para os ajustes iniciais, variando tipo, teor e distribuição granulométrica do fíler. Os primeiros estudos reológicos desses concretos foram feitos na USP, com o reômetro Pheso (Poli-USP), consistindo em testes exploratórios. Conforme explanado no item 3.1, os dados desse estudo preliminar podem ser observados no Apêndice A, uma vez que os materiais utilizados não foram os mesmos que os empregados nos demais ensaios.

3.4.1 Determinação dos Traços

Para determinar o traço piloto dos CAAs, inicialmente foi estabelecida a relação água/cimento necessária para atingir a resistência à compressão de 40 MPa (classe de resistência muito empregada em indústrias de pré-fabricados) utilizando a Lei de Abrams e empregando os mesmos materiais efetivamente usados na dosagem do CAA, com exceção dos agregados: cimento CP V ARI, areia natural, brita 12,5/19

mm e aditivo superplastificante. Após a dosagem dos três concretos para a confecção da curva, determinou-se as constantes da Equação 16.

$$f_{cj} = \frac{100,35}{4,61^{a/c}} \quad (16)$$

Utilizando um desvio padrão de 3,0 MPa, a resistência de dosagem empregada foi de aproximadamente 45 MPa. Determinou-se a relação água/cimento de 0,53, a qual foi mantida constante para todos os CAAs.

De acordo com a literatura (EFNARC, 2005) e com estudos experimentais realizados anteriormente a esse trabalho, os parâmetros de dosagem em relação a 1 m³ de CAA podem ser resumidos da seguinte forma:

- consumo de água igual a 200 l;
- consumo de cimento igual a 377 kg;
- consumo de agregado graúdo igual a 30% do volume total;
- consumo de finos (cimento + fílers de britagem) variável:
 - 180 litros: 109 dm³ de cimento + 71 dm³ de fíler de britagem;
 - 200 litros: 109 dm³ de cimento + 91 dm³ de fíler de britagem;
 - 220 litros: 109 dm³ de cimento + 111 dm³ de fíler de britagem;
- aditivo superplastificante ajustado objetivando uma abertura no *slump flow* de 67 ± 3 cm.

A Figura 45 mostra os componentes fixos e variáveis dos CAAs. A seta indica os componentes que foram alterados neste trabalho em função da definição dos volumes de finos adotados.

Com base nas proporções definidas anteriormente, foram confeccionados CAAs contendo diferentes mineralogias, tamanho de partículas (D₅₀) e teores de fílers. Também foi dosada uma série de CAA com o volume total de finos constituído somente por cimento (série C2), a qual apresentou a mesma relação água/finos em volume dos demais concretos e relação água/cimento inferior a 0,53 (0,36; 0,33; 0,30). No total, foram confeccionados 30 concretos autoadensáveis, conforme indica a Figura 46.

Figura 45: Componentes do CAA. A seta indica os componentes que serão alterados neste trabalho.

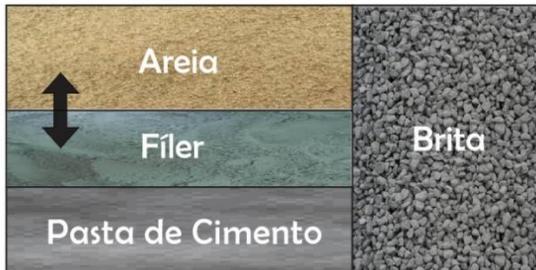
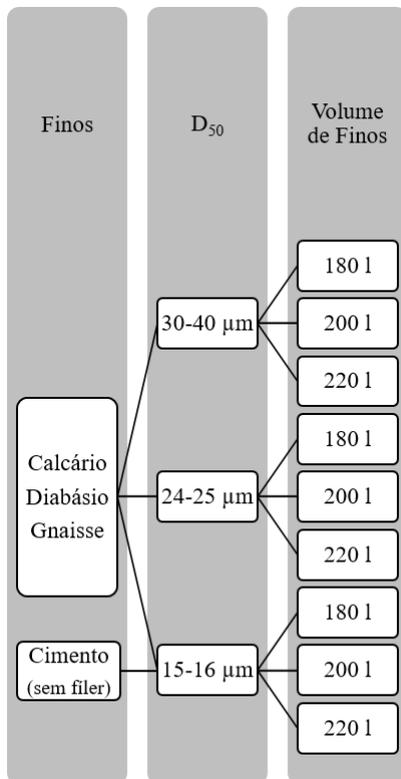


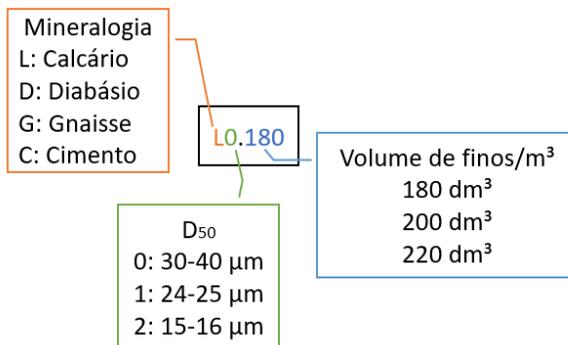
Figura 46: Concretos dosados.



A nomenclatura adotada para os concretos produzidos está apresentada na Figura 47, que mostra o exemplo do concreto L0.180. A

letra representa a mineralogia do filer presente (“L” representa o calcário). Concretos dosados somente com cimento (sem filer) são representados pela letra “C”. O número “0” significa que o filer não passou por nenhum processo de moagem e encontra-se na sua granulometria mais grossa (D_{50} entre 30 e 40 μm). Finalmente, “180” indica o volume total de finos (litros) presente na mistura por m^3 de CAA produzido.

Figura 47: Esquema explicativo da nomenclatura dos CAAs.



A Tabela 23 mostra o proporcionamento dos materiais utilizados nos CAAs dosados. Vale salientar que a massa de filer varia conforme a granulometria porque as substituições foram feitas em volume e os filers apresentam variações na sua massa específica aparente. Como mencionado anteriormente, o teor de aditivo superplastificante foi ajustado tendo como alvo uma abertura no *slump flow* de 67 ± 3 cm. Isso foi necessário para que todas as misturas se enquadrassem nas classificações de concreto autoadensável.

Tabela 23: Proporcionamento dos materiais para confecção de 1 m^3 de concreto.

CAA	Cimento (kg)	Filer (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (l)	Aditivo (l)
L0.180	377	165	707	924	200	1,22
L0.200	377	221	655	924	200	1,32
L0.220	377	277	603	924	200	1,78
L1.180	377	165	707	924	200	1,27
L1.200	377	221	655	924	200	1,56
L1.220	377	277	603	924	200	1,83
L2.180	377	165	707	924	200	1,37
L2.200	377	221	655	924	200	1,47
L2.220	377	277	603	924	200	1,76

CAA	Cimento (kg)	Filer (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (l)	Aditivo (l)
D0.180	377	167	707	924	200	1,43
D0.200	377	223	655	924	200	1,68
D0.220	377	279	603	924	200	2,03
D1.180	377	167	707	924	200	1,83
D1.200	377	223	655	924	200	2,30
D1.220	377	279	603	924	200	3,02
D2.180	377	167	707	924	200	1,91
D2.200	377	223	655	924	200	2,33
D2.220	377	279	603	924	200	2,86
G0.180	377	164	707	924	200	1,70
G0.200	377	219	655	924	200	2,18
G0.220	377	274	603	924	200	2,68
G1.180	377	164	707	924	200	2,06
G1.200	377	219	655	924	200	2,51
G1.220	377	274	603	924	200	3,00
G2.180	377	164	707	924	200	2,13
G2.200	377	219	655	924	200	2,38
G2.220	377	274	603	924	200	2,96
C2.180	562	0	707	924	200	2,08
C2.200	624	0	655	924	200	2,47
C2.220	686	0	603	924	200	3,40

3.4.2 Mistura

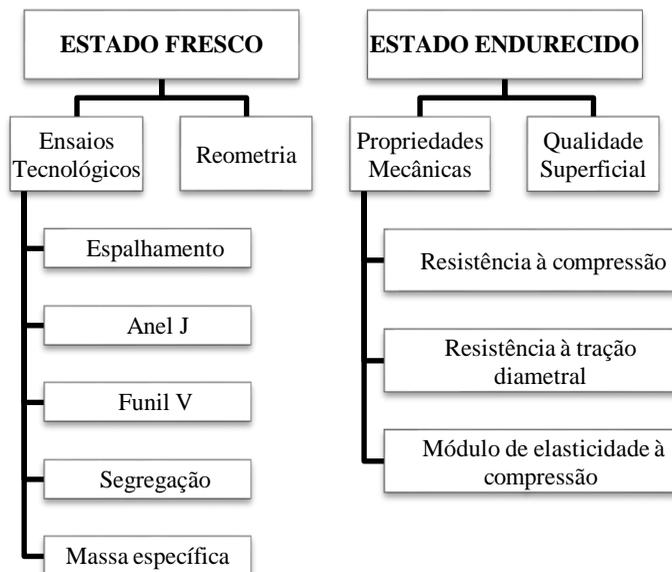
Todos os processos de mistura, assim como os ensaios no estado fresco do concreto, foram realizados em sala climatizada a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Para cada concreto, os materiais foram pesados com um dia de antecedência e deixados na sala de mistura para estabilizar a temperatura. Para cada mistura, foram confeccionados 30 litros de CAA, os quais foram misturados em betoneira de eixo inclinado, seguindo uma ordem de lançamento na cuba. Inicialmente, os materiais secos foram homogeneizados durante 30 s. Colocava-se toda a água e misturava-se por mais 60 s. A mistura era paralisada para a raspagem da superfície da betoneira e para a colocação do aditivo superplastificante. Misturava-se por mais 30 segundos. Interrompia-se a mistura durante 30 s para verificar a necessidade de ajuste do teor de superplastificante (ajuste 1). Caso fosse necessário, adicionava-se mais aditivo. Independentemente da colocação de mais aditivo ou não, misturava-se por mais 30 s e repetia-se a operação

de verificação do teor de aditivo (ajuste 2). Independentemente da colocação ou não de mais aditivo na segunda etapa de ajuste, misturava-se por mais 30 s. O teste do *slump flow* era iniciado em torno de cinco minutos após o primeiro contato da água com os materiais secos.

3.4.3 Ensaios Realizados

O resumo de todos os ensaios realizados em concreto pode ser visualizado na Figura 48. Explicações de cada procedimento serão apresentadas na sequência. Todos esses ensaios foram realizados no *Civil, Architectural and Environmental Engineering Department – UT*.

Figura 48: Ensaios realizados em concreto.



3.4.3.1 Ensaios no Estado Fresco

Todos os ensaios no estado fresco foram realizados em sala climatizada a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ logo após a finalização da mistura.

3.4.3.1.1 Ensaios Tecnológicos

Os ensaios de espalhamento, anel J e funil V foram realizados seguindo as prescrições constantes na ABNT NBR 15823 (2010). O ensaio de resistência à segregação seguiu as recomendações da ASTM C1712 (2014). A Figura 49 mostra um exemplo desses ensaios. Optou-se por não empregar o ensaio de coluna de segregação, prescrito pela ABNT NBR 15823 (2010) devido a morosidade desse ensaio e ao volume de concreto necessário para sua realização, que não pode ser reaproveitado para nenhum outro teste.

Figura 49: Ensaios tecnológicos: (a) Espalhamento; (b) Anel J; (c) Funil V; (d) Ensaio de resistência à segregação.



(a) Espalhamento (*slump flow*)



(b): Anel J



(c) Funil V



(d) Ensaio rápido de segregação

Imediatamente após a mistura do concreto, foi feito o ensaio de espalhamento, ou *slump flow*, uma vez que esse era um parâmetro fixo para todas as misturas (67 ± 3 cm). Paralelamente, cerca de 20 litros de concreto era vertido no recipiente do reômetro. Vale salientar que, a amostra de concreto utilizada nos testes reométricos não foi utilizada para nenhum ensaio tecnológico anterior.

Posteriormente, realizava-se os demais ensaios. A amostra de concreto usada no ensaio de *slump flow* era reutilizada para o ensaio de Anel-J, tomando-se cuidado para não perder argamassa, conforme procedimento ilustrado na Figura 50.

Figura 50: Cuidados durante a remoção do concreto para reutilização da amostra.



3.4.3.1.2 Reometria

Os CAAs realizados nesse programa experimental foram ensaios em reômetro ICAR (Figura 51), um instrumento portátil para medir as propriedades reológicas do concreto fresco. O reômetro foi desenvolvido no International Center of Aggregate Research (ICAR), localizado na Universidade do Texas, em Austin, EUA.

O equipamento é composto por um recipiente para armazenar o concreto a ser ensaiado, um controlador para o motor elétrico e um torquímetro, pá misturadora de quatro palhetas (vane), um quadro de fixação do conjunto e um computador portátil com *software* de gerenciamento do reômetro. O recipiente contém uma série de hastes verticais em torno do perímetro para evitar o escorregamento do concreto ao longo da parede do recipiente durante o ensaio. Os tamanhos do recipiente e do comprimento do eixo do misturador foram selecionados em função da dimensão nominal máxima do agregado: o recipiente tinha capacidade para 20 litros de concreto a ser ensaiado e apresentava diâmetro de 300 mm; o perfil vane com quatro lâminas apresentava diâmetro de 127 mm e altura de 127 mm.

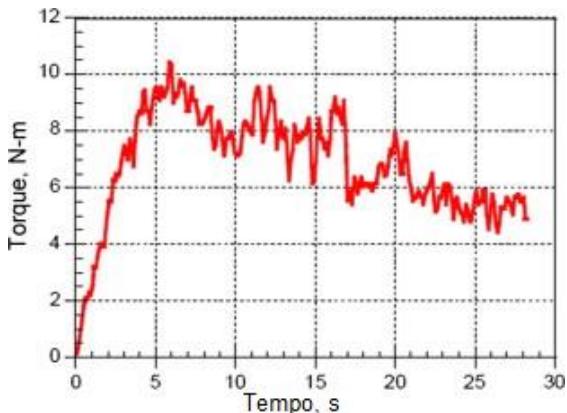
Os concretos foram vertidos dentro do recipiente do reômetro depois de decorridos aproximadamente oito minutos do início da mistura até uma altura de 280 mm. As amostras de concreto destinadas aos ensaios reológicos eram novas, ou seja, amostras de concreto que não tinham passado por nenhum outro ensaio.

Figura 51: Reômetro ICAR.



Iniciava-se o teste para a determinação da tensão de escoamento estática pelo método *stress growth test*, no qual o perfil vane é rotacionado a uma velocidade lenta e constante de 0,025 rps. O aumento do torque é medido em função do tempo. O torque máximo obtido durante o teste é usado para calcular a tensão de escoamento estática (SAAK; JENNING; SHAH, 2001). A Figura 52 mostra um gráfico típico para a determinação da tensão de escoamento estática.

Figura 52: Gráfico típico do teste para a determinação da tensão de escoamento estática.



Fonte: Adaptada de Rahman, Baluch e Malik (2014).

Posteriormente, iniciava-se a curva de fluxo. Cada composição foi preconditionada a uma taxa de pré-cisalhamento de 0,5 rps por 20 s (*breakdown*). As medidas de torque foram obtidas para sete velocidades de rotação em ordem decrescente, a cada 5 s, de 0,5 rps até 0,05 rps. Após o término do ensaio, o perfil vane era retirado e a mistura era homogeneizada manualmente por 30 s. Repetia-se as leituras no reômetro para a confirmação dos resultados.

Os dados foram ajustados a uma equação linear usando a regressão de mínimos quadrados ordinária para determinar uma inclinação e uma intercepção, conforme a Equação 17 (GESOGLU et al., 2015; WALLEVIK et al., 2015), onde G é o ponto de interseção da linha com o eixo de torque (Nm) relacionado à tensão de escoamento dinâmica; H representa a inclinação da linha (Nm.s) e está relacionada com a viscosidade plástica; T é o torque; e N é a velocidade de rotação.

$$T = G + HN \quad (17)$$

Para determinar a viscosidade plástica (Pa.s) e a tensão de escoamento (Pa), a equação de Reiner-Riwlin para materiais de Bingham pode ser usada, como apresentado nas Equações 18 e 19 (WALLEVIK et al., 2015). Esse procedimento não fornece uma transformação ponto a ponto, mas expressa a relação obtida em unidades fundamentais, onde h é a altura do cilindro submerso em concreto, R_1 é o raio da palheta vane e R_0 é o raio do recipiente. Todas as medidas são apresentadas em metros (BILLBERG, 2012).

$$\tau_0 = \frac{G}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) \frac{1}{\ln \left(\frac{R_0}{R_1} \right)} \quad (18)$$

$$\mu_p = \frac{H}{8\pi^2 h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) \quad (19)$$

Os dados também foram analisados pelo modelo de Bingham modificado, apresentado na Equação 20. Os parâmetros desse modelo foram determinados por meio das Equações 21, 22 e 23, conforme publicado por Heirman et al. (2008) e Feys et al. (2013).

$$T = G_{BM} + H_{BM}N + C_{BM}N^2 \quad (20)$$

$$\tau_0 = \frac{1}{4\pi h} \frac{G_{mB}}{\ln\left(\frac{R_0}{R_i}\right)} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) \quad (21)$$

$$\mu = \frac{H_{mB}}{8\pi^2 h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) \quad (22)$$

$$c = \frac{\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2}}{8\pi^3 h} \frac{(R_0 - R_i)}{(R_0 + R_i)} C_{mB} \quad (23)$$

Onde:

G_{mB} : torque inicial ou resistência ao fluxo (N.m);

H_{mB} : termo de primeira ordem (Nm/rev.s⁻¹); e

C_{mB} : termo de segunda ordem (N.m/rev.s⁻¹)².

Verificação da Repetibilidade

Devido à quantidade limitada de materiais enviados para os EUA, cada um dos 30 CAAs foi dosado uma única vez. No entanto, para verificar o desvio padrão do processo de mistura e da leitura do equipamento reométrico, duas misturas (L0.200 e D0.200) foram repetidas três vezes sob as mesmas condições. O ensaio 1 e o ensaio 2 foram realizados em um mesmo dia, enquanto que o ensaio 3 foi feito após aproximadamente 24 ou 48 horas das primeiras misturas.

Cada amostra foi ensaiada duas vezes no reômetro, sendo realizada uma mistura e homogeneização manual com haste metálica entre as leituras. Todas as leituras feitas com a mesma amostra resultaram em valores praticamente iguais, pois foram realizadas com o mesmo concreto, com diferença de tempo de medição de dois a três minutos.

O maior interesse em conferir o potencial de repetibilidade consistiu em analisar amostras distintas, ou seja, verificar a diferença dos parâmetros reológicos de misturas dosadas com o mesmo traço e realizadas com o mesmo procedimento.

A Figura 53 mostra o resultado de tensão de escoamento estática, feita pelo método *stress growth test*, e a curva torque x rotação para as três amostras da série L0. Os resultados para a série D0 são apresentados na Figura 54. A Tabela 24 especifica o desvio padrão e o coeficiente de variação das medidas reológicas das duas séries de concretos testados.

Considerando somente CAAs dosados e ensaiados no mesmo dia (ensaios 1 e 2), percebe-se que a tensão de escoamento estática apresentou variação de 20% na série L0 e de 7% na série D0. A grande variação na primeira série pode ter sido causada por alguma interferência no ensaio 1, uma vez que os ensaios 2 e 3 apresentaram valores muito próximos.

Figura 53: Repetibilidade dos ensaios reológicos: CAA contendo filler calcário in natura (L0).

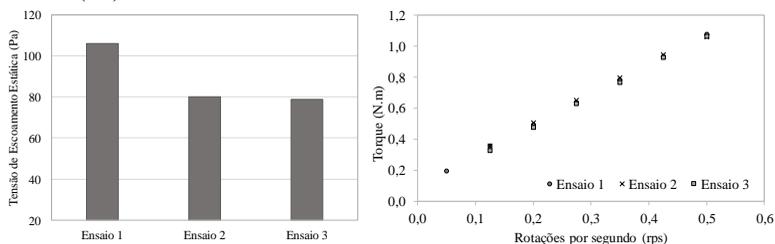


Figura 54: Repetibilidade dos ensaios reológicos: CAA contendo filler diabásio in natura (D0).

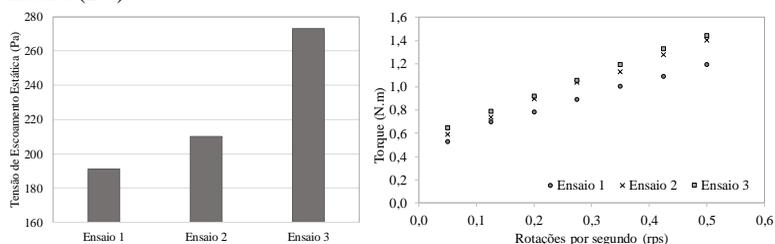


Tabela 24: Desvio padrão e coeficiente de variação dos parâmetros reológicos medidos nos ensaios de repetibilidade.

Medidas Reológicas	Série:	L0	D0
Tensão de Escoamento Estática	Desvio padrão (MPa)	15,4	43,0
	Coeficiente de variação	17 %	19%
Tensão de Escoamento (Bingham)	Desvio padrão (MPa)	3,1	4,8
	Coeficiente de variação	19,7%	4,5%
Viscosidade	Desvio padrão (MPa)	0,64	4,3
	Coeficiente de variação	1,7%	16%

Percebeu-se também uma pequena variabilidade do torque inicial e da inclinação da reta (valores que representam tensão de escoamento e viscosidade pelo modelo de Bingham) entre amostras feitas em um mesmo dia (ensaios 1 e 2) e uma variabilidade maior em relação ao ensaio 3. Apesar de a sala de mistura ser climatizada (23°C), podem ter ocorrido pequenas oscilações na temperatura, falta de acurácia na pesagem, calibração do equipamento ou qualquer outro fator externo que tenha

interferido na reologia da mistura. É utópico pensar que ensaios laboratoriais em concreto não apresentem variações, já que não são fluidos ideais e podem ser influenciados por diversos fatores. Dessa forma, considera-se que ocorreu pequena variação entre as três leituras, uma vez que essa margem de erro é comum em ensaios laboratoriais e não houve mudança na ordem de grandeza das conclusões. Aliado a isso, equipamentos reométricos tendem a ser mais sensíveis do que ensaios tecnológicos, como o *slump flow*.

3.4.3.2 Estado Endurecido

Para cada mistura, foram moldados oito corpos-de-prova cilíndricos de 10x20 cm para determinação da resistência à compressão (ABNT NBR 5739, 2007), módulo estático de elasticidade à compressão (ABNT NBR 8522, 2008) e resistência à tração na compressão diametral (ABNT NBR 7222, 2011), com 28 dias de idade. Esses ensaios têm por objetivo avaliar se a mudança do tipo do microfino na mistura causa alterações significativas na resistência mecânica e na deformabilidade do concreto.

Paralelamente, para cada CAA, foram moldadas placas de concreto de 50x40x5 cm (comprimento x largura x espessura) para o exame da qualidade superficial. As formas para moldagem das placas foram confeccionadas com compensado não absorvente, conforme a Figura 55. As dimensões foram estipuladas para permitir a análise de faces com as maiores dimensões possíveis para que cada placa pudesse ser movimentada sem o auxílio de equipamentos. Essa geometria estipulada armazena 10 litros, o que corresponde a aproximadamente 23 kg de concreto. Cerca de uma hora antes da moldagem, um desmoldante a base de álcool foi aspergido em todas as faces das formas. Tomou-se o cuidado de verter o CAA sempre de uma mesma altura, a partir do centro da forma.

Figura 55: Formas para moldagem das placas de concreto.



A análise de imagens digitais foi conduzida conforme metodologia proposta por Megid (2012). A desforma das placas ocorreu após 24 horas da moldagem. Procedia-se uma escovação das superfícies com escova de aço para mostrar toda a imperfeição presente na peça. Cada uma das duas superfícies da placa foi fotografada sob iluminação artificial a uma distância de cerca de 30 cm ou 40 cm a partir da superfície do elemento de concreto. A fotografia com cor original foi convertida para preto e branco e analisada utilizando-se o *software* ImageTool 3.0 (Figura 31). Os defeitos da superfície foram indicados pela área ocupada pela cor preta. A porcentagem de defeitos (bolhas) em função da área total da imagem é determinada por meio do *software*. A Figura 56 mostra a sequência de processamento das placas para a análise da qualidade superficial.

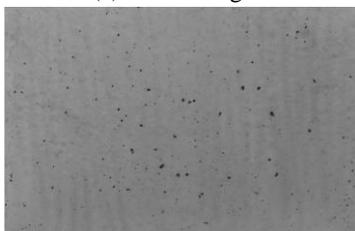
Figura 56: Processo das placas de concreto para análise da qualidade superficial.



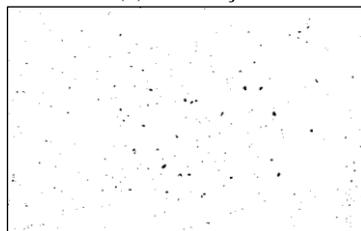
(a) Desmoldagem



(b) Escovação



(c) Obtenção das imagens



(d) Fotografia convertida para preto e branco.

3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nos resultados obtidos experimentalmente em laboratório, englobando as etapas de caracterização dos finos, dosagem de pastas e a dosagem dos concretos, foram realizados os seguintes tratamentos estatísticos para uma significância de 5%:

- regressão linear, e
- projeto de experimentos (experimentos fatoriais): análise de variância (ANOVA).

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos neste trabalho serão apresentados organizados em caracterização dos finos - fílers, resultados das pastas e resultados dos CAAs.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS FINOS - FÍLERS

Os fílers foram obtidos diretamente das pedreiras com D_{50} das partículas entre 33 e 38 μm (denominados L0, D0 e G0). Para avaliar a influência do tamanho das partículas, cada fíler foi moído para a obtenção de mais duas distribuições granulométricas distintas. Dependendo da natureza do fíler (dureza), mais ou menos tempo de permanência no moinho foi necessário (Tabela 25). Foi determinada também a área superficial de cada tipo de fíler pelo método de BET (Tabela 25). As distribuições granulométricas a *laser* do cimento e de todos os tipos de fíler são apresentadas nas Figuras 57, 58 e 59, nas quais é possível observar que as curvas de distribuição granulométrica dos fílers com o mesmo D_{50} são similares.

Tabela 25: BET, D_{50} de todos os finos utilizados e o tempo de moagem necessário para a obtenção da granulometria desejada.

Finos	Denominação	BET (m^2/kg)	D_{50} (μm)	Tempo de moagem (h)
Cimento	C2	2.231	15,19	0
Calcário 0	L0	1.280	38,09	0
Calcário 1	L1	1.671	25,22	1,5
Calcário 2	L2	2.746	16,45	7,5
Diabásio 0	D0	1.183	33,01	0
Diabásio 1	D1	2.071	24,22	1,5
Diabásio 2	D2	5.566	16,12	6,0
Gnaisse 0	G0	1.349	34,15	0
Gnaisse 1	G1	2.525	25,09	9,0
Gnaisse 2	G2	5.517	16,56	18

Vale salientar que a área superficial das partículas apresenta grande variação para um mesmo D_{50} . As maiores diferenças ocorreram com D_{50} de 16 μm , em que as partículas de diabásio e gnaisse apresentaram valores na ordem de 5.500 m^2/kg , enquanto que o calcário apresentou 2.746 m^2/kg . Provavelmente, essa diferença ocorre porque as partículas

menores que 16 μm de diabásio e gnaissé são muito mais finas que as de calcário.

Figura 57: Distribuição granulométrica a *laser* do filler calcário com D_{50} de 38, 25 e 16 μm ; e distribuição granulométrica do cimento.

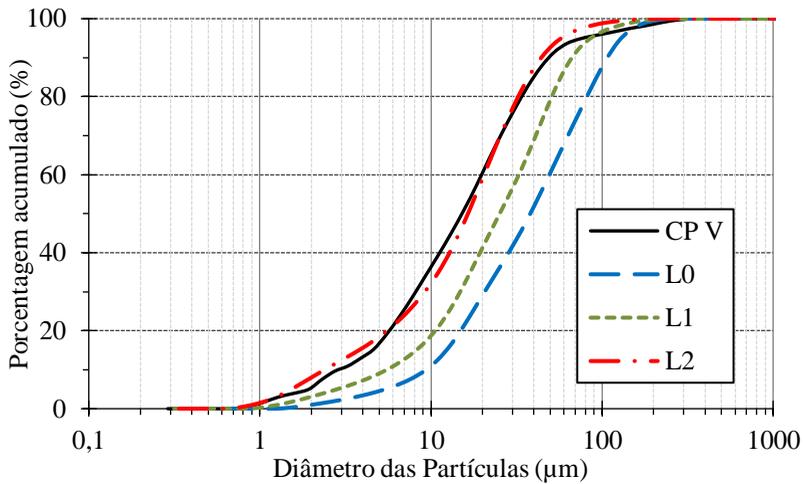


Figura 58: Distribuição granulométrica a *laser* do filler diabásico com D_{50} de 33, 24 e 16 μm ; e distribuição granulométrica do cimento.

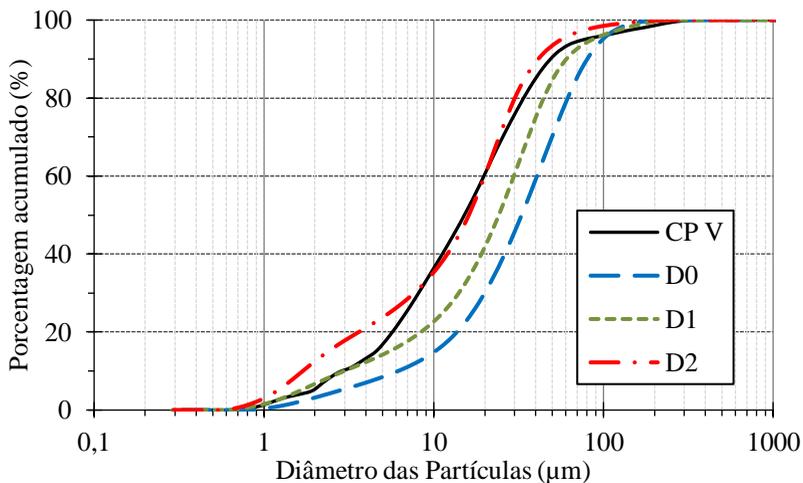
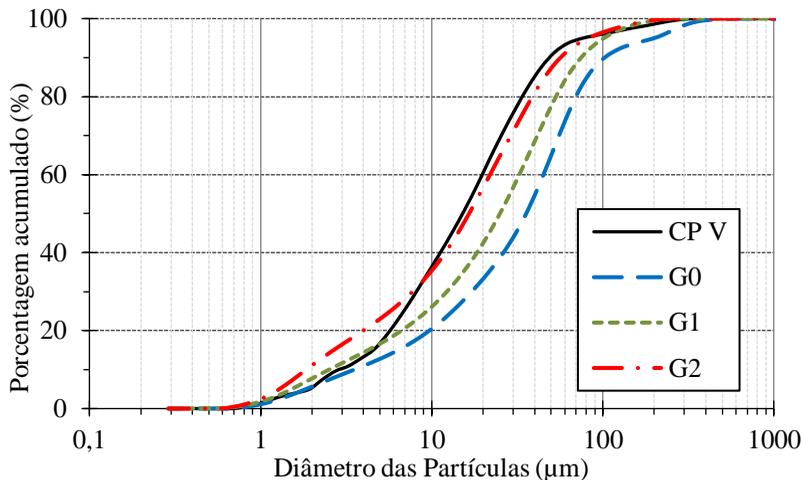


Figura 59: Distribuição granulométrica a *laser* do filer gnáissico com D_{50} de 34, 25 e 16 μm ; e distribuição granulométrica do cimento.



4.1.1 Forma das Partículas

Imagens MEV referentes a cada tipo de filer empregado podem ser visualizadas na Figura 60. Na Tabela 26, encontram-se os valores médios de relação de aspecto, angularidade e rugosidade das partículas, calculados de acordo com as Equações 5, 6 e 7; além do fator de forma (FF) calculado pelas Equações 8, 9 e 10.

A relação de aspecto igual a 1 corresponde a partículas esféricas ou equidimensionais, apresentando valores mais altos para partículas mais alongadas e planas. A angularidade de um círculo ou de uma elipse é igual a 1; e, quanto menor as reentrâncias nas partículas, menor é a sua rugosidade.

Dependendo do grau de moagem, a relação de aspecto e angularidade das partículas foi aumentada para os filers de calcário e diabásio. Isso é consistente com o trabalho de Felekoglu (2009), que usou processos de moagem de partículas de calcário e quartzo e observou que o efeito da moagem na forma, na textura e na superfície pode variar com o tipo de pó. O autor também verificou um aumento no alongamento das partículas após a moagem de até três horas.

No presente estudo, após a moagem de até 1,5 h, as partículas tornaram-se mais alongadas e planas. No entanto, depois de seis horas de

moagem, as partículas melhoraram individualmente a sua relação de aspecto.

Figura 60: Imagens de MEV de cada tipo de filer empregado.

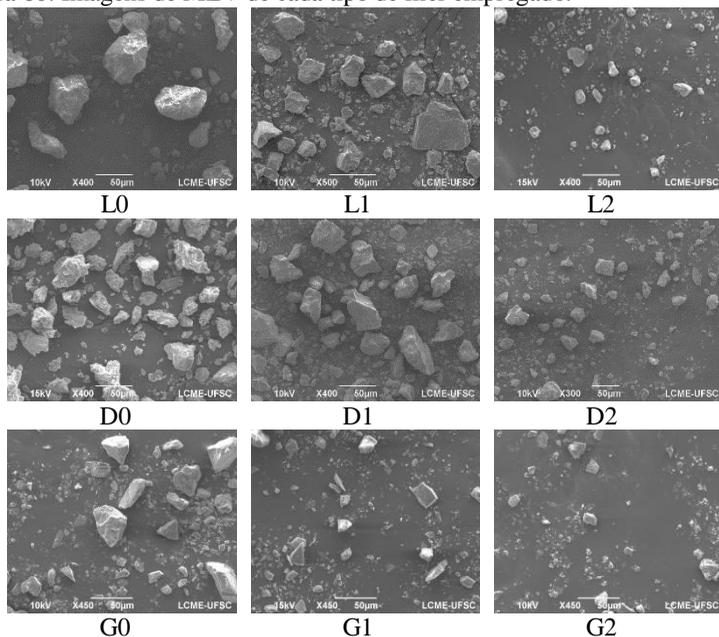


Tabela 26: Análise das partículas de filer: relação de aspecto, angularidade e rugosidade, e fator de forma (FF)

Filer	Relação de aspecto	Angularidade	Rugosidade	FF
L0	1,42	1,11	1,33	12,18
L1	1,46	1,13	1,29	9,97
L2	1,41	1,12	1,30	9,40
D0	1,55	1,14	1,35	7,89
D1	1,59	1,15	1,26	8,79
D2	1,48	1,12	1,29	15,10
G0	1,57	1,13	1,28	6,67
G1	1,52	1,15	1,23	9,60
G2	1,54	1,15	1,24	15,92

A rugosidade das partículas aumenta quando a superfície destas (e, conseqüentemente, o seu perímetro) aumenta. Percebeu-se que as partículas de gnaíse apresentaram as menores rugosidades. A

angularidade foi similar entre as partículas, sendo levemente mais elevadas nas de diabásio e gnaiss do que nas de calcário. Vale salientar que, segundo Kuo (2002), uma diferença de 0,01 na angularidade e na rugosidade das partículas é considerada significativa.

De maneira geral, em relação aos três parâmetros iniciais (relação de aspecto, angularidade e rugosidade), o fíler calcário tende a ser mais favorável do que os demais fílers estudados. Essa conclusão já era esperada, uma vez que vários autores mencionam a forma das partículas como uma desvantagem de fílers de diferentes origens mineralógicas (HO et al., 2002; STEWART et al., 2003; RAMOS et al., 2013).

Segundo Daminieli (2013), quanto menor o valor do FF, menor a rugosidade e a angularidade do grão. Consequentemente, as partículas tendem a adsorver menor quantidade de água e solicitar menor teor de água para a mesma fluidez. No entanto, não houve uma correlação entre os valores de angularidade e rugosidade (medidos de forma direta pelas equações de Kuo e Freeman) com o FF, uma vez que sua determinação leva em consideração a área superficial do fíler.

A Tabela 27 mostra uma análise estatística dos parâmetros de forma analisados em relação à mineralogia e ao D_{50} dos fílers.

Tabela 27: ANOVA - influência de mineralogia e do D_{50} na relação de aspecto, angularidade e rugosidade.

Parâmetro	Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Relação de aspecto	Mineralogia	0,02496	2	0,01248	9,52	97%
	D_{50}	0,00362	2	0,00181	1,38	65%
	Erro	0,00524	4	0,00131		
Angularidade	Mineralogia	0,00087	2	0,00043	3,71	88%
	D_{50}	0,00047	2	0,00023	2,00	75%
	Erro	0,00047	4	0,00012		
Rugosidade	Mineralogia	0,00576	2	0,00288	16,19	99%
	D_{50}	0,00576	2	0,00288	16,19	99%
	Erro	0,00071	4	0,00018		
FF	Mineralogia	0,070	2	0,035	0,003	0,3%
	D_{50}	37,246	2	18,623	1,74	71%
	Erro	42,634	4	10,658		

SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade; MQ: médias quadradas; F: distribuição de Fisher.

Percebe-se que, para a relação de aspecto, a mineralogia é o fator de maior importância, o que confirma as diferenças significativas entre

fílers calcáριο, diabásio e gnaissе. Para a angularidade e o fator de forma, nenhum dos dois fatores analisados apresenta grande influência (confiabilidade menor que 95%), podendo haver efeitos de segunda ordem ou relacionados com a própria relação de aspecto. A rugosidade, por sua vez, é influenciada significativamente por ambos os parâmetros analisados.

4.1.2 Adsorção por Azul de Metileno

A Tabela 28 mostra a adsorção de azul de metileno de todos os fílers estudados. Para facilitar a análise, os dados de área superficial BET foram novamente expostos nessa tabela. O teste de azul de metileno, frequentemente utilizado para determinar a presença de minerais argilosos deletérios, pode identificar os níveis de adsorção das partículas. A Figura 61 mostra o ensaio para determinar essa propriedade. Vale salientar que somente foi apresentada a última cartela de adsorção de cada fíler. As fotografias de todas as cartelas (filtros) utilizadas podem ser verificadas no Apêndice B.

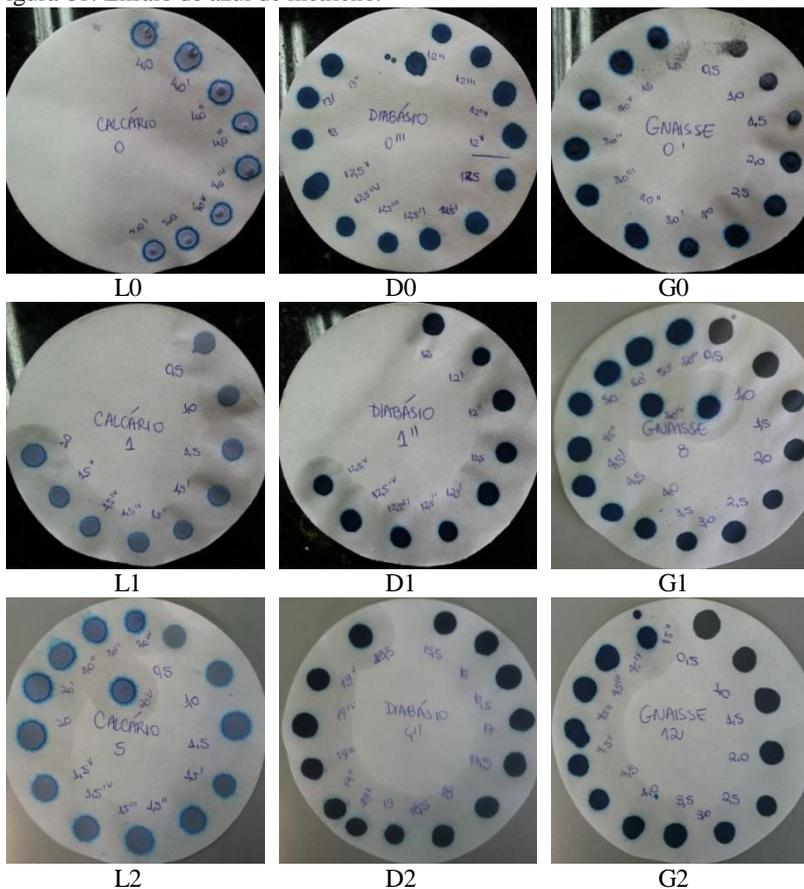
Tabela 28: Adsorção por azul de metileno dos fílers.

Fíler	BET (m ² /kg)	Azul de Metileno (mg/g)
L0	1.280	1,5
L1	1.671	1,5
L2	2.746	1,5
D0	1.183	10,0
D1	2.071	12,5
D2	5.566	19,0
G0	1.349	3,0
G1	2.525	4,5
G2	5.517	4,5

Percebe-se que, apesar de a adsorção do azul de metileno aumentar moderadamente entre as partículas de mesma origem mineralógica após o processo de moagem, não houve uma correlação entre os valores de BET ou D₅₀ com a adsorção de azul de metileno. Isso indica que a mineralogia interfere na forma de adsorção – e não somente a área superficial do material. Diversos autores que estudaram a presença de materiais argilosos, como finos em concretos, demonstraram em seus estudos que não somente a sua quantidade ou a sua finura afetam o desempenho no concreto, mas também a sua composição mineralógica

(STEWART et al., 2006; TOPÇU; DEMIR, 2008; QUIROGA; FOWLER, 2004).

Figura 61: Ensaio de azul de metileno.



Segundo Topçu e Demir (2008), quanto maior a facilidade de o material fino trocar cátions, mais acentuada será a demanda de água e compostos orgânicos (aditivos) da mistura, tornando o fino de qualidade inferior.

Em todas as faixas granulométricas estudadas, o fíler diabásio apresentou a maior adsorção por azul de metileno, enquanto que os menores valores ocorreram com fíler calcário. Dessa forma, pode-se dizer que os fílers diabásicos foram os que apresentaram as maiores

capacidades de trocar cátions com o meio. Stewart et al. (2006) testaram a adsorção de azul de metileno em microfios de diferentes rochas e observaram que fios diabásicos, apesar de apresentarem partículas maiores que os demais fios, foram mais adsorventes que os fios gnáissicos e que a maioria dos fios calcários testados.

4.1.3 Composição dos Fios nas Misturas

As distribuições granulométricas dos fios (fíler e cimento) empregadas nas misturas de pastas e CAA podem ser visualizadas nas Figuras 62, 63 e 64, as quais mostram as composições referentes a 200 litros de fios, ou a relação água/fios igual a 1,0. Optou-se por expor aqui somente um teor de fios, pois todos os teores apresentaram comportamentos semelhantes em relação à comparação entre as três mineralogias estudadas.

Figura 62: Distribuição granulométrica da composição: cimento + fílers com D_{50} entre 33-38 μm . Volume de fios de 200 litros/ m^3 , relação água/fios de 1,0.

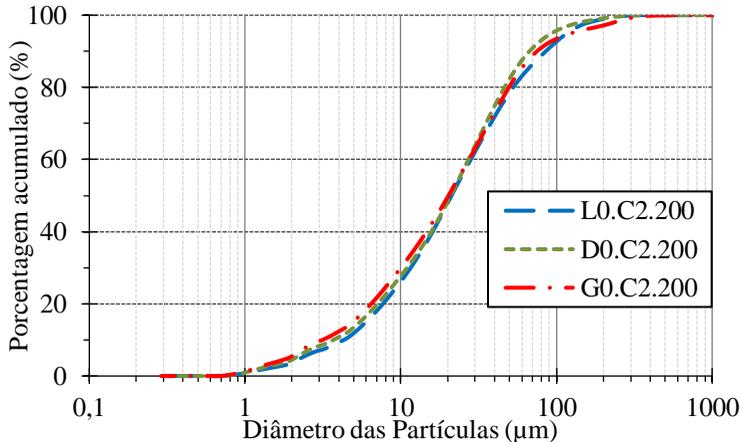


Figura 63: Distribuição granulométrica da composição: cimento + fílers com D_{50} entre 24-25 μm . Volume de finos de 200 litros/ m^3 , relação água/finos de 1,0.

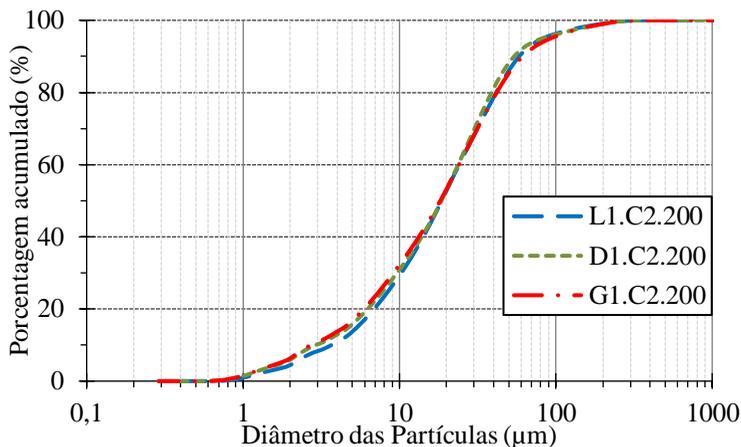
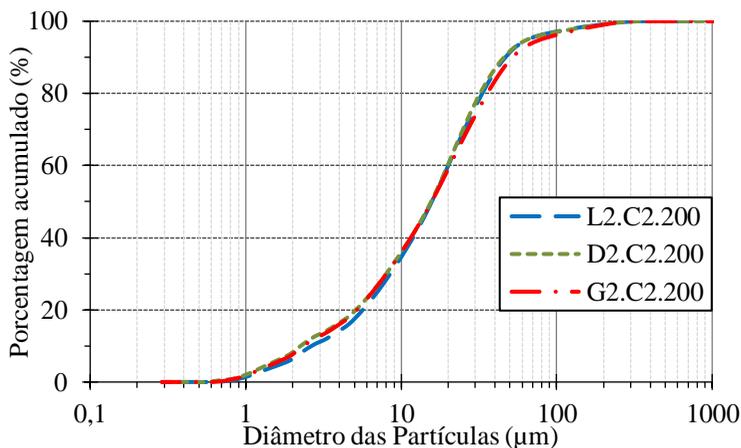


Figura 64: Distribuição granulométrica da composição: cimento + fílers com D_{50} de 16 μm . Volume de finos de 200 litros/ m^3 , relação água/finos de 1,0.



Percebe-se que as composições granulométricas foram muito próximas quando se utilizou fílers de diferentes mineralogias, porém, com o mesmo D_{50} , e o mesmo volume de finos. A maior variação ocorreu na composição dos fílers *in natura*, que apresentaram maior variação no D_{50} .

Percebe-se que as partículas de gnaïsse (G0) apresentaram maior quantidade de finos com diâmetro menor que 15 μm , o que resultou em uma maior área superficial BET. No entanto, de maneira geral, pode-se considerar a distribuição granulométrica como um parâmetro fixo entre cada grupo de D_{50} .

4.2 RESULTADOS DO ESTUDO DE PASTAS

Os resultados de pastas foram divididos em três grupos:

- pastas unitárias com aditivo fixo: quando se utilizou somente um tipo de fíler em cada mistura e fixou-se o teor de superplastificante entre amostras com diferentes mineralogias de filers;
- pastas binárias com aditivo fixo: quando se utilizou uma composição de filers (calcário com diabásio; calcário com gnaïsse) e fixou-se o teor de superplastificante entre as amostras;
- pastas unitárias com aditivo variável: quando se utilizou somente um tipo de fíler em cada mistura e fixou-se a abertura no *minislump* para todas as amostras, com ajuste do superplastificante.

4.2.1 Resultado das Pastas Unitárias com Aditivo Fixo

Os primeiros estudos em pastas tinham por objetivo avaliar a influência do tipo de fíler empregado nos parâmetros reológicos das pastas com eles confeccionadas. Para isso, fixou-se uma quantidade de superplastificante para cada volume de finos e D_{50} do fíler adicionado. A quantidade de aditivo usada foi determinada utilizando o fíler calcário, que é considerado referência neste trabalho. Também foram dosadas pastas apenas com cimento como material fino (série C2).

4.2.1.1 Reometria

A Tabela 29 mostra a abertura no *minislump*, assim como os parâmetros reológicos medidos logo após a mistura e também após 40 minutos.

Percebe-se que as maiores aberturas do *minislump* ocorreram principalmente quando o fíler utilizado foi o calcário, o que reflete os resultados obtidos pela análise de partículas. O fíler calcário foi a adição que apresentou a menor relação de aspecto entre os filers estudados, indicando que o seu formato é mais arredondado do que os demais.

Tabela 29: Resultados do estado fresco das pastas dosadas com aditivo fixo.

Pasta	Mini slump (mm)	Parâmetro reológicos com 10 min			Parâmetro reológicos com 40 min		
		σ_0 Estática (Pa)	σ_0 Dinâmica (Pa)	η (Pa.s)	σ_0 Estática (Pa)	σ_0 Dinâmica (Pa)	η (Pa.s)
L0.1	112,6	30,0	70,7	0,78	76,3	104,4	1,34
L0.2	112,0	31,6	59,3	0,63	200,0	111,4	1,38
L0.3	113,0	69,3	73,5	0,72	201,0	110,6	1,37
D0.1	129,0	19,5	41,3	0,40	50,6	77,6	0,80
D0.2	139,0	21,9	32,8	0,33	80,0	81,5	0,74
D0.3	138,0	23,0	34,2	0,39	123,0	89,6	0,82
G0.1	64,0	212,0	208,3	1,31	326,0	264,1	0,95
G0.2	61,0	357,0	312,0	1,66	593,0	325,9	2,79
G0.3	54,0	752,0	437,7	2,70	1260,0	512,7	6,16
L1.1	109,0	73,6	71,5	0,58	133,0	102,0	1,21
L1.2	111,0	55,3	58,8	0,42	118,0	105,7	1,07
L1.3	115,0	97,3	77,5	0,66	258,5	118,0	1,27
D1.1	82,0	94,3	154,0	0,93	256,0	179,7	1,99
D1.2	60,0	353,0	242,3	2,12	741,0	206,7	3,64
D1.3	40,0	687,0	288,7	2,00	1550,0	270,5	4,94
G1.1	77,0	147,0	176,9	0,87	294,0	194,3	1,57
G1.2	65,0	332,0	259,8	1,31	564,0	235,2	1,57
G1.3	55,0	687,0	409,1	1,66	942,0	394,8	2,98
L2.1	109,0	61,3	61,6	0,48	82,5	108,1	1,10
L2.2	112,0	61,6	72,0	0,54	195,5	120,0	1,14
L2.3	111,5	110,0	77,6	0,60	236,0	129,4	1,12
D2.1	75,0	197,0	168,0	0,77	291,0	215,9	1,86
D2.2	62,0	321,0	293,7	1,16	614,0	347,6	0,79
D2.3	58,0	607,0	412,6	1,91	1200,0	433,4	4,17
G2.1	86,0	194,0	151,3	0,63	235,0	221,8	1,47
G2.2	72,3	232,0	206,0	0,90	398,0	288,6	1,46
G2.3	62,0	489,0	325,7	1,43	597,0	343,1	2,08
C2.1	76,0	91,2	180,8	1,21	88,1	184,1	1,73
C2.2	56,5	330,0	336,6	1,99	472,0	381,9	1,95
C2.3	40,0	971,0	333,1	4,34	1660,0	831,7	11,22

σ_0 : Tensão de escoamento; η : viscosidade.

Além disso, o fíler calcário também apresentou as menores adsorções por azul de metileno, o que poderia justificar o melhor desempenho quanto à fluidez da mistura. No entanto, a série D0 também apresentou alta fluidez, embora tenha indicado uma alta adsorção de azul de metileno. Isso mostra que a situação à qual o fíler é exposto no teste de azul de metileno não reflete adequadamente a situação na pasta de cimento, em que as condições de adsorção não são exclusivas do fíler e dependem da interação com o cimento e o aditivo presentes.

Nas pastas dosadas com partículas de fíler com D_{50} entre 33-38 μm (série X0.X), percebeu-se a influência da área superficial do fíler na

abertura do *minislump*. A presença de fíler D0, que apresentava a menor área superficial, conduziu a maiores aberturas no *minislump*, sendo o contrário válido para as pastas dosadas com G0 (maior área superficial e menor abertura). As partículas L1 e L2 tinham as menores áreas superficiais entre os fílers com o mesmo D_{50} e também apresentaram os valores de fluidez mais elevados. No entanto, comparando pastas com a presença de finos de diferentes mineralogias, porém, com área superficial próxima, como as pastas L2, D1, G1 e C2 (2746, 2071, 2525 e 2231 m^2/g), percebe-se uma grande diferença entre a abertura das pastas L2 (na ordem de 110 mm) e as demais (aberturas menores que 82 mm).

A presença de maior quantidade de fíler (séries XX.2 e XX.3) conduziu a maiores valores de tensão de escoamento estática em todas as misturas. A tensão de escoamento dinâmica também apresentou tendência de crescimento, embora séries contendo L0 e D0 tenham mostrado um decréscimo em relação a L0.1 e L0.2; e D0.1 e D0.2. O mesmo comportamento foi observado em relação à viscosidade. Na maioria das pastas, o aumento do teor de sólidos na mistura provocou aumento na viscosidade (com exceção das séries L0 e D0). Segundo Perrot et al. (2012), as forças atrativas coloidais dependem da distância média entre as partículas, e seu impacto macroscópico sobre a reologia depende do número de partículas (do volume de sólidos) interagindo na suspensão. Dessa forma, apesar do efeito do aditivo em dispersar as partículas, na maioria das pastas, sua quantidade não foi suficiente para que não houvesse um domínio das forças atrativas.

A fim de ratificar as conclusões sobre as variáveis dos testes, a Tabela 30 mostra a influência da mineralogia, D_{50} e teor (relação água/finos) de fíler nos parâmetros reológicos das pastas por meio de análise estatística de variância. Apenas o D_{50} não apresenta influência significativa na tensão de escoamento estática, dinâmica e na viscosidade. Isso ocorreu provavelmente porque a quantidade de aditivo foi fixada para cada grupo de D_{50} , ou seja, pastas contendo L0, D0 e G0 (D_{50} entre 33-38 μm) apresentavam as mesmas quantidades de aditivo para cada teor de fíler adicionado. Quando se utilizou fílers com D_{50} de 24 μm (série X1.X), a quantidade de aditivo foi alterada e manteve-se constante dentro do grupo. Ocorreu o mesmo com a série X2.X (D_{50} de 15-16 μm). Efeitos de segunda e terceira ordem não puderam ser mensurados porque não houve repetições dessas pastas.

Tabela 30: ANOVA - influência da mineralogia, D_{50} e teor de filler presente nos parâmetros reológicos das pastas dosadas com aditivo fixo.

Parâmetro	Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
σ_0 Estática	Mineralogia	541573	3	180524	6,54708	99,8%
	D_{50}	33626	2	16813	0,60976	44,8%
	Teor	476079	2	238040	8,63300	99,8%
	Erro	606611	22	27573		
σ_0 Dinâmica	Mineralogia	210198,4	3	70066,1	9,7006	100,0%
	D_{50}	15249,0	2	7624,5	1,0556	63,5%
	Teor	59432,3	2	29716,1	4,1142	97,0%
	Erro	158903,7	22	7222,9		
η	Mineralogia	8,38090	3	2,79363	7,7837	99,9%
	D_{50}	0,11879	2	0,05939	0,1655	15,1%
	Teor	3,79242	2	1,89621	5,2833	98,7%
	Erro	7,89599	22	0,35891		

As Figuras 65, 66 e 67 mostram a correlação entre os parâmetros reológicos (10 minutos) com a abertura no *minislump*. Percebe-se que há uma tendência de diminuição dos parâmetros reológicos com o aumento da abertura.

No entanto, observando os valores da Tabela 29, percebe-se que pastas que apresentaram aberturas menores no *minislump* conduziram aos maiores valores de tensões de escoamento estática e dinâmica, mas não necessariamente às maiores viscosidades.

Vários pesquisadores concordam que misturas à base de cimento Portland apresentam correlações entre a abertura medida em testes de espalhamento e a tensão de escoamento, mas não com a viscosidade (ROUSSEL; STEFANI; LEROY, 2005; CHOI et al., 2016).

Figura 65: Abertura no *minislump* versus tensão de escoamento estática (medida com 10 minutos) das pastas dosadas com aditivo fixo.

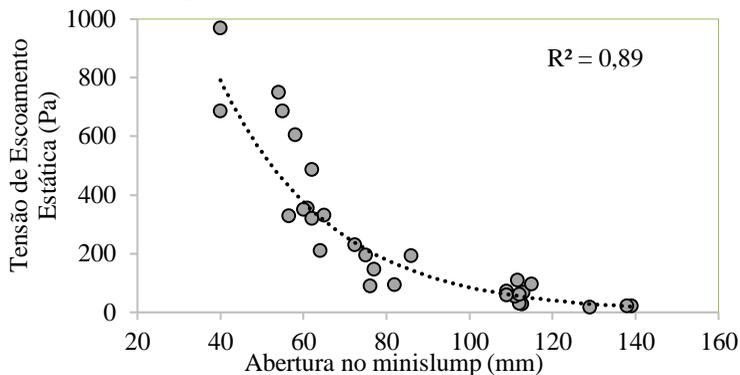


Figura 66: Abertura no *minislump* versus tensão de escoamento dinâmica (medida com 10 minutos) das pastas dosadas com aditivo fixo.

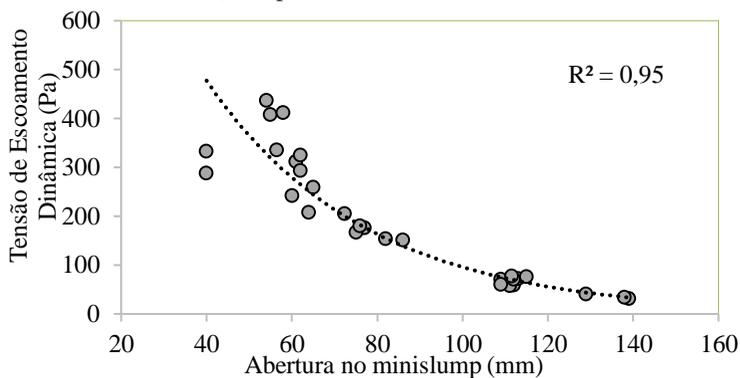
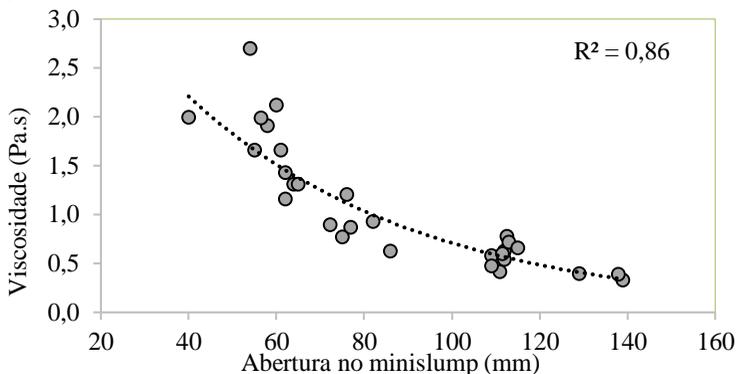


Figura 67: Abertura no *minislump* versus viscosidade (medida com 10 minutos) das pastas dosadas com aditivo fixo.



Em relação à manutenção de trabalhabilidade, comparando-se os parâmetros reológicos medidos em diferentes tempos, percebeu-se que, quanto maior a quantidade de finos da mistura, mais acentuada é a diminuição dos parâmetros. Misturas da série XX.1 não apresentaram grande diferença entre a medição com 10 minutos e com 40 minutos. Por outro lado, misturas da série XX.3 apresentaram grandes diferenças com o passar do tempo, especialmente a mistura contendo somente cimento, C2.3.

As misturas contendo calcário foram aquelas que apresentaram os menores valores de tensão de escoamento e viscosidade, e também as que menos sofreram influência do tempo, mostrando pequeno aumento nos valores com 40 minutos decorridos do início da mistura. Dessa forma, percebe-se que as partículas de calcário são as que proporcionam a melhor manutenção da trabalhabilidade. Essa conclusão está em concordância com estudos de Kim, Noemi e Shah (2012). Os autores verificaram que a substituição de cimento por fíler calcário aumentou a fluidez e a manutenção da fluidez de CAA.

Vale salientar que as misturas contendo fíler calcário foram aquelas com maior abertura no *minislump*, uma vez que a série L foi usada para definir o teor de aditivo para as demais séries. Segundo Flatt e Schober (2012), se a dosagem de aditivo está muito abaixo do valor crítico para ocorrer a saturação, a manutenção da trabalhabilidade tende a ser menor. Por outro lado, se o teor de aditivo adicionado é suficiente para cobrir toda a superfície (ou quase toda), espera-se uma maior manutenção de fluidez. Dessa forma, o melhor desempenho na presença de fíler calcário provavelmente ocorreu porque a dosagem de aditivo empregada

nas pastas da série L estava mais próxima do teor de saturação do que o teor utilizado nas demais séries (D, G e C). No Apêndice C, é possível observar gráficos que mostram a manutenção da trabalhabilidade das diferentes misturas.

4.2.1.2 Calorimetria de Condução

As curvas de taxa de calor liberado (mW/g) e o calor total liberado (J/g) por massa de cimento plotadas em função do tempo são mostradas na Figura 68, sendo os seus respectivos resultados numéricos apresentados na Tabela 31. Em função do grande número de amostras (30), os gráficos foram divididos em função da mineralogia e do teor de filer adicionado, e as séries com cimento (C2) foram apresentadas em todos os gráficos como referência.

A relação água/cimento (0,53) foi mantida constante para todas as pastas moldadas com adição de filers. As pastas da série C2 foram dosadas somente com cimento, mantendo fixo o volume de finos total e, conseqüentemente, alterando a relação água/cimento, de modo que a pasta C2.1 tinha relação água/cimento de 0,35; a C2.2, de 0,32; e a C2.3, de 0,29.

Em relação às pastas contendo somente cimento, percebeu-se que, quanto maior a relação água/cimento, maior foi o calor total liberado. Isso ocorre pelo maior grau de diluição de cimento na solução, causando uma taxa de hidratação maior e, conseqüentemente, aumentando o calor total liberado (ERN; HELENE, 2003; HU; GE; WANG, 2014).

Figura 68: Curvas de calorimetria de condução das pastas analisadas em função da massa de cimento.

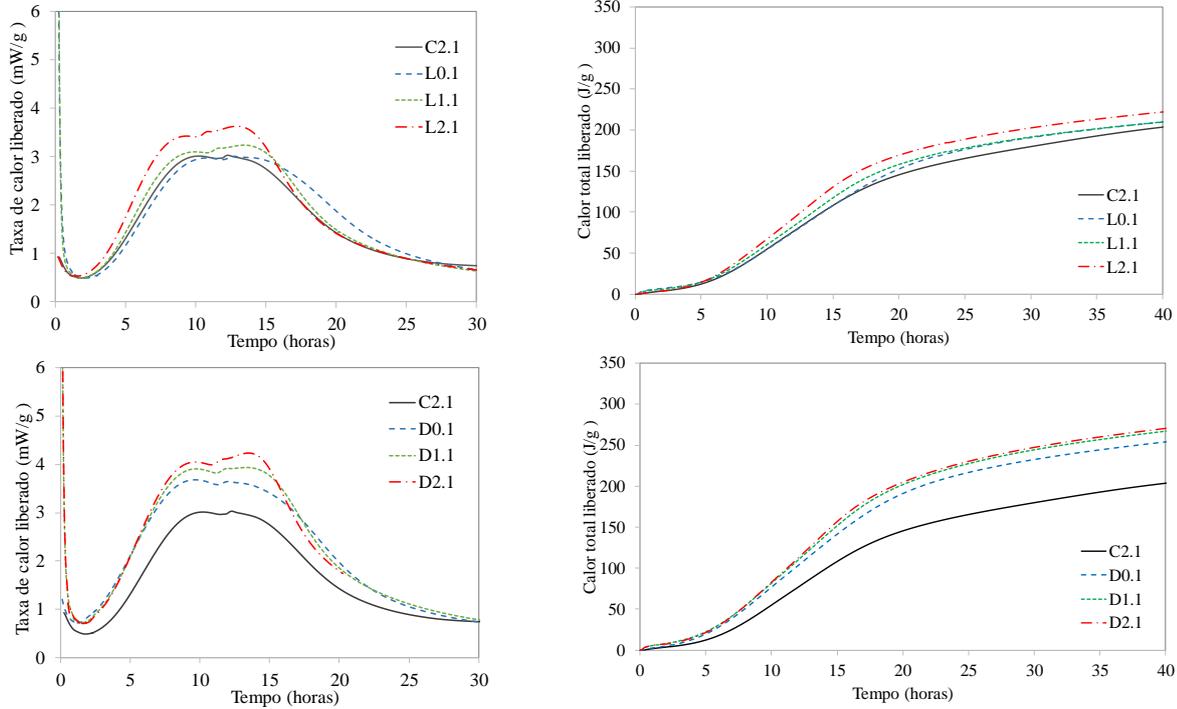


Figura 68: Curvas de calorimetria de condução das pastas analisadas em função da massa de cimento.
(continuação)

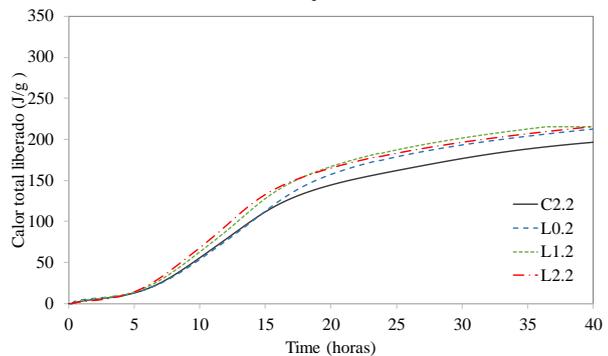
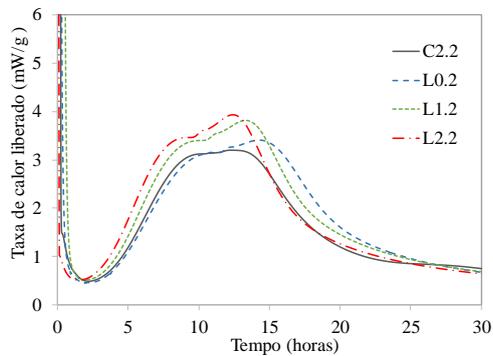
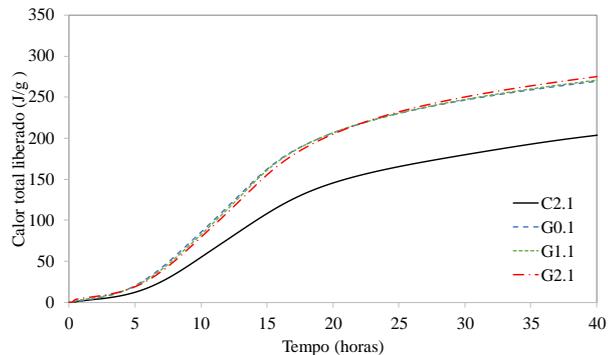
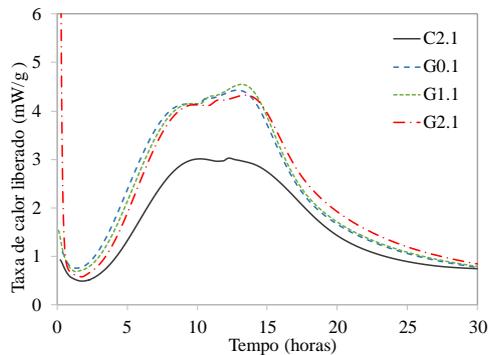


Figura 68: Curvas de calorimetria de condução das pastas analisadas em função da massa de cimento.
(continuação)

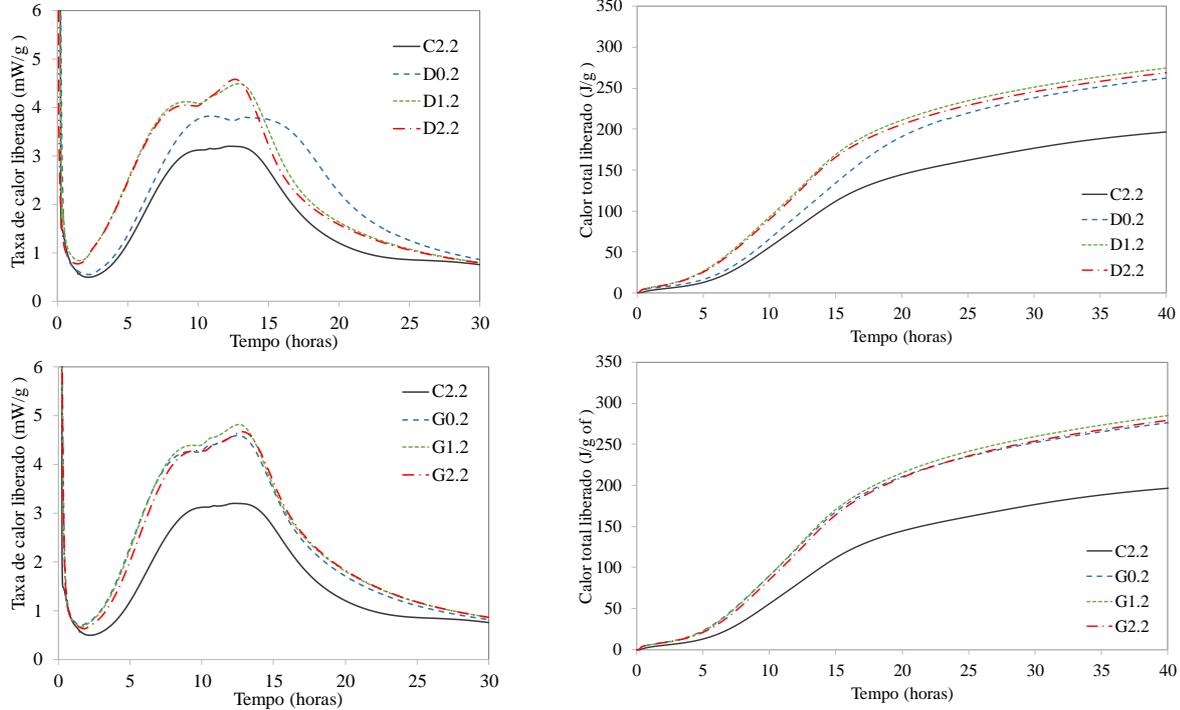


Figura 68: Curvas de calorimetria de condução das pastas analisadas em função da massa de cimento.
(continuação)

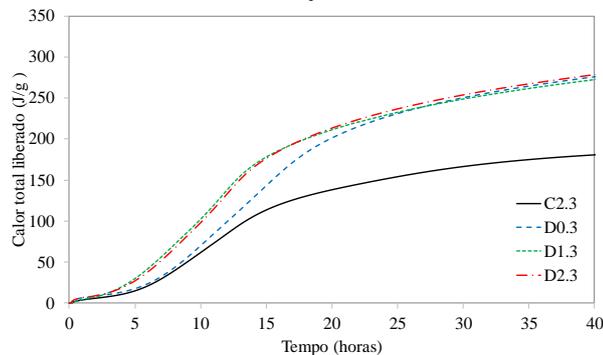
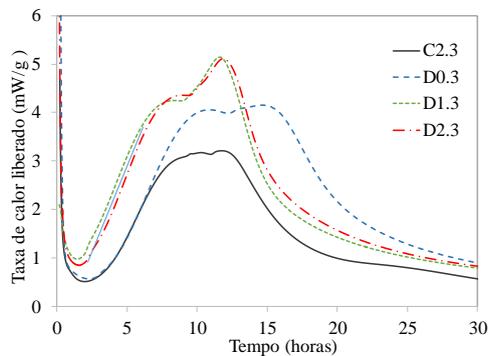
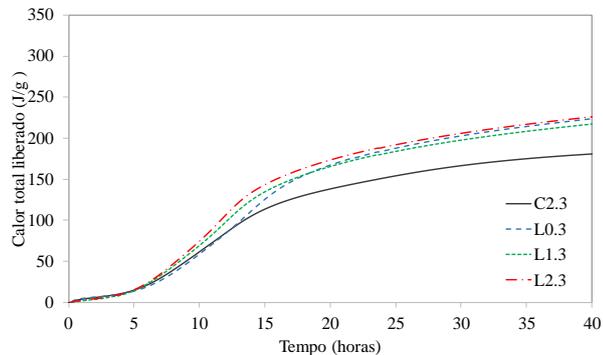
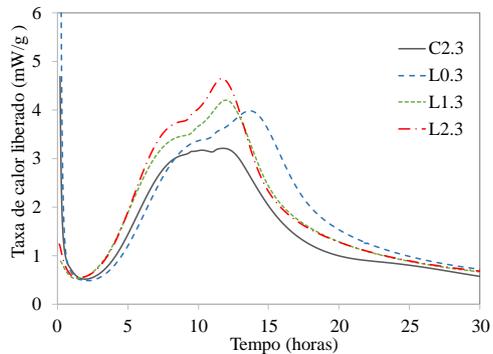


Figura 68: Curvas de calorimetria de condução das pastas analisadas em função da massa de cimento.
(continuação)

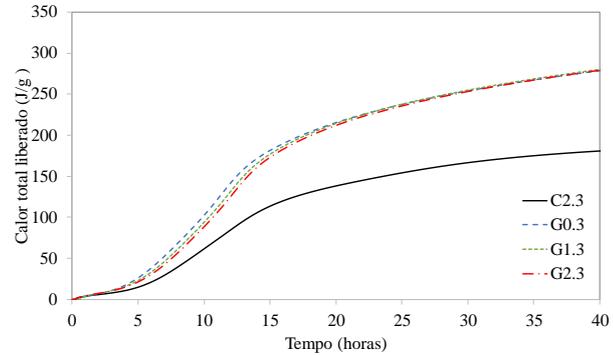
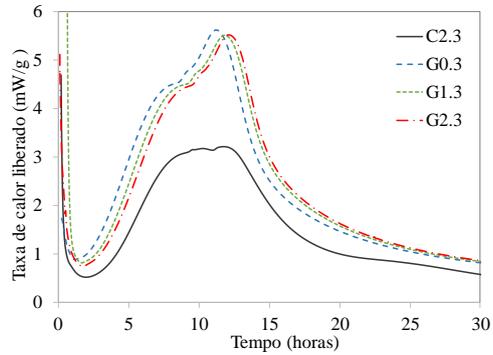


Tabela 31: Resultados numéricos do período de indução e calor total liberado em 40 horas.

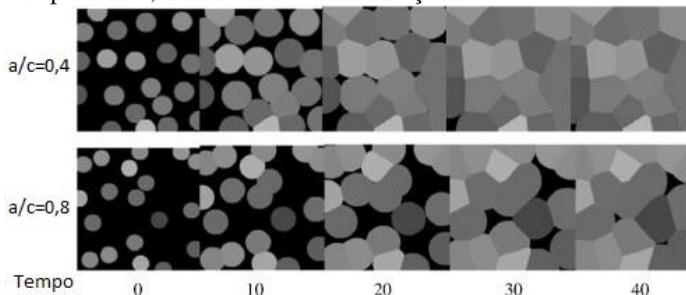
Pastas	Período de indução (h)	Calor total liberado em 40 horas (J/g*)
L0.1	3,40	209,69
L0.2	3,70	212,57
L0.3	3,70	223,65
D0.1	2,55	253,94
D0.2	3,65	262,20
D0.3	3,60	275,99
G0.1	2,60	269,30
G0.2	2,90	276,27
G0.3	2,50	278,53
L1.1	3,10	209,86
L1.2	3,50	215,39
L1.3	2,90	217,20
D1.1	2,80	266,99
D1.2	2,50	274,51
D1.3	2,00	272,54
G1.1	2,80	270,66
G1.2	2,95	285,02
G1.3	2,90	280,14
L2.1	3,05	222,00
L2.2	2,90	215,57
L2.3	3,00	225,99
D2.1	2,80	270,39
D2.2	2,20	268,84
D2.3	2,40	278,59
G2.1	3,20	275,01
G2.2	3,10	279,20
G2.3	3,05	279,02
C2.1	3,10	203,55
C2.2	3,70	196,50
C2.3	3,30	180,77

* J por grama de cimento.

A Figura 69 mostra a floculação de partículas conforme a relação água/cimento da pasta. Percebe-se que a pasta com relação água/cimento de 0,8 apresenta-se menos floculada do que a pasta com relação água/cimento de 0,4, o que facilita/aumenta o contato de água com os materiais cimentícios. Segundo Kirby e Biernacki (2012), quando a relação água/cimento aumenta, a velocidade da reação irá permanecer

elevada por um longo período, aumentando, conseqüentemente, o calor total liberado.

Figura 69: Modelo de crescimento bidimensional que ilustra o conceito da colisão de partículas, diminuindo a taxa de reação.



Fonte: Adaptada de Kirby e Biernacki (2012).

Os períodos de indução das pastas variaram de 2,0 até 3,7 h. As misturas contendo fíler calcário apresentaram maiores tempos de indução do que aquelas contendo fílers diabásico e gnáissico. Segundo Moon et al. (2017), a presença de alguns tipos de adições em misturas à base de cimento é capaz de reduzir a barreira de energia e pode promover a formação de produtos de hidratação de forma mais rápida. Segundo Scrivener, Juilland e Monteiro (2015), a presença de fíler aumenta a taxa de reação da alita no período de aceleração. Esse efeito tem sido geralmente atribuído ao aumento dos locais de nucleação do C-S-H. Contudo, Berodier e Scrivener (2014) demonstraram que a densidade de nucleação dos hidratos na superfície dos fílers é muito semelhante às encontrados nos grãos de cimento, sendo que o efeito de aceleração não é evidente quando não há o fornecimento de superfícies de nucleação extras (adição de fíler ao invés de substituição de cimento por fíler). Segundo os autores, a aceleração do período de indução pode ser atribuída ao cisalhamento extra produzido pela presença das partículas de fíler.

Os períodos de indução das pastas com fíler calcário (série L) e fíler diabásio (série D) apresentaram uma tendência de redução quando o D_{50} dos fílers aumentou. Nas séries contendo fíler gnaisse (G), notou-se um aumento do período de indução com a utilização de fílers mais finos. Não foi observada uma tendência clara entre o volume de finos presente e o período de indução.

Todas as pastas contendo adição de fíler apresentaram maior taxa de liberação de calor do que as pastas contendo somente cimento. Segundo estudos de Choudhary, Shah e Bishnoi (2016), resultados de

resistência e curvas isotérmicas de calorimetria demonstraram que a taxa de hidratação do cimento aumenta, independentemente da quantidade de fíler adicionado, em relação às pastas dosadas somente com cimento.

Diversos pesquisadores observaram um papel ativo do calcário no processo de hidratação, o qual pode explicar o aumento do calor total liberado nas pastas contendo fíler gnáissico e diabásico, analogamente com o fíler calcário. Segundo Zhang e Zhang (2008), a maior presença de gesso nas pastas contendo somente cimento pode reduzir o pico de liberação de calor, conforme mostrado na Figura 68; por outro lado, a presença de fíler calcário pode aumentar a quantidade de calor de hidratação liberado devido à formação de hidratos carboaluminatos. De acordo com Bonavetti, Rahhal e Irassar (2001), o fíler calcário provoca uma aceleração da hidratação dos grãos de clínquer (especialmente o C3S) em idades mais precoces, melhora o empacotamento de partículas do sistema (ZEM, 1990 apud BONAVETTI; RAHHAL; IRASSAR, 2001), fornece novos locais de nucleação (SOROKA; STERN, 1976) e forma carboaluminatos como resultado da reação entre CaCO_3 e C3A do cimento (RAMACHANDRAN; ZHANG, 1986).

O aumento do teor de finos na mistura foi acompanhado por um incremento no calor total liberado, principalmente quando se compara misturas com menor quantidade de finos, série XX.1 (relação água/finos de 1,1), com misturas contendo maior quantidade de finos, série XX.3 (relação água/finos de 0,9). Segundo Kakali et al. (2000), o efeito de nucleação na microestrutura de hidratação depende da quantidade de adição mineral utilizada, uma vez que a probabilidade de locais de nucleação próximos às partículas de cimento aumenta com a quantidade adicionada.

Em relação à finura, comparando as misturas com fíler *in natura* (série X0.X) com aquelas contendo fíler com D_{50} de $16 \mu\text{m}$ (série X2.X), percebeu-se um incremento do calor total liberado nesta última série. Lawrence, Cyr e Ringot (2003) testaram a influência de pó de quartzo com diferentes teores e finuras na hidratação do cimento e concluíram que os graus de hidratação de argamassas contendo adição mineral (pó de quartzo) foram sempre mais elevados do que a hidratação da argamassa referência. O estudo indicou que, quanto mais finas eram as adições, maior era o efeito na hidratação, e que existe um teor ótimo de substituição para criar mais pontos de nucleação.

O calor total liberado pelas pastas contendo calcário, independentemente do teor e da finura do fíler, variou de 209 a 226 J/g, valores significativamente inferiores aos obtidos nas pastas contendo

fílers diabásico e gnáissico. As séries com fíler diabásico apresentaram 254-278 J/g, enquanto que as com fíler gnáissico liberaram 269-285 J/g.

Esse aumento na taxa de liberação de calor pode ter ocorrido devido a uma maior taxa de hidratação das pastas contendo diabásio e gnaisse. Isso indica que esse fílers conduzem a produtos de hidratação mais uniformemente distribuídos na microestrutura, com efetivo aproveitamento dos grãos de cimento (CHOUDHARY; SHAH; BISHNOI, 2016). Aliado a isso, a maior taxa de hidratação do cimento pode ter sido resultado de uma menor floculação entre as partículas. As pastas contendo fíler gnáissico apresentam menos floculação (medida pelo ensaio de FBRM), conforme será explanado adiante.

A fim de ratificar as conclusões sobre as variáveis do teste, a Tabela 32 mostra a influência da mineralogia, D_{50} e teor de fíler nos resultados de calorimetria por meio de análise estatística de variância. O fator de maior influência no tempo de indução e no calor total liberado foi a mineralogia do fíler. No tempo de indução, o segundo fator de maior importância é o D_{50} , enquanto que o teor de finos parece pouco influenciar. Já no calor total liberado, percebe-se uma influência maior do teor de finos incorporado e também do D_{50} . Efeitos de segunda e terceira ordem não puderam ser mensurados porque não houve repetições dessas pastas. Essa análise estatística corrobora com as explicações anteriores sobre a cinética de reação das pastas.

Tabela 32: ANOVA - influência da mineralogia, D_{50} e teor de fíler presente nos resultados de calorimetria das pastas dosadas com aditivo fixo.

Parâmetro	Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Tempo de Indução	Mineralogia	1,8980	3	0,6327	4,348	98%
	D_{50}	0,6813	2	0,3406	2,341	88%
	Teor	0,1985	2	0,0992	0,682	48%
	Erro	3,2013	22	0,1455		
Calor Total Liberado	Mineralogia	28373	3	9458	241,84	≈100%
	D_{50}	154	2	77	1,97	84%
	Teor	187	2	94	2,40	89%
	Erro	860	22	39		

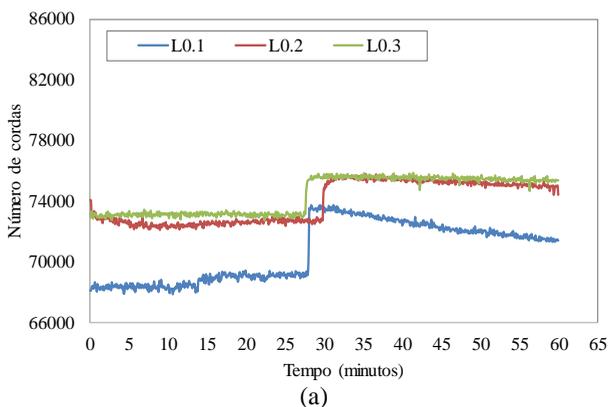
4.2.1.3 FBRM

Para facilitar a análise das medições de FBRM, nesta seção, são apresentados alguns gráficos que mostram o comportamento do aspecto observado. Todos os gráficos estão disponíveis no Apêndice D.

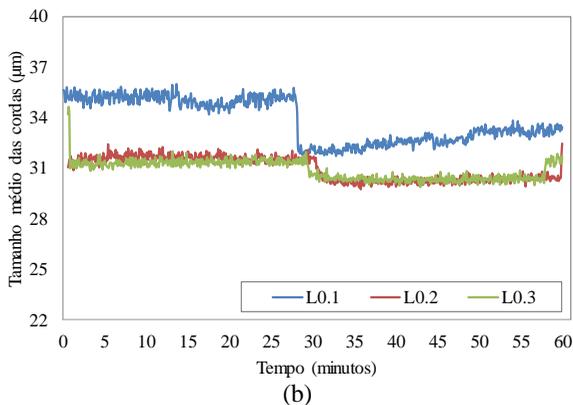
Os resultados de FBRM mostram a evolução da contagem das cordas – número de cordas (*mean of total particle counts*) e a evolução do comprimento das cordas (*chord length*) registradas para cada mistura submetida a diferentes intensidades de agitação durante 30 minutos cada: 40 e 400 rpm. A Figura 70 mostra um exemplo representativo dos resultados obtidos em pastas contendo filer calcário. Percebe-se que o número de cordas diminui quando o comprimento de corda aumenta, indicando o grau de floculação do sistema.

Os dados mostram que a cinética de agregação das partículas domina o sistema quando submetido a baixa intensidade de agitação, indicando a formação de flocos (partículas individuais juntam-se para formar partículas maiores). Quando $N^6=400$ rpm, o processo de desagregação domina, e os flocos maiores são divididos em flocos menores, uma vez que a intensidade de agitação elevada diminui a eficiência de agregação. A redução do tamanho das partículas tipicamente indica que está ocorrendo desagregação e o número de cordas aumenta durante o mesmo período (FERRON, 2008). Esse comportamento foi observado em todas as 30 misturas realizadas.

Figura 70: Resultados de FBRM de pastas contendo calcário: comportamento em relação à intensidade de agitação. (a) número de cordas; (b) tamanho médio das cordas.



⁶ N= velocidade de rotação.

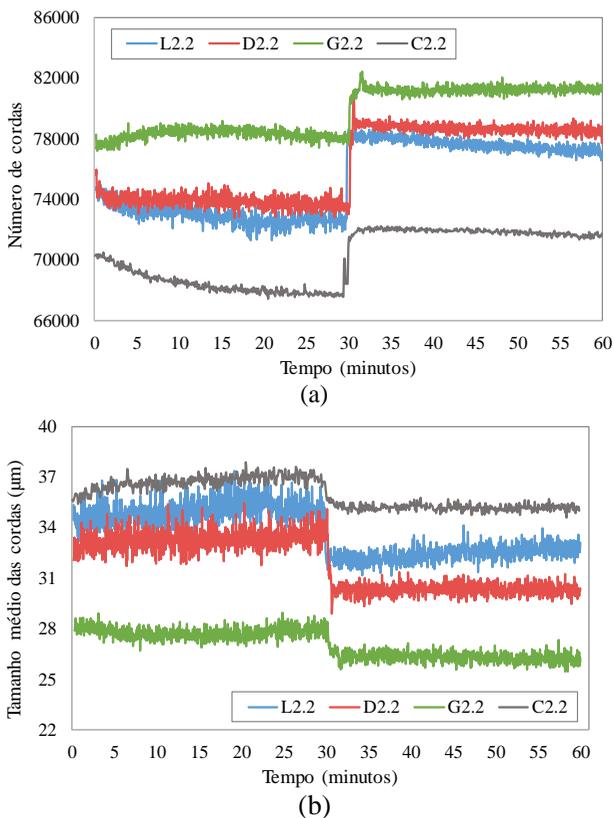


Segundo Ferron (2008), a elevada diferença entre o número de cordas medidas com taxa de cisalhamento baixa (40 rpm) e alta (400 rpm) suporta a premissa de que a resistência do floco é inversamente proporcional ao seu tamanho. À medida que o tamanho do floco aumenta, este é mais propenso à ruptura, uma vez que a probabilidade de encontrar falhas (ligações mais fracas) também aumenta. Dessa forma, à medida que o tamanho do floco aumenta, é provável que sua microestrutura seja mais porosa (menos compacta), aumentando a suscetibilidade à quebra.

Foi possível observar também que o aumento do volume de finos da mistura aumentou o número de cordas medidas. Percebeu-se, em todas as pastas da série XX.3 (menor relação água/finos empregada), que o número de cordas foi superior ao da série XX.1. Isso era esperado, uma vez que efetivamente havia mais partículas nessas misturas. Essas séries também apresentaram os maiores valores de tensão de escoamento e viscosidade. Isso ocorre pela maior densidade da mistura contendo maior teor de finos. Yim, Kim e Shah (2013) também observaram um aumento na viscosidade de pastas de cimento quando o esqueleto granular ficava mais compacto.

Em relação à mineralogia de fino presente na pasta, a Figura 71 mostra um exemplo dos resultados de FBRM para pastas contendo finos com o mesmo D_{50} e mesmo teor (mesma relação água/finos). As pastas contendo gnaisse apresentaram contagens mais elevadas e menores comprimentos de corda em comparação com as pastas contendo calcário e diabásio com o mesmo D_{50} e a mesma relação água/finos (mesmo teor de finos). Isso indica que as partículas de gnaisse mostram menos floculação em comparação com as demais.

Figura 71: Resultados de FBRM de pastas com o mesmo D_{50} e mesmo volume de finos, mas diferentes mineralogias. (a) número de cordas; (b) tamanho médio das cordas.



Em relação às pastas contendo diabásio, ora apresentaram maior floculação que as pastas contendo calcário, ora menor floculação, no entanto, as diferenças não foram muito acentuadas. As pastas contendo somente cimento apresentaram maior floculação do que as pastas contendo algum tipo de filer.

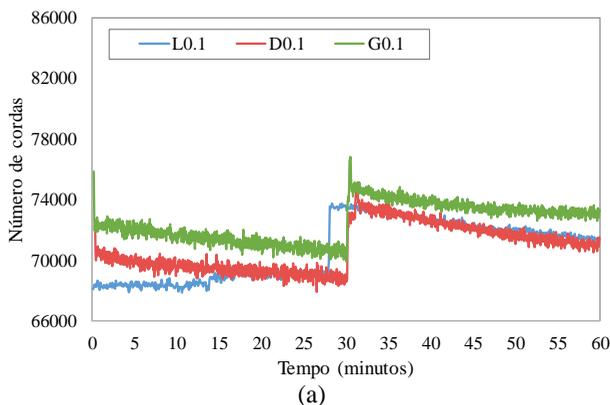
As misturas com gnaíse também mostraram menor aumento imediato da contagem quando a intensidade de agitação foi aumentada, indicando que os flocos dessas misturas são mais estáveis e menos sensíveis a perturbações dinâmicas. O resultado do FBRM depende da forma, do tamanho e da concentração de partículas (BLANCO et al., 2002). Como as partículas de gnaíse apresentaram alta angularidade e maior relação de aspecto do que as partículas de calcário e diabásio, a

forma das partículas pode ter contribuído para manter os grãos menos floculados.

Vale salientar que as pastas contendo gnaïsse apresentaram-se menos floculadas, mesmo mostrando espalhamento menor no *minislump*, o que indicaria, a princípio, um maior intertravamento das partículas.

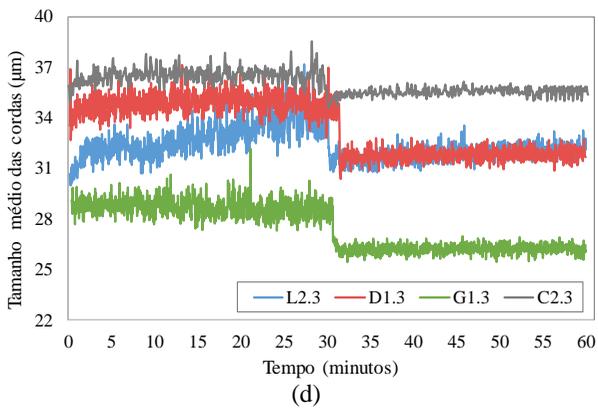
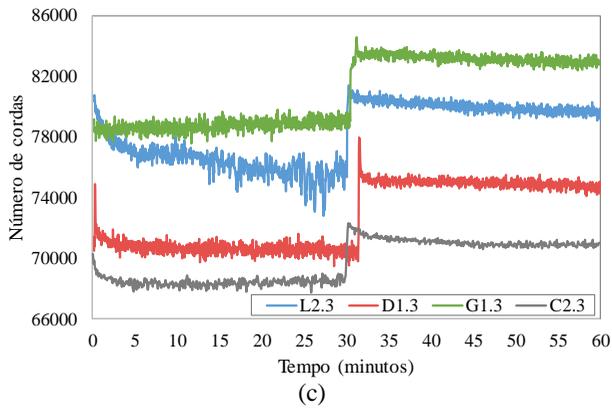
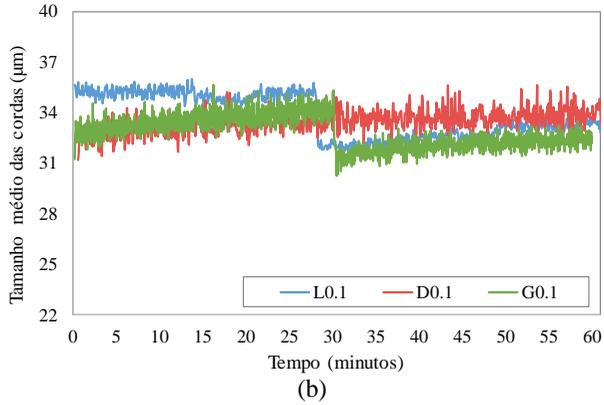
Para avaliar a influência na floculação em função da área superficial, pode-se comparar pastas contendo filer sem moagem (D_{50} entre 33-38 μm), que apresentaram área superficial em torno de 1200 m^2/kg , e as pastas dosadas com L2, D1, G1 e C2, com área superficial em torno de 2400 m^2/kg . A Figura 72 mostra o número e o tamanho médio das cordas em função do tempo para as misturas citadas. Percebe-se que o tamanho médio das cordas das pastas L0.1, D0.1 e G0.1 foi próximo e dentro da faixa do D_{50} da série 0 (33-38 μm), embora sejam duas medidas distintas⁷. Por outro lado, quando se compara pastas com partículas mais finas (L2.3, D1.3, G1.3 e C2.3), as diferenças de número e tamanho das cordas são mais acentuadas e não há relação entre o tamanho médio das cordas e do D_{50} . Dessa forma, não há uma relação clara entre os resultados de FBRM das pastas e a área superficial BET das partículas presentes na mistura.

Figura 72: Resultados de FBRM para pastas contendo filers com área superficial BET similar. (a) e (c) número de cordas; (b) e (d) tamanho médio das cordas.



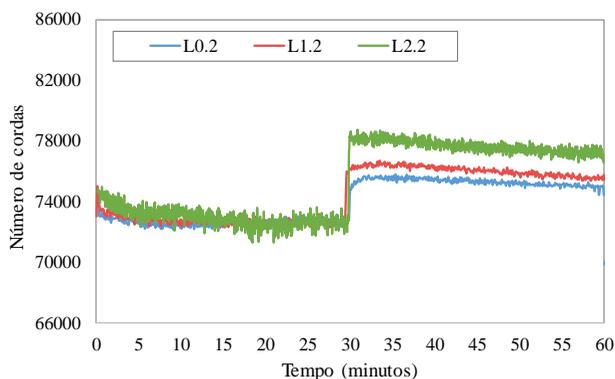
⁷ D_{50} : 50% das partículas apresentam diâmetro abaixo do D_{50} .

Tamanho médio: média aritmética do diâmetro de todas as partículas.

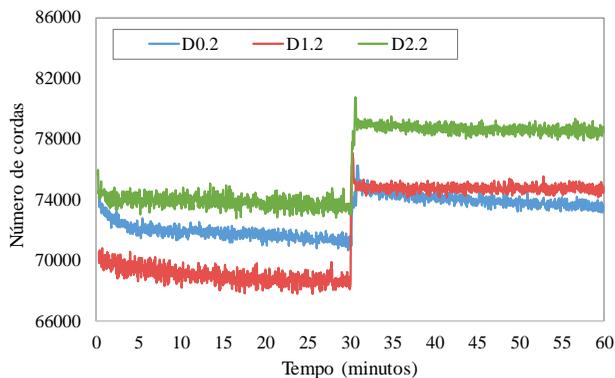


A Figura 73 mostra a comparação de pastas dosadas com filers de diferentes D_{50} , com o mesmo tipo e teor de filer. Com a velocidade de rotação alta (400 rpm), uma tendência óbvia é observada: quanto menor o D_{50} do fino, maior o número de cordas, uma vez que há maior número de partículas, já que o volume adicionado é o mesmo. Logo, a aglomeração de pequenas partículas gera pequenos flocos e, conseqüentemente, maior número deles. Isso também pode ser observado, porém, com menos clareza, durante a rotação baixa (40 rpm).

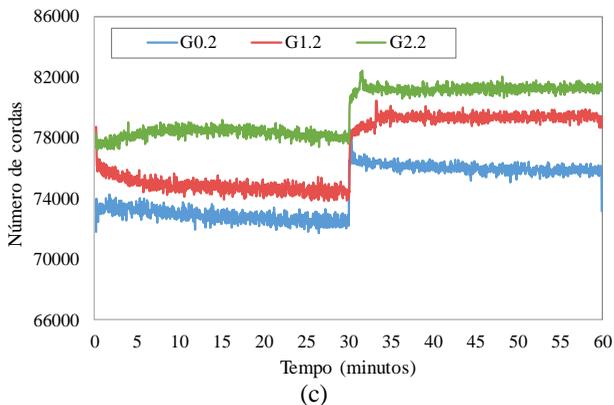
Figura 73: Resultados de FBRM de pastas dosadas com filers de diferentes D_{50} , mesma mineralogia e mesmo teor de filer. (a) filer calcário; (b) filer diabásico; (c) filer gnáissico.



(a)



(b)



Apesar desse comportamento no estado dinâmico, as pastas contendo gnaïsse conduziram a grandes tensões de escoamento e viscosidade (valores sempre maiores que as séries contendo filer calcário). Isso ocorreu porque a fluidez da mistura não era a mesma, uma vez que a quantidade de aditivo se manteve fixa para pastas dosadas com filers com mesmo D_{50} e mesma proporção de finos. Só foi possível estabelecer uma relação entre as medições do FBRM (floculação) com o comportamento reológico das pastas quando se fixou a fluidez da mistura com o ajuste da quantidade de aditivo superplastificante adicionado (resultados apresentados no item 4.2.3).

Relacionando os resultados de floculação com a calorimetria das pastas, pôde-se perceber que as misturas contendo gnaïsse liberaram mais calor de hidratação e também foram aquelas que se apresentaram menos floculadas. Segundo Kirby e Biernacki (2012), quando o espaço entre as partículas é aumentado, a velocidade da reação irá permanecer elevada por um longo período de tempo, aumentando a liberação total de calor.

Percebeu-se também que, embora o tamanho das partículas tenha diminuído com a utilização de filers moídos, não foi observada uma diminuição expressiva no tamanho médio das cordas nas séries contendo filer calcário e diabásio. Isso pode ter acontecido pela floculação de partículas, que conduz a leituras unificadas de partículas aglomeradas.

4.2.2 Resultados das Pastas Binárias com Aditivo Fixo

4.2.2.1 Reologia

A Tabela 33 mostra as propriedades do estado fresco das pastas binárias moldadas: abertura no *minislump* e parâmetros reológicos das misturas binárias com dois tempos de leitura (10 e 40 minutos). Vale salientar que todas as misturas foram dosadas com o mesmo teor de fíler, mantendo fixa a relação água/finos em 1,0.

Percebe-se que a abertura no *minislump* e os parâmetros reológicos das composições apresentaram valores intermediários às pastas unitárias com os mesmos fílers. Por exemplo, as misturas L1.2, D1.2 e G1.2 tiveram abertura de 111, 60 e 65 mm, respectivamente. Já as composições D1. 50% e G1 50% apresentaram 95 e 89 mm, respectivamente. Isso também ocorreu nos parâmetros reológicos; enquanto L1.2, D1.2 e G1.2 apresentavam tensão de escoamento dinâmica de 58,8, 242,3 e 259,8 Pa; e viscosidade de 0,42, 2,12 e 1,31 Pa.s, respectivamente, as pastas D1.50% e G1 50% apresentaram 114,5 e 134 Pa de tensão de escoamento; e 0,75 e 1,04 Pa.s de viscosidade, respectivamente.

É interessante observar que, para as misturas binárias, a presença de 50% de calcário apresentou melhores resultados do que a presença de 70%. Isso pode ser resultado de uma melhor distribuição granulométrica das séries com 50% de fíler diabásico ou gnáissico em comparação com as séries de 30%.

Em relação à manutenção das propriedades do estado fresco com o tempo, as menores diferenças ocorreram nas misturas D2 50% e G2 50%. De modo geral, as misturas contendo fíler gnáissico apresentam maior retenção da trabalhabilidade do que as misturas contendo fíler diabásico.

Tabela 33: Resultados do estado fresco das pastas binárias com aditivo fixo.

Pasta	<i>Mini slump</i> (mm)	Parâmetro reológicos com 10 min			Parâmetro reológicos com 40 min		
		σ_0 Estática (Pa)	σ_0 Dinâmica (Pa)	η (Pa.s)	σ_0 Estática (Pa)	σ_0 Dinâmica (Pa)	η (Pa.s)
D0 50%	122,0	28	43,1	0,56	124	91,7	1,11
D0 30%	117,0	29	48,3	0,69	166	100,2	1,23
D1 50%	95,0	75,7	114,5	0,75	137,0	138,9	1,02

Pasta	Mini slump (mm)	Parâmetro reológicos com 10 min			Parâmetro reológicos com 40 min		
		σ_0 Estática (Pa)	σ_0 Dinâmica (Pa)	η (Pa.s)	σ_0 Estática (Pa)	σ_0 Dinâmica (Pa)	η (Pa.s)
D1 30%	87,0	122,0	162,6	0,79	307,0	243,3	1,87
D2 50%	98,0	139,0	119,4	0,64	145,0	162,9	1,08
D2 30%	87,3	128,0	147,3	0,70	281,0	198,8	1,20
G0 50%	88,9	78,0	143,4	1,04	155,0	200,9	1,34
G0 30%	74,5	138,0	212,3	1,17	307,0	243,3	1,87
G1 50%	98,0	134,0	114,8	0,66	186,0	144,6	1,00
G1 30%	89,0	205,0	192,6	0,62	232,0	226,0	0,99
G2 50%	107,0	132,0	117,1	0,50	74,5	138,7	0,80
G2 30%	97,0	184,0	156,3	0,60	182,0	184,2	0,86

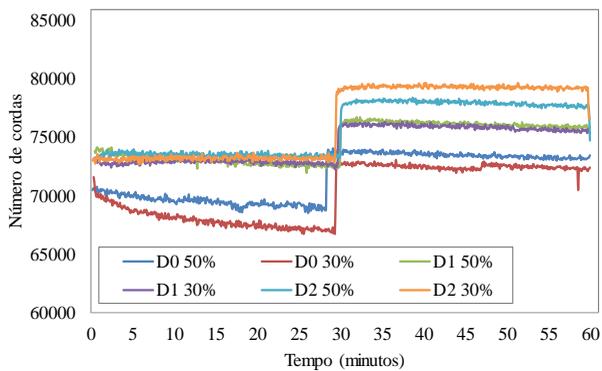
4.2.2.2 FBRM

Os resultados de FBRM podem ser observados na Figura 74. Percebe-se que as pastas contendo 70% de fíler calcário apresentaram comportamento similar em relação ao número de cordas, tanto na presença de fíler diabásico quanto gnáissico. Isso indica que a parcela de calcário domina o efeito de floculação das partículas.

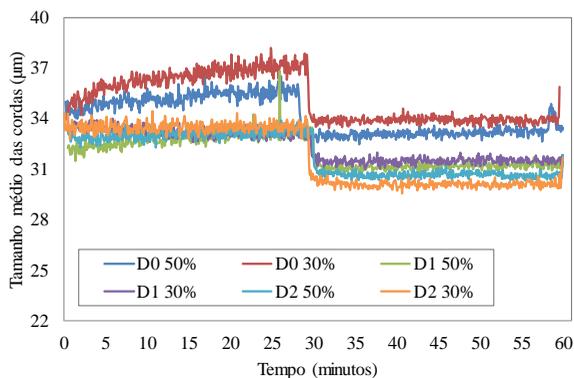
Tal como observado nas misturas unitárias, a presença de maior quantidade de fíler calcário (séries XX 30%) resultou nas maiores taxas de floculação em comparação com as misturas contendo maior quantidade de fíler diabásico ou gnáissico (séries XX 50%).

O comportamento das misturas binárias indica que a composição de fílers pode ser uma opção para o emprego de fílers alternativos ao calcário, uma vez que tais misturas apresentaram características intermediárias em relação àquelas contendo somente um tipo de fíler.

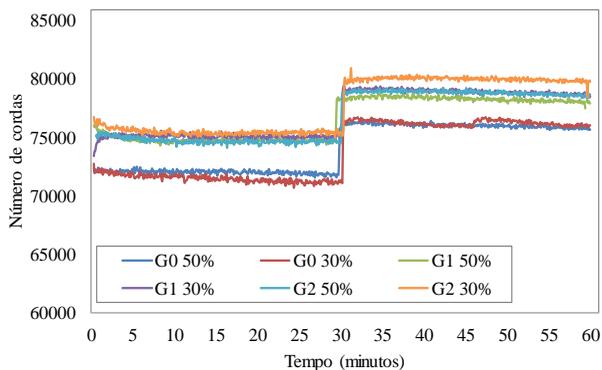
Figura 74: Resultados de FBRM das pastas binárias. (a) e (b) número e tamanho médio das cordas das pastas contendo filer diabásico e calcário; (c) e (d) pastas contendo filer gnáissico e calcário.



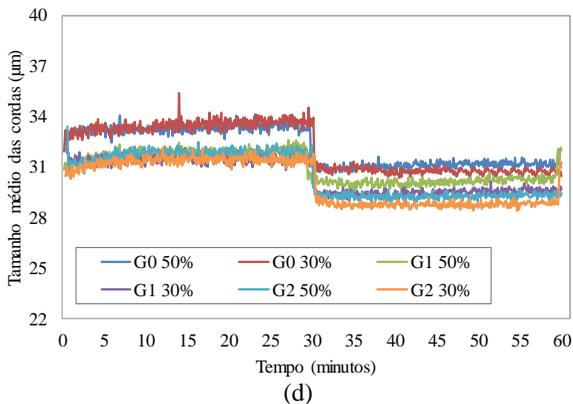
(a)



(b)



(c)



4.2.3 Pastas Unitárias com Aditivo Variável

4.2.3.1 Reologia

Os resultados dos testes reométricos, realizados com 10 e 40 minutos, para as pastas com diferentes quantidades de aditivo (ajuste para uma abertura do *minislump* fixa em 112 ± 1 mm), estão apresentados na Tabela 34.

O teor de aditivo das pastas variou de 0,02 a 0,44% em função de mineralogia, D_{50} e teor de filer adicionado (ou relação água/finos). A Tabela 35 mostra a análise de variância, sendo possível constatar que todas as variáveis citadas são igualmente importantes e apresentam alta influência sobre a demanda de aditivo.

Tabela 34: Parâmetros reológicos das pastas dosadas com aditivo variável.

Pasta	Mini slump (mm)	Parâmetro reológicos com 10 min			Parâmetro reológicos com 40 min		
		σ_0 Estática (Pa)	σ_0 Dinâmica (Pa)	η (Pa.s)	σ_0 Estática (Pa)	σ_0 Dinâmica (Pa)	η (Pa.s)
L0.1	0,07%	30,00	70,72	0,78	76,30	104,39	1,34
L0.2	0,13%	31,60	59,31	0,63	200,00	111,35	1,38
L0.3	0,16%	69,30	73,52	0,72	201,00	110,64	1,37
D0.1	0,02%	43,80	59,31	0,54	58,30	91,69	0,98
D0.2	0,05%	40,70	70,17	0,65	111,00	129,23	1,37
D0.3	0,09%	33,20	56,80	0,53	189,00	123,30	1,24
G0.1	0,19%	81,00	79,19	0,47	148,00	130,92	1,17
G0.2	0,28%	57,20	62,30	0,33	177,00	101,36	0,87

Pastas	Mini slump (mm)	Parâmetro reológicos com 10 min			Parâmetro reológicos com 40 min		
		σ_0 Estática (Pa)	σ_0 Dinâmica (Pa)	η (Pa.s)	σ_0 Estática (Pa)	σ_0 Dinâmica (Pa)	η (Pa.s)
G0.3	0,33%	110,00	96,12	0,67	359,00	134,83	1,31
L1.1	0,11%	73,60	71,55	0,58	133,00	107,97	1,21
L1.2	0,16%	55,30	58,77	0,42	118,00	105,56	1,07
L1.3	0,19%	97,30	77,50	0,66	258,50	118,05	1,27
D1.1	0,18%	101,00	85,08	0,55	233,00	137,82	1,49
D1.2	0,28%	97,60	76,55	0,41	345,00	150,60	1,23
D1.3	0,32%	85,90	81,77	0,42	641,00	179,59	1,14
G1.1	0,21%	83,00	78,75	0,35	209,00	125,62	0,98
G1.2	0,28%	49,20	60,65	0,40	185,00	102,31	0,82
G1.3	0,36%	75,00	74,53	0,33	127,00	112,14	0,77
L2.1	0,12%	61,25	61,61	0,48	82,47	108,13	1,10
L2.2	0,17%	61,55	72,04	0,54	195,50	120,04	1,14
L2.3	0,22%	110,00	77,60	0,60	236,00	129,36	1,12
D2.1	0,21%	64,60	80,50	0,33	170,00	123,74	0,86
D2.2	0,29%	98,40	91,40	0,35	306,00	49,24	0,98
D2.3	0,35%	76,10	68,40	0,32	271,00	148,78	0,88
G2.1	0,20%	77,00	75,71	0,35	117,00	125,97	0,915
G2.2	0,26%	80,00	75,98	0,59	143,00	101,11	1,053
G2.3	0,36%	59,00	57,73	0,44	120,00	64,53	0,79
C2.1	0,20%	82,20	97,70	0,89	212,00	150,75	1,55
C2.2	0,28%	107,00	154,30	0,92	473,00	209,43	1,65
C2.3	0,44%	150,00	138,59	0,75	467,00	166,53	1,32

* porcentagem de aditivo em relação à massa de finos.

Tabela 35: ANOVA - influência da mineralogia, D_{50} , e teor de fíler presente no teor de aditivo necessário para manter a mesma abertura no *minislump* das pastas.

Parâmetro	Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Teor de aditivo	Mineralogia	0,000008	3	0,000003	9,3787	100,0%
	D_{50}	0,000005	2	0,000002	8,4728	99,8%
	Teor	0,000009	2	0,000004	14,6447	100,0%
	Erro	0,000008	3	0,000003	9,3787	100,0%

Observou-se que o aumento do teor de finos (menor relação água/finos) de mesmo tamanho e da mesma mineralogia provocou um acréscimo na demanda de aditivo superplastificante, conforme esperado, uma vez que há efetivamente mais partículas na mistura para uma mesma quantidade de água.

Considerando as pastas dosadas com os fílers *in natura* (D_{50} 33-38 μm), a série com fíler diabásico foi a que apresentou a menor demanda de

aditivo, seguida da série com calcário. Isso pode ser resultado de duas propriedades das partículas determinadas anteriormente. A primeira delas é relacionada à área superficial BET. Apesar de a área superficial desses 3 fílers não variar de forma expressiva, as partículas D0 apresentaram 1.183 m²/kg, enquanto que o L0 tinha 1.280 m²/kg e, o G0, 1.349 m²/kg. Além disso, as partículas L0 e D0 apresentaram menor relação de aspecto e angularidade do que as partículas G0.

Em pastas contendo partículas com D₅₀ de 24-25 µm, a presença de fíler gnáissico ainda resultou nas maiores demandas de aditivo. Com esse D₅₀, o melhor desempenho foi do fíler calcário, que necessitou dos menores teores de aditivo. Novamente, isso pode estar ligado à área superficial do fíler, uma vez que partículas L1, D1 e G1 apresentaram 1.671, 2.071 e 2.525 m²/kg, respectivamente. As partículas L1 também foram as que mostraram as menores relações de aspecto entre as partículas com D₅₀ de 24-25 µm.

Por fim, em pastas contendo partículas com D₅₀ de 15-16 µm, misturas contendo fíler calcário apresentaram o melhor desempenho. As pastas contendo fíler diabásico, gnáissico e aquelas dosadas somente com cimento demandaram quantidades similares de aditivos, sendo ligeiramente menor com a presença de gnaisse. Partículas L2 apresentaram a relação de aspecto mais baixa e área superficial de 2.746 m²/kg. Já as áreas superficiais do D2, do G2 e do cimento foram de 5.566, 5.517 e 2.231 m²/kg, respectivamente.

Portanto, embora a demanda de aditivo das misturas seja influenciada pela área superficial do fíler presente, a sua mineralogia tem um impacto mais expressivo, já que pastas contendo partículas com área superficial próxima, mas diferentes mineralogias (L2, D1, G1 e C2), apresentam diferenças significativas na demanda de aditivo.

Esses resultados estão em concordância com outras pesquisas utilizando fílers similares. Estudos realizados por Ho et al. (2002) constataram que o uso de fílers graníticos em CAA demandou o dobro da quantidade de aditivo que os CAAs dosados com fílers calcários para obter os mesmos parâmetros no estado fresco. Conforme constatado neste trabalho, Felekoglu (2007) e Dehwah (2012) também verificaram que a presença de fíler calcário melhora a trabalhabilidade de CAA comparado com misturas contendo somente cimento.

Em relação à manutenção da trabalhabilidade, a mesma tendência observada com 10 minutos foi mantida com 40 minutos, ou seja, pastas com maiores viscosidades aos 10 minutos também conduziram a maiores viscosidades aos 40 minutos, dentro da série específica.

De maneira geral as misturas contendo fíler calcário mostraram

menor variação entre a tensão de escoamento (estática e dinâmica) medida com 10 minutos e com 40 minutos, seguidas das pastas contendo fíler gnáissico. As pastas contendo fíler diabásico foram as que apresentaram maior aumento da tensão de escoamento com o passar do tempo. Segundo Mardani et al. (2013), uma baixa manutenção de trabalhabilidade em misturas à base de cimento pode ocorrer devido à incompatibilidade do superplastificante e dos finos presentes na mistura, uma vez que, de acordo com Kauppi, Andersson e Bergstrom (2005), a adsorção dos policarboxilatos é dependente das interações eletrostáticas entre eles e a superfície das partículas. Aliado a isso, filers diabásicos foram os que apresentaram a maior adsorção por azul de metileno (mais que o dobro dos demais filers), fato que pode justificar a menor manutenção de trabalhabilidade. De acordo com Vickers Jr. et al. (2005), taxas mais elevadas de perda de fluidez ocorrem devido à rápida adsorção da fase aquosa que contém superplastificante. Em relação à viscosidade, não foram observadas grandes diferenças entre as séries dosadas com os diferentes filers.

Assim como observado nas pastas contendo aditivo fixo, quanto maior a quantidade de finos presentes na mistura (menor a relação água/finos), mais acentuada a diferença entre as leituras com 10 e 40 minutos. Isso é consistente com o trabalho de Rek, Zalegowski e Garbacz (2015), que verificaram que o aumento da substituição de areia por fíler cerâmico em argamassas, além de causar diminuição da trabalhabilidade inicial, ainda apresentava perda de fluidez mais acentuada após 30 e 60 minutos. Jafari et al. (2014) também observaram que a presença de finos de pedreira de origem zeolítica em argamassas aumentou em 0,2% a dosagem de aditivo superplastificante para a obtenção da mesma abertura no ensaio de mesa de queda livre (*flow table*) em comparação com argamassas feitas com apenas cimento (com a mesma quantidade de finos em massa), além de causarem uma perda mais acentuada de trabalhabilidade após 45 minutos da mistura.

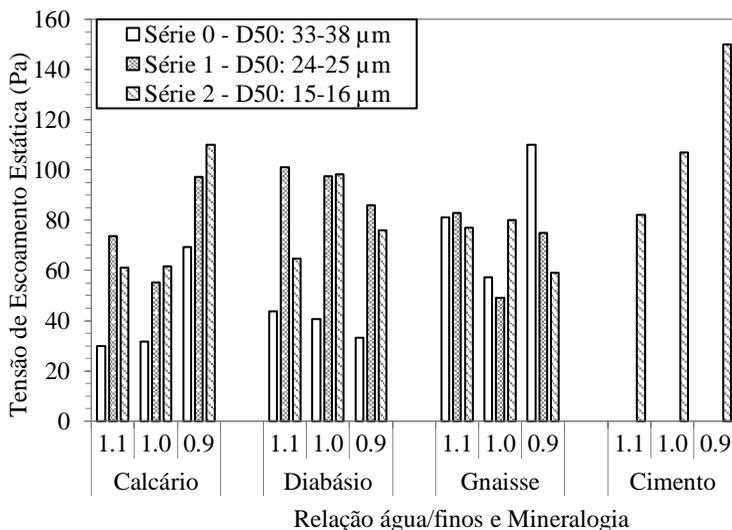
De acordo com Flatt e Schober (2012), quando o teor de aditivo utilizado está mais perto do seu teor de saturação, a manutenção da fluidez ocorre por um maior tempo. Portanto, a dosagem de superplastificante nas pastas contendo fíler calcário e/ou naquelas com menor quantidade de finos pode ter sido suficientemente elevada, cobrindo quase toda a superfície, diferentemente das pastas contendo fíler diabásico e daquelas com maior quantidade de finos, em que o teor de superplastificante utilizado pode estar muito abaixo do seu teor de saturação.

Para facilitar a análise dos parâmetros reológicos e de seus fatores influentes, os resultados de tensão de escoamento (estática e dinâmica) e

viscosidade foram separados em diferentes gráficos. A Figura 75 mostra os resultados de tensão de escoamento estática, determinados por *stress growth test*. Para a mesma relação água/finos, as pastas contendo somente cimento (série C2) apresentaram as maiores tensões. Dessa forma, a adição de fíler diminuiu a tensão de escoamento estática das pastas independentemente da sua mineralogia. Não foram observadas grandes diferenças em função da mineralogia do fíler nos resultados de tensão de escoamento estática, mas houve visível influência em relação aos tamanhos das partículas.

Pastas contendo fíler calcário ou diabásio apresentaram as menores tensões de escoamento estáticas quando os fílers foram empregados *in natura*, ou seja, com o maior D_{50} (entre 33 e 38 μm). Em contraste, o uso de fíler gnáissico moído (G1 e G2) resultou em pastas com menores tensões de escoamento quando comparadas às pastas contendo gnaisse sem moer (G0). Isso reflete os resultados das análises de partículas, nas quais os fílers L0 e D0 mostraram menor relação de aspecto e angularidade que os fílers L1 e D1, respectivamente. O oposto ocorreu com o gnaisse, sendo que o G0 apresentou 1,57 de relação de aspecto, enquanto que o G1 resultou em 1,52.

Figura 75: Tensão de escoamento estática das pastas dosadas com aditivo variável.



Em relação ao teor de finos presente, a maioria das pastas apresentou incremento dos parâmetros reológicos com o aumento do teor de finos da mistura, uma vez que o teor de sólidos aumenta. O motivo de algumas pastas não mostrarem tal comportamento foi a utilização de aditivo variável, ou seja, pastas contendo maior teor de finos também continham maior teor de aditivo, o que torna a análise complexa.

Para a relação água/finos de 1,1 (série XX.1), a maior tensão de escoamento estática ocorreu quando os filers empregados tinham D_{50} médio (24-25 μm), independentemente da mineralogia. Para a relação água/finos intermediária, 1,0 (série XX.2), os maiores valores ocorreram em pastas com os filers mais finos (D_{50} de 16 μm). Para a menor relação água/finos, 0,9 (série XX.3), não houve uma tendência clara em função do tamanho dos filers.

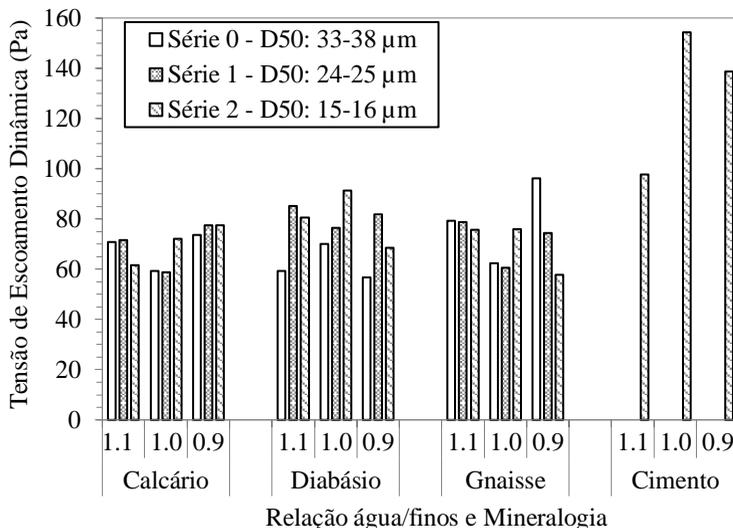
A análise de variância (ANOVA) foi realizada para identificar os efeitos individuais e interativos das variáveis sobre a tensão de escoamento estática. Os resultados estão apresentados na Tabela 36. Em relação aos fatores isolados, percebeu-se a seguinte ordem de importância: D_{50} ; relação água/finos; e, por último, a mineralogia do fino. A interação entre todos os fatores influencia significativamente nos resultados de tensão de escoamento estática, com 95% de confiabilidade.

Tabela 36: ANOVA para os resultados de tensão de escoamento estática.

Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Mineralogia	754,83	2	377,42	3,29	94,8%
D_{50}	6392,92	2	3196,46	27,88	~100,0%
Água/finos (a/f)	2431,71	2	1215,85	10,61	99,9 %
D_{50} * a/f	2073,67	4	518,42	4,52	99,4%
D_{50} * Mineralogia	8479,50	4	2119,88	18,49	~100,0%
a/f *Mineralogia	6047,52	4	1511,88	13,19	~100,0%
D_{50} * a/f * Mineralogia	2461,10	8	307,64	2,68	97,4%
Erro	3095,09	27	114,63		
TOTAL (SQT)	31736,34	53			

A tensão de escoamento dinâmica e a viscosidade foram calculadas de acordo com o modelo de Bingham. O valor de R^2 para as curvas lineares foi maior que 0,96 para todas as amostras, sendo igual ou superior a 0,99 para a maioria das misturas. As Figuras 76 e 77 mostram os resultados dos parâmetros reológicos separados em função da mineralogia do filer, da relação água/finos da mistura e do D_{50} das partículas.

Figura 76: Tensão de escoamento dinâmica das pastas dosadas com aditivo variável.



Em relação ao tamanho das partículas (D_{50}), os resultados da tensão de escoamento estática e dinâmica apresentaram o mesmo comportamento. O processo de moagem beneficiou o filer gnáissico, mas prejudicou a *performance* dos filers calcário e diabásico. Isso é consequência das características das partículas (ver Tabela 26). O primeiro processo de moagem (séries X1.X) aumentou a relação de aspecto dos filers calcário e diabásico e diminuiu a do filer gnáissico. De acordo com Castro e Pandolfelli (2009) e Uysal e Yilmaz (2011), os efeitos das adições minerais sobre o comportamento da mistura dependem significativamente de sua distribuição granulométrica, tamanho, forma e características de superfície das partículas.

De forma similar aos resultados de tensão de escoamento estática, para a relação água/finos de 1,0 (séries XX.1), os maiores valores de tensão de escoamento dinâmica ocorreram nas pastas contendo os filers mais finos (D_{50} de 16 µm). Para a relação água/finos de 1,1, os maiores valores ocorreram com o uso de filers de tamanho intermediário (D_{50} de 24-25 µm), com exceção das pastas contendo gnaisse, que apresentaram resultados similares para todos os tamanhos de partículas testados.

O uso de partículas mais finas não resultou, necessariamente, no aumento da tensão de escoamento, porque foram adicionadas diferentes quantidades de superplastificante nas misturas. Por exemplo, pastas

contendo fíler calcário L0 demandaram de 44 a 77% mais aditivo do que as pastas contendo fíler diabásico D0 para obter a mesma abertura no *minislump* (ver Tabela 34).

A Tabela 37 mostra a ANOVA para os resultados de tensão de escoamento dinâmica. O fator analisado tem influência significativa quando o nível de significância é igual ou menor que 0,05 (95% de probabilidade). Dessa forma, apenas a mineralogia dos fílers não apresenta influência significativa na tensão de escoamento dinâmica, com 95% de confiabilidade.

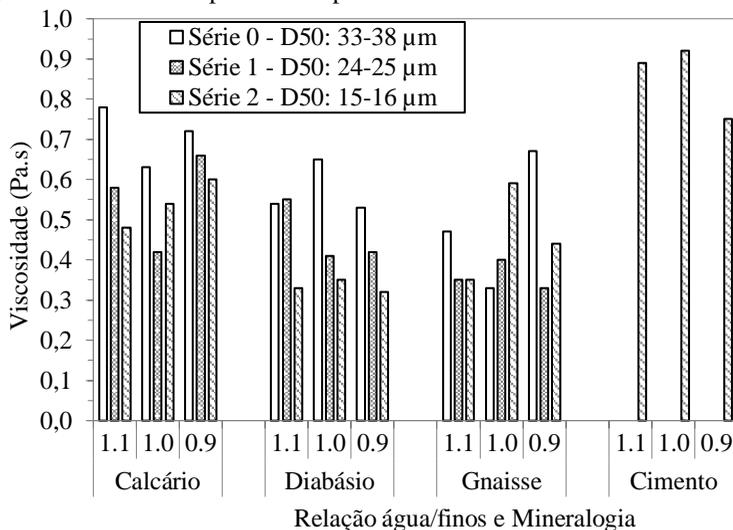
Tabela 37: ANOVA para os resultados de tensão de escoamento dinâmica das pastas contendo aditivo variável.

Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Mineralogia	10,64	2	5,32	0,08	7,7%
D ₅₀	468,88	2	234,44	3,53	95,6%
Água/finos (a/f)	652,17	2	326,08	4,90	98,5%
D ₅₀ * a/f	2408,20	4	602,05	9,05	99,9%
D ₅₀ * Mineralogia	1516,03	4	379,01	5,70	99,8%
a/f * Mineralogia	2474,23	4	618,56	9,30	99,9%
D ₅₀ * a/f * Mineralogia	1929,11	8	241,14	3,63	99,5%
Erro	1795,58	27	66,50		
TOTAL (SQT)	11254,86	53			

Os fatores em ordem de importância são todas as interações de segunda ordem; interações de terceira ordem; relação água/finos; D₅₀; e, por fim, mineralogia (com influência muito baixa). Vale salientar que, apesar de o efeito isolado da mineralogia não ter grande influência na tensão de escoamento dinâmica, os efeitos de segunda ordem mostraram que o grau de moagem (D₅₀) e a relação água/finos são dependentes da mineralogia.

Em relação à viscosidade plástica (Figura 77), pastas contendo apenas cimento (série C2) apresentaram os mais altos valores entre as misturas estudadas, seguidas das pastas contendo fíler calcário (série L). Como o teor de superplastificante foi ajustado para cada mistura, pastas contendo os fílers mais finos (D₅₀ de 16 µm – série X2.X) não necessariamente tiveram as maiores viscosidades. Da mesma forma, a maior relação água/finos não resultou, necessariamente, nas menores viscosidades, embora essa seja uma tendência observada por outros pesquisadores (CYR; LEGRAND; MOURET, 2000).

Figura 77: Viscosidade plástica das pastas dosadas com aditivo variável.



Os maiores valores de viscosidade para pastas com relação água/finos de 0,9 ocorreram quando foram utilizados filers de maior D_{50} (33-36 μm), o que não é uma tendência esperada, uma vez que, para uma mesma quantidade de água, materiais mais finos aumentam a viscosidade das misturas. No entanto, como citado anteriormente, a quantidade de aditivo usada foi diferente, portanto, esses resultados são perfeitamente aceitáveis, já que as pastas contendo materiais mais finos também demandaram maiores quantidade de superplastificante. As outras relações água/finos não mostraram uma tendência em função do D_{50} das partículas.

As menores viscosidades de pastas contendo filer calcário e filer gnáissico ocorreram com relação água/finos igual a 1,0 (série XX.2). Para as pastas contendo filer diabásico e as pastas contendo somente cimento, a relação água/finos de 0,9 (série XX.1) resultou em viscosidades mais baixas do que as misturas com relação água/finos maiores (1,0 e 1,1). Isso indica que a quantidade de finos na mistura pode ser otimizada. Segundo Svermova, Mohammed e Barts (2003) e Daczko (2012), o teor de sólidos está relacionado com a viscosidade da pasta, que governa o comportamento da mistura e é um efeito sinérgico do volume de sólidos presentes.

A Tabela 38 mostra a ANOVA para os resultados de viscosidade das pastas. Todos os fatores individuais e as interações apresentaram influência, com 95% de confiabilidade. A mineralogia é o mais

importante fator isolado, influenciando a viscosidade, seguida pelo D_{50} e pela relação água/finos.

Tabela 38: ANOVA para resultados de viscosidade de pastas com aditivo variável.

Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Mineralogia	0,5388	2	0,2694	21,74	~100,0%
D_{50}	0,2175	2	0,1088	8,78	99,8%
Água/finos (a/f)	0,0994	2	0,0497	4,01	97,0%
D_{50} * a/f	0,1414	4	0,0353	2,85	95,7%
D_{50} * Mineralogia	0,1729	4	0,0432	3,49	97,9%
a/f *Mineralogia	0,2085	4	0,0521	4,21	99,1%
D_{50} * a/f * Mineralogia	0,3659	8	0,0457	3,69	99,5%
Erro	0,3345	27	0,0124		
TOTAL (SQT)	2,0789	53			

Considerando todos os parâmetros reológicos, fica claro que a presença de adições minerais nas pastas de cimento conduz a melhores *performances* nas propriedades do estado fresco quando comparadas com pastas contendo apenas cimento. Isso está de acordo com o reportado na literatura em relação à presença de outros tipos de adições (FERRARIS; OBLA; HILL, 2001). Isso ocorre porque a presença de partículas minerais pode reduzir a tendência de aglomeração das partículas de cimento e o atrito interpartículas.

De acordo com Nehdi, Mindess e Aitcin (1998), vários tipos de forças coexistem em uma suspensão cimentícia; existem forças de origem coloidal que surgem de interações mútuas entre as partículas e que são afetadas pela polarização da água. Os filers minerais podem influenciar as forças eletrostáticas dependendo de sua mineralogia e propriedades de superfície das partículas. A interposição de grãos de filer entre as partículas de cimento pode afetar a sua atração eletrostática e, conseqüentemente, sua estrutura floculada, porque as forças coloidais também dependem da distância entre as partículas e de sua interposição. Os autores ainda salientam que a substituição de cimento por materiais de diferentes áreas superficiais altera a área de superfície molhável e a quantidade de água adsorvida. Algumas adições minerais possuem solubilidade em água e podem modificar a solução de eletrólito e, conseqüentemente, as forças eletrostáticas. Esse efeito dos filers está fora do âmbito do presente trabalho.

4.2.3.2 FBRM

Os gráficos de FBRM de todas as misturas estão disponíveis no Apêndice D. Devido ao grande número de dados, nesta seção, optou-se por apresentar somente alguns resultados de FBRM que ilustram o comportamento geral de algumas séries.

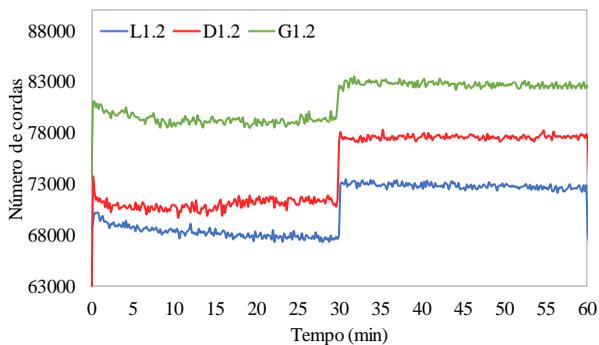
As conclusões obtidas nas pastas com fluidez fixa foram semelhantes às das pastas com aditivo fixo (e fluidez variável) em vários aspectos. Quando $N=40$ rpm, a microestrutura da amostra apresentou agregação, indicando a formação de flocos e aumentando o tamanho médio das partículas. Quando a intensidade de agitação foi aumentada para 400 rpm, as forças de cisalhamento geradas foram suficientemente fortes para que os mecanismos de ruptura dominassem a mistura, provocando desagregação (FERRON, 2008). A Figura 78 ilustra a situação descrita. Nos primeiros 30 minutos, a mistura foi submetida ao cisalhamento menor, gerando uma maior aglomeração das partículas e, conseqüentemente, uma contagem menor. Após 30 minutos, a velocidade de rotação foi aumentada, resultando na quebra de alguns aglomerados e aumentando o número da contagem.

O tamanho dos flocos formados não ultrapassou $40\ \mu\text{m}$, indicando que há um limite para a aglomeração das partículas e que a força de aglomeração diminuiu, ao passo que o tamanho dos flocos tende a aumentar (FERRON, 2008).

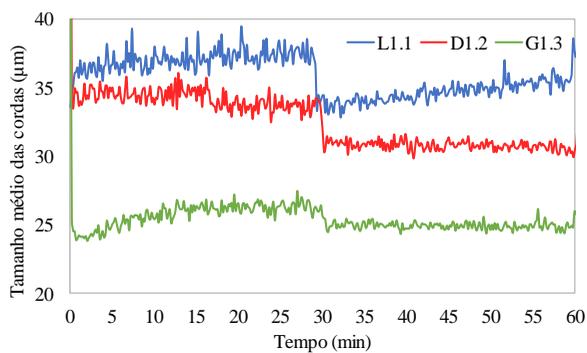
Tal como observado nas pastas com teor de aditivo fixo, os mecanismos de agregação foram influenciados pela morfologia das partículas. A presença do fíler gnáissico nas misturas conduziu à maior contagem de cordas dentro de uma mesma série, seguida das pastas contendo fíler diabásico, calcário e, por último, das pastas contendo somente cimento. Conseqüentemente, as pastas contendo gnaiss também foram as que apresentaram o menor tamanho de cordas.

A menor tendência à floculação das pastas contendo fíler gnáissico contradiz o desempenho frequentemente observado na presença de partículas irregulares, que tendem a gerar comportamentos mais espessantes (BARNES, 1989), uma vez que, entre os fílers testados, as partículas de gnaiss apresentaram a maior relação de aspecto. Como tanto o uso de partículas de gnaiss *in natura* (com alta relação de aspecto) quanto o uso de partículas moídas (com menor relação de aspecto) apresentaram o mesmo comportamento, outros fatores devem prevalecer durante a formação de flocos, como a interação entre as partículas de fíler, cimento e aditivo.

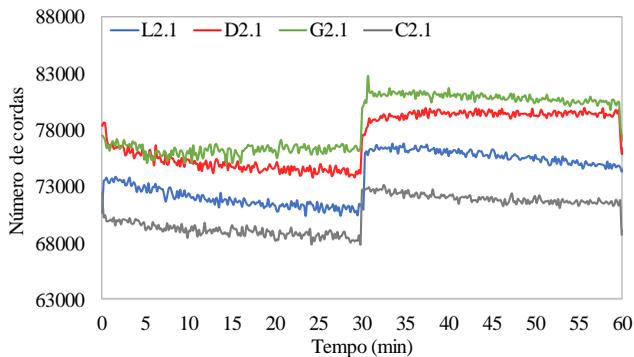
Figura 78: Resultados de FBRM de pastas com diferentes mineralogias de filler, mesmo D_{50} e mesma relação água/finos - (a) e (b): D_{50} de 24-25 μm e relação água finos igual a 1,0; (c) e (d): D_{50} de 15-16 μm e relação água finos igual a 1,1.



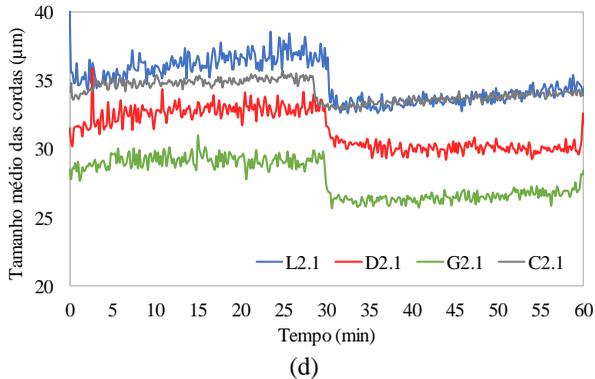
(a)



(b)



(c)



Pastas dosadas somente com cimento (série C2) e aquelas preparadas com filer calcário apresentaram as menores contagens de cordas e os maiores comprimentos de corda para a maioria das pastas com o mesmo D_{50} e a mesma proporção água/finos. Isso sugere que a microestrutura no estado fresco dessas pastas sofre maior aglomeração do que as pastas preparadas com filer gnáissico ou diabásico. Isso é consistente com tendências gerais indicadas em estudos reológicos de Han e Ferron (2015). Os autores observaram que as misturas com maior comprimento de corda e menor contagem de partículas também mostraram viscosidades mais altas em testes de reologia.

Conforme consta na Figura 77, a série C2 e as misturas contendo filer calcário (L0, L1 e L2) conduziram a viscosidades maiores do que as pastas contendo filers diabásico e gnáissico para a mesma relação água/finos e o mesmo D_{50} de partículas.

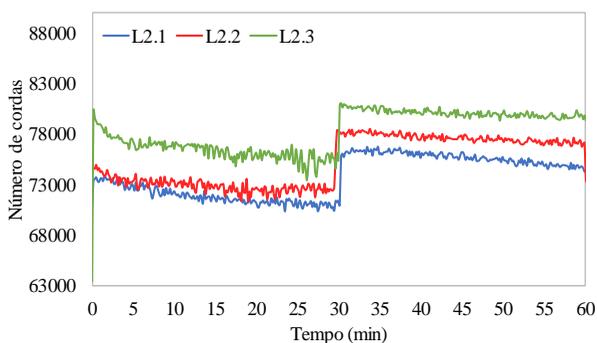
Uma suspensão cimentícia com partículas floculadas possui alta viscosidade, e esse valor diminui à medida que as partículas são defloculadas (ROUSSEL, 2012; YIM; KIM; SHAH, 2013). Quando o tamanho do floco é pequeno, à sua microestrutura tende a ser menos porosa (mais compacta) e isso diminui a susceptibilidade à ruptura (YANG; JENNINGS, 1995; YEUNG; PELTON, 1996). As diferenças nos gradientes de velocidade perto do extremo da superfície da partícula tendem a diminuir à medida que o tamanho dos flocos diminui; conseqüentemente, flocos menores estão expostos a menores tensões de cisalhamento (FERRON et al., 2013).

A menor floculação das pastas contendo filer diabásico e, principalmente, o gnáissico, pode explicar as maiores taxas de liberação de calor dessas pastas em relação àquelas contendo calcário e somente cimento. A maior desaglomeração dos finos reduz a viscosidade e

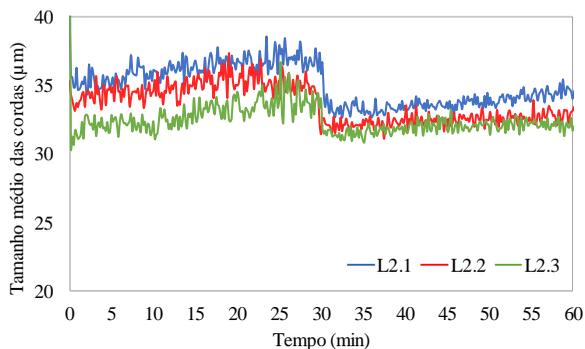
aumenta a área específica dos grãos, favorecendo a acessibilidade da água.

Pode-se observar um aumento do número de cordas com o aumento do teor de finos presentes na mistura. A Figura 79 mostra um exemplo desse comportamento. Com exceção da série D0, todas as séries com relação água/finos de 0,9 (XX.3) resultaram em maiores contagens do que as demais relações água/finos.

Figura 79: Resultados de FBRM em função da relação água/finos da pasta (fixando o tipo e o D_{50} dos filers). (a) Número de cordas; (b) Tamanho médio das cordas.



(a)



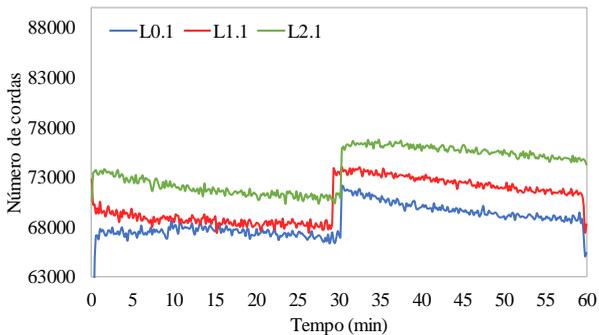
(b)

Com relação à distribuição granulométrica, a Figura 80 mostra os resultados de FBRM em função do D_{50} (fixando o tipo de filer e a relação água/finos). O tamanho médio de partículas não diferiu significativamente entre as partículas de calcário e diabásio, provavelmente devido à floculação. As pastas contendo gnaíse, que

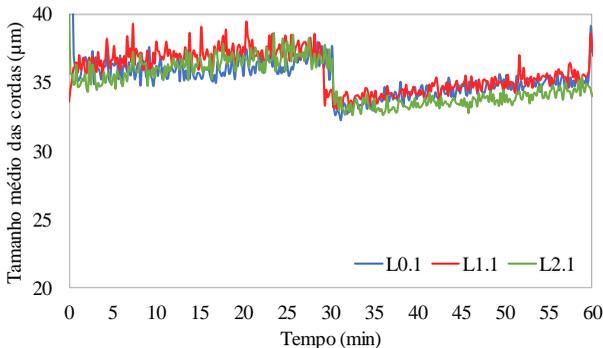
mostraram menor tendência à aglomeração, apresentaram tamanho de partículas inversamente proporcional ao número de cordas identificado.

As misturas contendo partículas mais finas resultaram em maior número de cordas, uma vez que efetivamente havia um maior número de partículas na mistura, pois o volume de finos permaneceu constante. Portanto, percebe-se que, conforme a área superficial de um mesmo tipo de filer aumentava, o número de cordas também aumentava.

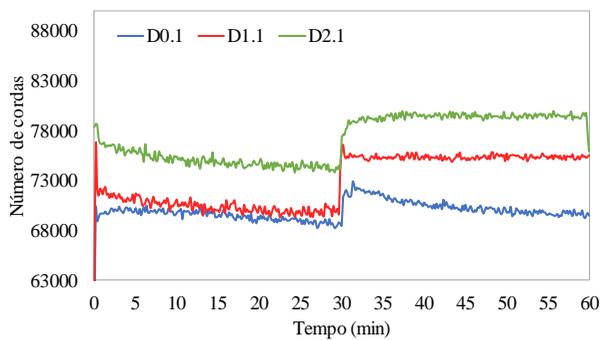
Figura 80: Resultados de FBRM em função do D_{50} fixando a relação água/finos em 0,9: (a) e (b) pastas dosadas com filer calcário (L); (c) e (d) pastas dosadas com filer diabásico (D); (e) e (f) pastas dosadas com filer gnáissico (G).



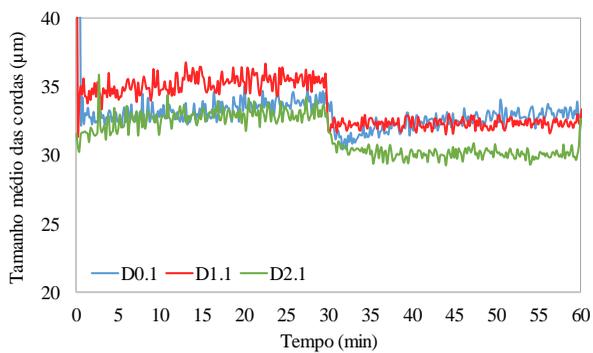
(a)



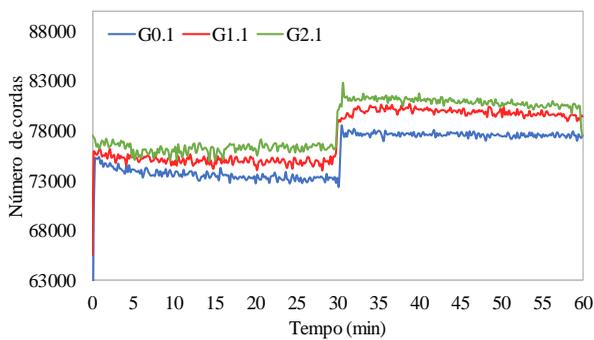
(b)



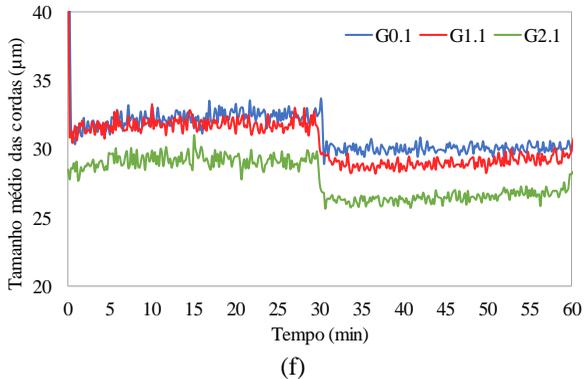
(c)



(d)

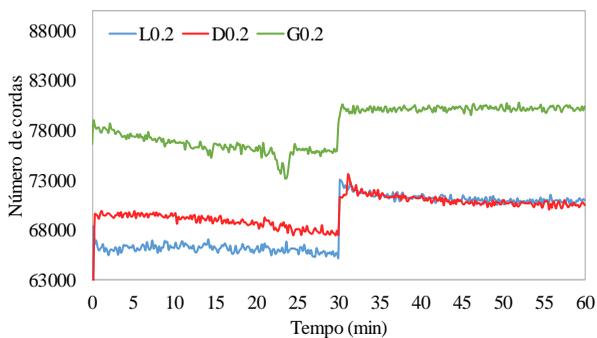


(e)

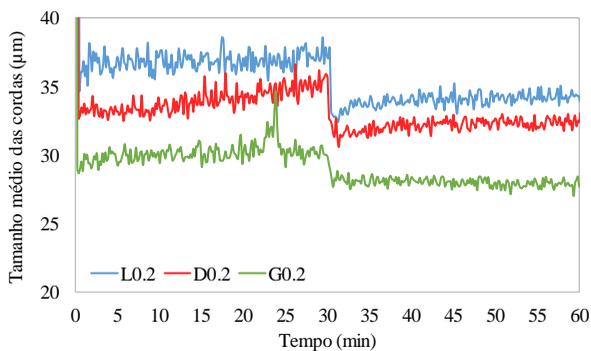


A área superficial do fíler e os resultados de FBRM só puderam ser correlacionados quando a mineralogia do fíler permaneceu constante. A Figura 81 compara os resultados de FBRM das pastas contendo partículas com área superficial BET semelhante, independentemente do tipo de finos presentes, percebendo-se diferenças significativas nos resultados. As partículas de gnaisse permanecem apresentando o maior número de cordas, indicando menor floculação. Pastas contendo fíler diabásico (D0.2 e D1.2) e contendo fíler calcário (L0.2 e L2.2) mostraram comportamento semelhante. Pastas dosadas somente com cimento, por sua vez, continuam a apresentar o menor número de cordas, indicando a maior floculação entre as misturas. Segundo Neville (2016), existe uma tendência natural à floculação das partículas de cimento na água, pois os silicatos apresentam potencial elétrico negativo, enquanto que as fases C3A e C4AF mostram um potencial positivo; e, na solução aquosa formada durante a hidratação do cimento, há uma inversão de polarização, com formação de íons H^+ e OH^- . Esse fenômeno provoca a formação de flocos.

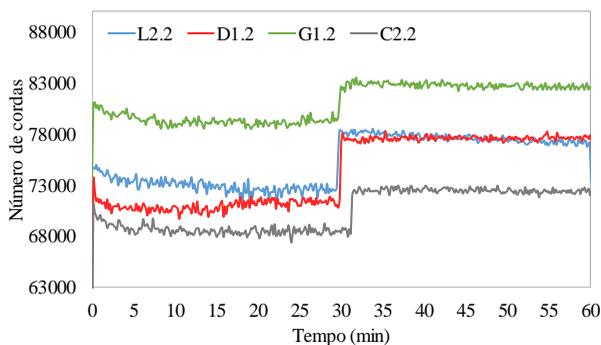
Figura 81: Resultados de FBRM para pastas contendo finos com área superficial BET semelhante, fixando a relação água/finos da mistura em 1,0. (a) e (b) $BET \approx 1200 \text{ m}^2/\text{kg}$; (c) e (d) $BET \approx 2.700 \text{ m}^2/\text{kg}$.



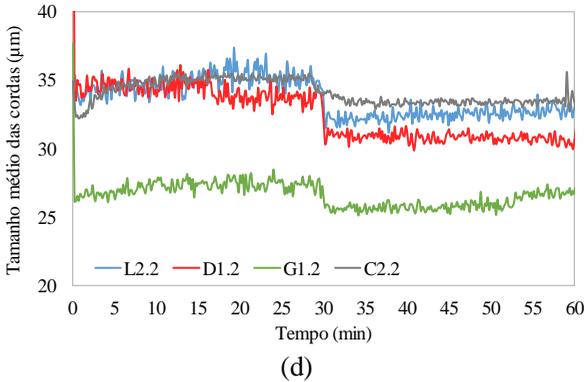
(a)



(b)



(c)



4.2.3.3 Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Diferencial (dTG)

Os resultados dos ensaios de termogravimetria são apresentados nas Figuras 82, 83, 84 e 85 para as pastas de cimento contendo fíler calcário, diabásico, gnáissico e somente cimento, respectivamente. Prontamente, é possível identificar as três reações principais ocorridas durante o aquecimento das amostras (picos da curva dTG em azul), correspondentes aos hidratos, ao hidróxido de cálcio e ao carbonato de cálcio.

Figura 82: Termogravimetria da pasta L0.2 (com fíler calcário).

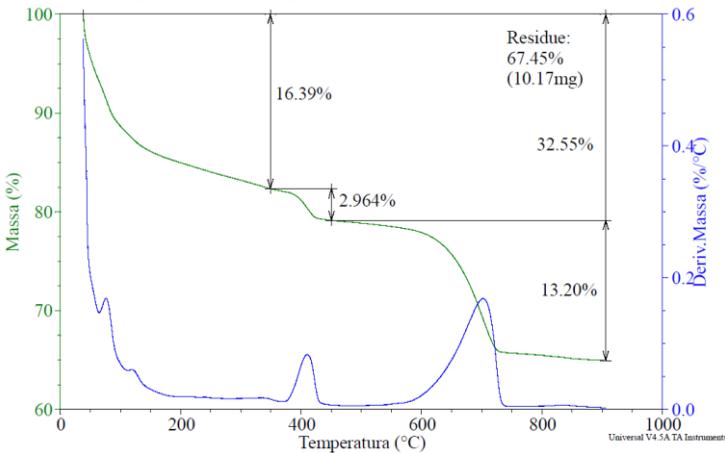


Figura 83: Termogravimetria da pasta D1.2 (com filler diabásico).

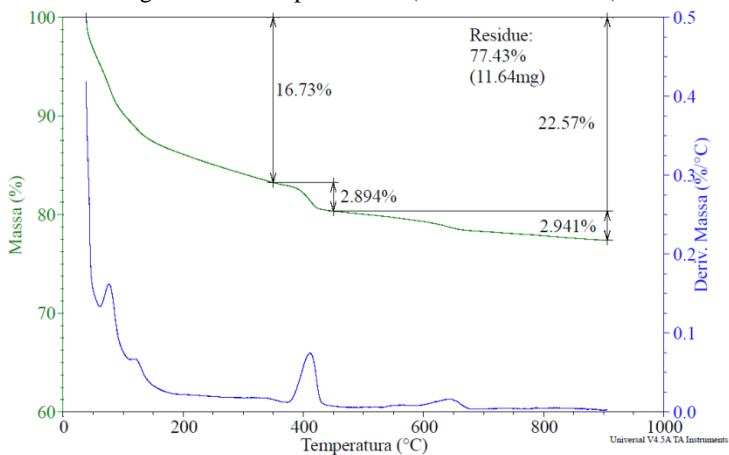


Figura 84: Termogravimetria da pasta G1.2 (com filler gnáissico).

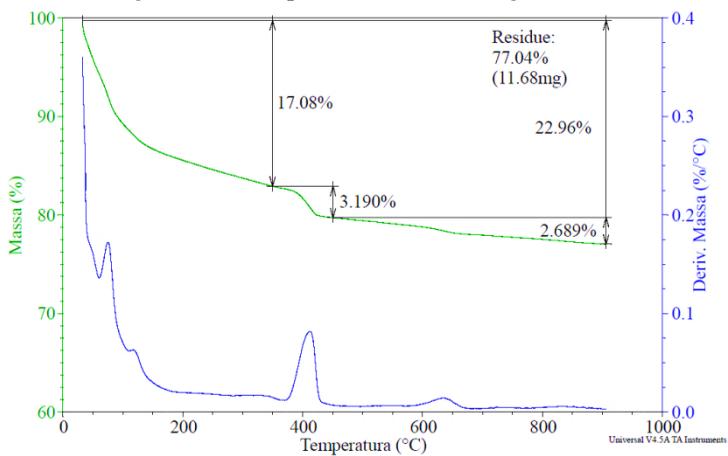
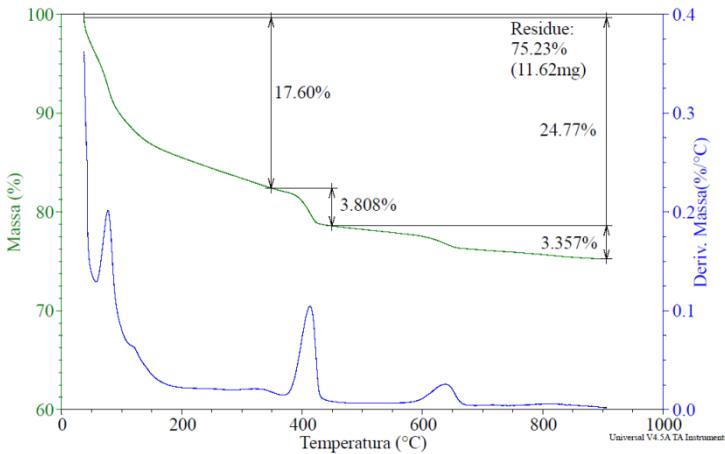


Figura 85: Termogravimetria da pasta C2.2 (dosada somente com cimento).



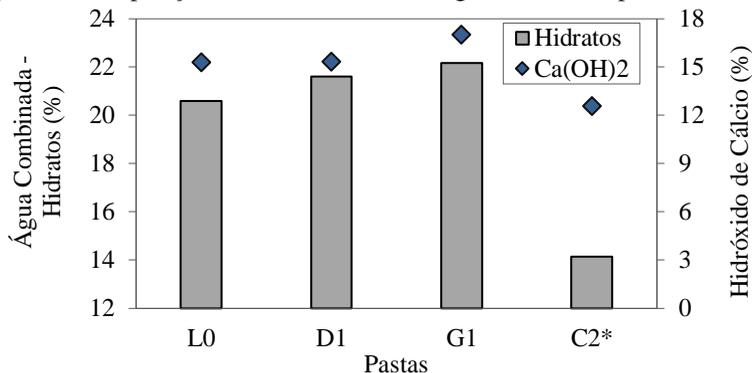
A pasta contendo somente cimento apresentou os maiores picos de água quimicamente combinada nos hidratos e no hidróxido de cálcio (Figura 85). Isso ocorreu pela maior quantidade de cimento na mistura. A relação água/cimento dessa pasta foi menor que a das demais, uma vez que a relação água/finos se manteve constante.

Como a pasta C2.2 era constituída por massa de cimento 60% superior às demais misturas, os resultados referentes aos teores de água quimicamente combinada foram estimados para igualar a massa de cimento presente nas pastas, segundo metodologia proposta por Hoppe (2008) e apresentada no Apêndice E. Dessa forma, para a análise dos resultados, compara-se o teor de hidratos formados na mesma proporção de massa de cimento.

A Figura 86 mostra os percentuais de água quimicamente combinada e o teor de hidróxido de cálcio das pastas obtidos pela análise termogravimétrica. Esses percentuais foram calculados com base nos resultados apresentados nas Figuras 82, 83, 84 e 85 e corrigidos pela massa residual, segundo recomendações de Taylor (1997). Outra correção realizada foi em função da grande perda de massa acima de 500°C na pasta contendo fíler calcário (liberação de CO₂). A presença de fíler diabásico ou gnáissico gera uma menor representação no percentual de carbonato de cálcio em comparação com a pasta contendo fíler calcário. Isso influencia na massa residual que é utilizada para o quantitativo dos produtos hidratados. Segundo Pilar (2012), esses valores devem ser corrigidos para que todas as pastas apresentem o mesmo percentual

relativo de carbonato de cálcio. No Apêndice E, é detalhado como foram realizadas as correções nos percentuais em função da massa residual e da presença de fíler calcário.

Figura 86: Comparação dos resultados de termogravimetria das pastas testadas.



*C2: resultados estimados para a padronização do teor de cimento de todas as pastas.

Pode-se perceber que o uso de fíler de britagem associado ao cimento aumentou o grau de hidratação das pastas. Todas as misturas contendo algum tipo de fíler resultaram em maior quantidade de água quimicamente combinada do que a pasta contendo somente cimento (em relação ao valor teórico estimado). Isso está de acordo com diversos autores, segundo os quais o uso de material inerte na composição de material cimentício modifica a cinética de reação do cimento por aumentar o grau de hidratação (GUTTERIDGE; DALZIEL, 1990; SHARMA; PANDEY, 1999; LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2003; RAHHAL; TALERO, 2005).

Segundo Rahhal e Talero (2005), o maior grau de hidratação do cimento na presença de fíler ocorre devido à nucleação heterogênea dos hidratos. A disponibilidade de novos pontos de nucleação no sistema cimentício estimula a precipitação dos hidratos na superfície dos grãos de cimento e do material inerte. De acordo com Lawrence, Cyr e Ringot (2003), na presença de fíler, a camada de hidratos que recobre os grãos de clínquer possui menor espessura que na pasta de cimento sem a presença de fíler. Dessa forma, leva-se mais tempo para ocorrer uma restrição à solubilização dos anidros, já que parte dos hidratos se precipita sobre as partículas de fíler.

Entre as pastas contendo fílers, o maior teor de água quimicamente combinada e de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberado ocorreu na presença de fíler diabásico e, principalmente, do fíler gnáissico, mostrando que houve aceleração da hidratação do cimento em relação à pasta contendo fíler calcário. Esses resultados remetem à análise do calor total liberado nos ensaios de calorimetria por condução, nos quais pastas contendo fílers diabásico e gnáissico apresentaram valores significativamente mais elevados do que aquelas contendo fíler calcário.

Segundo Hoppe (2008), o material inerte, ao aumentar o grau de hidratação do cimento, atua sobre todas as fases anidras. O efeito físico propiciado por alguns tipos de partículas na cinética de reação é evidente, principalmente nas primeiras idades.

4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CAA NO ESTADO FRESCO

Neste tópico, são apresentados os resultados dos testes tecnológicos e reométricos dos 30 CAAs dosados.

4.3.1 Estabilidade Visual

Os CAAs foram dosados com ajuste de aditivo individual, objetivando uma abertura no *slump flow* entre 64 e 70 cm (67 ± 3 cm). Esse procedimento foi adotado para que todas as misturas pudessem ser classificadas como autoadensáveis e pelo fato de o *slump flow* ser o teste mais utilizado para verificações e ajustes de CAA.

A Tabela 39 mostra o teor de aditivo adicionado em cada mistura para alcançar a fluidez desejada. A primeira avaliação realizada nos concretos foi a estabilidade visual, de acordo com classificação da ASTM C1611.

Apesar de todas as misturas estarem dentro do intervalo de abertura no *slump flow*, algumas apresentaram segregação visível (D0.200, D0.220, D1.220 e G1.180). Isso indica que, para as composições utilizadas, não é possível atingir a fluidez estipulada, isso devido à incapacidade de os finos estabilizarem a mistura. Os concretos que apresentaram segregação foram refeitos, diminuindo a quantidade de aditivo de forma que não houvesse segregação. Os únicos concretos que, após o ajuste de aditivo, apresentaram abertura no *slump flow* fora da faixa estipulada, foram o D0.200 e o G1.180. O concreto D0.200 apresentou abertura no *slump flow* de 56 cm, devendo ser excluído das principais

análises dispostas na sequência. Já o concreto G1.180 mostrou abertura de 60 cm, próxima ao limite inferior estipulado.

Tabela 39: Quantidade de aditivo usado nos CAAs, abertura no *slump flow* e estabilidade visual.

Concreto	Teor de aditivo *	<i>Slump flow</i> (cm)	Estabilidade Visual - EV ASTM C1611	Concretos refeitos		
				Teor de aditivo*	<i>Slump flow</i> (cm)	EV ASTM C1611
L0.180	0,22%	65	0			
L0.200	0,22%	64	0			
L0.220	0,27%	70	1			
L1.180	0,23%	66	0			
L1.200	0,26%	69	1			
L1.220	0,28%	67	0			
L2.180	0,25%	69	0			
L2.200	0,25%	67	0			
L2.220	0,27%	68	0			
D0.180	0,26%	66	0			
D0.200	0,28%	62	2	0,25%	56	1
D0.220	0,31%	69	2	0,29%	67	1
D1.180	0,34%	67	1			
D1.200	0,38%	69	0			
D1.220	0,46%	70	2	0,43%	64	0
D2.180	0,35%	67	1			
D2.200	0,39%	65	0			
D2.220	0,44%	67	0			
G0.180	0,31%	67	0			
G0.200	0,37%	65	0			
G0.220	0,41%	66	0			
G1.180	0,38%	70	3	0,31%	60	0
G1.200	0,42%	65	0			
G1.220	0,46%	65	0			
G2.180	0,39%	69	1			
G2.200	0,40%	69	0			
G2.220	0,45%	69	0			
C2.180	0,37%	69	0			
C2.200	0,40%	64	0			
C2.220	0,50%	67	0			

* Teor de aditivo em relação à massa de finos.

Embora as primeiras misturas dos concretos D0.200, D0.220, D1.220 e G1.180 tenham apresentado instabilidade visível, os ensaios

reológicos foram realizados a fim de verificar a resposta do equipamento para uma situação de segregação. A Figura 87 mostra um exemplo dessas misturas, sendo possível observar a ausência de agregados na superfície.

Figura 87: CAA apresentando segregação.



Os parâmetros reológicos das misturas apresentando segregação constam na Tabela 40. Apesar de a tensão de escoamento estática e da viscosidade mostrarem valores bastante distintos, todas as misturas obtiveram tensão de escoamento dinâmica igual a 0,1 Pa. Isso acontece pela programação do *software* do reômetro, que indica uma tensão de escoamento padrão quando o modelo de Bingham resulta em uma tensão de escoamento negativa. Após o ensaio de tensão de escoamento estática e do *break down*, as misturas, que já apresentavam instabilidade durante o *slump flow*, tiveram sua tensão superficial diminuída e consequente separação de fases. Como o reômetro ICAR não é destinado para ensaios em pastas, o torque inicial negativo ou próximo de zero medido pelo equipamento não é representativo. De acordo com Ferraris e Gaidis (1992), a pasta de cimento pode não apresentar tensão de escoamento, enquanto que o concreto mostra uma tensão de escoamento mais definida. Dessa forma, apesar de não ser o foco do presente trabalho, notou-se que o reômetro ICAR é capaz de sinalizar misturas não conformes em relação à segregação.

Tabela 40: Parâmetros reológicos dos CAAs apresentando segregação.

Concreto	Tensão de Escoamento Estática (Pa)	Modelo de Bingham	
		Tensão de Escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)
D0.200	102,1	0,1	113,2
D0.220	16,8	0,1	14,3
D1.220	58,5	0,1	73,4
G1.180	7,7	0,1	11,3

Conforme apresentado na Tabela 39, o teor de aditivo dos concretos variou de 0,22 a 0,46% em função de mineralogia, D_{50} e volume de finos adicionado. A Tabela 41 mostra a análise de variância, sendo possível constatar que todas as variáveis citadas são igualmente importantes e apresentam alta influência sobre a demanda de aditivo.

Tabela 41: ANOVA - influência de mineralogia, D_{50} e teor de fíler presente na demanda de aditivo dos CAAs.

Parâmetro	Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Teor de aditivo	Mineralogia	0,000010	3	0,000003	34,397	≈100,00%
	Volume	0,000003	2	0,000002	14,789	99,99%
	D_{50}	0,000002	2	0,000001	11,214	99,96%
	Erro	0,000002	22	0,000000		

Percebe-se que, quanto maior o volume de finos presentes, maior a quantidade de aditivo necessária. O teor de aditivo também tende a crescer quanto mais finas são as partículas.

A

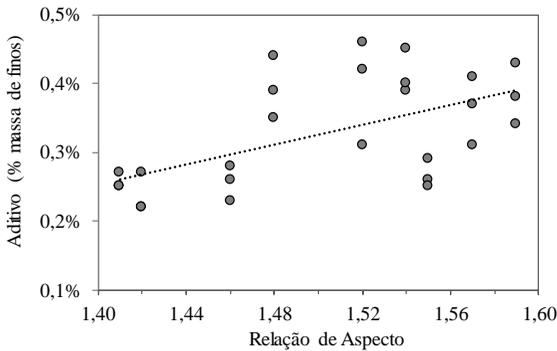
Figura 88 mostra a influência das características das partículas (relação de aspecto, angularidade, rugosidade e área superficial) na demanda de aditivo superplastificante. Pode-se observar que, quanto maior a relação de aspecto e maior a angularidade das partículas presentes, maior a quantidade de aditivo necessária na mistura. Isso ocorre porque partículas mais esféricas movimentam-se mais facilmente, reduzindo a fricção interpartículas. A forma esférica também minimiza a superfície das partículas em relação ao seu volume, ou seja, uma esfera terá a menor superfície específica entre formatos de mesmo volume (RAMACHANDRAN, 1995; FERRARIS; OBLA; HILL, 2001).

Da mesma forma, porém, com maior dispersão, percebeu-se que concretos dosados com partículas com maior fator de forma e com maior área superficial BET demandaram mais aditivo para a fluidez estipulada. De acordo com Esping (2008), apesar de a área superficial das partículas apresentar forte influência na fluidez de concretos autoadensáveis e, conseqüentemente, na viscosidade e na tensão de escoamento da mistura, as diferenças de área superficial podem ser compensadas de forma eficaz com mudanças no teor de água e/ou aditivo na mistura, a fim de manter a fluidez constante.

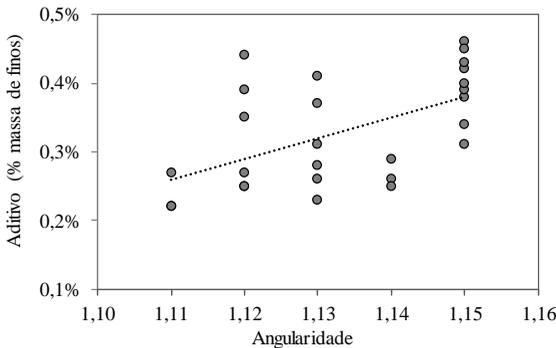
A respeito da rugosidade, percebe-se que foi inversamente proporcional em relação à demanda de aditivo. Isso pode ter ocorrido porque o efeito dos outros parâmetros (relação de aspecto, por exemplo) sobrepõe-se à rugosidade, dificultando uma análise imparcial.

Embora o coeficiente de determinação (R^2) não seja alto para o ajuste linear, utilizando análises estatísticas (regressão linear) por meio da divisão entre a constante da reta e o desvio padrão da inclinação (distribuição t-Student), pode-se concluir que existe uma relação significativa entre o teor de aditivo e a relação de aspecto, angularidade, rugosidade, área superficial BET e fator de forma (FF), com 95% de confiabilidade.

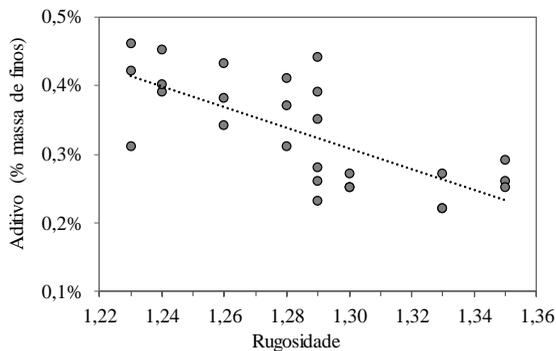
Figura 88: Relação entre a demanda de aditivo dos concretos e as características das partículas. Aditivo versus (a) relação de aspecto; (b) angularidade; (c) rugosidade; (d) área superficial BET; (e) Fator de forma.



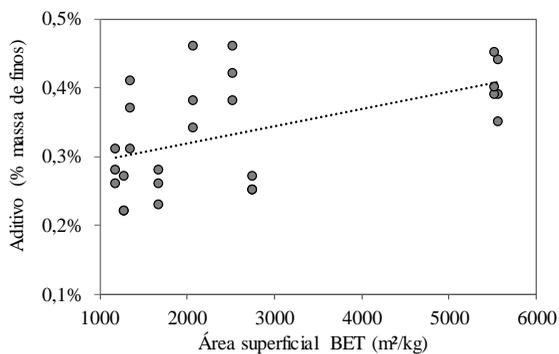
(a)



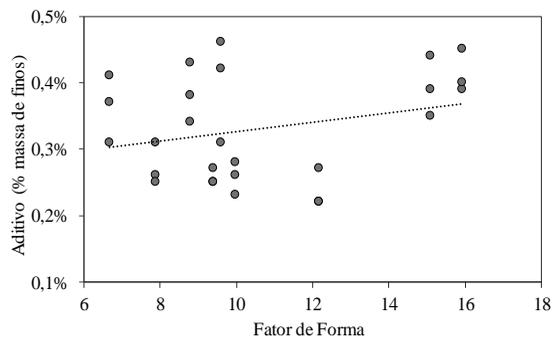
(b)



(c)



(d)



(e)

4.3.2 Ensaios Tecnológicos

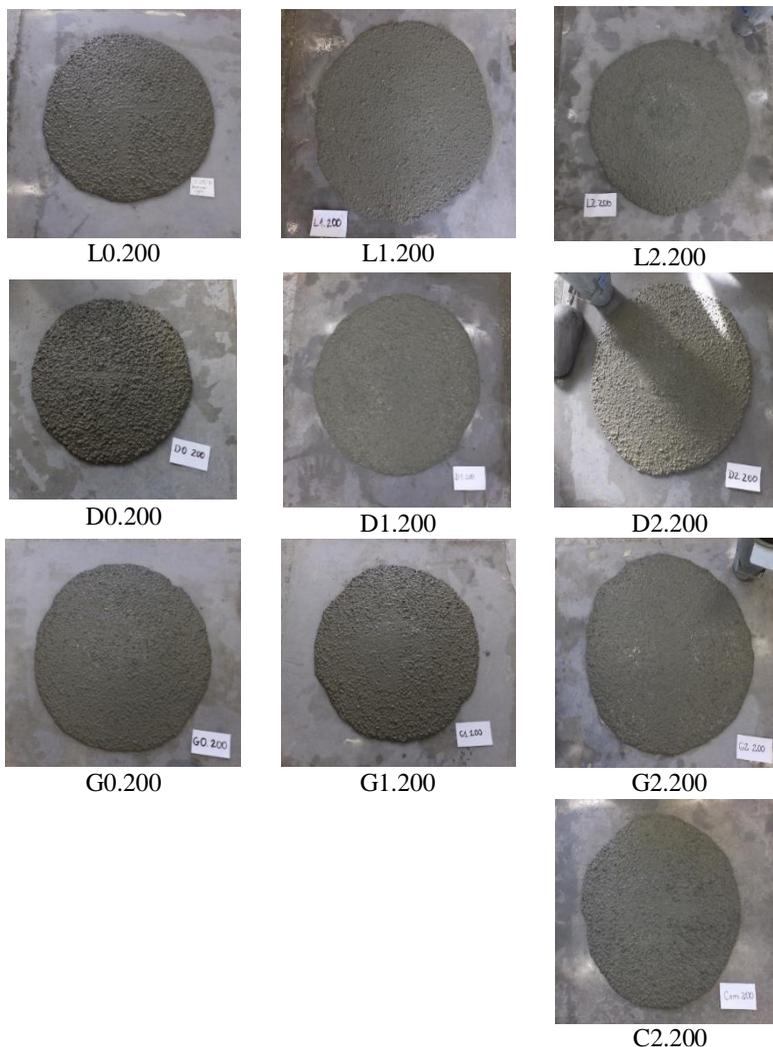
A Tabela 42 mostra os resultados dos ensaios tecnológicos para todos os concretos dosados. A Figura 89 traz exemplos dos CAAs dosados com diferentes mineralogias e diferentes D_{50} dos fílers.

Tabela 42: Resultado dos ensaios tecnológicos dos CAAs.

Concreto	Slump flow (cm)	Funil V (s)	ME (kg/dm ³)	Ar (%)	Anel J		Segregação (mm)
					Slump* (cm)	Diferença** (cm)	
L0.180	65	5,9	2,34	1,7	61,10	3,90	3,0
L0.200	64	4,8	2,34	1,1	55,21	8,29	1,0
L0.220	70	9,5	2,36	1,3	63,45	7,05	2,0
L1.180	66	3,8	2,33	2,3	61,09	4,91	5,0
L1.200	69	6,8	2,33	1,5	68,01	0,99	5,0
L1.220	67	7,4	2,35	1,7	62,30	5,00	3,0
L2.180	69	4,2	2,34	1,9	62,01	6,59	5,0
L2.200	67	4,3	2,36	1,2	63,50	3,20	2,5
L2.220	68	6,0	2,37	0,7	62,20	5,70	2,0
D0.180	66	5,5	2,33	2,5	54,73	11,63	4,0
D0.200	56	3,7	2,35	1,8	42,43	13,47	2,0
D0.220	67	5,2	2,35	2,0	54,26	7,34	2,0
D1.180	67	4,9	2,35	1,6	61,14	5,54	3,0
D1.200	69	9,0	2,36	1,5	60,91	8,31	1,5
D1.220	64	12,2	2,39	0,3	59,00	4,50	1,0
D2.180	67	3,2	2,36	1,0	61,29	6,01	4,0
D2.200	65	5,3	2,37	0,9	57,53	7,57	3,0
D2.220	67	7,1	2,38	0,8	61,39	5,91	2,0
G0.180	67	4,7	2,34	1,6	60,81	5,89	5,0
G0.200	65	5,2	2,36	0,9	60,54	4,86	6,0
G0.220	66	7,2	2,38	0,4	62,69	3,71	5,0
G1.180	60	4,0	2,36	0,9	54,93	5,07	0,0
G1.200	65	5,0	2,37	0,6	60,83	4,26	5,0
G1.220	65	5,5	2,37	0,9	61,44	3,65	5,0
G2.180	69	3,4	2,37	0,4	64,77	4,45	11,0
G2.200	69	4,5	2,38	0,3	66,48	2,42	6,0
G2.220	69	7,5	2,38	0,4	68,28	1,25	6,0
C2.180	69	4,1	2,38	0,9	56,16	5,12	0,0
C2.200	64	6,1	2,40	0,5	59,55	3,95	3,0
C2.220	67	10,0	2,41	0,5	61,95	4,66	2,0

* slump flow com o dispositivo Anel J; ** diferença entre slump flow e slump flow com Anel J; Ar (%): ar incorporado.

Figura 89: Aparência de alguns CAAs dosados com diferentes tipos de filler e mesmo volume de finos.



Percebe-se que as únicas misturas que apresentaram abertura no *slump flow* fora da faixa estipulada foram D0.200 e G1.180. Conforme explanado anteriormente, foram realizadas misturas D0.200 e G1.180 com abertura de 67 ± 3 cm (conforme Tabela 39), mas elas apresentaram segregação e foram descartadas da análise.

Em relação ao tempo de escoamento no funil V, percebe-se que todas as misturas apresentaram valores abaixo de 25 s, que é o limite superior da ABNT NBR 15823 (2010). A classe VF 1 da norma classifica os CAAs com funil V menor ou igual a 8 s como adequados para elementos estruturais de alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle de exsudação e de segregação, principalmente no momento de lançamento. Com exceção das misturas L0.220, D1.200, D1.220 e C2.220, todas as outras 26 misturas enquadraram-se nesse quesito.

Como já era esperado, as maiores massas específicas ocorreram nas misturas dosadas sem fíler, ou seja, somente com cimento (série C2), uma vez que a massa específica do cimento é maior que a dos filers. Nas demais misturas, a massa específica apresentou pequena variação (de 2,33 a 2,38 kg/dm³). O ar incorporado das misturas variou de 0,3% até 2,5%, sendo o valor mais elevado para a mistura D0.180.

No ensaio de anel J, percebeu-se uma tendência ao bloqueio em várias misturas. A ABNT NBR 15823 (2010) estipula uma diferença máxima de 5 cm entre a abertura no *slump flow* sem e com o dispositivo anel J. Os concretos com as maiores tendências de bloqueio foram da série D0 (D0.180 e D0.200), que apresentaram valores acima de 11 cm. Vale salientar que o concreto D0.200 também foi o de menor fluidez (56 cm), podendo haver uma interferência da perda de trabalhabilidade durante a realização do ensaio, uma vez que havia pouco aditivo para garantir a retenção da consistência. De acordo com Flatt e Schober (2012), quando a dosagem de aditivo utilizada na mistura é inferior ao teor de saturação, a manutenção da trabalhabilidade tende a ser reduzida. Já quando a dosagem de aditivo é suficiente para cobrir quase toda a superfície, o concreto tende a manter sua trabalhabilidade por um período mais longo. Aliado a isso, conforme observado nos estudos de pastas, as séries dosadas com diabásio apresentaram as menores manutenções de fluidez de 10 a 40 minutos, sendo creditado esse comportamento à alta adsorção das partículas, verificada no ensaio de azul de metileno.

Os concretos com as melhores resistências ao bloqueio foram aqueles contendo fíler gnáissico. Todas as misturas com esse fíler, independentemente da finura e da quantidade de finos adicionada, apresentaram diferença menor que 6 cm.

A Figura 90 traz uma comparação entre CAAs dosados com diferentes filers, diabásico e gnáissico, sendo possível perceber que a mistura contendo fíler diabásico apresentou bloqueio muito maior do que a mistura contendo fíler gnáissico.

Figura 90: Ensaio de anel J de misturas contendo filer diabásico e gnáissico.

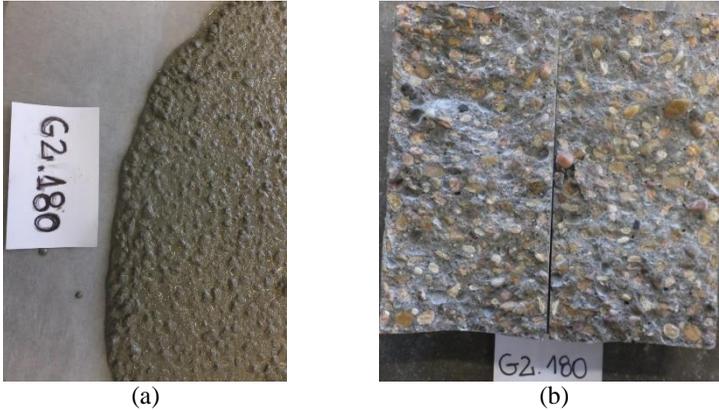


Apesar de nenhuma mistura apresentar segregação visível, algumas mostraram-se mais robustas do que outras. A ASTM C1712 (2014), que prescreve o ensaio de resistência à segregação estática (ensaio de penetração), estabelece que misturas com penetração menor ou igual a 10 mm são consideradas resistentes; até 25 mm, moderadamente resistentes; acima de 25 mm, não são resistentes à segregação. Portanto, com exceção do concreto G2.180, que apresentou a maior penetração (igual a 11 mm), todas as demais misturas enquadram-se na faixa ideal (resistentes à segregação). A Figura 91 traz a extremidade da mistura G2.180 no teste de *slump flow* e um corpo de prova moldado com concreto G2.180 após o rompimento. Percebe-se que não há indícios de segregação. No Apêndice F, estão disponíveis imagens de todos os concretos moldados após o rompimento; em nenhum deles notou-se segregação.

Com exceção do concreto G1.180, que teve abertura no *slump flow* inferior à estipulada, percebe-se que os concretos contendo gnaisse foram os que apresentaram os maiores valores de penetração do dispositivo, o que indica uma menor robustez quanto à segregação. Isso deve-se ao comportamento observado nos ensaios de FBRM, nos quais as pastas contendo gnaisse foram as que mostraram menor floculação. Partículas que favorecem a formação de flocos, como o fíler calcário e o cimento, resultam em misturas mais estáveis devido à maior resiliência dos aglomerados (FERRON, 2008). Segundo Kuder et al. (2007), a presença de partículas que favorecem a floculação do sistema melhora a coesão dos materiais à base de cimento. Aliado a isso, de acordo com Yammine et al. (2008), existe uma forte transição no comportamento de uma mistura cimentícia no estado fresco entre um regime dominado pelo atrito entre

partículas agregadas e um regime domina por interações hidrodinâmicas menos expressivas.

Figura 91: Estabilidade da mistura G2.180 – a) borda da mistura no *slump flow*; b) corpo de prova moldada com concreto G2.180 após o rompimento, sem indícios de segregação.



4.3.3 Reometria

Os resultados dos testes reológicos estão organizados em dois grupos: tensão de escoamento estática e curvas de fluxo (tensão de escoamento dinâmica e viscosidade).

4.3.3.1 Tensão de Escoamento Estática

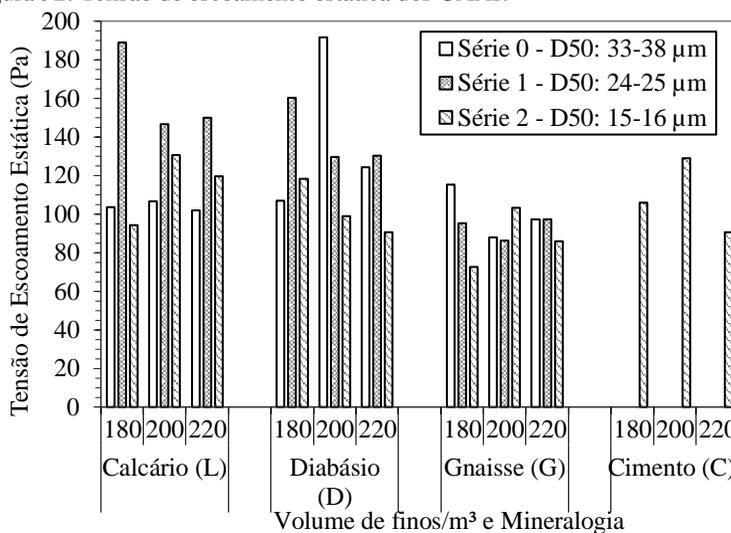
A Figura 92 compara a tensão de escoamento estática das 30 misturas realizadas. A tensão de escoamento estática é uma consequência da estruturação do material (OVARLEZ, 2012). Pode-se perceber que, de maneira geral, as misturas contendo fíler gnáissico foram as que apresentaram as menores tensões de escoamento estáticas. Esse resultado remete às conclusões de floculação obtidas em pastas com o ensaio de FBRM, no qual se constatou que misturas contendo gnaissse tinham menor tendência à formação de aglomerados.

O maior valor ocorreu na mistura D0.200, que também foi a mistura que apresentou o menor espalhamento no *slump flow*. Excluindo essa mistura da análise, uma vez que ela não apresentou a fluidez estipulada, percebe-se que, para as misturas contendo calcário e diabásio, os concretos contendo as partículas de tamanho intermediário (D_{50} de 24-

25 μm , série X1.X) foram aqueles com as maiores tensões de escoamento estática.

Apesar dos diferentes concretos apresentarem trabalhabilidade similar (abertura no *slump flow* de 67 ± 3 cm), a tensão de escoamento estática diferiu significativamente. Isso acontece porque o teste do *slump flow* não é influenciado por apenas uma propriedade física. Ferraris et al. (2000) testaram 13 concretos com o mesmo *slump flow* com o ajuste na dosagem de superplastificante. Essas misturas mostraram uma grande gama de propriedades de fluxo. Jau e Yang (2010) estudaram CAA contendo VMA e concluíram que misturas com a mesma trabalhabilidade apresentaram grandes diferenças no torque inicial estático e na viscosidade dos concretos. Portanto, os resultados de *slump flow* de forma isolada não são capazes de informar sobre a habilidade de escoamento do concreto (JAU; YANG, 2010).

Figura 92: Tensão de escoamento estática dos CAAs.



A Tabela 43 mostra a influência da mineralogia, D_{50} e teor de filler na tensão de escoamento estática dos concretos por meio de análise estatística de variância. Somente os fatores individuais puderam ser analisados. Efeitos de segunda e terceira ordem não foram mensurados porque não houve repetições dos concretos. Os fatores em ordem de influência para a tensão de escoamento estática são mineralogia, D_{50} e, por último, com baixa influência, o volume de finos presentes.

Tabela 43: ANOVA - influência da mineralogia, D_{50} e volume filer presente nos parâmetros reológicos dos concretos.

Parâmetro	Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Tensão de Escoamento Estática	Mineralogia	7016,8	3	2338,9	4,1278	98,2%
	D_{50}	4077,1	2	2038,5	3,5977	95,6%
	Volume	753,2	2	376,6	0,6646	47,5%
	Erro	12465,8	22	566,6		

4.3.3.2 Curvas de Fluxo

As Figuras 93 e 94 mostram as curvas de fluxo dos concretos, em torque por rps, medidas com o reômetro ICAR quando da aplicação de diferentes patamares de rotação (0,5; 0,43; 0,35; 0,27; 0,20; 0,13; e 0,05 rps). Entretanto, os resultados em torque *versus* velocidade de rotação devem ser convertidos para unidades físicas fundamentais, a fim de minimizar a influência de detalhes geométricos específicos do reômetro com o qual foram medidos (dimensões da pá, por exemplo) (WALLEVIK; WALLEVIK, 2011).

Percebe-se, pelo comportamento das curvas, que a maioria das misturas apresenta perfil reológico classificado como plástico de Bingham (reta) ou como dilatante (*yield-dilatant*). Embora o reômetro ICAR forneça os parâmetros fundamentais pelo modelo de Bingham, neste trabalho, as curvas de fluxo foram analisadas também pelo Bingham modificado. Com esse modelo e por meio da relação c/μ , é possível avaliar o espessamento por cisalhamento.

De acordo com Feys et al. (2013) e Wallevik et al. (2015), é recomendada a utilização de modelos reológicos simples para descrever o comportamento de concretos, como o modelo de Bingham. Se observada a não linearidade dos dados, os autores sugerem o uso de Bingham modificado ao invés da aplicação do modelo de Herschel-Bulkley, uma vez que a tensão de escoamento medida por este último é sujeita a grande variação para pequenos desvios de leituras no reômetro.

Figura 93: Curvas de fluxo dos CAAs dosados com fíler medidas no reômetro ICAR.

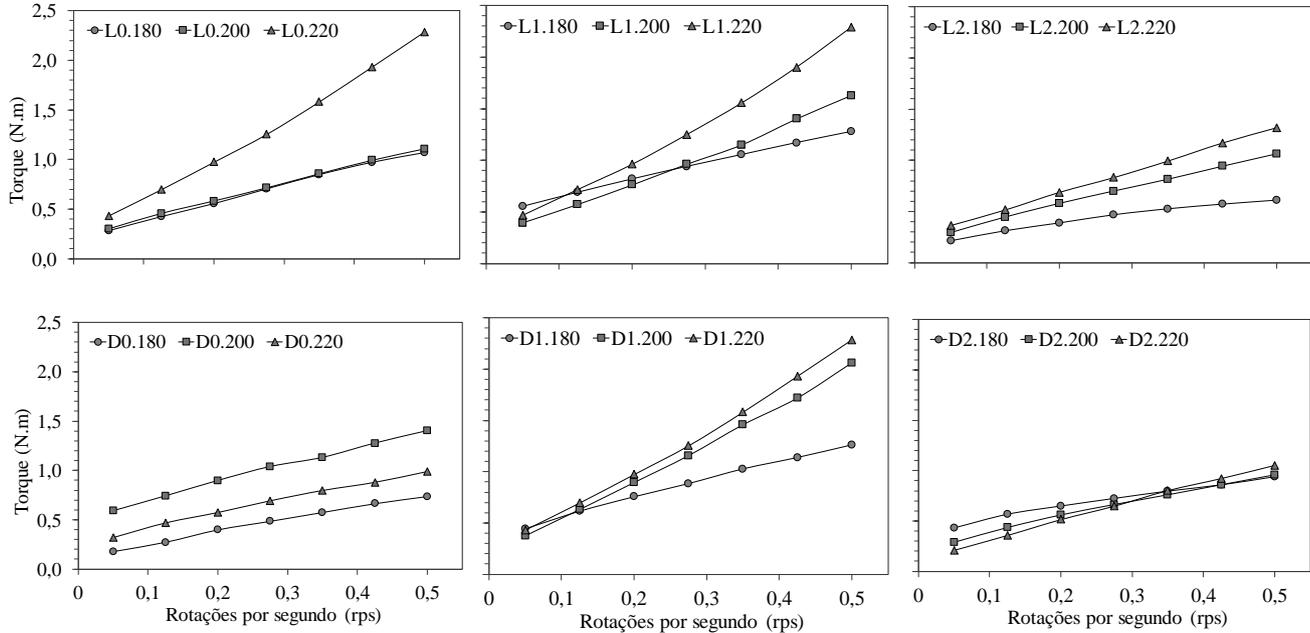


Figura 93: Curvas de fluxo dos CAAs dosados com fíler medidas no reômetro ICAR. (continuação)

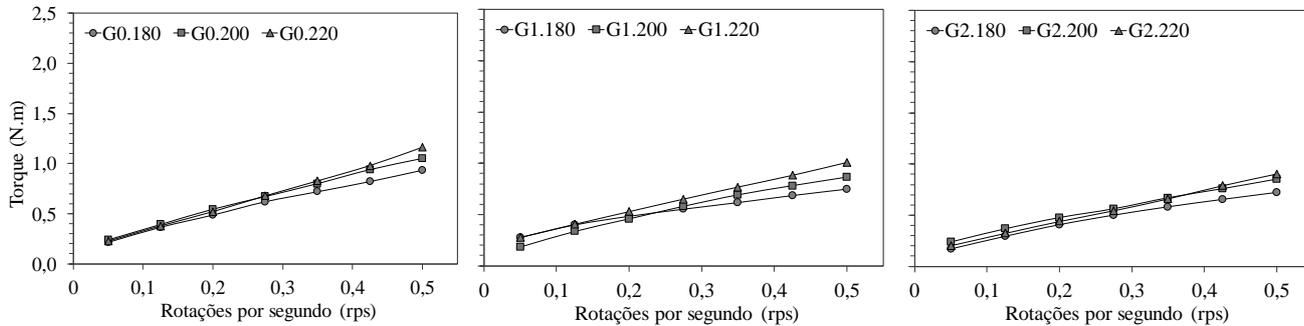
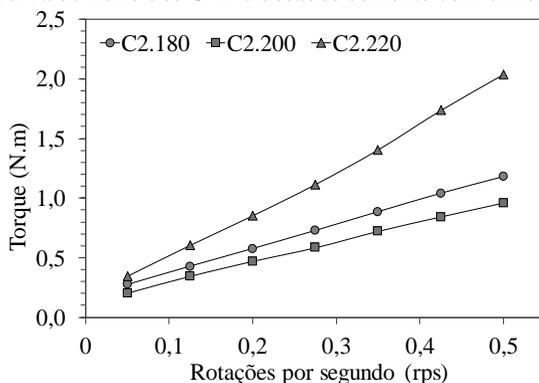


Figura 94: Curva de fluxo dos CAAs dosados somente com cimento.



4.3.3.2.1 Parâmetros Reológicos por Bingham Modificado

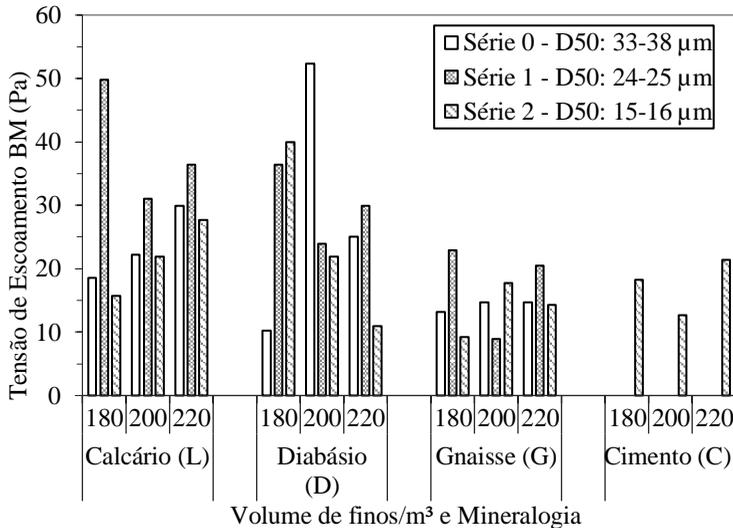
Os parâmetros obtidos pelo modelo reológico Bingham modificado (Equações 19-23) estão apresentados na Tabela 44. O coeficiente de determinação (R^2) de todas as curvas foi igual ou superior a 0,99. Para uma melhor análise, a tensão de escoamento está também apresentada na Figura 95.

Tabela 44: Parâmetros reológicos obtidos pelo modelo Bingham modificado.

Concreto	Tensão de Escoamento Dinâmica (Pa)	μ Termo Linear (Pa.s)	c - Termo de Segunda Ordem (Pa.s ²)	c/μ	c/μ arredondado
L0.180	18,6	31,2	-1,1	-0,03526	0,0
L0.200	22,2	29,0	-0,5	-0,01724	0,0
L0.220	29,9	45,4	3,8	0,08370	0,1
L1.180	49,8	27,7	-0,9	-0,03249	0,0
L1.200	31,0	31,6	2,2	0,06962	0,1
L1.220	36,4	38,4	5,1	0,13281	0,1
L2.180	15,7	21,4	-2,0	-0,09346	-0,1
L2.200	21,9	28,5	-0,8	-0,02807	0,0
L2.220	27,7	31,0	0,2	0,00645	0,0
D0.180	10,2	23,7	-1,2	-0,05063	-0,1
D0.200	52,3	31,3	-1,1	-0,03514	0,0
D0.220	25,0	27,6	-1,4	-0,05072	-0,1
D1.180	36,4	33,1	-1,5	-0,04532	0,0
D1.200	23,9	46,5	2,0	0,04301	0,0
D1.220	29,9	45,4	3,8	0,08370	0,1
D2.180	40,0	22,4	-1,6	-0,07143	-0,1

Concreto	Tensão de Escoamento Dinâmica (Pa)	μ Termo Linear (Pa.s)	c - Termo de Segunda Ordem (Pa.s ²)	c/ μ	c/ μ arredondado
D2.200	21,9	28,1	-1,6	-0,05694	-0,1
D2.220	10,9	32,0	-1,0	-0,03125	0,0
G0.180	13,2	29,5	-1,5	-0,05085	-0,1
G0.200	14,7	31,4	-1,1	-0,03503	0,0
G0.220	14,7	27,3	0,8	0,02930	0,0
G1.180	22,9	21,9	-1,6	-0,07306	-0,1
G1.200	8,9	31,5	-2,2	-0,06984	-0,1
G1.220	20,5	25,4	-0,3	-0,01181	0,0
G2.180	9,2	26,8	-2,1	-0,07836	-0,1
G2.200	17,7	24,0	-1,0	-0,04167	0,0
G2.220	14,3	22,1	0,2	0,00905	0,0
C2.180	18,3	30,5	-0,1	-0,00328	0,0
C2.200	12,7	26,6	-0,4	-0,01504	0,0
C2.220	21,4	44,2	2,8	0,06335	0,1

Figura 95: Tensão de escoamento determinada pelo modelo Bingham modificado.



Com exceção das misturas D0.200 (com abertura do *slump flow* fora da faixa estipulada) e L1.180, todas os demais CAAs apresentaram tensão de escoamento inferior a 40 Pa. Não há uma razão clara para o

comportamento atípico do concreto L1.180; essa mistura também foi a que apresentou maior tensão de escoamento estática entre os concretos dosados com calcário. Esse efeito pode ser consequência de um empacotamento menos eficiente, gerado simultaneamente pela distribuição granulométrica do fíler e o volume presente. Segundo Chateau (2012), quanto menor a densidade de empacotamento das partículas, menos fluida será a mistura para um volume fixo de partículas. A análise da influência do empacotamento de partículas na reologia dos CAAs está fora do escopo do presente trabalho.

Embora nem todos os concretos sigam a mesma tendência, as misturas contendo fíler gnáissico são as que apresentam os menores valores de tensão de escoamento. Os concretos contendo fíler calcário mostraram os maiores valores de tensão entre as partículas com D_{50} de 33-38 μm e D_{50} de 24-25 μm , independentemente do volume de finos adicionado.

Em relação ao volume de finos presentes, os concretos contendo partículas com D_{50} intermediário apresentaram a menor tensão com 200 litros de finos, o que parece ser um valor otimizado para esses concretos, assim como para a série contendo somente cimento.

No modelo de Bingham modificado, a relação entre o termo de segunda ordem e o termo linear pode ser usada para descrever o comportamento não linear da mistura. Quando $c/\mu < 0$, a mistura é considerada não dilatante (*shear thinning*); quando $c/\mu > 0$, ocorre o espessamento por cisalhamento (*shear thickening*); e quando $c/\mu = 0$, corresponde ao modelo de Bingham (reta).

Percebe-se que concretos dosados com fíler calcário e somente com cimento apresentaram maior tendência ao espessamento (C2.220, L0.220, L1.200 e L1.220). Além deles, os concretos D1.200 e D1.220 também mostraram esse comportamento, porém, menos pronunciado, uma vez que no arredondamento dos valores de c/μ com apenas uma casa decimal, somente o D1.220 apresentou valor igual a 0,1. As misturas contendo gnaisse foram aquelas em que ocorreu o menor espessamento por cisalhamento. As misturas G0.220 e G2.220 apresentaram valores positivos de 0,029 e 0,009, respectivamente. Conforme exposto na última coluna da Tabela 44, se os valores fossem arredondados para uma casa decimal, os concretos contendo gnaisse estariam classificados como não dilatantes.

O efeito de espessamento por cisalhamento ocorre quando a distância entre duas superfícies sólidas tende a zero, ou seja, quando há tendência à floculação (ROUSSEL, 2012). Dessa forma, esses resultados confirmam as conclusões obtidas em pastas com FBRM, quando se

percebeu que as misturas contendo gnaissé apresentavam as menores floculações, logo, com menor tendência ao espessamento.

Nota-se também que o espessamento por cisalhamento aconteceu em misturas com maior volume de finos por m³, sendo que nenhum concreto com o menor volume de finos (180 litros) apresentou esse comportamento. Segundo Barner (1989), quanto maior o volume de partículas na suspensão, mais severo é o espessamento.

A deformação imposta em suspensões concentradas tende a empurrar as partículas muito próximas umas das outras, conduzindo a energias muito elevadas; conseqüentemente, induz ao espessamento (ROUSSEL, 2012). Segundo Pileggi (2001), a ausência de finos pode dificultar a movimentação das partículas maiores. No entanto, finos em excesso podem gerar um comportamento dilatante, pois a quantidade de água disponível para o afastamento das partículas no sistema reduz com o aumento da área específica das partículas.

A fim de ratificar as conclusões, a Tabela 45 mostra a análise estatística de variância para os parâmetros obtidos pelo modelo de Bingham modificado. Na tensão de escoamento, a mineralogia dos fílers é o único fator influente, com 95% de confiabilidade. Já nos resultados de c/μ , todos os fatores (mineralogia, D_{50} e volume de fílers) são influentes, com 95% de confiabilidade, sendo que o fator de maior importância é o volume de finos.

Tabela 45: ANOVA - influência da mineralogia, D_{50} e volume fíler presente nos parâmetros reológicos obtidos pelo modelo de Bingham modificado.

Parâmetro	Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
σ_0	Mineralogia	1006,42	3	335,47	3,3926	96,4%
	D_{50}	385,02	2	192,51	1,9468	83,3%
	Volume	2,52	2	1,26	0,0127	1,3%
	Erro	2175,44	22	98,88		
Relação c/μ	Mineralogia	0,016822	3	0,005607	4,36856	98,5%
	D_{50}	0,012627	2	0,006314	4,91886	98,3%
	Volume	0,036190	2	0,018095	14,09781	100,0%
	Erro	0,028238	22	0,001284		

4.3.3.2.2 Parâmetros Reológicos de Bingham

Considerando que a relação c/μ frequentemente é maior que 1, podendo chegar a 3 (GUNEYISI et al., 2013; LI et al., 2017) para misturas com grande tendência ao espessamento por cisalhamento, todos os CAAs dosados apresentaram baixa relação c/μ , inferior a 0,13 (ver Tabela 44),

indicando uma tendência ao comportamento linear.

Conforme discutido na revisão de literatura, misturas de concreto são frequentemente caracterizadas pelo modelo de Bingham, e há evidências consideráveis de que a reologia de materiais à base de cimento está em conformidade com esse modelo reológico (TATTERSALL, 1991; BANFILL, 2003; ROUSSEL, 2012). Como muitos concretos apresentaram tendência linear, além da aplicação do modelo de Bingham modificado, os parâmetros reológicos pelo modelo de Bingham também foram determinados. Por esse modelo, é possível analisar a tensão de escoamento e a viscosidade plástica das misturas.

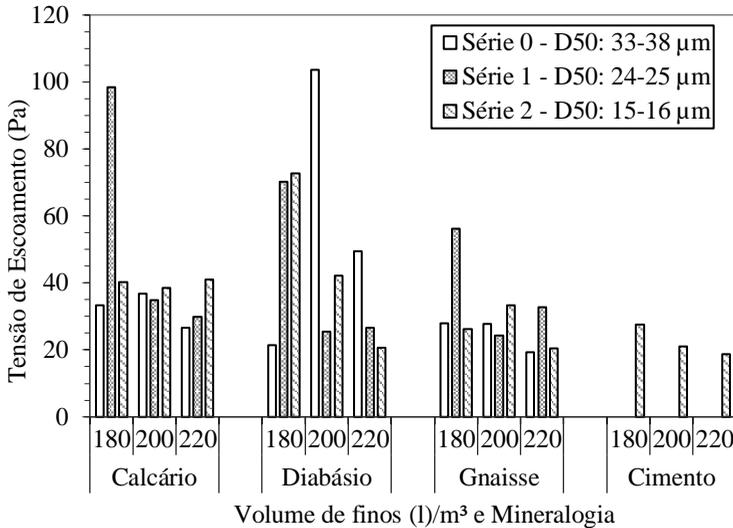
A Figura 96 apresenta os valores de tensão de escoamento dos CAAs calculada pelo modelo de Bingham. Analisando os concretos contendo calcário, percebe-se que, com exceção da mistura L1.180, todas as demais apresentaram tensão de escoamento dinâmica entre 27 e 41 Pa. A mistura L1.180 resultou na maior tensão de escoamento entre as misturas contendo fíler calcário, tanto pelo modelo de Bingham quanto pelo Bingham modificado.

Concretos dosados com fíler diabásico apresentaram maior dispersão dos valores de tensão de escoamento em função do D_{50} e do volume de finos. A mistura D0.200 mostrou a maior tensão de escoamento devido à pequena abertura no *slump flow* (fora da faixa estipulada). Além dessa mistura, os concretos D1.180 e D2.180 também apresentaram valores elevados.

Com exceção do concreto G1.180, todas as demais misturas contendo gnaiss apresentaram tensão de escoamento entre 20-33 Pa. Já os concretos contendo somente cimento mostraram valores entre 19 e 28 Pa.

Com exceção da mistura D0.200 (com abertura no *slump flow* de 56 cm), as séries contendo 180 litros de finos foram as que apresentaram os valores mais elevados de tensão de escoamento para cada tipo de fíler empregado. Percebe-se que a presença de partículas com D_{50} entre 24-25 μm conduziu aos maiores valores de tensões de escoamento na série 180 litros. Com o aumento do volume de finos, não foi observada a mesma tendência em função do D_{50} das partículas empregadas, embora a tensão de escoamento tenha sido semelhante. Por fim, comparando as misturas contendo as partículas mais finas de fíler (D_{50} de 15-16 μm), as séries contendo fíler calcário tiveram valores próximos a 40 Pa, independentemente da quantidade de fíler da mistura. As séries G2 e C2, apresentaram valores entre 20 e 30 Pa, enquanto que a série D2 foi a que mostrou as maiores variações em relação à quantidade de fíler presente, de 20,6 a 72,8 Pa.

Figura 96: Tensão de escoamento dinâmica dos CAAs determinada pelo modelo de Bingham.

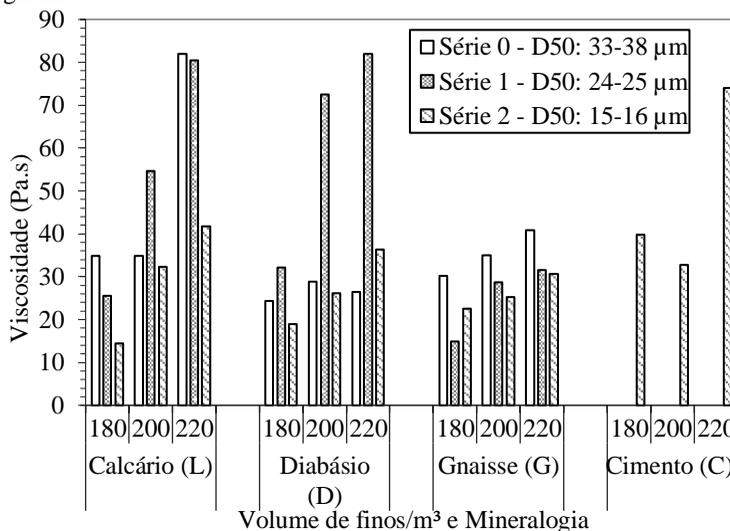


A Figura 97 mostra a viscosidade dos 30 CAAs dosados. De maneira geral, as misturas contendo filer gnáissico foram as que apresentaram as menores viscosidades, seguidas das misturas contendo filer diabásico (com exceção da D1.200 e da D1.220). Dos concretos contendo filer gnáissico, a série G0 foi a que mostrou os maiores valores de viscosidade. O menor valor ocorreu no concreto G1.180, que também foi aquele que apresentou a maior tensão de escoamento entre os concretos dosados com gnaíse. A tendência de as misturas contendo gnaíse apresentarem menor viscosidade já havia sido constatada nos estudos de pastas, sendo que se atribui esse comportamento à menor disposição à floculação das misturas contendo essa mineralogia de filer.

Comparando misturas contendo filers com D_{50} de 32-38 μm , percebe-se que a série L0 foi a que apresentou as maiores viscosidades, independentemente do volume de filers presente. Em relação a misturas contendo filers com granulometria intermediária (D_{50} de 24-25 μm), os maiores valores de viscosidade ocorreram com o uso de filer diabásico. Por fim, usando finos com D_{50} de 15-16 μm , os maiores valores de viscosidade ocorreram nos concretos contendo somente cimento, sendo que as séries com filer calcário e diabásico apresentaram valores muito próximos.

Em relação à quantidade de finos por m^3 de concreto, como era esperado, a maior viscosidade ocorreu para o volume de 220 litros, diminuindo quando a quantidade de finos presente diminuía. Para Krieger e Dougherty (1959 apud CEPURITIS et al., 2016), o efeito das partículas em uma suspensão dependerá fortemente da sua concentração de sólidos. Menos água livre resulta em menos distância entre partículas e, conseqüentemente, no aumento da viscosidade plástica (JIN, 2002). Segundo Ferraris e Larrard (1998), a relação entre a distribuição do tamanho das partículas, sua forma e seu volume estabelece a reologia do concreto. Sfikas, Badogiannis e Trezos (2014) estudaram CAA com diferentes volumes de finos; embora tenham realizado ajustes no aditivo, misturas com maior teor de finos demandaram maior quantidade de superplastificante e, ainda assim, resultaram em concretos com maiores viscosidades.

Figura 97: Viscosidade plástica dos CAAs determinada pelo modelo de Bingham.



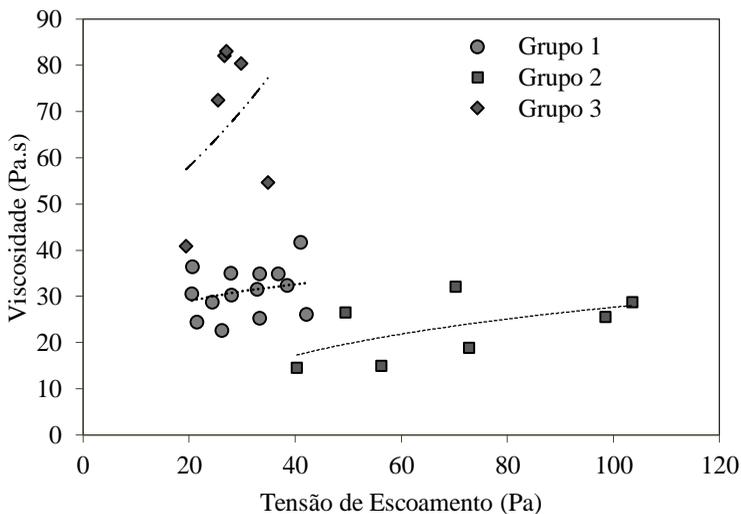
Analisando simultaneamente a tensão de escoamento e a viscosidade, percebeu-se três grupos de misturas, conforme suas propriedades reológicas:

- tensão de escoamento moderada e viscosidade moderada;
- tensão de escoamento alta e viscosidade baixa; e
- tensão de escoamento baixa e viscosidade alta.

No primeiro grupo, pode-se citar as misturas com tensão de escoamento próxima a 30-35 Pa e viscosidade de aproximadamente 30 Pa.s, conforme observado nas misturas L0.180, L0.200, L2.200, G0.180, G0.200 e G1.220. No segundo grupo, estão misturas que apresentaram elevada tensão de escoamento e viscosidade baixa, que é o caso das misturas L1.180 (98,5 Pa e 25,5 Pa.s), L2.180 (40,3 Pa e 14,5 Pa.s), D2.180 (72,8 Pa e 18,9 Pa.s) e G1.180 (56,2 Pa e 14,9 Pa.s). O contrário também foi observado, ou seja, baixas tensões de escoamento e altas viscosidades, completando o terceiro grupo com os concretos L1.220 (29,8 Pa e 80,4 Pa.s), D1.200 (25,5 Pa e 72,5 Pa.s) e D1.220 (26,7 Pa e 82 Pa.s). Essa tendência entre a viscosidade e a tensão de escoamento pode ser observada na Figura 98. Os pontos plotados estão divididos nos grupos e as linhas de tendência dos pontos indicam o comportamento anteriormente explanado.

Diante desses resultados, percebe-se que a tensão de escoamento e a viscosidade atuam juntas na garantia da estabilidade da mistura, de forma que quando a viscosidade for muito baixa, a tensão de escoamento deve ser alta, sendo o contrário válido. Essa conclusão está de acordo com o observado por Níelsson e Wallevik (2003).

Figura 98: Relação entre viscosidade e tensão de escoamento dos CAAs.



O comportamento reológico observado no presente estudo está em concordância com outras pesquisas nesta área. Jau e Yang (2010) testaram

CAA contendo diferentes tipos de finos e concluíram que misturas com as mais altas tensões de escoamento conduziram aos menores valores de viscosidade. Wallevik e Wallevik (2011) constataram que concretos com tensão de escoamento elevada, por exemplo, superior a 300 Pa, só eram viáveis quando a viscosidade da mistura era menor que 40 Pa.s. Os autores desenvolveram gráficos correlacionando tensão de escoamento e viscosidade recomendados para diferentes concretos, sendo que a tendência observada foi muito semelhante ao apresentado na Figura 98.

Com a análise dos resultados reológicos, pode-se notar que há certa influência do tamanho do fino (D_{50}) na relação entre tensão de escoamento e viscosidade para que a mistura se mantenha autoadensável e estável. Nos concretos contendo filer calcário, a mistura L2.180, por exemplo, que é constituída por partículas mais finas que a mistura L1.180, conseguiu ficar estável a uma viscosidade baixa e a uma tensão de escoamento moderada (14,5 Pa.s e 40,3 Pa). A mistura contendo partículas com tamanho maior, L1.180, necessitou de 98,5 Pa de tensão de escoamento quando a viscosidade ficou próxima a 35 Pa.

A fim de ratificar as conclusões sobre as variáveis dos testes, a Tabela 46 mostra a influência da mineralogia, D_{50} e teor de filer nos parâmetros reológicos de Bingham dos concretos por meio de análise estatística de variância. Somente os fatores individuais puderam ser analisados. Efeitos de segunda e terceira ordem não foram mensurados porque não houve repetições dos concretos.

Tabela 46: ANOVA - influência da mineralogia, D_{50} e volume filer presente nos parâmetros reológicos de Bingham dos CAAs.

Parâmetro	Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Tensão de Escoamento Dinâmica	Mineralogia	2285,41	3	761,80	1,20280	66,8%
	D_{50}	400,21	2	200,11	0,31594	26,8%
	Volume	2688,56	2	1344,28	2,12246	85,6%
	Erro	13933,89	22	633,36		
Viscosidade	Mineralogia	1691,10	3	563,70	2,7103	93,0%
	D_{50}	1326,08	2	663,04	3,1880	93,9%
	Volume	3817,02	2	1908,51	9,1763	99,9%
	Erro	4575,60	22	207,98		

O fator analisado é considerado com influência significativa quando a probabilidade é maior ou igual a 95%, portanto, percebe-se que tanto a mineralogia quanto o D_{50} não apresentam influência significativa nos parâmetros de Bingham. Conforme comentado anteriormente,

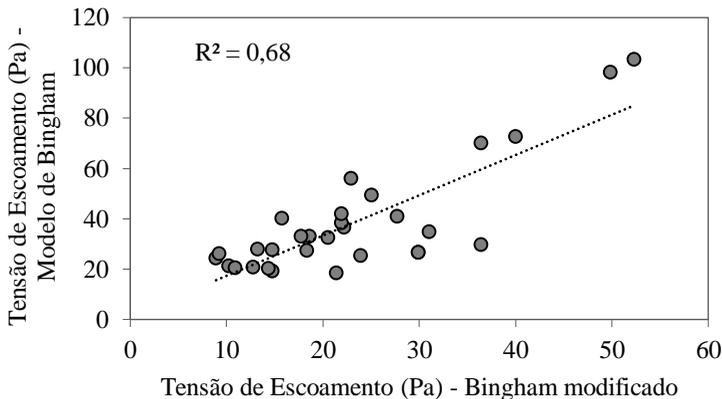
confirma-se estatisticamente que o valor de viscosidade é influenciado pelo volume de finos presente, com 99,9% de confiabilidade.

4.3.3.2.3 Tensão de Escoamento: Bingham Modificado e Bingham

Comparando-se os valores de tensão de escoamento dinâmica obtidos pelo modelo de Bingham modificado e pelo modelo de Bingham, percebeu-se algumas diferenças. Os concretos L1.180 e D0.200, por exemplo, apresentaram 50 e 52 Pa pelo Bingham modificado, enquanto que no modelo de Bingham, os valores foram 99 e 104 Pa, respectivamente. Por outro lado, a mistura L1.220 apresentou 36 Pa pelo Bingham modificado e 30 Pa pelo modelo de Bingham. Conforme explanado por Wallevik et al. (2015), foi observado que, em misturas com menor tendência ao espessamento por cisalhamento, os valores obtidos pelo modelo de Bingham foram maiores do que aqueles obtidos pelo Bingham modificado. O oposto ocorreu com as misturas mais dilatantes. Apesar disso, os valores da tensão de escoamento medidos por ambos os modelos reológicos não apresentaram diferenças na ordem de grandeza para a maioria dos concretos estudados.

A Figura 99 apresenta a correlação entre os valores de tensão de escoamento calculados pelos dois modelos reológicos. Embora o coeficiente de determinação (R^2) não seja alto para o ajuste linear, uma análise estatística pela distribuição de T-Student mostra que, com 95% de confiabilidade, pode-se dizer que existe uma relação significativa entre as variáveis.

Figura 99: Relação entre a tensão de escoamento dinâmica determinada pelos modelos de Bingham e Bingham modificado.



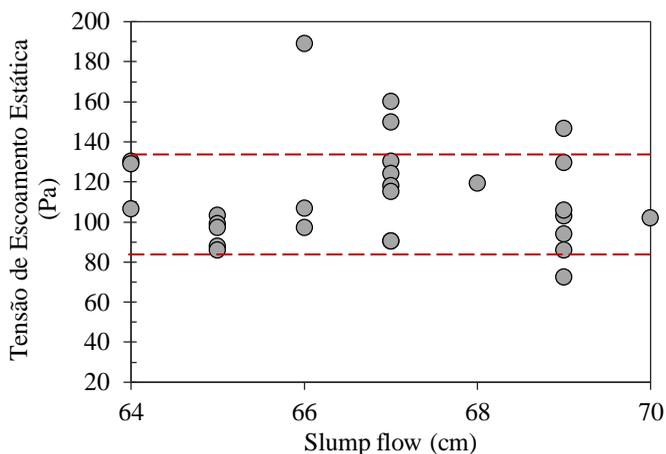
4.3.4 Correlação entre Reologia e Testes Tecnológicos

Como os principais testes tecnológicos realizados no CAA consistem na abertura do *slump flow* e no funil V, neste tópico, são correlacionados os resultados desses dois ensaios com os parâmetros reológicos medidos em todas as misturas dosadas.

Embora os resultados de abertura obtidos pelo ensaio *slump flow* tenham sido na faixa de 67 ± 3 cm, essa pequena variação pode gerar misturas com diferentes características de fluxo.

Percebe-se que, para a faixa de *slump flow* obtida, a maioria dos valores de tensão de escoamento estática concentra-se entre 80 e 130 Pa, aproximadamente, conforme pode ser observado na Figura 100.

Figura 100: Relação entre a tensão de escoamento estática e a abertura do *slump flow* dos CAAs.



As Figuras 101 e 102 mostram a relação entre a abertura no *slump flow* e a tensão de escoamento dinâmica determinada pelos modelos de Bingham modificado e Bingham, respectivamente. Em relação aos valores determinados por Bingham modificado, pode-se perceber que a maioria deles se concentra em 10-30 Pa. Considerando os valores obtidos pelo modelo de Bingham, observou-se maior frequência entre 20 e 40 Pa, embora não haja uma relação clara entre essas duas variáveis. De acordo com Roussel (2007) e Roussel (2012), no caso de CAA, o espalhamento medido pelo *slump flow* não pode ser correlacionado com a tensão de escoamento da mistura testada porque o teste do *slump flow* não proporciona um fluxo homogêneo da mistura. Isso acontece devido à

baixa relação entre a espessura do concreto no final do teste e o diâmetro das partículas presentes. Segundo Coussot e Ancey (1999), a espessura da amostra quando o escoamento cessa deve ser, no mínimo, cinco vezes maior que o diâmetro máximo dos agregados para que seja considerado o fluxo homogêneo de uma mistura.

Figura 101: Relação entre a tensão de escoamento dinâmica determinada por Bingham modificado e a abertura do *slump flow* dos CAAs.

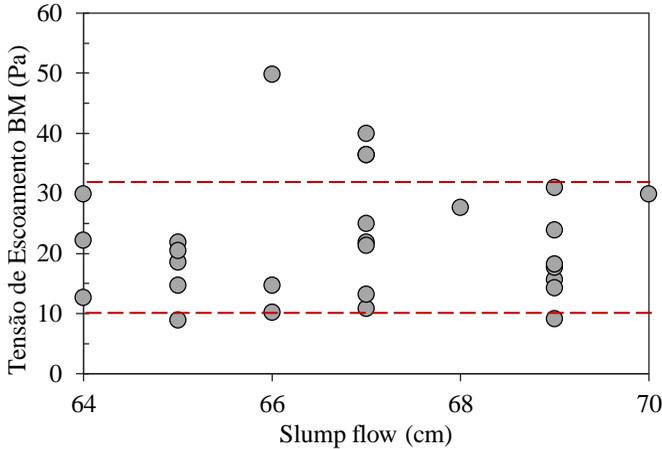
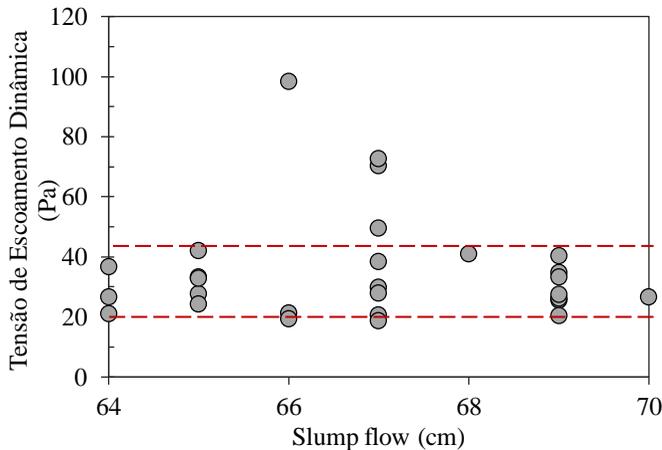


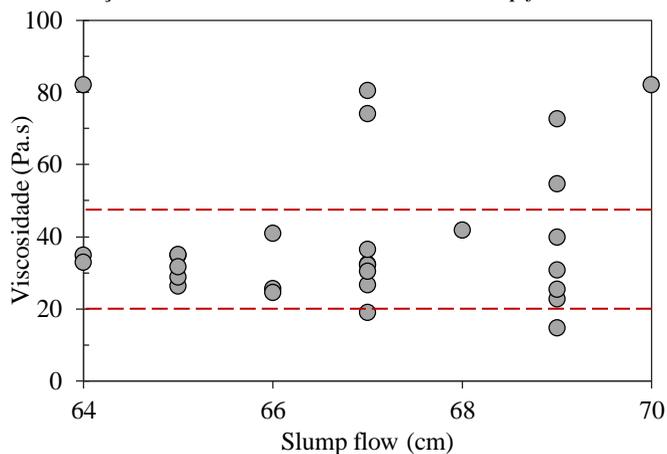
Figura 102: Relação entre tensão de escoamento dinâmica obtida pelo modelo de Bingham e a abertura no *slump flow*.



A relação entre viscosidade e abertura no *slump flow* pode ser visualizada na Figura 103, na qual se percebe que os valores de viscosidade se concentram entre 20 e 40 Pa.s. No entanto, não há uma relação entre esses dois parâmetros.

De acordo com Wallevik (2006), houve várias tentativas de encontrar uma relação entre a viscosidade plástica e o teste de abatimento, sempre indicando que não há uma boa correlação entre essas duas medidas.

Figura 103: Relação entre viscosidade e abertura no *slump flow*.



O tempo de escoamento no funil V não mostrou relação clara com a tensão de escoamento estática nem com a tensão de escoamento dinâmica, obtidas pelos dois modelos reológicos estudados (conforme apresentado nas Figuras 104, 105 e 106), assim como relatado por outras pesquisas, como Ferraris et al. (2000). No entanto, percebe-se que a maioria dos concretos dosados apresentou tempo de escoamento variando de 4 a 6 s.

Figura 104: Relação entre tensão de escoamento estática e tempo de escoamento no funil V.

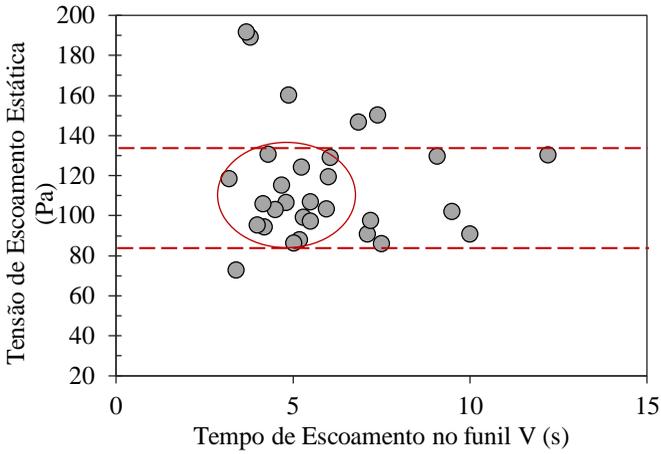


Figura 105: Relação entre tensão de escoamento dinâmica calculada por Bingham modificado e tempo de escoamento no funil V.

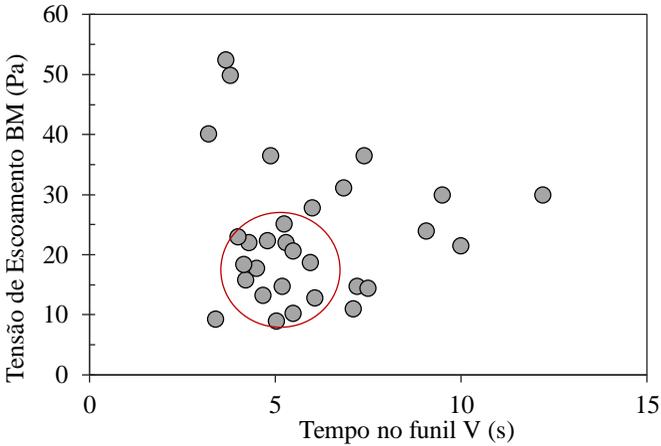
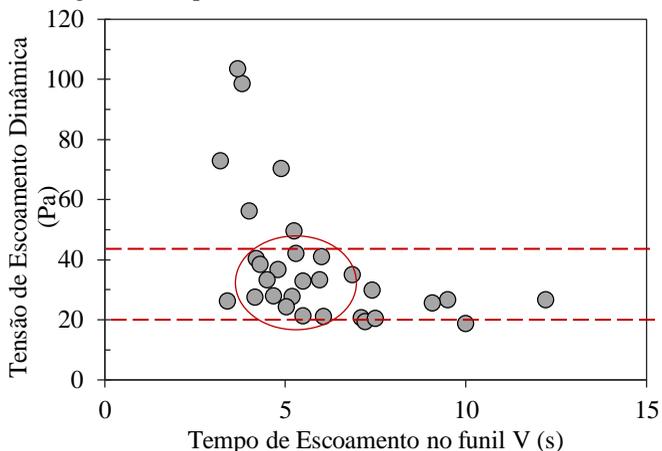


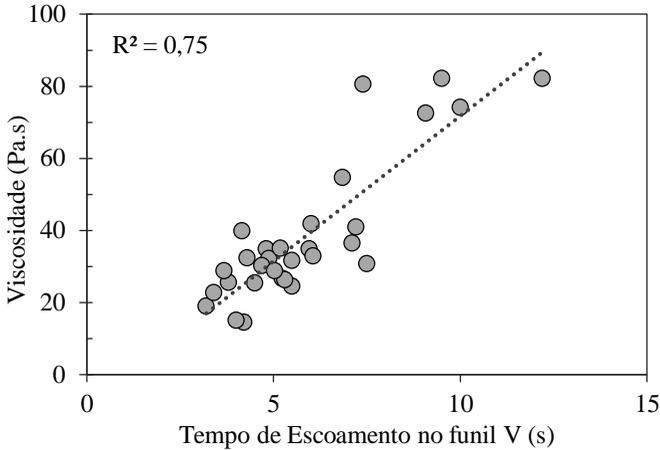
Figura 106: Relação entre tensão de escoamento dinâmica determinada pelo modelo de Bingham e tempo de escoamento no funil V.



A Figura 107 mostra a relação entre a viscosidade e o tempo de escoamento no funil V; percebe-se que há uma tendência diretamente proporcional, ou seja, quanto maior o tempo de escoamento no funil V, maior a viscosidade que a mistura apresenta. No entanto, o coeficiente de correlação não é muito forte (R^2 de 0,75) e pode apenas refletir a tendência geral, sendo que, em baixas variações de viscosidade, o teste do funil V pode não ser eficiente para medir a magnitude da alteração. Isso é consistente com o trabalho de muitos pesquisadores, como Felekoglu et al. (2006), Hadi, Halabian e Chamani (2014) e Bouziani e Benmounah (2015).

Diante do exposto, com exceção dos resultados de viscosidade e tempo de escoamento no funil, que apresentou uma correlação razoável, percebeu-se que não há boas correlações entre os demais resultados reológicos e os testes tecnológicos para os CAAs testados. Esses ensaios tecnológicos resultam em apenas um valor único e têm sido criticados por diversos pesquisadores, já que um mesmo valor pode ser produzido por dois concretos com características reológicas bastante distintas (TATTERSALL; BANFILL, 1983; TATTERSLL, 1991; YAMMINE et al., 2008; ROUSSEL, 2012).

Figura 107: Relação entre viscosidade e tempo de escoamento no funil V.



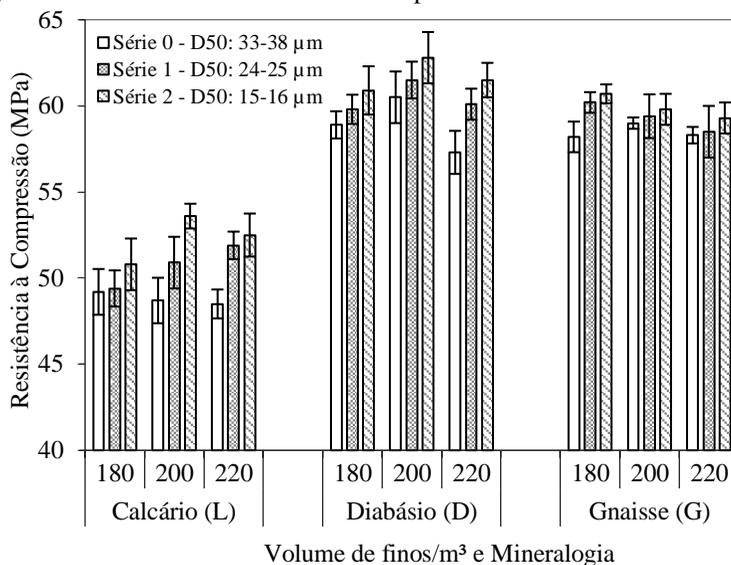
4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CAA NO ESTADO ENDURECIDO

Os resultados da resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral são apresentados nos próximos tópicos, nos quais só foram comparados os concretos com relação água/cimento de 0,53, ou seja, a série contendo somente cimento (C) foi omitida da análise. A resistência à compressão dos CAAs da série C apresentou valores na ordem de 75-80 MPa, uma vez que a relação água/cimento diminuiu para valores entre 0,30 e 0,36. Além dos parâmetros mecânicos, também serão mostrados os resultados da qualidade superficial das placas de concreto moldadas.

4.4.1 Resistência à Compressão

A Figura 108 mostra os resultados de resistência à compressão dos CAAs aos 28 dias. Percebe-se que os concretos contendo fíler calcário foram os que apresentaram os menores valores de resistência mecânica. A média da resistência à compressão dos concretos contendo fíler calcário foi de 51 MPa, enquanto que os concretos contendo fílers diabásico e gnáissico apresentaram média de 60 e 59 MPa, respectivamente.

Figura 108: Resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos CAAs.



Ho et al. (2002) estudaram a incorporação de fíler calcário e granítico em concreto autoadensável e verificaram que os CAAs contendo fíler granítico conduziram a resistências à compressão 15% maiores que os CAAs contendo fíler calcário. Os autores atribuem esse aumento da resistência à maior área superficial do fíler granítico em relação ao calcário.

No entanto, neste trabalho, a área superficial BET do fíler calcário com D_{50} entre 33-38 μm (1.280 m^2/kg) é maior do que a do fíler diabásico (1.183 m^2/kg) e muito próxima à do fíler gnáissico (1.349 m^2/kg) com esse mesmo D_{50} . Portanto, apesar de os fílers diabásico e gnáissico apresentarem as maiores áreas superficiais com D_{50} de 24-25 e 16 μm , a série moldada com fílers *in natura* descarta a finura do fíler como fator único e determinante no desempenho mecânico.

Por outro lado, a área superficial do fíler apresentou influência na resistência à compressão quando os concretos analisados continham a mesma mineralogia e o mesmo volume de finos. Quanto mais finas eram as partículas presentes (D_{50} de 16 μm), maior foi a resistência à compressão dos CAAs.

A presença de partículas mais finas é capaz de preencher de forma mais efetiva o espaço entre os grãos de agregado, resultando na diminuição de vazios (diminuição da porosidade). Esse fato assegura um

melhor empacotamento da matriz (ação de microenchimento), o que conduz a uma redução do espaço para a água livre e a uma maior dispersão das partículas de cimento. Isso garante melhores condições de hidratação e maior quantidade de pontos de nucleação, propiciando um aumento da compacidade e da resistência mecânica do concreto (GHANNAM; NAJM; VASCONEZ, 2016; SINGH et al., 2016).

Há diversos estudos que comprovam o bom desempenho de fílers de origem granítica na resistência mecânica de concretos (RACHED; FOWLER; KOEHLER, 2010; VIJAYALAKSHMI; SEKAR; GANESH, 2013; ELMOATY, 2013; DAMINELI, 2013; SINGH et al., 2016; GHANNAM; NAJM; VASCONEZ, 2016); no entanto, estudos sobre gnaisse e diabásio são praticamente inexistentes. Como o gnaisse é uma rocha originada pelo metamorfismo do granito, muitas características do gnaisse são equivalentes às do granito, fato que justifica a citação de estudos realizados com fílers graníticos.

Comparando os resultados de resistência à compressão dos concretos e à calorimetria de pastas, pode-se comprovar a melhor hidratação das partículas de cimento na presença de fílers diabásico e gnáissico do que na presença de fíler calcário. O calor total liberado pelas pastas contendo fíler calcário variou de 209 a 226 J/g, enquanto que as pastas contendo fílers diabásio e gnáissico apresentaram valores entre 254-278 J/g, e 269-285J/g, respectivamente.

Aliado a isso, os resultados de FBRM das pastas com aditivo variável mostraram maiores leituras de número de cordas nas pastas contendo fíler gnáissico, seguidas das misturas contendo fíler diabásico, calcário e, por último, pastas dosadas somente com cimento. Isso indica uma menor tendência à floculação das partículas de gnaisse e diabásio, o que pode contribuir para uma melhor dispersão da água livre e maior hidratação das partículas de cimento.

Ensaio de termogravimetria mostraram que a presença de fílers diabásico e gnáissico aumentam o grau de hidratação do cimento em relação a pastas contendo fíler calcário. Esses resultados sugerem que as partículas de fílers diabásico e gnáissico catalisam a reação de forma mais efetiva, causando a aceleração do desenvolvimento de resistência do concreto, observada aos 28 dias.

Pode-se perceber também que parece existir um teor ótimo de fíler a ser adicionado na mistura, visando um melhor desempenho mecânico. Por exemplo, na série de concretos dosados com fíler calcário e fíler diabásico, a maior resistência ocorreu com a adição de 200 litros de finos, enquanto que para concretos contendo fíler gnáissico, a maior resistência foi observada para 180 litros de finos.

Olaniyan, Afolabi e Okeyinka (2012) e Vijayalakshmi, Sekar e Ganesh (2013) perceberam que substituições de até 15% de areia por fíler granítico aumentavam a resistência dos concretos produzidos, mas que valores superiores a isso causavam queda no desempenho. Os autores atribuíram esse comportamento à densidade ótima da matriz e à otimização da dispersão dos grãos de cimento. Singh et al. (2016) observaram que o máximo valor de resistência à compressão de concretos ocorria com porcentagens de substituição de areia por fíler de 30%. Imagens de MEV comprovaram que, nesse teor de substituição, ocorria uma melhor formação e distribuição do gel C-S-H na matriz, além da diminuição da espessura da zona de transição.

A fim de comprovar as análises anteriormente realizadas, a Tabela 47 mostra a ANOVA para os resultados de resistência à compressão dos concretos.

Tabela 47: ANOVA para resultados de resistência à compressão dos CAAs.

Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Mineralogia	1027,8	2	513,9	216,05	100,0%
D ₅₀	60,6	2	30,3	12,75	100,0%
Volume	10,0	2	5,0	2,09	85,7%
Mineralogia * D ₅₀	6,7	4	1,7	0,70	40,3%
Mineralogia * Volume	13,0	4	3,2	1,37	72,8%
D ₅₀ * Volume	2,8	4	0,7	0,30	12,3%
Mineralogia * D ₅₀ * Volume	12,0	8	1,5	0,63	25,5%
Erro	64,2	27	2,4		

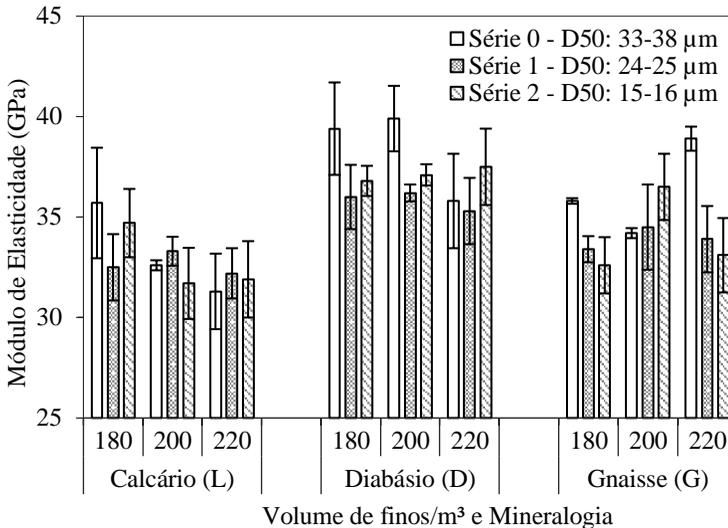
Percebe-se a grande influência da mineralogia e do D₅₀ dos fílers na resistência à compressão dos concretos. Os demais fatores (volume e interações) não apresentam influência significativa, com 95% de confiabilidade. Pelo teste de Duncan, pode-se concluir que a resistência à compressão dos concretos dosados com fíler diabásico e gnáissico não diferem entre si, mas são significativamente superiores aos concretos dosados com fíler calcário, com 95% de confiabilidade.

4.4.2 Módulo de Elasticidade Estático à Compressão

A Figura 109 apresenta os resultados de módulo de elasticidade dos CAAs. Os valores de módulo de elasticidade foram maiores em concretos contendo fíler diabásico (média de 37 GPa), seguidos das misturas com fíler gnáissico (média de 35 GPa) e, por último, das misturas

contendo fíler calcário (média de 33 GPa). Isso pode ser atribuído aos valores de resistência à compressão, discutidos anteriormente.

Figura 109: Módulo de elasticidade estático à compressão aos 28 dias dos CAAs.



Além disso, sabe-se que o módulo de elasticidade de concretos é altamente influenciado pelo módulo de elasticidade de seus constituintes. Segundo Mehta e Monteiro (2008), agregados naturais de baixa porosidade, como rochas ígneas, apresentam módulo de elasticidade na faixa de 70 a 140 GPa, ao passo que em calcários e outras rochas de variedade porosa, pode ser de 21 a 49 GPa.

Com base nesse fato, a ABNT NBR 6118 (2014) prescreve equações para a determinação do módulo de elasticidade do concreto em função do f_{ck} e da presença de diferentes tipos de rochas no concreto – da seguinte forma para f_{ck} de 20 a 50 MPa:

$$E_{ci} = \alpha_E \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (24)$$

Sendo E_{ci} o módulo de elasticidade em MPa, f_{ck} a resistência característica do concreto à compressão em MPa e α_E em função do agregado gráudo:

Calculando o módulo de elasticidade teórico dos concretos (considerando o α_E igual a 1,0), os concretos contendo fíler calcário apresentariam módulo de elasticidade médio de 37 GPa, enquanto que aqueles contendo fíler diabásico e gnáissico resultariam em 41 GPa,

aproximadamente. Esses valores são significativamente maiores do que os dados experimentais, que foram em média 33, 37 e 35 GPa para as misturas contendo fíler calcário, fíler diabásico e fíler gnáissico, respectivamente.

A Tabela 48 apresenta a ANOVA dos resultados de módulo de elasticidade, na qual é possível observar que, com 95% de confiabilidade, o único fator com influência no módulo de elasticidade é a mineralogia do fíler presente.

Tabela 48: ANOVA para resultados de módulo de elasticidade dos CAAs.

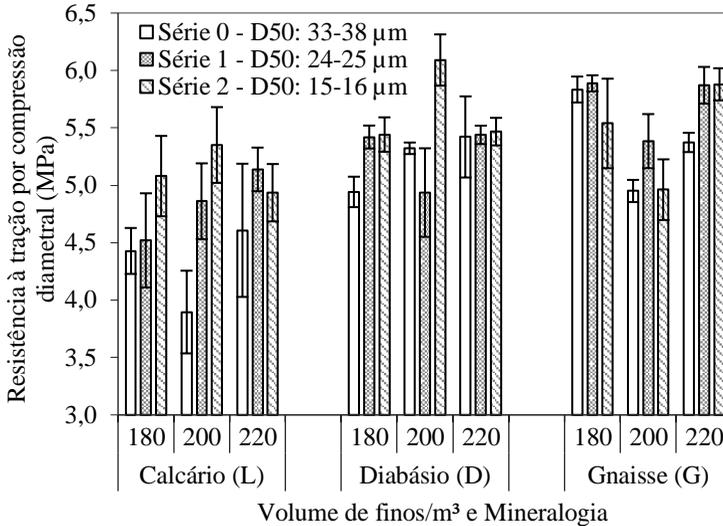
Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Mineralogia	161,91	2	80,96	16,77	100,0%
D ₅₀	31,39	2	15,69	3,25	94,6%
Volume	6,45	2	3,22	0,67	47,9%
Mineralogia * D ₅₀	10,05	4	2,51	0,52	27,9%
Mineralogia * Volume	27,59	4	6,90	1,43	74,9%
D ₅₀ * Volume	8,09	4	2,02	0,42	20,6%
Mineralogia * D ₅₀ * Volume	54,33	8	6,79	1,41	76,2%
Erro	130,33	27	4,83		

4.4.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os valores de resistência à tração por compressão diametral seguiram a mesma tendência observada nos demais ensaios de desempenho mecânico, ou seja, os menores valores ocorreram na presença de fíler calcário (média 4,8 MPa), conforme pode ser observado na Figura 110.

A média dos resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos da série G (com fíler gnáissico) foi ligeiramente superior à da série D (com fíler diabásico) – 5,4 e 5,3 MPa, respectivamente, não sendo considerados valores significativamente diferentes. De maneira geral, a resistência à tração foi aproximadamente 8-10% da resistência à compressão dos respectivos concretos. No entanto, os concretos não apresentaram uma tendência clara dos resultados de tração por compressão diametral em relação ao tamanho da partícula de fíler e o total de finos presente. Essa falta de clareza na tendência dos resultados pode ter sido causada pelo alto desvio padrão observado em algumas séries.

Figura 110: Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos CAAs, aos 28 dias.



De acordo com a análise estatística de variância, apresentada na Tabela 49, os fatores influentes nos resultados de tração por compressão diametral, em ordem de importância, são: mineralogia do filler, D_{50} , interação de segunda ordem entre mineralogia e os demais fatores, volume de finos presente, interação de terceira ordem e, por último, com baixa influência, a interação de segunda ordem entre D_{50} e Volume.

Tabela 49: ANOVA para resultados de tração por compressão diametral dos CAAs.

Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Mineralogia	5,935	2	2,968	21,49	100,0%
D_{50}	1,833	2	0,916	6,63	99,5%
Volume	0,638	2	0,319	2,31	88,1%
Mineralogia * D_{50}	1,263	4	0,316	2,29	91,4%
Mineralogia * Volume	1,276	4	0,319	2,31	91,6%
D_{50} * Volume	0,521	4	0,130	0,94	54,6%
Mineralogia * D_{50} * Volume	1,760	8	0,220	1,59	82,6%
Erro	3,729	27	0,138		

4.4.4 Qualidade Superficial

Alguns exemplos da qualidade superficial das placas moldadas podem ser visualizados na Figura 111. Imagens de todas as placas moldadas estão disponíveis no Apêndice G. A qualidade superficial das placas moldadas pode ser analisada pela porcentagem de bolhas superficiais apresentada na Figura 112.

Evidentemente, a qualidade da superfície depende de outros fatores, além do concreto produzido. No entanto, o intuito desse estudo foi somente comparar a qualidade superficial de CAA dosado com filer calcário, que é muito utilizado no Brasil, com os demais filers (diabásico e gnáissico), para verificar se a substituição do tipo de filer poderia causar algum prejuízo para a indústria de pré-fabricados pela piora da qualidade superficial das peças produzidas.

Figura 111: Placas de CAA moldadas para análise da qualidade superficial.

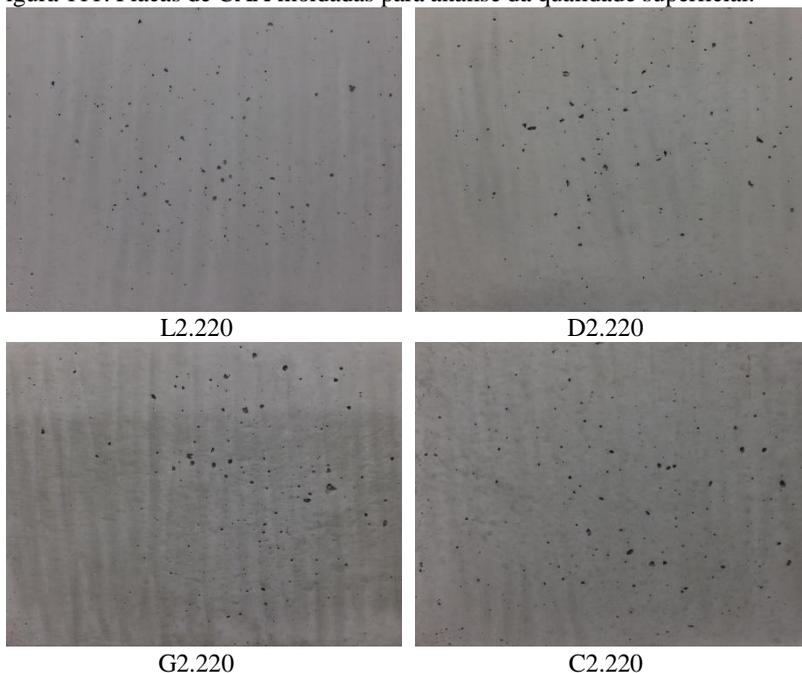
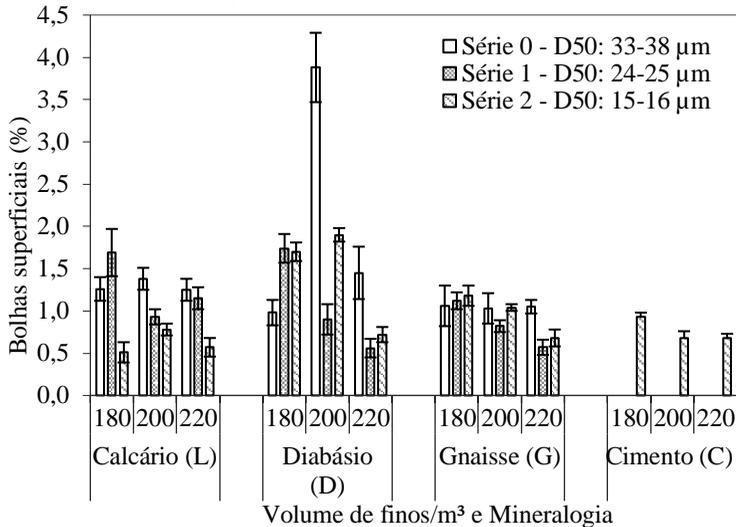


Figura 112: Qualidade superficial das placas de concreto medida por meio da porcentagem de bolhas superficiais.



Não houve uma influência clara da mineralogia e do D_{50} dos fílers presentes na qualidade superficial dos concretos. A superfície com maior número de imperfeições ocorreu com o concreto D0.200, que foi aquele com abertura da *slump flow* fora do estipulado para o trabalho.

Excluindo a mistura D0.200 da análise, de maneira geral, as misturas contendo 180 litros de filer apresentaram porcentagem de imperfeições ligeiramente maior que as misturas contendo 200 e 220 litros de finos. Esse fato possivelmente está relacionado à reologia do concreto e/ou ao refinamento da argamassa da mistura, uma vez que o agregado miúdo é substituído pelo filer quando o volume de finos é maior.

Para melhor analisar os fatores influentes na qualidade superficial dos CAAs, a Tabela 50 apresenta a ANOVA da porcentagem de bolhas superficiais presentes nas placas moldadas. Para essa análise, foram excluídos os dados do concreto D0.200.

Percebe-se que, em relação aos fatores individuais, a mineralogia e o D_{50} não apresentam influência significativa na qualidade superficial, com 95% de confiabilidade, embora sejam importantes nas interações de segunda e terceira ordem. Os principais fatores influentes em ordem de importância são volume de finos presente, mineralogia* D_{50} e D_{50} *volume, com alta influência, seguidos da interação de terceira ordem e mineralogia.

Tabela 50: ANOVA para as porcentagens de bolhas superficiais dos CAAs.

Fonte	SQ	GL	MQ	F _{ratio}	Probabilidade
Mineralogia	0,106711	1	0,106711	2,51221	87,5%
D ₅₀	0,020069	1	0,020069	0,47248	50,2%
Volume	1,141336	1	1,141336	26,86956	100,0%
Mineralogia * D ₅₀	1,711411	3	0,570470	13,43012	100,0%
Mineralogia * Volume	0,232378	3	0,077459	1,82356	83,2%
D ₅₀ * Volume	2,009607	3	0,669869	15,77019	100,0%
Mineralogia * D ₅₀ * Volume	0,997200	7	0,142457	3,35375	98,9%
Erro	1,104400	26	0,042477		

Além desses fatores analisados, as propriedades reológicas das misturas apresentam grande influência na qualidade superficial dos CAAs. As Figuras 113 e 114 mostram a relação entre a quantidade de bolhas superficiais com parâmetros de Bingham, tensão de escoamento e viscosidade, respectivamente.

Figura 113: Relação entre a qualidade superficial das placas de concreto e a tensão de escoamento dinâmica das misturas, determinada pelo modelo de Bingham.

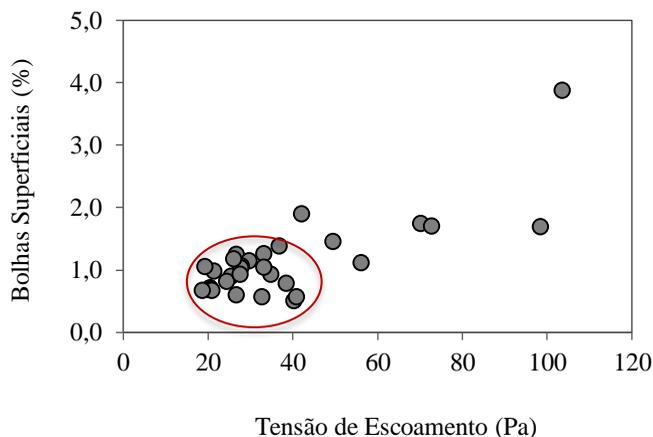
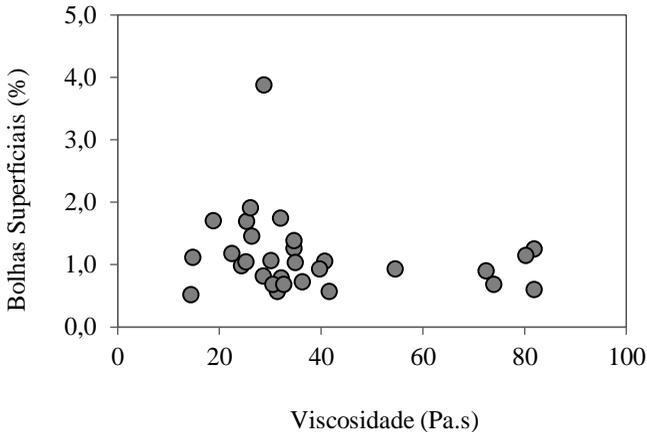


Figura 114: Relação entre a qualidade superficial das placas de concreto e a viscosidade das misturas.



Parece haver uma faixa ótima para valores de tensão de escoamento que resultaram nas melhores superfícies das placas. Apesar de acreditar-se que a qualidade superficial depende da tensão de escoamento e da viscosidade atuando simultaneamente na mistura, não houve nenhuma correlação entre a quantidade de bolhas superficiais e a viscosidade do concreto produzido. Isso pode ter ocorrido devido a faixa de abertura do *slump flow* adotada. Em concretos com espalhamento maior (acima de 70 cm), a viscosidade da mistura poderia apresentar influência sobre a qualidade superficial do elemento moldado. No entanto, essa hipótese está fora do âmbito deste trabalho.

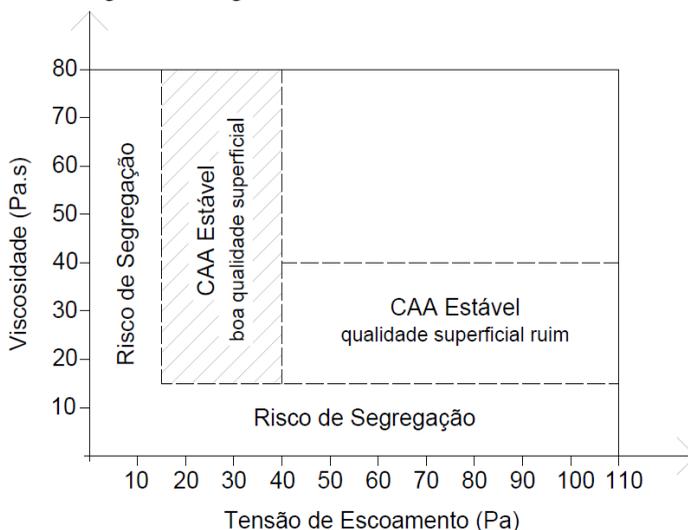
Analisando os valores individualmente, percebeu-se que, para os concretos moldados, a tensão de escoamento teve um impacto muito maior na qualidade superficial em termos de área de imperfeições do que a viscosidade. Por exemplo, enquanto a tensão de escoamento aumentou de 37 para 104 Pa e a viscosidade permaneceu na ordem de 30 Pa.s, a quantidade de imperfeições superficiais aumentou mais de 180%. Por outro lado, quando a viscosidade plástica aumentava de 34 para 82 Pa.s e a tensão de escoamento permaneceu na ordem de 30 Pa, não foi constatada piora na superfície dos concretos.

Essa mesma observação entre a qualidade superficial e os parâmetros reológicos (tensão de escoamento e viscosidade) foi constatada no trabalho de Megid (2012). O autor concluiu que a tensão de escoamento tem influência significativamente superior à da viscosidade

na quantidade de imperfeições e no diâmetro das bolhas presentes em placas moldadas com CAA.

Com os resultados obtidos nos CAAs dosados, pôde-se elaborar o gráfico orientativo de dosagem do concreto em função da viscosidade e da tensão de escoamento, conforme apresentado na Figura 115. Cabe lembrar que esses valores são válidos somente para a situação utilizada na dosagem deste trabalho e com o uso do reômetro ICAR.

Figura 115: Gráfico orientativo para dosagem de CAA em função dos parâmetros reológicos de Bingham.



Misturas com valores de tensão de escoamento e viscosidade abaixo de 15 Pa e 15 Pa.s não apresentaram estabilidade adequada, o que pode causar segregação na mistura. Combinações de baixa viscosidade com alta tensão de escoamento, e vice-versa, conduziram a misturas estáveis; no entanto, quando a tensão de escoamento foi alta (acima de 40 Pa), houve uma piora da qualidade superficial, o que pode ser um problema para determinadas aplicações.

4.5 SUBSTITUIÇÃO DO FÍLER CALCÁRIO PELOS FÍLERS ALTERNATIVOS

Considerando a mistura contendo fíler calcário *in natura* em volume de 200 litros como um concreto ideal (referência), já utilizado pela indústria e com propriedades consideradas adequadas, pode-se fazer uma análise sobre o uso a substituição do fíler calcário pelos fílers alternativos.

O concreto L0.200 apresentou parâmetros reológicos iguais a 106,6 Pa, 36,8 Pa e 34,8 Pa.s para a tensão de escoamento estática, dinâmica (Bingham) e viscosidade plástica, respectivamente. Os parâmetros reológicos do concreto G1.220 foram muito próximos ao concreto referência: 97,2 Pa, 32,8 Pa e 31,5 Pa.s. Os resultados dos ensaios tecnológicos também foram semelhantes, com a vantagem de o concreto com fíler gnáissico apresentar maior resistência ao bloqueio (a diferença entre a abertura no *slump flow* e no anel J foi de 8,3 cm para o concreto L0.200 e 3,7 cm para o G1.220), melhor acabamento superficial (menor porcentagem de imperfeições) e maior resistência mecânica (o concreto G1.220 apresentou resistência à compressão 20% superior ao concreto L0.200).

Nenhum concreto contendo fíler diabásico apresentou parâmetros reológicos muito próximos ao concreto L0.200. O concreto D0.180 apresentou tensão de escoamento estática de 106,8 Pa, dinâmica de 21,4 Pa e viscosidade de 24,0 Pa.s. Isso indica que a mistura pode ser menos estável (maior tendência à segregação). Por outro lado, gerou elementos com menos imperfeições superficiais e com maior resistência à compressão (21% superior). O concreto D1.220 apresentou valores muito próximos ao concreto L0.220, com alta viscosidade e tensão de escoamento baixa. O concreto D1.220 também apresentou vantagens em relação ao L0.220 no âmbito da qualidade superficial e da resistência mecânica.

Dessa forma, em locais com ausência de fíler calcário, fílers gnáissicos e diabásicos poderiam ser utilizados como materiais finos em CAAs, sem prejuízo do desempenho no estado fresco e endurecido do concreto. Na falta de fíler calcário, muitas vezes opta-se pela utilização de maior quantidade de cimento, o que aumenta o custo do material e causa um prejuízo nas propriedades do estado fresco, demandando maior quantidade de aditivo.

Embora a presença de fíler gnáissico ou diabásico também exija um consumo maior de aditivo superplastificante para atingir as propriedades de fluxo desejadas, quando comparado com misturas

contendo fíler calcário, esse custo adicional pode ser compensado pelo baixo custo associado a esses fílers alternativos, bem como pelo menor consumo de cimento.

Considerando, em média, um aumento de 10 MPa⁸ na resistência dos concretos dosados com os fílers alternativos e um aumento de, no máximo, 1,45 litros no consumo de aditivo por m³ de concreto, pode-se verificar, na Tabela 51, que o concreto dosado com fíler gnáissico ou com fíler diabásico seria mais econômico do que o concreto dosado com fíler calcário. Vale salientar que, no cálculo, não foram considerados os valores dos fílers, o que teria potencial para aumentar a vantagem dos fílers alternativos, uma vez que eles certamente apresentam um preço inferior ao fíler calcário.

Tabela 51: Impacto no custo de cimento e aditivo superplastificante com a utilização dos fílers alternativos em CAAs (preços em dólares - US\$).

Parâmetros	Cimento	Aditivo
Custo da unidade (\$/kg)	0,073	0,96
Acréscimo ou diminuição do uso (kg/m ³)	- 60,00	+ 1,45
Acréscimo ou diminuição do custo (\$/m ³)	- 4,38	+ 1,39
Saldo (\$/m ³)	- 2,99	

Além do aspecto econômico, o uso dos fílers alternativos tem um forte apelo ambiental, uma vez que apresenta uma potencial redução do consumo de cimento e, conseqüentemente, de clínquer (reduzindo a emissão de CO₂), além da destinação de resíduo gerado em larga escala e potencialmente nocivo para o meio ambiente.

4.6 COMPARAÇÃO ENTRE O ESTUDO DE PASTAS E CONCRETOS

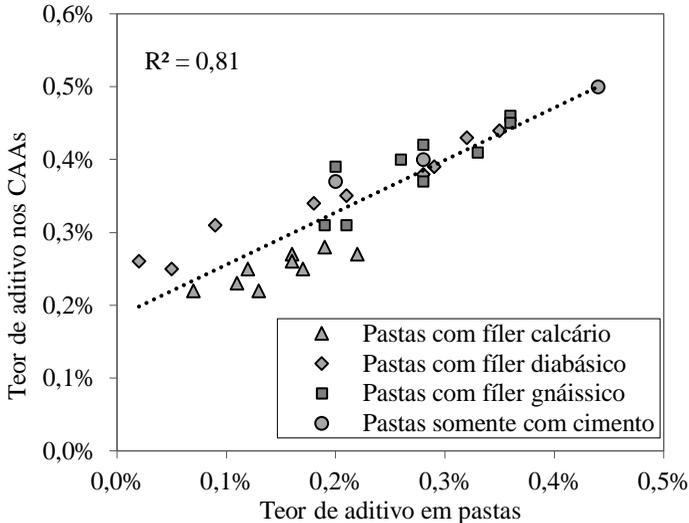
Conforme apresentado anteriormente, neste trabalho, estudou-se o comportamento de pastas e de CAAs. Aqui, só serão analisadas as pastas contendo aditivo variável (fluidez fixa), já que foi o mesmo método empregado nos concretos. Embora o proporcionamento do cimento, do fíler e da água utilizados nas pastas tenha relação direta com os CAAs dosados, a quantidade de aditivo superplastificante foi definida sem nenhuma relação entre ambos os estudos. Aliado a isso, as pastas não

⁸ Considerando uma média de 6 kg de cimento para cada 1 MPa de resistência à compressão do concreto.

apresentaram grande fluidez para serem consideradas autoadensáveis. Dessa forma, não se espera que haja uma relação direta entre as propriedades do estado fresco das pastas e dos concretos.

Em relação à demanda de aditivo, os menores teores utilizados foram nas misturas contendo fíler calcário, tanto em pastas quanto em concretos, com exceção da série D0 em pastas, que apresentou menor demanda do que as pastas contendo L0. A Figura 116 mostra a relação entre o teor de aditivo empregado nas pastas e o teor empregado nos CAAs. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,81; com 95% de confiabilidade, pode-se dizer que existe uma relação significativa entre os teores utilizados em ambos os estudos.

Figura 116: Relação entre o teor de aditivo empregado nos estudos em pastas e em CAAs.



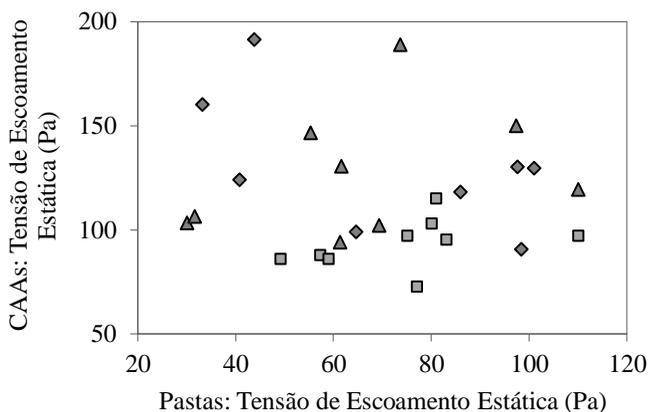
A tendência da demanda de aditivo em relação às características dos filers foi a mesma em pastas e em concretos. A presença de partículas com maior relação de aspecto, maior angularidade e maior área superficial BET tendem a demandar maior teor de aditivo para a mesma fluidez, ao passo que a rugosidade das partículas teve o efeito contrário.

Em relação à reometria de pastas e concreto, foram analisados os resultados de tensão de escoamento estática e os parâmetros determinados pelo modelo de Bingham. Percebeu-se que não houve nenhuma relação significativa para os parâmetros medidos, conforme pode ser visualizado

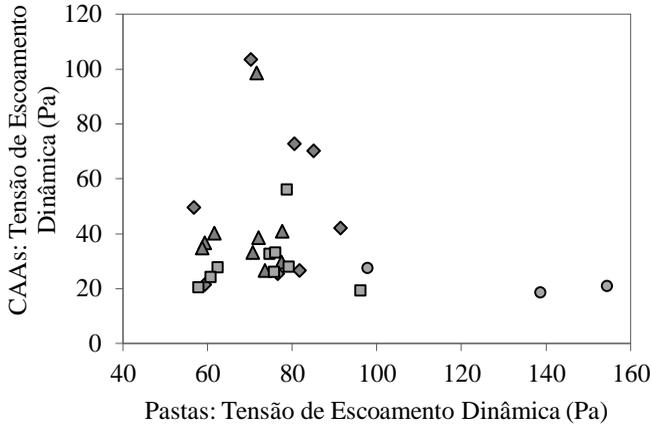
na Figura 117. Isso significa que as propriedades reológicas encontradas nas pastas não geraram, necessariamente, o mesmo comportamento nos concretos correspondentes (quando utilizado o mesmo tipo e teor de filler).

Embora as pastas de cimento tenham sido matéria de muitos estudos para prever a reologia dos concretos – por diversas razões, como facilidade de ensaios e maior disponibilidade de equipamentos –, está fora do alcance estabelecer uma conexão entre a reologia da pasta de cimento e do concreto (TATTERSALL; BANFILL, 1983; ROUSSEL, 2012). Ainda que a pasta seja o fator reológico principal de um concreto, as suas propriedades no estado fresco são complexas de diferentes maneiras, sendo que medidas em pastas nem sempre predizem as determinações nos concretos correspondentes (FERRARIS; GAIDIS, 1992).

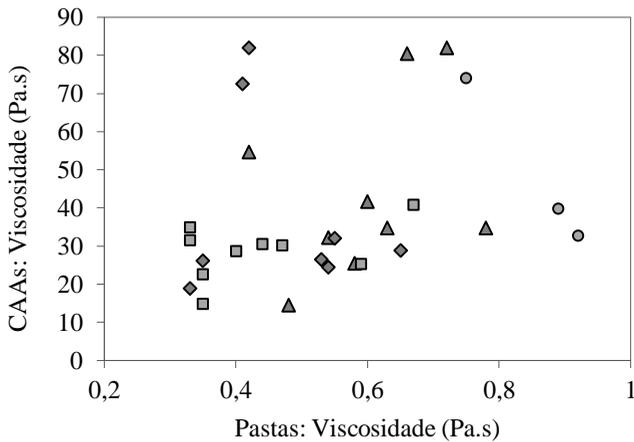
Figura 117: Relação entre a reometria de pastas e concretos: (a) Tensão de escoamento estática; (b) Tensão de escoamento dinâmica; (c) Viscosidade.



(a)



(b)



(c)

- ▲ Misturas com filler calcário
- ◆ Misturas com filler diabásico
- Misturas com filler gnáissico
- Misturas somente com cimento

Na Tabela 52, pode-se observar os intervalos de valores dos parâmetros reológicos em ambos os estudos. A faixa de valores apresentada pelas misturas está em concordância com a tendência apresentada por Banfill (2006), que se baseou em diversos estudos publicados. Segundo o autor, a viscosidade plástica de pastas de cimento são na ordem de 0,01-1 Pa.s, enquanto que em CAAs variam de 20-100

Pa.s. A tensão de escoamento, por sua vez, apresenta valores entre 10 e 100 Pa para pastas, enquanto que em CAAs, são de 50-200 Pa.

Tabela 52: Parâmetros reológicos das pastas e dos CAAs estudados.

Parâmetro Reológico	Pastas de cimento	CAA
Tensão de Escoamento Estática	30-150 Pa	73-192 Pa
Tensão de Escoamento (Modelo de Bingham)	57-154 Pa	19-104 Pa
Viscosidade (Modelo de Bingham)	0,32-0,92 Pa.s	15-82 Pa.s

Diante do exposto, não é possível estabelecer comparações entre os valores dos parâmetros reológicos encontrados em cada um dos estudos. Apesar disso, pode-se verificar se há convergência entre as conclusões obtidas em pastas e em CAAs em relação à presença dos diferentes filers.

A análise estatística de variância (ANOVA) da tensão de escoamento estática concluiu que a mineralogia não é um fator influente nesse parâmetro em pastas, porém, apresentou-se influente nos concretos. Por outro lado, a tensão de escoamento calculada pelo modelo de Bingham em ambos os estudos não foi influenciada pela mineralogia do filer, com 95% de confiabilidade. Na viscosidade, por sua vez, a mineralogia dos filers apresentou grande influência nas pastas e moderada influência nos concretos.

A granulometria dos filers (representada pelo D_{50}) apresentou alta influência nos parâmetros reológicos das pastas de cimento com eles dosados. Nos concretos, por sua vez, essa influência foi menos acentuada, embora tenha sido significativa, com 95% de confiabilidade em relação à tensão de escoamento estática.

O volume de finos presente mostrou-se significativamente influente na viscosidade de pastas e concretos, apresentando valores divergentes nas demais propriedades reológicas.

Observou-se que a presença de filer calcário na mistura mostrava uma propensão ao aumento da viscosidade dentro da mesma série (mesmo D_{50} e mesmo volume de finos), tanto em pastas quanto em concretos. O oposto foi observado na presença de filer gnáissico. Esse fato ocorreu em função da cinética de floculação das partículas, observado no ensaio FBRM, no qual misturas contendo filer gnáissico apresentavam-se menos floculadas que aquelas contendo filer calcário.

Em relação à tensão de escoamento estática e dinâmica, não houve nenhuma relação entre a tendência observada nas pastas e nos concretos.

Portanto, pode-se concluir que, embora não tenham sido encontradas relações significativas entre os parâmetros reológicos obtidos em pastas com aqueles medidos em CAAs, o estudo de pastas pode ser utilizado para antever tendências gerais de comportamento das misturas, como demanda de superplastificante e influência da característica das partículas nessa demanda, além de permitir o estudo de processos de floculação das partículas finas, que parece interferir no comportamento reológico do concreto com elas confeccionado.

5 CONCLUSÕES

Nesse capítulo, são apresentadas algumas considerações sobre os resultados mais expressivos obtidos com a realização do programa experimental desta tese. Ao final deste capítulo, constam também algumas sugestões para o desenvolvimento de novos trabalhos.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o trabalho realizado, foi possível tecer algumas conclusões sobre o uso de filers de britagem alternativos em CAA, especialmente em função das características das partículas, cinética de floculação e reologia das misturas, além do desempenho no estado endurecido.

Iniciando pela análise das partículas de filers de britagem, pôde-se concluir que a mineralogia do filer teve grande influência nas características de forma das partículas. Observou-se que o filer calcário apresenta partículas com forma mais favorável (menor relação de aspecto e menor angularidade) em comparação com filers diabásicos e gnáissicos. Além disso, as partículas de calcário mostram mais baixa adsorção por azul de metileno entre os finos testados. Esses aspectos contribuem para que misturas contendo filer calcário demandem menor quantidade de aditivo superplastificante do que misturas contendo os filers diabásicos ou gnáissicos, isso para uma mesma fluidez.

Nos estudos em pastas, foi possível avaliar a capacidade de retenção da trabalhabilidade das misturas. Medições reológicas realizadas com 10 e 40 minutos após o início da homogeneização dos materiais indicaram que pastas contendo filer diabásico tiveram o maior aumento nos parâmetros reológicos (tensão de escoamento estática, dinâmica e viscosidade). Atribui-se esse comportamento à maior adsorção por azul de metileno das partículas diabásicas, que foi expressivamente superior às demais. Desta forma, a perda de trabalhabilidade é resultado da maior capacidade de adsorção de aditivos e água dos filer diabásicos. Além disso, pode-se citar a grande diferença entre o teor de superplastificante utilizado e o seu ponto de saturação.

Em relação ao processo de floculação (avaliado pelo tamanho dos flocos medidos pelo FBRM), percebeu-se que a rede de flocos é alterada por forças hidrodinâmicas, tais como as experimentadas pelo concreto durante a mistura, o bombeamento e o descarregamento. Em todas as misturas, pôde-se perceber que a cinética de agregação das partículas domina o sistema quando submetido a baixa taxa de cisalhamento,

indicando a formação de flocos. Por outro lado, quando a intensidade de agitação é elevada, o processo de desagregação domina. Isso ocorre porque à medida que o tamanho do aglomerado aumenta, as ligações tendem a ser mais fracas, com microestrutura menos compacta, aumentando a suscetibilidade à quebra.

Aliado a isso, percebeu-se que a presença fíler gnáissico conduz a menores taxas de aglomeração de partículas. As misturas com gnaisse também mostraram-se mais estáveis e menos sensíveis a perturbações dinâmicas. A presença de partículas de diabásio tende a gerar menos floculação do que as pastas contendo fíler calcário e aquelas dosadas somente com cimento. Em decorrência disso, os CAAs contendo partículas mais propensas a aglomeração apresentaram comportamento reológico com maior tendência ao espessamento por cisalhamento, enquanto que em concretos dosados com fíler gnáissico, observou-se maior tendência ao comportamento linear.

Nos estudos de calorimetria de condução e termogravimetria, ficou claro que a presença de fíler aumenta o grau de hidratação do aglomerante em relação a pastas contendo somente cimento. Entre os fílers estudados, a presença de diabásio e, principalmente, de gnaisse, conduz a uma significativa evolução do calor total liberado e à diminuição do tempo de indução em comparação com pastas contendo fíler calcário ou somente cimento. O teor de água quimicamente combinada (C-S-H e aluminatos) e o teor de hidróxido de cálcio presentes nas pastas contendo fíler diabásico ou gnáissico foram superiores em relação à pasta contendo fíler calcário, o que indica maior aceleração na hidratação do cimento. Como as pastas contendo fíler gnáissico e diabásico foram as que apresentaram as menores floculações, pode-se concluir que o espaço entre as partículas foi majorado, aumentando o contato da água com os materiais cimentícios. Isso resulta em uma maior taxa de hidratação e, conseqüentemente, no aumento na taxa de liberação de calor.

Aliado a isso, o aumento do teor de finos e o uso de fílers mais finos na mistura foi acompanhado por um incremento no calor total liberado. Isso ocorre porque a probabilidade de locais de nucleação próximos às partículas de cimento aumenta com a maior quantidade de partículas finas adicionada.

Análises estatísticas dos dados reológicos das pastas indicaram que, entre as características dos fílers analisadas, a mineralogia é o fator individual de menor influência na tensão de escoamento estática e dinâmica. Já para os resultados de viscosidade, a mineralogia, o D_{50} e o teor de finos presentes são fatores significativamente influentes.

De forma geral, as pastas contendo somente cimento e aquelas contendo fíler calcário foram as misturas que apresentaram os valores mais altos de viscosidade. Isso é decorrência da maior tendência de aglomeração dessas partículas, conforme observado no ensaio de FBRM.

Os estudos realizados em concreto demonstraram que é possível dosar CAA contendo fílers de britagem de forma que apresentem homogeneidade, fluxo, resistência ao bloqueio e à segregação.

Concretos contendo fíler gnáissico foram as misturas que apresentaram as maiores resistências ao bloqueio, mas também as que mostraram a menor robustez quanto à segregação. Isso acontece porque partículas que não favorecem a formação de flocos resultam em misturas menos estáveis devido à menor resiliência dos aglomerados.

Tal como observado em pastas, de maneira geral, os CAAs contendo fíler gnáissico foram os que apresentaram as menores viscosidades, correspondendo à tendência observada na literatura, a saber, que misturas com menor comprimento de corda e menor contagem de partículas (menor floculação) também apresentam viscosidades mais baixas em testes de reologia.

Como todos os concretos tiveram seus teores de aditivos ajustados para uma mesma fluidez, foi observado que tanto a mineralogia quanto o D_{50} das partículas não apresentaram influência significativa nos parâmetros de Bingham, com 95% de confiabilidade. Isso é um resultado favorável, uma vez que as características negativas dos fílers de britagem alternativos, como maior relação de aspecto, angularidade e adsorção, podem ser facilmente compensadas com o uso de maior teor de superplastificante.

De maneira geral, os resultados reométricos dos concretos dosados com fíler calcário tiveram similaridade com os resultados das misturas contendo fílers diabásico e gnáissico, embora seja necessário o uso de maior quantidade de aditivo superplastificante e, eventualmente, o uso de partículas de maior finura.

Concretos dosados com fílers diabásicos e gnáissicos tiveram um melhor desempenho no estado endurecido que os concretos dosados com fíler calcário. Conforme citado anteriormente, o efeito catalisador dos fílers diabásicos e gnáissicos nas misturas cimentícias ocorre de forma mais efetiva, aumentando o grau de hidratação do cimento e melhorando, conseqüentemente, o desempenho dos concretos aos 28 dias.

O acréscimo da resistência dos CAAs contendo os fílers alternativos foi até 21% superior aos concretos dosados com fíler calcário. Esse comportamento também foi observado na resistência à tração diametral, apresentando valores de 8-10% da resistência à compressão.

Da mesma forma, CAAs contendo diabásio e gnaisse apresentaram módulo de elasticidade médio de 37 e 35 GPa, respectivamente, enquanto que aqueles contendo filer calcário mostraram valor médio de 33 GPa. Esses resultados indicam um grande potencial de redução do consumo de cimento, com o emprego dos filers alternativos. Além disso, o módulo de elasticidade mais elevado, seja devido a maior resistência à compressão para um mesmo consumo de cimento, seja pela presença do filer diabásico ou gnáissico, pode ser uma alternativa para estruturas que necessitam maior rigidez, atualmente especificadas em muitos projetos estruturais.

A qualidade superficial das peças foi mais afetada pela reologia das misturas do que pelas características dos filers presentes. Percebeu-se que a tensão de escoamento tem um impacto muito maior na quantidade de imperfeições do que a viscosidade. CAAs que apresentaram tensão de escoamento (modelo de Bingham) superior a 40 Pa tiveram um aumento na porcentagem de bolhas superficiais das placas moldadas.

Em relação aos ensaios realizados, pode-se citar as seguintes considerações:

- as conclusões mais expressivas dos estudos em pastas foram semelhantes àquelas obtidas nos estudos em concreto, embora não haja correlação entre os parâmetros reológicos dos dois estudos;
- o ensaio de FBRM, que ainda é pouco utilizado, é uma ferramenta útil para o estudo de diferentes mecanismos de floculação e estabilidade dos flocos em misturas à base de cimento;
- os resultados de FBRM apresentaram boa correlação com os resultados dos testes reológicos;
- não existe uma correlação significativa entre os resultados de abertura no *slump flow* e a tensão de escoamento dos concretos. Por outro lado, houve uma correlação razoável entre o tempo de escoamento no funil V e a viscosidade das misturas.

Finalmente, a fim de elucidar o objetivo geral deste trabalho, foi possível concluir que o uso de filers diabásicos e filers gnáissicos pode substituir o filer calcário em concretos autoadensáveis sem prejuízo do seu desempenho no estado fresco e endurecido. Na ausência de filer calcário, o uso de filers alternativos é sempre preferível ao aumento do consumo de cimento, seja por razões técnicas ou econômicas. Dessa forma, os resultados favoráveis da utilização de filers de britagem em misturas de CAA não só apresenta potencial para redução dos custos, como também proporciona uma solução para problemas ambientais relacionados a esse resíduo.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns aspectos citados neste trabalho podem ser estudados de forma mais expressiva, a fim de contribuir para a aplicação de CAAs de maneira geral e para a disseminação do uso de fílers alternativos.

- Avaliar a durabilidade dos CAAs dosados com fílers de britagem quanto à penetração de cloretos e reação álcali-agregado.
- Avaliar a microestrutura dos CAAs confeccionados com as diferentes adições por meio de MEV.
- Estudar a qualidade superficial do CAA variando diferentes fatores, como forma de enchimento, material das formas, formato das formas, aditivos desmoldantes etc.
- Testes em campo: realizar ensaios em indústrias de pré-fabricados para relacionar os resultados laboratoriais com o desempenho em campo.
- Verificar a resposta do reômetro ICAR com uma gama mais ampla de materiais e aplicações.
- Testes com o reômetro Pheso Poli-USP, a fim de comparar as conclusões obtidas com o reômetro ICAR.
- Testes em CAA com misturas binárias de fílers (calcário e diabásio/gnaïsse), a fim de verificar a se há um aumento na resistência mecânica sem afetar o consumo de aditivo de forma expressiva.
- Estudo do módulo de elasticidade de concretos contendo fíler alternativos, para verificar se a melhora dessa propriedade está relacionada à presença do material, ou somente ao acréscimo da resistência à compressão.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing Materials. **ASTM C 837**. Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay. PA: ASTM International, 2009.

___ **ASTM C1610/C1610M**. Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete using Column Technique. PA: ASTM International, 2010.

___ **ASTM C1611/C1611M**. Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. PA: ASTM International, 2009.

___ **ASTM C1621/C1621M**. Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring. PA: ASTM International, 2009.

___ **ASTM C1712**. Standard Test Method for Rapid Assessment of Static Segregation Resistance of Self-Consolidating Concrete Using Penetration Test. PA: ASTM International, 2014.

___ **ASTM C1738**. Standard practice for high-shear mixing of hydraulic cement pastes. PA: ASTM International, 2014.

___ **ASTM C1758/C1758M**. Standard Practice for Fabricating Test Specimens with Self-Consolidating Concrete. PA: ASTM International, 2013.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15823**. Concreto Autoadensável 1-6. Rio de Janeiro, 2010.

___ **NBR 11768**. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

___ **NBR 14949**. Microrrevestimentos asfálticos – Caracterização da fração fina por meio da absorção de azul de metileno. Rio de Janeiro, 2003.

___ **NBR 15558**. Concreto – Determinação da Exsudação. Rio de Janeiro, 2008.

___ **NBR 5737**. Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

___ **NBR 5739**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

___ **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

___ **NBR 7211**. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

___ **NBR 7222**. Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

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

___ **NBR 8522**. Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

___ **NBR 9062**. Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2006.

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

___ **NBR NM 76**. Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

AHARI, R.S; ERDEM, T.K; RAMYR, K. Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, Volume 75, January 2015, Pages 89 – 98.

AHMAD, S.; ADEKUNLE, S. K.; MASLEHUDDIN, M.; AZAD, A.K. Properties of self-consolidating concrete made utilizing alternative mineral fillers. **Construction and Building Materials**, Volume 68, October 2014, Pages 268-276.

American Association of State Highway and Transportation Officials. **AASHTO TP57-99**. Standard Test Method for Methylene Blue Value of Clays Mineral Fillers, and Fines. AASHTO Standards., Washington, D.C., 2000.

- American Concrete Institute - **ACI Committee 237R-07**. Self-Consolidating Concrete. 2007.
- American Concrete Institute – **ACI Committee 303R-04**. Guide to cast-in-place architectural concrete practice. 2008.
- ANDREOLA, F; BARBIERI, L; LANCELLOTTI, I; BIGNOZZI, M.C; SANDOLINI, F. New blended cement from polishing and glazing ceramic sludge. **International Journal of Applied Ceramic Technology**: Ceramic Product Development and Commercialization, v.7, n. 4, p. 546-555, 2010.
- AQEL, M.; PANESAR, D.K. Hydration kinetics and compressive strength of steam-cured cement pastes and mortars containing limestone filler. **Construction and Building Materials**, Volume 113, June 2016, Pages 359-368.
- ASSAAD, J.J.; HARB, J.; MAALOUF, Y. Effect of vane configuration on yield stress measurements of cement pastes, **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, Volume 230, April 2016, Pages 31-42.
- ATTIOGBE, E. K.; SEE, H. T.; DACZKO, J. A. Engineering properties of self-consolidating concrete. In: Proceedings of the First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete. **Proceeding**. 2002.
- BANFILL, P.F.G. Rheology of fresh cement and concrete. **Rheology Reviews**. Pp 61-130. The British Society of Rheology. 2006.
- BANFILL, P.F.G. The rheology of fresh cement and concrete – a review. In: International Cement Chemistry Congress, 11st., 2003, Durbab. **Proceeding**. France: RILEM Publications, 2003. p. 533-539.
- BANFILL, P.F.G. The rheology of fresh mortar – a review. **Anais**. Florianópolis. VI SBTA, 2005.
- BARNES, H.A. **Journal of Rheology**. V. 33, Issue 2, Pg 329-366. 1989.
- BARRIGA, P.A.P. Reologia del concreto. In: XIV Congreso Nacional de Ingenieria Civil – Iquitos. **Anais**. 2003.
- BELLEW, G. P.E. Petrographic and Technological Methods for Evaluation of Concrete

Aggregates, **Analytical Techniques in Concrete Science and Technology**, Ramachandran, V.E., Beaudoin, J.J., ed., Chapter 2, William Andrew Publishing/Noyes Publications, New York, 2001.

BERODIER, E.; SCRIVENER, K. Understanding the filler effect on the nucleation and growth of C-S-H. **Journal the American Ceramic Society**. Vol 12, 2014.

BETIOLI, A.M.; GLEIZE, P.J.P.; SILVA, D.A.; JOHN, V.M.; PILEGGI, R.G. Effect of HMEC on the consolidation of cement pastes: Isothermal calorimetry versus oscillatory rheometry, **Cement and Concrete Research**, Volume 39, Issue 5, May 2009, Pages 440-445.

BIERNACKI, J.J.; WILLIAMS, P. J.; STUTZMAN, P. E.: Kinetics of reaction of calcium hydroxide and fly ash. **ACI Materials Journals**, Vol. 98, N° 4, p. 340-349, July-August 2001.

BILLBERG, P. Understanding formwork pressure generated by fresh concrete. In **Understanding the Rheology**. Edited by Nicolas Roussel. Woodhead Publishing. 2012.

BILLBERG, P. Mix design model for self-compacting concrete. In: First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete. **Proceedings**. 2002. p. 65-70.

BLANCO, A.; FUENTE, E.; NEGRO, C.; TIJERO, J. Flocculation Monitoring: Focused Beam Reflectance Measurement as a Measurement Tool, **Canadian Journal of Chemical Engineering**, vol. 80, pp. 734-740, 2002.

BODENHEIMER, W.; HELLER, L. Sorption of methylene blue by montmorillonite saturated with different cations. **Israel Journal of Chemistry**. Volume 6. 307-314. 1968.

BOLLER, M.; BLASER, S. Particles under stress. **Water Sci. Technol**, 37. 9-29. 1998.

BONAVETTI, V.L.; RAHHAL, V.F.; IRASSAR, E.F. Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements. **Cement and Concrete Research**. Vol. 31. p. 853-859. 2001.

BONEN, D; SHAH, S.P. Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete. **Progress in Structural Engineering and Materials**, Volume 7, Issue 1, January/March 2005, pages 14–26.

BOTELLA, R.M. **Reologia de suspensões cerâmicas**. Consejo superior de investigaciones científicas, Madrid, 2005.

BOUZIANI, T.; BENMOUNAH, A. Correlation between v-funnel and minislump test results with viscosity. **KSCE Journal of Civil Engineering**. 2013.

BRADY, J.F.; BOSSIS, G. Stokesian dynamics. **Ann. Rev. Fluid Mech.** N. 20. Pg 111-157. 1988.

British Standards Institution. **BS 812**, 1975. Methods for sampling and testing of mineral aggregates, sands and fillers. Part 1: methods for determination of particle size and shape.

___ **BS 812:105.1**, 1990. Methods for determination of particle shape: flakiness index.

BUI, B.K.; MONTGOMERY, D. Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume. In: 1st International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete. Stockholm, Sweden, p. 373-384, **Proceeding**. 1999.

CALLISTER, W.D., Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CAMACHO, R.E.R.; CORONA, G.G.M.; AFIF, R.U.; ROMÁN, H.J.M. Experiences with SCC to increase the productivity and applications of prefabricated elements in Mexico. In: Second International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Compacting Concrete, RILEM, Pg.808-816. **Proceeding**. 2009.

CAMÕES, A. Influência do superplastificante nos parâmetros reológicos do concreto fresco. **Engenharia Civil – UM**. N. 24, 2005, pg. 29-43.

CASTRO, A.L.; LIBORIO, J.B.K.; PANDOLFELLI, V.C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil – revisão. **Cerâmica**. n. 57. Pg 63-75. 2011.

CASTRO, A.L.; PANDOLFELLI, V.C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica** n.55. Pg 18-32. 2009.

CEPURITIS, R.; JACOBSEN, S.; PEDERSEN, B.; MØRTSELL, E. Crushed sand in concrete – Effect of particle shape in different fractions

and filler properties on rheology, **Cement and Concrete Composites**, Volume 71, August 2016, Pages 26-41.

CHATEAU, X. Particle packing and the rheology of concrete. In **Understanding the Rheology**. Edited by Nicolas Roussel. Woodhead Publishing, 2012.

CHIDIAC, S.E.; MAHMOODZADEH, F. Plastic viscosity of fresh concrete – A critical review of predictions methods, **Cement and Concrete Composites**, Volume 31, Issue 8, Pg 535-544, 2009.

CHOI, M. S.; LEE, J.S.; RYU, K.S.; KOH, K.T.; KWON, S.H. Estimation of rheological properties of UHPC using mini slump test, **Construction and Building Materials**, Volume 106, 1 March 2016, Pages 632-639.

CHOUDHARY, A.; SHAH, V.; BISHNOI, S. Effect of low cost fillers on cement hydration, **Construction and Building Materials**, Volume 124, October 2016, Pages 533-543.

Concrete International Board – Commission W29. **CIB** report n. 24: tolerances on blemishes of concrete; 2003.

COUSSOT, P.; ANCEY, C. **Rhéophysique des pâtes et des suspensions**, Paris , EDP Sciences, 1999.

CYR, M.; LEGRAND, C.; MOURET, M. Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives. **Cement and Concrete Research**. Vol. 30. Pp 1477-1483. 2000.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength, **Cement and Concrete Research**, Volume 36, Issue 2, February 2006, Pages 264-277.

DACZKO, J.A. **Self-consolidating concrete: applying what we know**. CRC Press. NW, 2012.

DAL MOLIN, D. C. C.; Técnicas Experimentais para Estudos da Microestrutura. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1ª Edição, v. 1, São Paulo. 2007. p. 403-436.

DAMINELI, B.L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. 2013. 265p. Tese (Doutorado). Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DAMO, G.F. **Avaliação do desempenho de diferentes agregados miúdos de britagem em concretos de cimento Portland**. 2011. 230p. Dissertação (Mestrado). Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. 2011.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. E & FN Spon, London, 1999.

DE LARRARD, F.; FERRARIS, C.F.; SEDRAN, T. Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material. **Materials and Structures**, Vol 31, pg 494-498, 1998.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete, **Cement and Concrete Research**, Volume 32, Issue 11, November 2002, Pg 1699-1704

DEHWAH, H. A. F. Mechanical properties of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume or fly ash, **Construction and Building Materials**, Volume 26, Issue 1, Pg 547-551, 2012.

Deutsches Institut fur Normung. **DIN 52 114**. Deutshen Normen ausschusses, Berlin.

DIAMANTONIS, N.; MARINOS, I.; KATSIOTIS, M.S.; SAKELLARIOU, A.; PAPATHANASIOU, A.; KALOIDAS, V.; KATSIOTI, M. Investigations about the influence of fine additives on the viscosity of cement paste for self-compacting concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 24, Issue 8, p. 1518-1522, 2010.

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

DONIAK, I.O.; GUTSTEIN, D. Concreto Pré-fabricado. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 2011. Editor Geraldo C. Isaia. Volume I, Pg 347-380. IBRACON. 2011.

DRUTA, C; WANG, L; LANE, D.S. Tensile strength and paste–aggregate bonding characteristics of self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, Volume 55, March 2014, Pages 89–96.

ELMOATY, A.E.M.A. Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust. **Construction and Building Materials**. Vol. 47, 743-752. 2013.

EN 933-9. Tests for geometrical properties of aggregates. Part 9: Assessment of fines — Methylene blue test. Austrian Standards Institute, 2009

ERN, T.; HELENE, P.R.L. **Estudo das propriedades térmicas do concreto de média e alta resistência**. BT/PCC/439. USP. SP. 2003.

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

European Committee for Standardization, CEN, 1993. European Standard **EN 933-4** (Proposed Draft), Tests for geometrical properties of aggregates—part 4: determination of particle shape of aggregates-Shape index. CEN, Brussels.

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

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). Specification and guidelines for self-compacting concrete. Specification, Production and Use. In: **EFNARC**. 2005.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). Guidelines for Viscosity Modifying Admixtures for Concrete. In: **EFNARC**. 2006.

FABBRI, G.T.P. **Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno**. 176p. Tese (doutorado). Engenharia Civil. Universidade de São Paulo. 1994.

FABBRIS, F.; CARVALHO, W. D.; LOOTENS, D. A Concrete Rheometer: features and industrial applications. Rheology and processing of construction materials – 7th RILEM International

Conference on Self-Compacting Concrete and 1st RILEM International Conference on Rheology and Processing of Construction Materials. Editores Nicolas Roussel e Hela Bessaies-Bey. Pg 99-106. **Proceeding**, RILEM, 2013.

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

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

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**, Volume 36, Issue 9, September 2006, Pages 1719-1726.

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**. Volume 104, N° 5, pg 461- 478, 1999.

FERRARIS, C.F.; BROWER, L.; OZYILDIRIM, C.; DACZKO, J. **Workability of self-compacting concrete**. National Institute of Standards and Technology, 2000.

FERRARIS, C.F.; DE LARRARD, F. **Testing and Modeling of Fresh Concrete Rheology**. NIST (National Institute of Standards and Technology) Report 6094, NIST, Gaithersburg, 1998.

FERRARIS, C.F.; GAIDIS, J.M. Connection between the rheology of concrete and rheology of cement paste. **ACI Materials Journal**. Title n. 89; 1992.

FERRARIS, C.F.; OBLA, K.H.; HILL, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, **Cement and Concrete Research**, Volume 31, Issue 2, Pg 245-255, 2001.

FERRON, R.D. **Formwork pressure of self-consolidating concrete: influence of flocculation mechanisms, structural rebuilding,**

tixotropy and rheology. 2008, 294p. Dissertation (PhD). Northwestern University. Evanston, Illinois, 2008.

FERRON, R.D.; NEGRO, C.; SHAH, S.P. Flocculation in cement pastes measured through use of laser microscopy. In **Transition from fluid to solid: re-examining the behavior of concrete at early ages**. Ed. K. Riding. American Concrete Institute. SP-259. 2009

FERRON, R.D.; SHAH, S.; FUENTE, E.; NEGRO, C. Aggregation and breakage kinetics of fresh cement paste, **Cement and Concrete Research**, Volume 50, August 2013, Pages 1-10.

FEYS, D.; WALLEVIK, J.E.; YAHIA, A.; KHAYAT, K.H.; WALLEVIK, O.H. Extension of the Reiner-Riwlin equation to determine modified Bingham parameters measured in coaxial cylinders rheometers. **Materials and Structures**, 46. 289-311. 2013

FEYS, D.; VERHOEVEN, R.; SCHUTTER, G. Why is fresh self-compacting concrete shear thickening?, **Cement and Concrete Research**, Volume 39, Issue 6, Pg 510-523, 2009.

FLATT, E.; SCHOBER, I. Superplasticizers and the rheology of concrete. In **Understanding the Rheology**. Edited by Nicolas Roussel. Woodhead Publishing. 2012.

GALETAKIS, M.; ALEVIZOS, G.; LEVENTAKIS, K. Evaluation of fine limestone quarry by-products, for the production of building elements – An experimental approach, **Construction and Building Materials**, Volume 26, Issue 1, 2012, Pg 122-130.

Germann Instruments. **Rheometer ICAR**. Disponível em <<http://www.germann.org/>>. Acessado em 30 de Maio de 2013.

GESOGLU, M.; GÜNEYISI, E.; OZTURAN, T.; OZ, H. O.; ASAAD, D. S. Shear thickening intensity of self-compacting concretes containing rounded lightweight aggregates, **Construction and Building Materials**, Volume 79, March 2015, Pages 40-47.

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

GOMES, P. C. C. (2002) **Optimization and Characterization of High-Strength Self -Compacting Concrete**. Tese (Doutorado em Engenharia)

Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

GUNEYISI, E.; GESOGLU, M.; AL-GOODY, A.; IPEK, S. Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**. 95. 29-44. 2015

GUTTERIDGE, W.A.; DALZIEL, J.A. Filler coment: the effect of the secondary component on the hydration of Portland cement: Parte I. A fine non-hydraylic filler. **Cement and Concrete Research**, 20, I 5, 778-782, 1990.

HADI, L.; HALABIAN, A.M.; CHAMANI, M.R. Simulation of concrete flow in V-funnel test and the proper range of viscosity and yield stress for SCC. **Materials and Structures**. Vol. 47, 1729-1743. 2014.

HAN, D. **Flow behavior and microstructure of cement-based materials**. 268p. Dissertation for PhD. The University of Texas at Austin. Austin – TX. 2014.

HAN, D.; FERRON, R. D. Effect of mixing method on microstructure and rheology of cement paste, **Construction and Building Materials**, Volume 93, 15 September 2015, Pages 278-288.

HAN, D.; FERRON, R. D. Influence of high mixing intensity on rheology, hydration, and microstructure of fresh state cement paste, **Cement and Concrete Research**, Volume 84, June 2016, Pages 95-106.

HARTMANN, C.; JEKNAVORIAN, A.; SILVA, D.; BENINI, H. Aditivos químicos para concretos e cimentos. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Editor Geraldo C. Isaia. Volume I, Pg 347-380. IBRACON. 2011.

HARTMANN, C.T.; HELENE, P.R.L. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2003.

HASPARIK, N. P.: **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. Porto Alegre. 2005. 326p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de

Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

HAWKING, P.; TENNIS, P.; DETWILER, R. **The Use of Limestone in Portland Cement: a state-of-the-art review**. Portland Cement Association. 2003.

HEIRMAN, G.; VANDEWALLE, L.; GEMERT, D.V.; WALLEVIK, O. Integration approach of the Couette inverse problem of powder type self-compacting concrete in a wide-gap concentric cylinder rheometer, J. Nonnewton. **Fluid Mech.** 150 (2008) 93–103.

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**, Volume 32, Issue 4, April 2002, Pg 505-511.

HOTZA, D. Artigo revisão: colagem de folhas cerâmicas. **Cerâmica**. n. 43. Pg 157-164. 1997.

HOPPE, J.F. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação**. São Paulo. 318 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

HU, J.; GE, Z.; WANG, K. Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times, **Construction and Building Materials**, Volume 50, January 2014, Pages 657-663.

IRGENS, F. **Continuum Mechanics**. Springer, Noruega, 2008.

JAFARI, H. A.; KAZEMIAN, A.; AHMADI, B.; BERENJIAN, J.; SHEKARCHI, M. Studying effects of chemical admixtures on the workability retention of zeolitic Portland cement mortar, **Construction and Building Materials**, Volume 72, December 2014, Pages 262-269.

JARVIS, P.; JEFFERSON, B.; GREGORY, J.; PARSONS, S.A. A review of floc strength and breakage. **Water Research**. 39. 3121-3137. 2005.

JAU, W.C.; YANG, C.T. Development of a modified concrete rheometer to measure the rheological behavior of conventional and self-consolidating concretes. **Cement & Concrete Composites**. Vol. 32, 450-460. 2010.

- JIN, J. **Properties of mortar for self-compacting concrete**. 399p. Thesis (PhD). University College London. 2002.
- JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete, **Cement and Concrete Research**, Volume 78, Part A, December 2015, Pages 71-80.
- KADRI, E.H.; AGGOUN, S.; DE SHUTTER, G.; EZZIANE, K. Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration. **Materials and Structures**. Vol. 43. 2010.
- KAKALI, G.; TSIVILIS, S.; AGGELI, E.; BATI, M. Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO₃. **Cement and Concrete Research**. Vol. 30. Pp 1073-1077. 2000.
- KAUFMANN, J.; WINNEFELD, F.; ZURBRIGGEN, R. Polymer dispersions and their interaction with mortar constituents and ceramic tile surfaces studied by zeta-potential measurements and atomic force microscopy, **Cement and Concrete Composites**, Volume 34, Issue 5, May 2012, Pg 604-611
- KAUPPI, A.; ANDERSSON, K.M.; BERGSTROM, L. Probing the effect of superplasticizer adsorption on the surface forces using the colloidal probe AFM technique. **Cement and Concrete Research**. Vol. 35; pp 133-140. 2005.
- KHALEEL, O.R.; MISHHADANI, S.A.; RAZAK, H.A. The Effect of Coarse Aggregate on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete (SCC), **Procedia Engineering**, Volume 14, 2011, Pg 805-813
- KHAYAT, K. H. Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials — An overview, **Cement and Concrete Composites**, Volume 20, Issues 2–3, Pg 171-188, 1998.
- KIM, J-H.; NOEMI, N.; SHAH, S. P. Effect of powder materials on the rheology and formwork pressure of self-consolidating concrete, **Cement and Concrete Composites**, Volume 34, Issue 6, July 2012, Pages 746-753.
- KIRBY, D. M.; BIERNACKI, J.J. The effect of water-to-cement ratio on the hydration kinetics of tricalcium silicate cements: Testing the two-

step hydration hypothesis, **Cement and Concrete Research**, Volume 42, Issue 8, August 2012, Pages 1147-1156.

KOEHLER, E.P. **Aggregates in Self-consolidating concrete**. 426p. Dissertation (PhD). The University of Texas at Austin. 2007.

KOEHLER, E.; FOWLER, D. **ICAR Research Report 108-2F: Aggregates in SelfConsolidating Concrete**. International Center for Aggregates Research, University of Texas at Austin. 2007.

KOVLER, K.; ROUSSEL, N. Properties of fresh and hardened concrete, **Cement and Concrete Research**, Volume 41, Issue 7, July 2011, Pg 775-792.

KUDER, K.G.; OZYURT, N.; MU, E.B.; SHAH, S.P. Rheology of fiber-reinforced cementitious materials. **Cement and Concrete Research**. Vol. 37, 191-199. 2007.

KUO, C.-Y., "Correlating Permanent Deformation Characteristics of Hot Mix Asphalt with Aggregate Geometric Irregularities," **Journal of Testing and Evaluation**, JTEVA, Vol. 30, N. 2, March 2002, pp. 136–144.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration, **Cement and Concrete Research**, Volume 33, Issue 12, December 2003, Pages 1939-1947.

LEEMANN, A.; HOFFMANN, C. Properties of self-compacting and conventional concrete – differences and similarities. Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Du'bendorf, Switzerland. **Magazine of Concrete Research**, 2005, 57, No. 6, pg 315–319, 2005.

LEEMANN, A; LOSER, R; MUNCH, B. **Influence of cement type on ITZ porosity and chloride resistance of self-compacting concrete**. Cement and Concrete Composites, Volume 32, Issue 2, February 2010, Pages 116–120

LI, H.; HUANG, F.; XIE, Y.; YI, Z.; WANG, Z. Effect of water-powder ratio on shear thickening response of SCC. **Construction and Building Materials**. 131. 585-591. 2017.

LOMBOY, G.R; WANG, X; WANG, J. Rheological behavior and formwork pressure of SCC, SFSCC, and NC mixtures. **Cement and Concrete Composites**, Volume 54, November 2014, Pages 110–116

MANNING, D.; VETTERLEIN, J. **Exploitation and use of quarry fines**. Report N° 087/MIST2/DACM/01. Mineral Solutions. 2004.

MARCHON, D.; MANTELLATO, S.; EBERHARDT, A.B.; FLATT, R.J. Adsorption of chemical admixtures. In **Science and Technology of Concrete Admixtures**. Woodhead Publishing 59. Ed. Aitcin and Flatt. UK, 2016.

MARDANI-AGHABAGLOU, A.; TUYAN, M.; YILMAZ, G.; ARIÖZ, O.; RAMYAR, K. Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 47, October 2013, Pages 1020-1025.

MASAD, E., OLCOTT, D., WHITE, T., AND TASHMAN, L. “Correlation of fine aggregate imaging shape indices with asphalt mixture performance,” *Transportation Research Record 1757*, Paper N. 01-2132, pg. 148-156. **Proceeding**, 2001.

MASAD, E., SAADEH, S., AL-ROUSAN, T., GARBOCZI, E., LITTLE, D. Computations of Particle Surface Characteristics using Optical and X-Ray CT Images, **Journal of Computational Materials Science**, 2005.

MEGID, W.A.E. **Effect of rheology on surface quality and performance of SCC**. These de doctorat sciences application. Université de Sherbrooke. Sherbrooke, Canadá. 363p. 2012.

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

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

MELO, K.A. **Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de filer calcário**. 183p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFSC – Florianópolis – SC, (2005).

MOON, G. D.; OH, S.; JUNG, S. H.; CHOI, Y. C. Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength

development of PLC concrete. *Construction and Building Materials*. 135. 129-136. 2017

MOSTAFA, N. Y.; BROWN, P. W.: Heat of hydration of high reactive pozzolans in blended cements: Isothermal conduction calorimetry. **Thermochimica Acta**, Vol. 435, Issue 2, p. 162-167, 2005.

MURATA J.; KIKUKAWA, H. Viscosity equation for fresh concrete. **ACI Materials Journal**, 1992, 89, No. 3, 230-237.

National Institute of Standards and Technology NIST. **Comparison of concrete rheometers**: International tests at MB (Cleveland OH, USA) Ed.: Chiara Ferraris, Lynn Brower. NISTIR 7154. 2004.

NEHDI, M.; MINDESS, S.; AITCIN, P.C. Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles. **Cement and Concrete Research**. Vol. 28. N. 5, pp 687-697. 1998.

NEHDI, M; RAHMAN, M.A. Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction. **Cement and Concrete Research**, Volume 34, Issue 11, November 2004, Pages 1993–2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª Edição. Bookman Editora Ltda. 2016.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. 2ª Edição. Pini, 1997.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. Editora Bookman, 2ª Edição. 2013.

New Zealand Standard. **NZS 3106**. Design of concrete structures for the storage of liquids. 2009.

NGUYEN, Q.D.; BOGER, D.V. Direct yield stress measurement with the vane method. **Journal of Rheology**. Vol. 29. 1985.

NÍELSSON, I.; WALLEVIK, O.H. Rheological evaluation of some empirical test methods – Preliminary results. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: International Rilem Symposium on self-compacting concrete, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceeding**. France: RILEM Publications, 2003. p.59-68.

OH, S.G.; NOGUCHI, T.; TOMASAWA, F. Toward mix design for rheology of self-compacting concrete. In: 1st International RILEM

Symposium on Self-compacting Concrete. Stockholm, Sweden, p.361-372, **Proceeding**, 1999.

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

OLANIYAN, O.S; AFOLABI, O.M; OKEYINKA, O.M. Granite fines as a partial replacement for sand in sandcrete block production. **International Journal of Engineering and Technology**. Vol. 2, n. 8, 2012.

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação**. 296p. Tese (Doutorado). Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

OVARLEZ, G. Introduction to the rheometry of complex suspensions. In **Understanding the Rheology**. Edited by Nicolas Roussel. Woodhead Publishing. 2012.

OZKUL, T; KUCUK, I. Design and optimization of an instrument for measuring bughole rating of concrete surfaces. **Journal of the Franklin Institute**, 2011; 348(7):1377–92.

PAAMA, L.; PITKÄNEN, I.; RÖNKKÖMÄKI, H.; PERÄMÄKI, P.: Thermal and infrared spectroscopy characterization of historical mortars. **Thermochimica Acta**, 320, 1998, p.127-133.

PARK, C.K.; NOH, M.H.; PARK, T.H. Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, **Cement and Concrete Research**, Volume 35, Issue 5, 2005, Pg 842-849.

PARRA, C; VALCUENDE, M; GÓMEZ, F. Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, Volume 25, Issue 1, January 2011, Pages 201–207

PAUL, R., Using SCC to battle bug holes: what you do affects the surface aesthetics of selfconsolidating concrete, **Concrete Construction**, Nov. 2005.

PÉRA, J.; HUSSON, S.; GUILLOT, B. Influence of finely ground limestone on cement hydration. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 21. Pp 99-105. 1999.

PERROT, A.; LECOMPTE, T.; KHELIFI, H.; BRUMAUD, C.; HOT, J.; ROUSSEL, N. Yield stress and bleeding of fresh cement pastes, **Cement and Concrete Research**, Volume 42, Issue 7, July 2012, Pages 937-944.

PERSSON, A.L. Image analysis of shape and size of fine aggregates, **Engineering Geology**, Volume 50, Issues 1–2, Pg 177-186, 1998.

PETERSSON, O.; BILLBERG, P. A model for SCC: Production methods and workability of concrete. **Proceeding**. International RILEM Conference. E & F N Spon, London, 1996.

PIEKARCZYK, B. L. The type of air-entraining and viscosity modifying admixtures and porosity and frost durability of high performance self-compacting concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 40, Pg 659-671, 2013.

PILAR, R. Avaliação da atividade pozolânica da cinza pesada moída em pastas de cimento Portland. Florianópolis, 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UFSC, Florianópolis, 2012.

PILAR, R.; SCHANKOSKI, R.; PILLAR, N.; ONGHERO, L.; REPETTE, W.L. Estudo da reologia de pastas com diferentes tipos de cimentos e aditivos. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Florianópolis, 2011.

PILAR, R.; SCHANKOSKI, R.A.; DAL MORO, A.J.; REPETTE, W.L. Avaliação de pastas de cimento Portland contendo cinza pesada moída. **Revista Matéria**, v.21, n.1. pp 92-104, 2016.

PILEGGI, Rafael Giuliano. Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários. São Carlos, 2001. 204f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Programa e Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos.

PILEGGI, R.G.; PAIVA, A.E.; PANDOLFELLI, V.C. Desenvolvimento de um reômetro para concretos refratários. In: 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica. **Anais**. Florianópolis, 1999.

QIAN, Y.; KAWASHIMA, S. Use of creep recovery protocol to measure static yield stress and structural rebuilding of fresh cement pastes, **Cement and Concrete Research**, Volume 90, December 2016, Pages 73-79.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – estudo em pasta**. 2008. 188 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008.

QUIROGA, P. N.; FOWLER, D. W. *The effects of aggregates characteristics on the performance of portland cement concrete*, Research Report ICAR 104-1F, Aggregates Foundation for Technology, Research and Education, 2004.

RACHED, M.; FOWLER, D.; KOEHLER, E. **Use of Aggregates to Reduce Cement Content in Concrete**. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Ancona, Italy. 2010

RAHHAL, V.; TALERO, R. Early hydration of Portland cement with crystalline mineral additions. **Cement and Concrete Research**, 35. 1285-1291. 2005.

RAHMAN, M.K; BALUCH, M.H; MALIK, M.A. Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, Volume 50, January 2014, Pages 710–717.

RAMACHANDRAN, V.F.; ZHANG, C.M. Hydration kinetics and microstructural development in the $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ system. **Matériaux et Constructions**. Vol. 19 – n. 114. 1986.

RAMACHANDRAN, V.S. **Concrete Admixtures Handbook, Properties, Science and Technology**, Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1995.

RAMAN, S.N.; NGO, T.; MENDIS, P.; MAHMUD, H.B. High-strength rice husk ash concrete incorporating quarry dust as a partial substitute for sand, **Construction and Building Materials**, Volume 25, Issue 7, Pg 3123-3130. **Proceeding**, 2011.

RAMOS, T.; MATOS, A. N.; SCHMIDT, B.; RIO, J.; SOUSA-COUTINHO, J. Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability, **Construction and Building Materials**, Volume 47, October 2013, Pages 1001-1009.

REK, W.J.; ZALEGOWSKI, K.; GARBACZ, A.; BISSONNETTE, B. Properties of cement mortars modified with ceramic waste fillers. 7th

Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering. **Procedia Engineering**. Vol. 108. Pp 681-687. 2015.

REPETTE, W.L. Concreto Autoadensável. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Editor Geraldo C. Isaia. Volume II, Pg 1807-1842. IBRACON. 2011.

RILEM. Casting of Self Compacting Concrete. Report 35, Final Report of RILEM TC 188-CSC. Skarendahl, A.; Billberg, P. (Ed). França. In: RILEM Publications. **Proceeding**. 41p. 2006.

ROMANO, R.C.O.; CARDOSO, F.A.; PILEGGI, R.G. Propriedades do concreto no estado fresco. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Editor Geraldo C. Isaia. Volume I, Pg 453-500. IBRACON. 2011.

ROUSAN, T. A.; MASAD, E.; TUTUMLUER, E.; PAN, T. Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics, **Construction and Building Materials**, Volume 21, Issue 5, PG 978-990, 2007.

ROUSSEL, N. A theoretical frame to study stability of fresh concrete, **Materials and Structures** N. 39, pg 81–91, 2006.

ROUSSEL, N. The LCPC BOX: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC. **Materials and Structures**, 40, 889-896, 2007.

ROUSSEL, N. From industrial testing to rheological parameters for concrete. In **Understanding the Rheology**. Edited by Nicolas Roussel. Ch. 4. Woodhead Publishing. 2012.

ROUSSEL, N.; STEFANI, C.; LEROY, R. From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests. **Cement and Concrete Research**. Vol 35. Pp 817-822. 2005.

SAAK, A.W.; JENNINGS, H.M.; SHAH, S.P. A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow. **Cement and Concrete Research**. Vol. 34. Pp 363-371. 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**, Volume 121, May 2016, Pages 19-32.

SANTOS, C.C.N. **A influência das características da areia artificialmente britada nas propriedades do estado fresco do concreto**. 243p. Tese (Doutorado). Engenharia Civil. Universidade de Brasília. Faculdade de tecnologia. 2008.

SCRIVENER, K.L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P.J.M. Advances in understanding hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Research** 78. 2015. Pg 38-56.

SENF, L.; HOTZA, D.; REPETTE, W.L. Comportamento reológico de pastas de cimento com adição de sílica ativa, nanossílica e dispersante policarboxílico. **Revista Matéria**, V. 15, N. 1, pg 12-20, 2010.

SFIKAS, I. P.; BADOGIANNIS, E. G.; TREZOS, K. G. Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin, **Construction and Building Materials**, Volume 64, August 2014, Pages 121-129.

SHAH, S.P.; FERRON, R. P.; TREGGER, N.A.; FERRARA, L.; BEACRAFT, M.W. Self-consolidating concrete: now and future. In: Second International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete. China. **Proceeding**. RILEM, 2009.

SHARMA, R.L; PANDEY, S.P. Influence of mineral additives on the hydration characteristics of ordinary Portland cement. **Cement and Concrete Research**, 29, 1525-1529, 1999.

SILVA, D. A. **Efeitos dos polímeros hec e eva na microestrutura de pastas de cimento Portland**. 2001. 263p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Programa de Pós-graduação em Ciências e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

SILVA, W. R. L.; ŠTEMBERK, P. Expert system applied for classifying self-compacting concrete surface finish, **Advances in Engineering Software**, Volume 64, October 2013, Pages 47-61.

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

SOROKA, I.; STERN, N. Calcareous fillers and the compressive strength of Portland cement, **Cement and Concrete Research**, Volume 6, Issue 3, May 1976, Pages 367-376.

SVENSSON, P.D., HANSEN, S. Intercalation of smectite with liquid ethylene glycol— Resolved in time and space by synchrotron X-ray diffraction. **Applied Clay Science** 48, 2010.

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

SU, N.; HSU, K.C.; CHAI, H.W. A simple mix design method for self-compacting concrete, **Cement and Concrete Research**, Volume 31, Issue 12, pg 1799-1807, 2001.

SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Utilization of limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete incorporating high volumes of untreated rice husk ash as fine aggregate, **Construction and Building Materials**, Volume 38, 2013, Pg 455-464.

SVERMOVA, L.; MOHAMMED, S.; BARTS, P.J.M. Influence of mix proportions on rheology of cement grouts containing limestone powder. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 25. Pp 737-749. 2003.

TATTERSALL, G. H.; BANFILL, P. F. G. **The Rheology of Fresh Concrete**, Pitman, London, 1983.

TATTERSALL, G.H. **Workability and Quality Control of Concrete**, E&FN Spon, London (1991), p. 262

TAYLOR, H. F. W.: **Cement chemistry**. 2ª edição. London: Thomas Telford Publishing, 1997.

TENNICH, M.; KALLEL, A.; OUEZDOU, M. B. Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes, **Construction and Building Materials**, Volume 91, August 2015, Pages 65-70.

TERZIAN, P. Concretos para estruturas pré-fabricadas. In: **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. Editor: Geraldo C. Isaia. V. 2. PG 1363-1389. IBRACON. 2005.

THOMSON. M.S. Blowholes in concrete surface. **Concrete**, 3 (2) (1970), pp. 64–66.

TOPÇU, I.B.; DEMIR, A. Relationship between methylene blue values of concrete aggregate fines and some concrete properties. **Can. J. Civ. Eng.** 35: 379–383 (2008).

TREGGER, N. A.; PAKULA, M.E.; SHAH, S. P. Influence of clays on the rheology of cement pastes, **Cement and Concrete Research**, Volume 40, Issue 3, March 2010, Pages 384-391.

TUTIKIAN, B.F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos autoadensáveis**. 2007. 163p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2007.

TUTIKIAN, B.F.; DAL MOLIN, D.. **Concreto Autoadensável**. 1ª Edição. Sao Paulo – SP. Editora PINI, 2008.

UYSAL, M; YILMAZ, K. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, Volume 33, Issue 7, August 2011, Pages 771–776

UYSAL, M. Self-compacting concrete incorporating filler additives: Performance at high temperatures, **Construction and Building Materials**, Volume 26, Issue 1, pg 701-706, 2012.

UYSAL, M.; SUMER, M. Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures, **Construction and Building Materials**, Volume 25, Issue 11, 2011, Pg 4112-4120,

VICKERS JR., T.M.; FARRINGTON, S.A.; BURY, J.R.; BROWER, L.E. Influence of dispersant structure and mixing speed on concrete slump retention. **Cement and Concrete Research**. Vol. 35. Pp 1882-1890. 2005.

VIJAYALAKSHMI, M.; SEKAR, A.S.S.; GANESH, G. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste, **Construction and Building Materials**, Volume 46, September 2013, Pages 1-7.

VILANOVA, A.; GOMEZ, J. F.; LANDSBERGER, G.A. Evaluation of the mechanical properties of self-compacting concrete using current estimating models: Estimating the modulus of elasticity, tensile strength, and modulus of rupture of self-compacting concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 25, Issue 8, pg 3417-3426, 2011.

WALLEVIK, J. E. Relationship between the Bingham parameters and slump, **Cement and Concrete Research**, Volume 36, Issue 7, July 2006, Pages 1214-1221.

WALLEVIK, O. H.; FEYS, D.; WALLEVIK, J. E.; KHAYAT, K. H. Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials, **Cement and Concrete Research**, Volume 78, Part A, December 2015, Pages 100-109.

WALLEVIK, O. H.; WALLEVIK, J. E. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes, **Cement and Concrete Research**, Volume 41, Issue 12, December 2011, Pages 1279-1288.

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 (Mestrado). Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. 2008.

WILLIAMS, D.; SAAK, A.; JENNINGS, H.M. The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste, **Cement and Concrete Research**, Volume 29, Issue 9, 1999, Pg 1491-1496.

YAHIA, A.; KHAYAT, K.H. Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudoplastic grout, **Cement and Concrete Research** 31 (2001) 731-738

YAMMINE, J.; CHAUCHE, M.; GUERINET, M.; MARANVILLE, M.; ROUSSEL, N. From ordinary rheology concrete to self compacting concrete: a transition between frictional and hydrodynamic interactions, **Cement and Concrete Research** 38, (2008), Pg 890-896.

YANG, M.; JENNINGS, H.M. Influences of mixing methods on the microstructure and rheological behavior of cement paste. **Advanced Cement Based Materials**, 2, 70-78. 1995.

YANG, K-H.; JUNG, Y-B.; CHO, M-S.; TAE, S-H. Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO₂ emissions from concrete, **Journal of Cleaner Production**, Volume 103, September 2015, Pages 774-783.

YEUNG, A.K.C.; PELTON, R. Micromechanics: a new approach to studying the strength and breakup of flocs. **Journal of Colloid and Interface Science**. Vol. 184. 579-585. 1996.

YIM, H. J.; KIM, J. H.; SHAH, S. P. Cement particle flocculation and breakage monitoring under Couette flow, **Cement and Concrete Research**, Volume 53, November 2013, Pages 36-43.

YOOL, A.I.G; LEES, T.P.; FRIED, A. Improvements to the methylene blue dye test for harmful clay in aggregates for concrete and mortar, **Cement and Concrete Research**, Volume 28, Issue 10, 1998, P.1417-1428.

YUKSELEN, Y.; KAYA, A. Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils. **Engineering Geology** 102, pg 38-45. 2008.

ZHANG, X.; HAN, J. The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste, **Cement and Concrete Research**, Volume 30, Issue 5, Pg 827-830, 2000.

ZHANG, Y.; ZHANG, X. Research on effect of limestone and gypsum on C3A, C3S and PC clinker system, **Construction and Building Materials**, Volume 22, Issue 8, August 2008, Pages 1634-1642.

APÊNDICE A

Estudos Preliminares: Estudos Reológicos com Reômetro Pheso POLI-USP

Os primeiros estudos reológicos foram realizados na USP, com o reômetro Pheso Poli-USP. Foram produzidos 18 CAAs, com diferentes tipos e teores de finos, e medidas as suas propriedades reológicas. O estudo visou, principalmente, o primeiro contato com um equipamento destinado a reometria de concreto e, posterior análise das leituras obtidas.

Os experimentos realizados na USP, identificaram a viabilidade do estudo da reologia do CAA contendo filers de britagem, e permitiu elaborar o programa experimental a ser realizado na UT. Com os resultados obtidos, pode-se perceber que os filers de britagem diabásicos e gnáissicos apresentavam potencial para serem utilizados como materiais alternativos ao filer calcário em CAA.

A seguir estão explanados os materiais, métodos e resultados dos testes realizados na USP.

Materiais e Métodos

Materiais

Foi utilizado cimento Portland CP V ARI, com a composição química e física apresentada na Tabela A1 (conforme fabricante). Como aditivo, foi utilizado um superplastificante à base de policarboxilato, com concentração de sólidos de aproximadamente 23% e massa específica de 1,05 kg/dm³. A dosagem recomendada pelo fabricante era de 0,3 – 0,8% da massa de cimento.

Como agregados, utilizou-se uma composição de 60% de areia natural fina com 40% de areia natural média grossa, e brita 4,75/12,5 de origem granítica. A caracterização dos agregados pode ser visualizada na Tabela A2 e na Figura A1.

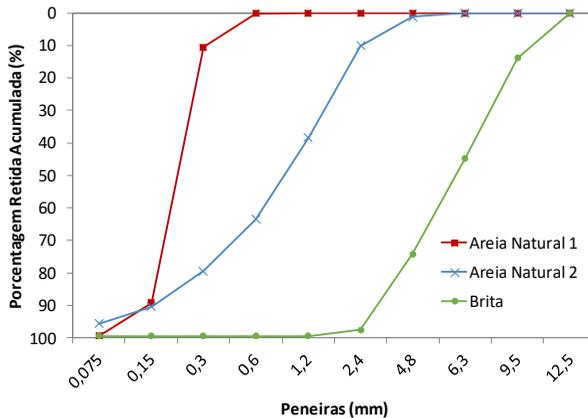
Tabela A1: Composição química e propriedades físicas do cimento.

SiO ₂	19,04	Perda ao Fogo (%)	3,27
Al ₂ O ₃	4,33	Resíduo Insolúvel (%)	0,67
Fe ₂ O ₃	2,73	Massa Específica (kg/dm ³)	3,12
CaO	61,5	Blaine (m ² /kg)	394
MgO	4,42	Tempo de pega (h)	Início 03:33
SO ₃	2,69		Fim 04:10
Na ₂ O e K ₂ O	0,69	Resistência à compressão (MPa)	7 dias 45,1
			28 dias 53,9

Tabela A2: Caracterização física dos agregados utilizados.

Materiais	Massa Específica (kg/dm ³)	Módulo de Finura	Material Pulverulento (%)
Areia Natural Fina	2,64	1,00	0,58
Areia Natural Média Grossa	2,62	2,83	4,36
Brita 9,5/12,5	2,67	5,83	0,57

Figura A1: Distribuição granulométrica do agregado graúdo.



Três diferentes filers de britagem foram avaliados nesse trabalho: calcário (representado como C, e utilizado como referência), diabásio (representado como D) e gnaisse (representado como G). A caracterização química e física dos filers pode ser visualizada na Tabela A3

Tabela A3: Características químicas e físicas dos filers.

Filer	C	D	G
Origem	Calcário	Diabásio	Gnaisse
<i>Análise Química (%)</i>			
CaO	54,03	8,48	1,12
Al ₂ O ₃	0,31	15,46	15,95
Fe ₂ O ₃	0,22	0,10	1,30
SiO ₂	0,85	51,88	70,13
MgO	1,91	4,58	0,69
K ₂ O	0,02	0,76	6,22
<i>Propriedade Física</i>			
Massa específica (kg/dm ³)	2,80	2,82	2,77

As amostras obtidas diretamente nas pedreiras (*in natura*) apresentaram

um D_{50}^9 de 38, 33 e 153 μm (representado como C38, D33 e G153 na Tabela A4). Além da granulometria *in natura*, foram testados fílers com distribuições granulométricas mais finas, para verificar a influência do tamanho das partículas nas propriedades reológicas da mistura. O filer de gnaïsse foi moído até chegar a um D_{50} de 34 μm , para ficar próximo aos demais fílers testados. Todos os fílers ainda foram moídos para atingir um D_{50} igual a 16 μm , valor próximo ao cimento utilizado neste trabalho (D_{50} do cimento igual a 15,8 μm), uma vez que, é comum CAAs apresentarem acréscimo do consumo de cimento, para atender a demanda de finos necessária para promover a viscosidade adequada da mistura. Os fílers de calcário e diabásio também foram testados em uma granulometria intermediária, com D_{50} de 24 μm .

Um moinho de bolas foi utilizado para moer os fílers. Foram utilizadas 60 bolas metálicas padronizadas, e o tempo no moinho variou em função do tipo de filer e do D_{50} desejado. A Tabela A4 mostra o D_{50} dos fílers e as Figuras A2-A4 mostram as distribuições granulométricas a laser de todos os tipos de finos utilizados, antes e após a moagem. Os fílers com mesmo D_{50} apresentam curvas granulométricas similares.

Tabela A4: D_{50} dos fílers utilizados.

Fíler	D_{50} (μm)	N.*
Calcário sem moer	38,09	C38
Calcário granulometria intermediária	25,22	C25
Calcário granulometria próxima ao cimento	16,45	C16
Diabásio sem moer	33,01	D33
Diabásio granulometria intermediária	24,22	D24
Diabásio granulometria próxima ao cimento	16,12	D16
Gnaïsse sem moer	153,80	G153
Gnaïsse granulometria próxima ao filer calcário <i>in natura</i>	34,15	G34
Gnaïsse granulometria próxima ao cimento	16,56	G16

*N. : denominação.

⁹ D_{50} : 50% das partículas apresentam diâmetro abaixo do D_{50} .

Figura A2: Calcário – Distribuição granulométrica a laser para cada D₅₀.

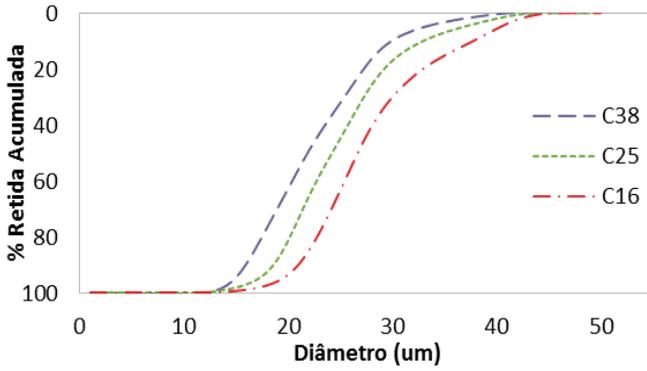


Figura A3: Diabásio – Distribuição granulométrica a laser para cada D₅₀.

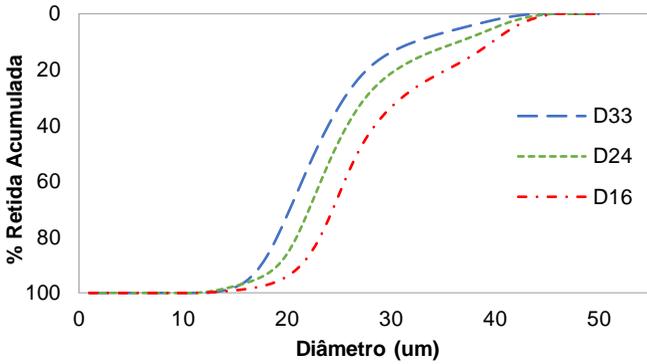
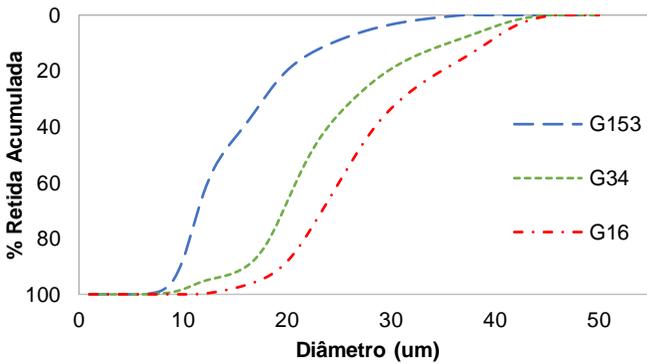


Figura A4: Gnaisse – Distribuição granulométrica a laser para cada D₅₀.



Proporções e Mistura

O traço das misturas foi baseado na recomendação da EFNARC (2005) para CAA. A proporção dos materiais está apresentada na Tabela A5. Nota-se que não se alterou o volume de fíler empregado nas misturas de concreto. Uma das variáveis analisadas, além da origem mineralógica, foi a distribuição granulométrica para cada tipo de fíler, a qual, neste trabalho, foi representada pelo D_{50} . Os concretos foram misturados em betoneira de eixo inclinado. Todas as substituições de fíler calcário pelos outros filers foram realizadas em volume e a quantidade de aditivo superplastificante foi ajustada para cada mistura objetivando a abertura no *slump flow* de 70 ± 5 cm, classificação SF 2 na ABNT NBR 15823 (2010) e fluidez indicada para a maioria das aplicações correntes, de acordo com a referida norma. A opção de não manter o aditivo fixo foi importante para que todas as misturas pudessem ser classificadas como autoadensáveis. Do contrário, produzira-se misturas muito diferentes e sem aplicação prática.

Tabela A5: Composição dos concretos dosados (kg/m³).

Concreto	Cimento	Fíler			Areia		Brita	Água a/c=0,53	Aditivo	
		Cal	D	G	Fina	Média			l/m ³	%
C38	379	222	0	0	399	261	927	201	1,75	0,46
C25	379	222	0	0	399	261	927	201	2,50	0,66
C16	379	222	0	0	399	261	927	201	2,54	0,67
D33	379	0	224	0	399	261	927	201	3,60	0,95
D24	379	0	224	0	399	261	927	201	3,84	1,01
D16	379	0	224	0	399	261	927	201	3,76	0,99
G153	379	0	0	220	399	261	927	201	3,19	0,84
G34	379	0	0	220	399	261	927	201	3,28	0,87
G16	379	0	0	220	399	261	927	201	3,30	0,87

Ensaio

Foram realizados os ensaios de caracterização de concreto autoadensável prescritos pela ABNT NBR 15823 (2010): *slump flow*, coluna de segregação, funil V e caixa L.

Após a verificação do diâmetro de abertura pelo *slump flow*, uma amostra adicional da mesma partida de concreto era destinada ao ensaio de reometria rotacional. O reômetro utilizado para medir a reologia dos concretos foi o desenvolvido na Poli-USP (Figura A5), que possui rotação concêntrica ou planetária. O equipamento varia controladamente a rotação, em RPM, transferindo-a, por meio de uma raquete dentada, para a mistura a ser analisada. O concreto (aproximadamente 20 litros) era vertido no recipiente do reômetro para execução do ensaio. O concreto utilizado no reômetro não foi utilizado para nenhum outro ensaio de caracterização para não ocorrer perda de abatimento. Para medição da tensão de cisalhamento das misturas, padronizou-se as taxas de cisalhamento: 25, 50, 100, 150 e 250 RPM. As mesmas taxas foram aplicadas em ordem crescente e posteriormente decrescente, por 10 segundos em cada rotação, sendo a tensão medida a cada 1 segundo.

Os dados foram analisados por meio de regressão linear, similar ao modelo de Bingham. De acordo com Tattersall e Banfill (1983), a reologia do concreto pode ser simulada utilizando o modelo de Bingham, conforme Equação A1. Como o reômetro utilizado mede Torque e rotação, a Equação A2 pode ser utilizada para modelar os parâmetros reológicos da mistura.

$$\tau = \tau_0 + \eta \times \gamma \quad \text{Equação A1}$$

Onde,

τ : tensão de cisalhamento (Pa);

τ_0 : tensão de escoamento (Pa);

γ : taxa de cisalhamento (1/s); e

η : viscosidade (Pa.s)

$$T = T_0 + v \times R \quad \text{Equação A2}$$

Onde,

T: torque (N.m)

T_0 : intersecção da reta com o eixo y;

v : inclinação da reta;

R: rotação (RPM).

Figura A5: Reômetro Poli-USP.



Resultados e Discussões

Os resultados dos ensaios monopontos no estado fresco e estado endurecido dos CAAs estão apresentados na Tabela A6.

Percebe-se que todos os concretos ficaram dentro da faixa estipulada inicialmente para o *slump flow* (70 ± 5 cm). No entanto, quando utilizado fíler G153 a colocação de aditivo suficiente para garantir a fluidez desejada, causou exsudação na mistura, conforme pode ser visualizado no resultado de coluna de segregação e funil V. Todos os demais concretos ficaram dentro da segunda faixa da ABNT NBR 15823 (2010) com relação aos resultados de funil (VS2: 9 a 25 s). O fíler G153, foi aquele que apresentou a maior relação de aspecto e a maior angularidade nos ensaios de caracterização de partículas. Desta forma, o tamanho e a forma dos grãos desse fíler não são adequados para garantir a viscosidade e a estabilidade da mistura autoadensável.

Nos demais filers, não foi possível observar uma relação clara entre as propriedades das partículas e os resultados do estado fresco do concreto, pois o aditivo superplastificante anulou os efeitos das maiores relações de aspecto e angularidades.

Em relação aos resultados de caixa L, a ABNT NBR 15823 (2010) recomenda valores iguais ou superiores a 0,80. Desta forma, somente a mistura que segregou, G153, não atendeu a esse requisito. Da mesma forma, com exceção da mistura G153, todos os concretos apresentaram valores dentro do recomendado no ensaio de coluna de segregação. A norma recomenda valores menores ou iguais a 10, 15 ou 20% dependendo da aplicação do concreto.

Tabela A6: Resultado dos ensaios no estado fresco e endurecido dos CAAs.

Concreto	Slump Flow (cm)	Funil V (s)	Caixa L	Coluna (%)
C38	71,5	13,13	0,82	3,53
C25	74,0	12,76	0,89	4,30
C16	70,0	11,36	0,89	7,75
D33	72,5	17,00	0,83	0,30
D24	75,0	10,79	0,87	6,14
D16	70,0	10,33	0,89	8,94
G153 *	68,5	72,12	0,70	18,99
G34	73,5	15,10	0,94	5,74
G16	75,0	14,60	0,91	3,85

* ocorreu exsudação

Os resultados obtidos pelo reômetro Poli-USP podem ser observados nas Figuras A6-A8. As curvas pontilhas representam a aceleração e as contínuas, a desaceleração.

Pode-se perceber que, em relação as misturas contendo os filers mais grossos, C38, D33 e G153, o ajuste com superplastificante das misturas contendo os filers mais finos, causaram sensíveis alterações no comportamento reológico da mistura, apesar de todos os concretos apresentarem *slump flow* dentro da faixa estipulada, 70 ± 5 cm.

Comparando misturas com filers de mesma origem mineralógica, em todos os casos, houve diminuição do torque inicial com o uso de filers que passaram pelo processo de moagem, ou seja, as misturas contendo os filers mais grossos, apresentaram maiores torques iniciais do que as misturas contendo os filers mais finos. Isso pode ter ocorrido pelo aumento no teor de superplastificante necessário a mistura, uma vez que, todas as misturas contendo filers mais grossos, C38, D33 e G153, demandaram menores quantidades de aditivos, do que as misturas contendo os filers correspondentes mais finos.

Figura A6: Torque x rotação (resultados reométricos) dos CAAs dosados com filler calcário de diferentes granulometrias.

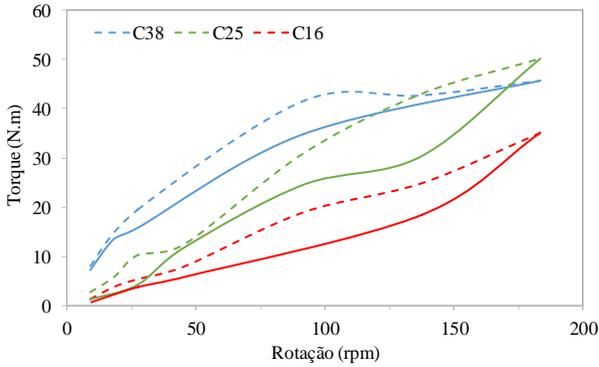


Figura A7: Torque x rotação (resultados reométricos) dos CAAs dosados com filler diabásio de diferentes granulometrias.

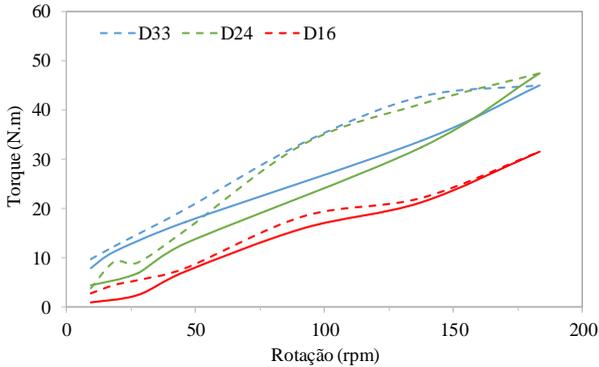
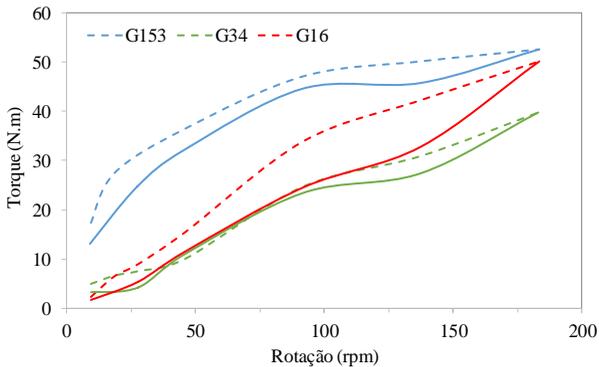


Figura A8: Torque x rotação (resultados reométricos) dos CAAs dosados com filler gnaissé de diferentes granulometrias.



Linearizando os dados da curva decrescente e empregando a Equação 2, obtém-se o coeficiente angular da reta. Esse valor pode ser relacionado a viscosidade da mistura e é apresentado na Tabela A7.

Tabela A7: Coeficiente angular da reta.

CAA	Coeficiente angular da reta (N.m/rpm)
C38	0,203
C25	0,273
C16	0,188
D33	0,225
D24	0,247
D16	0,177
G153	0,167
G34	0,214
G16	0,275

Grãos com maior relação de aspecto e maior angularidade tendem a gerar misturas com maior intertravamento e atrito entre partículas, que pode conduzir a um aumento de viscosidade e/ou tensão de escoamento do concreto (BANFILL, 2003). No entanto, o efeito das características das partículas não pode ser observado de forma clara nos resultados reológicos, devido a diferença na dosagem de superplastificante entre as misturas. Como a quantidade de superplastificante foi aumentada quando necessário, a dispersão das partículas foi garantida, reduzindo ou eliminando outros efeitos.

O concreto G153 apresentou exsudação conforme explanado anteriormente. Os resultados reológicos desse concreto diferiram significativamente dos demais. A mistura apresentou o maior torque inicial e a menor inclinação da reta, que correspondem a tensão de escoamento e viscosidade, respectivamente. Enquanto todos os demais CAAs apresentaram torque inicial igual ou inferior a 9,55 N.m, o concreto G153, apresentou 23,78 N.m. Em relação ao coeficiente angular da reta, a maioria dos concretos obteve valor entre 0,20 e 0,27, e o G153 apresentou 0,167. Isso indica que a reometria é capaz de diferenciar CAA adequados, dos não adequados para aplicações gerais.

Sabe-se que o filer calcário com D_{50} entre 30-40 μm é um material muito utilizado para completar a fração fina que o CAA requer (HO et al., 2002; DOMONE, 2007; ESPING, 2008). Desta forma, considerando o concreto contendo C38 como um concreto referência, pode-se analisar os filers diabásio e gnaiss como possíveis alternativas ao filer calcário, embora tenham demandado, em média, teores de superplastificante 50% mais elevados, para atingir as características desejadas.

Considerando o CAA C38 como uma mistura ideal (coeficiente angular da reta de 0,203 e torque inicial de 9,55 N.m), os concretos contendo, D33 e G34

apresentaram parâmetros reológicos similares ao concreto C38. O CAA D33 apresentou coeficiente angular de 0,225 e torque inicial de 3,64 N.m; enquanto que o CAA G34 apresentou coeficiente angular de 0,214 e torque inicial de 2,41 N.m. Portanto, para o filer de diabásio, a moagem para diminuição do tamanho das partículas parece ser um processo desnecessário, uma vez que já se encontrava *in natura* com distribuição granulométrica similar à do filer calcário. Por outro lado, os resultados indicaram que seria imprescindível o beneficiamento do filer gnaisse utilizado para ter o mesmo efeito do filer calcário nos CAA.

CAAs dosados com filers diabásio, apresentaram diminuição do torque inicial, com o uso de filers cada vez mais finos, ou seja, CAAs dosados com filers D24 e D16 apresentaram torque inicial menor do que o CAA contendo D33. O torque inicial de concretos contendo C25 e C16 foi muito semelhante, assim como ocorreu nos concretos contendo G24 e G16.

Comparando os resultados dos testes monopontos com os testes reológicos, não há uma relação entre torque inicial (tensão de escoamento) e abertura do *slump flow*, tampouco entre inclinação da reta (viscosidade) e tempo de escoamento no funil. Os concretos C38, D33 e G34, que apresentaram parâmetros reológicos semelhantes, também apresentaram abertura no *slump flow* próximas (71,5; 72,5 e 73,5 cm, respectivamente). No ensaio de Funil V, o concreto D33 foi o mais lento, demorando 17 s para escoar, enquanto que o concreto C38 levou 13 s. Em relação a caixa L, o concreto G34 apresentou relação de 0,94 enquanto que o C38 e D33 apresentaram 0,82 e 0,83, respectivamente. Na coluna de segregação, a mistura mais estável foi o concreto D33, o que já era de se esperar pela sua viscosidade (maior entre os três concretos analisados) e tempo de escoamento no funil.

Os resultados monopontos e reológicos, indicam que o filer diabásio com D_{50} de 33 μm e o filer gnaisse com D_{50} de 34 μm , poderiam ser materiais alternativos ao filer calcário, para o traço de CAA adotado neste trabalho, apesar de demandarem uma maior quantidade de superplastificante para atingir as características reológicas desejadas. No entanto, nenhum concreto demandou mais do que 1% de aditivo superplastificante em relação a massa de cimento, valor esse usualmente recomendado como faixa superior pelos fabricantes de aditivos.

Conclusões

Os resultados do trabalho mostraram que filers de diabásio e gnaisse apresentam potencial para serem usados como materiais alternativos ao filer calcário em CAA. Esses materiais, em geral, são subprodutos de pedreiras e não possuem destinação específica, sendo considerados um passivo ambiental. Embora suas características mineralógicas não impossibilitem seu uso, dependendo do processo de retirada desse material na pedreira, ele pode necessitar de um processo de beneficiamento, através de moagem, antes de ser usado em CAA.

Testando filers de diferentes diâmetros médios de partículas, pode-se perceber que, usando filer com distribuição granulométrica similar ao filer

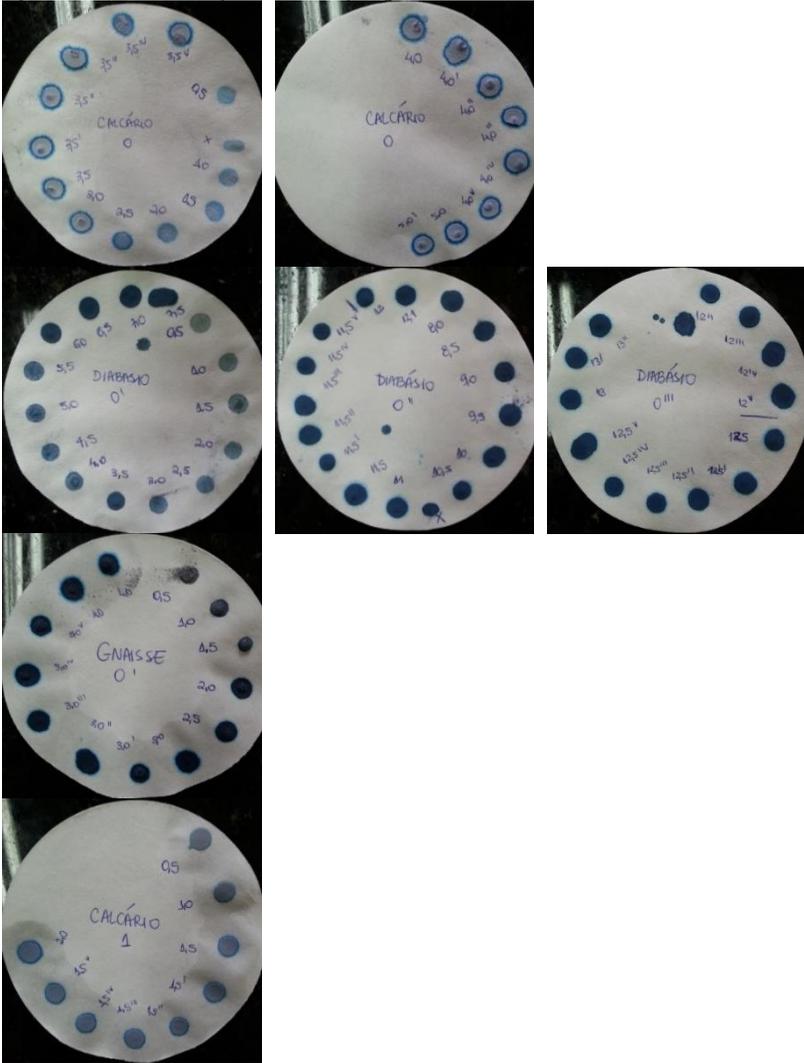
calcário (mesma faixa do diâmetro médio de partículas, D_{50} entre 30 e 40 μm), os concretos dosados com os fílers alternativos apresentaram características reológicas similares às do concreto dosado com fíler calcário, embora demandaram maior quantidade de aditivo superplastificante.

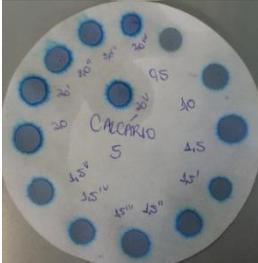
Aliado a isso, percebeu-se que o uso de fílers com partículas mais finas, geraram concretos com menores torques iniciais. Esse efeito é resultado do maior teor de aditivo empregado nos concretos contendo materiais mais finos. A utilização de partículas mais finas deixa a mistura mais estável e reduz a mobilidade entre as partículas, exigindo a correção da trabalhabilidade para a mistura ser classificada como CAA (realizada com superplastificante).

Diante disso, percebe-se que fílers de diabásio e gnaissé possuem potencial para serem empregados como material alternativos ao fíler calcário em CAAs. Embora possam necessitar de beneficiamento para o uso ou de uma maior quantidade de aditivo para um bom desempenho, eles são capazes de gerar CAA estáveis, fluidos e homogêneos, com a vantagem de ser um material de baixo custo e seu uso colaborar para a sustentabilidade da construção, com a redução de um passivo ambiental.

APÊNDICE B Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno

Figura B1: Determinação da adsorção por azul de metileno dos filers estudados

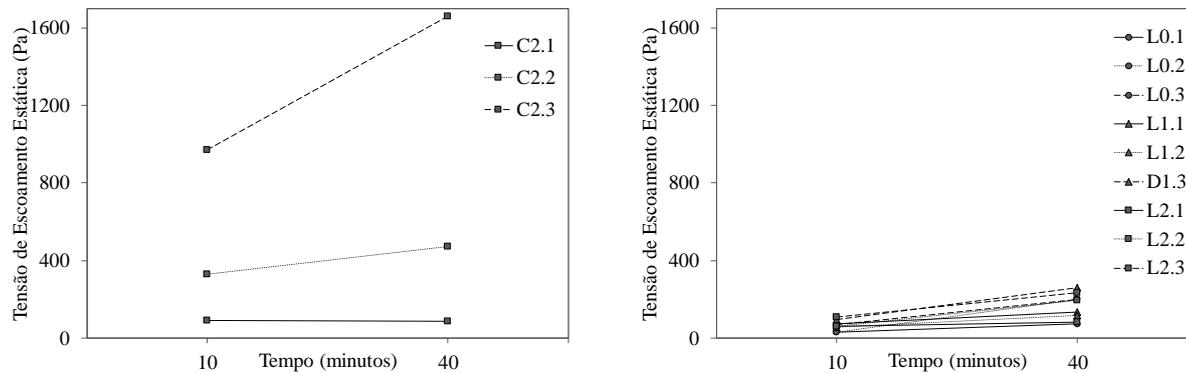


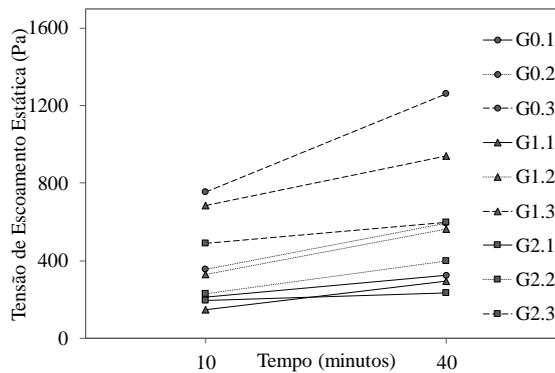
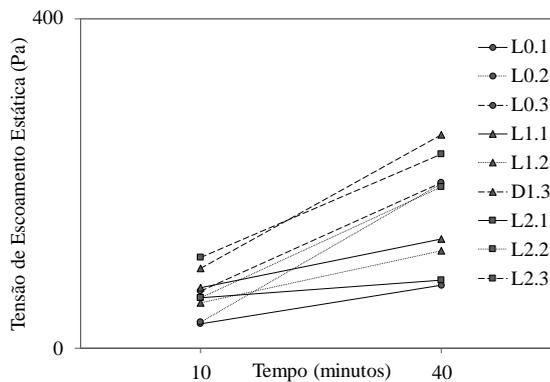
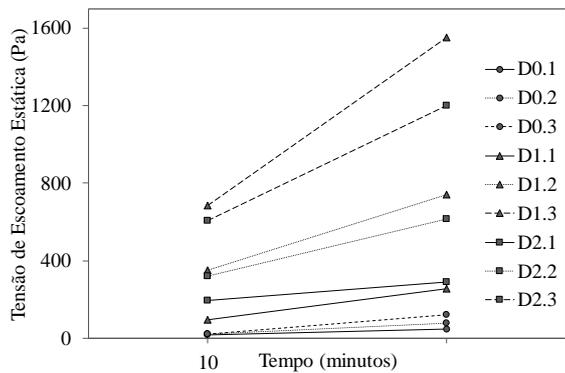


APÊNDICE C

Manutenção da Trabalhabilidade Pastas Unitárias com Aditivo Fixo
(Medidas reológicas em 10 e 40 minutos)

Figura C1: Medições de tensão de escoamento estática com o tempo.





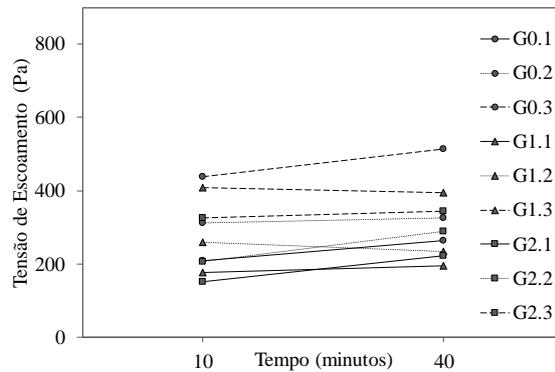
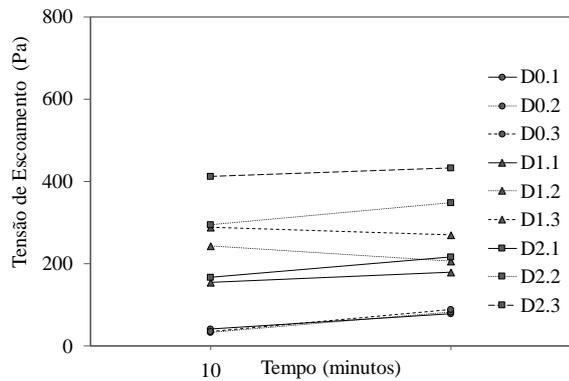
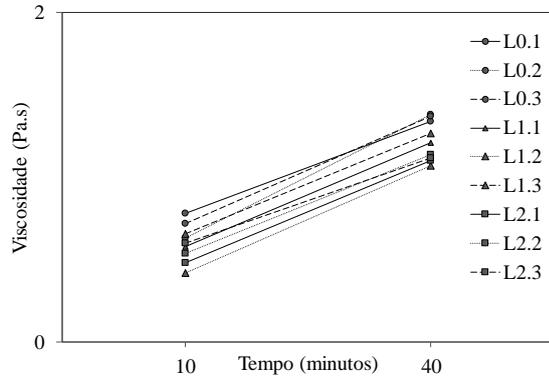
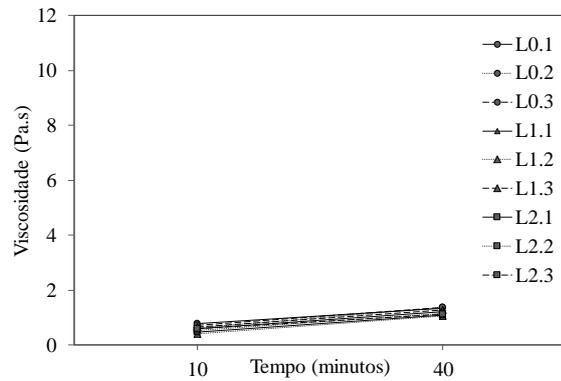
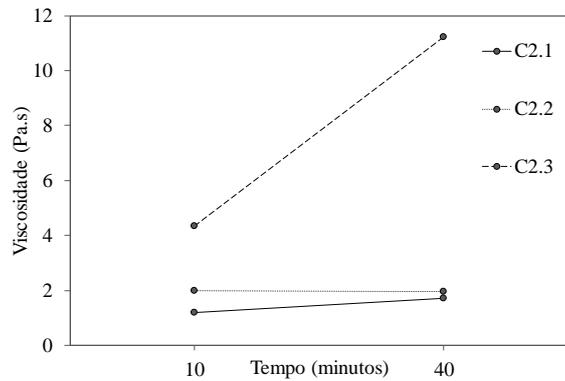
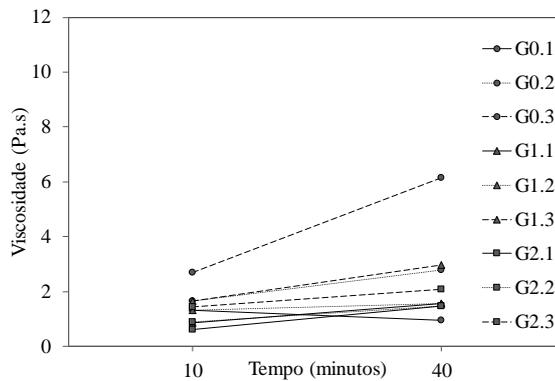
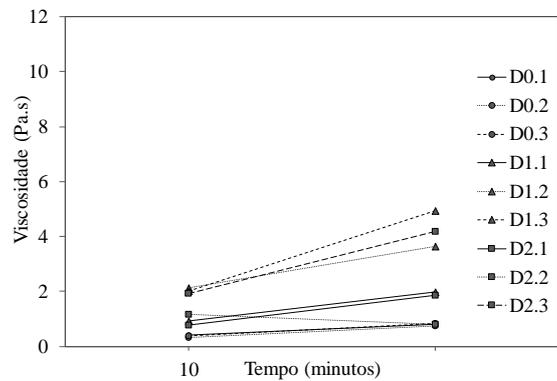


Figura C3: Medições de viscosidade com o tempo.





APÊNDICE D

Resultados do FBRM

Figura D1: FBRM de pastas dosadas somente com cimento (aditivo fixo)

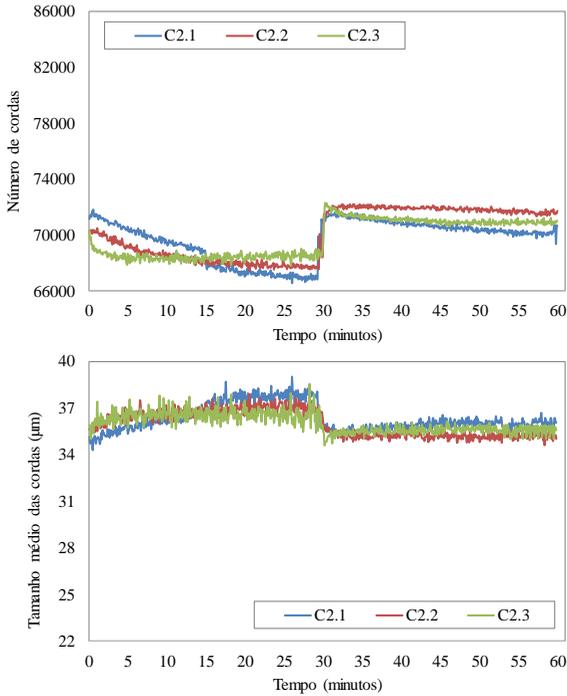
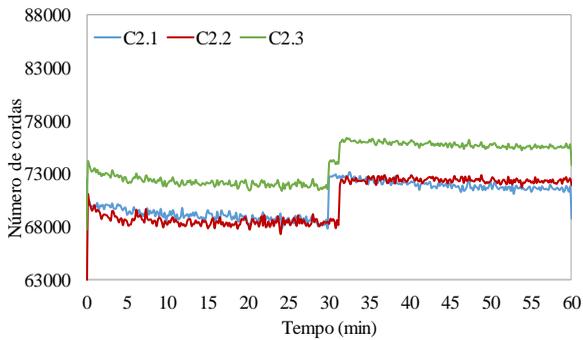


Figura D2: FBRM de pastas dosadas somente com cimento (aditivo variável)



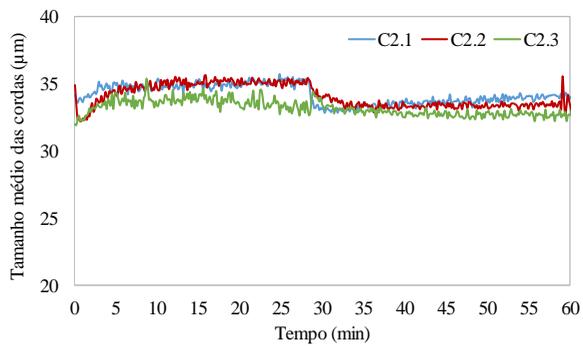
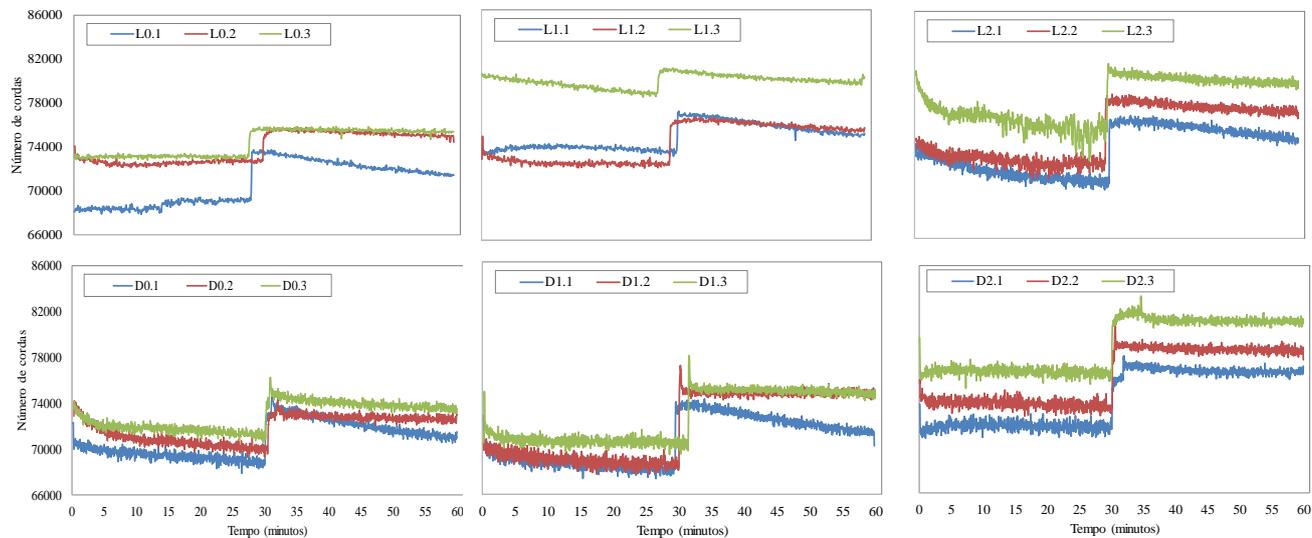


Figura D3: FBRM (número de cordas) de pastas dosadas com filers com aditivo fixo.



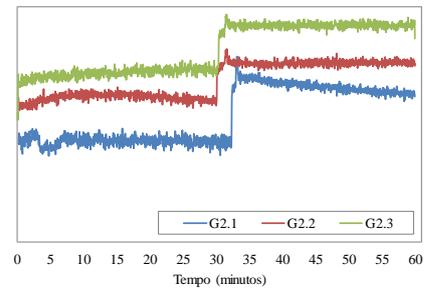
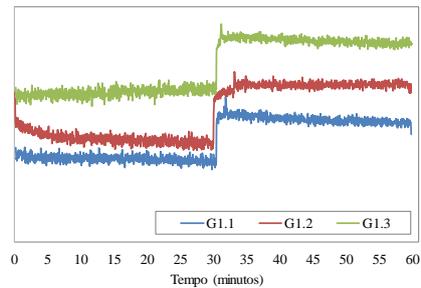
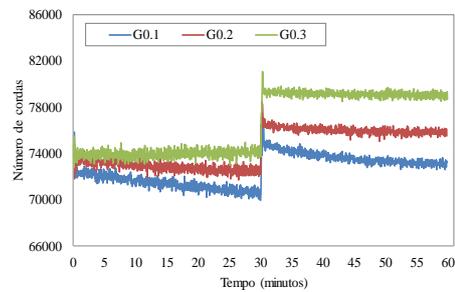
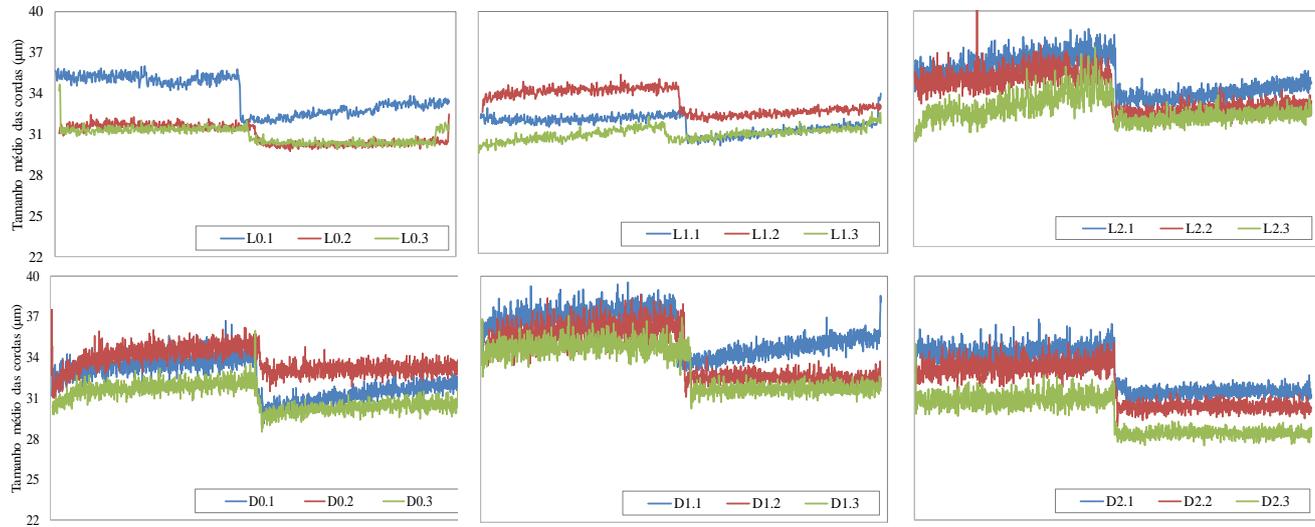


Figura D4: FBRM (tamanho médio das cordas) das pastas com flíers dosadas com aditivo fixo.



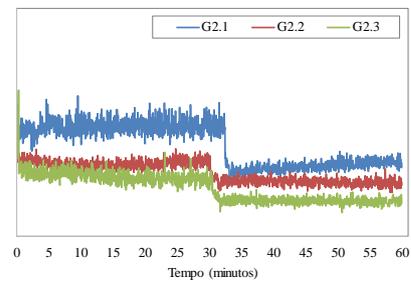
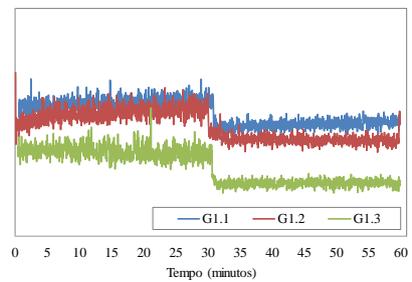
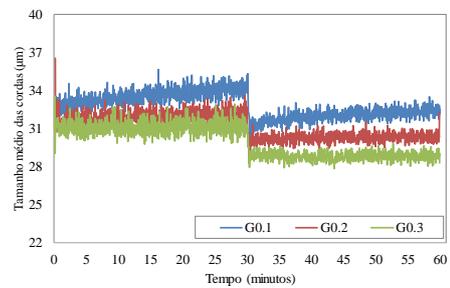
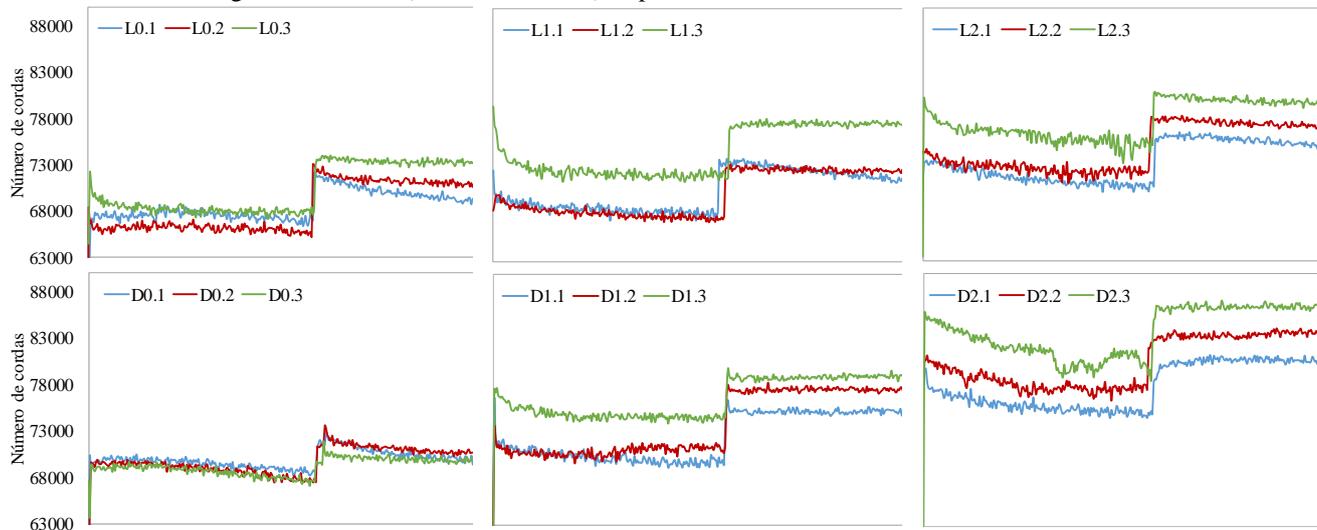


Figura D5: FBRM (número de cordas) de pastas dosadas com fíler com aditivo variável.



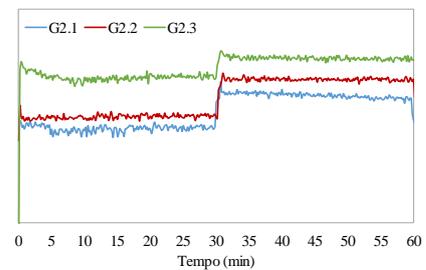
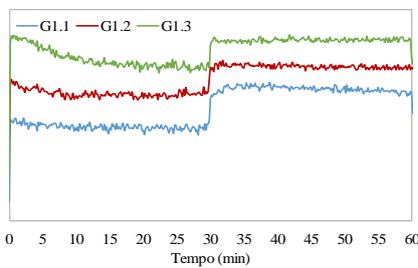
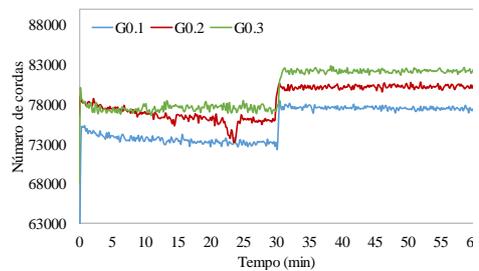
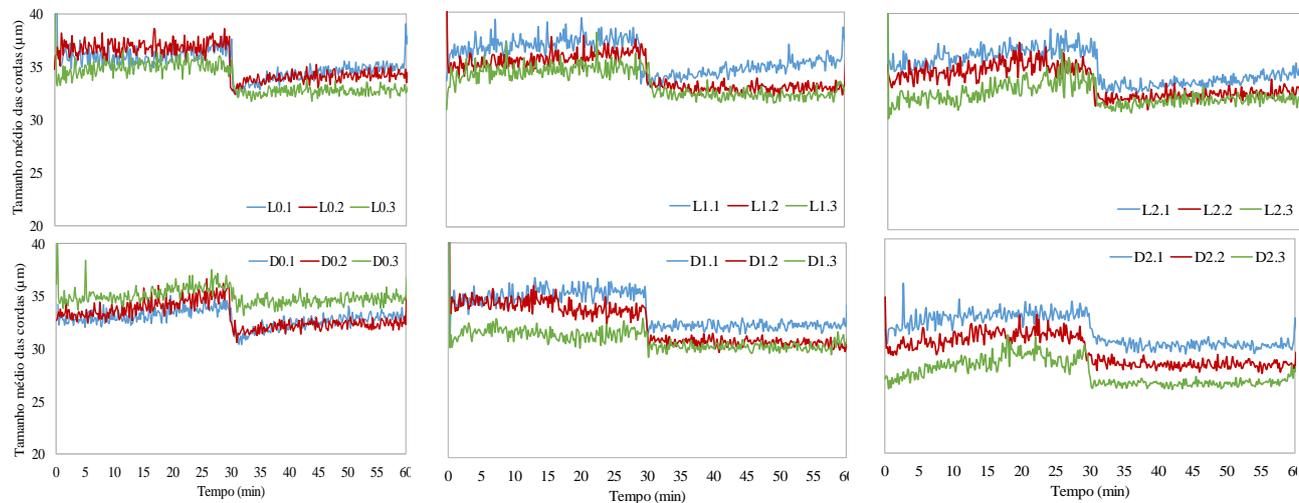
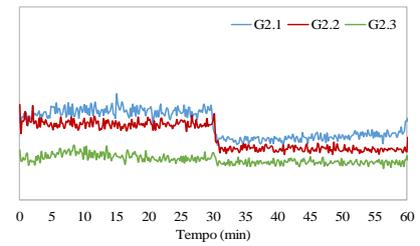
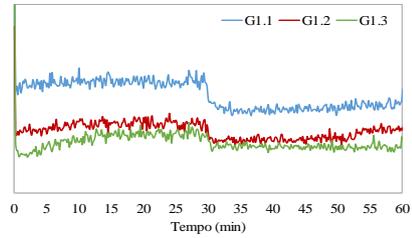
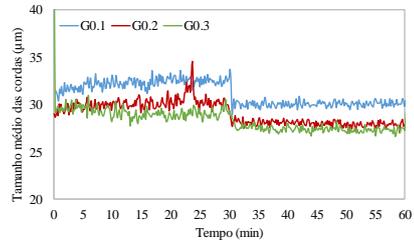


Figura D6: FBRM (tamanho médio das cordas) de pastas dosadas com fíler com aditivo variável.





APÊNDICE E

Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Diferencial (dTG)

Com os percentuais obtidos pela termogravimetria, pode-se obter os valores apresentados na Tabela E1, os quais foram corrigidos pela massa residual (TAYLOR, 1998) por meio do fator de correção. Os teores de perda de massa corrigidos são apresentados na Tabela E2.

Tabela E1: Teores de perda de massa.

Pasta	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)		Massa Residual (%)	Fator de Correção
	C-S-H + Aluminatos	H ₂ O	Ca(OH) ₂ *	CO ₂	CaCO ₃ *		
L0	24,30	4,39	18,06	13,20	29,96	67,45	1,48
D1	16,73	2,89	11,89	2,94	6,68	77,43	1,29
G1	17,08	3,19	13,11	2,69	6,10	77,04	1,30
C2	17,60	3,81	15,65	3,36	7,62	75,23	1,33

*Teores multiplicados pela razão entre massas moleculares 4,11 e 2,27, respectivamente.

Tabela E2: Teores de perda de massa corrigidos pela massa residual.

Pasta	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)		Massa Residual (%)
	C-S-H + Aluminatos	H ₂ O	Ca(OH) ₂	CO ₂	CaCO ₃	
L0	20,58*	3,72*	15,30	19,57	44,42	100,00
D1	21,61	3,74	15,36	3,80	8,62	100,00
G1	22,17	4,14	17,02	3,49	7,92	100,00
C2	23,39	5,06	20,80	4,46	10,13	100,00

Segundo Hoppe (2008), para comparação de pastas contendo somente cimento com pastas contendo teores de substituição de cimento por fíler, é importante padronizar as análises para uma mesma massa de cimento. O autor estimou os resultados de termogravimetria para pastas contendo somente cimento, de forma proporcionalmente a massa de cimento incorporada na mistura. Por exemplo: nas pastas contendo fíler a massa total de cimento empregada foi de 128,8 g, ao passo que, nas pastas sem adição de fíler, essa massa foi de 212,9 g para manter a mesma proporção água/finos em volume. Os resultados de termogravimetria estimados para uma pasta sem adição de fíler e contendo 128,8 g de cimento são apresentados na Tabela E3.

Tabela E3: Teores estimados (teoricamente) para a pasta C2 contendo a mesma quantidade de cimento das demais pastas.

Pasta	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)		Carbonato de Cálcio (%)	
	C-S-H + Aluminatos	H ₂ O	Ca(OH) ₂	CO ₂	CaCO ₃
C2 teórico	14,15	3,06	12,59	2,70	6,13

Os resultados da Tabela E2 sugerem que a pasta contendo fíler calcário foi a que apresentou a maior formação de hidratos. No entanto, a presença de fíler calcário que apresenta grande perda de massa após 500°C. A presença de fíler diabásico ou gnáissico gera uma menor representação no percentual de carbonato de cálcio, e isso influencia na massa residual que é utilizada para o quantitativo dos produtos hidratados. Segundo Pilar (2012), esses valores devem ser corrigidos para que o todas as pastas apresentem o mesmo percentual relativo de carbonato de cálcio.

Para essa correção, somou-se na massa residual final (925°C), a porcentagem teórica referente ao CO₂ da amostra estudada. Para o ensaio de termogravimetria da pasta L0.2 foi empregada uma massa inicial de 15,051 mg. Deste total, 4,166 mg correspondem ao fíler calcário (baseado no traço da pasta). Considerando 44% de perda, 1,833 mg corresponde ao CO₂ liberado. Como obteve-se 13,20% no terceiro pico da dTG, a perda de massa corresponde a 1,987 mg. Descontando o valor teórico de CO₂, resta apenas 0,154 mg, que corresponde a 1,023%. Portanto, soma-se a massa residual final 12,177% (13,20-1,023), resultando em uma massa residual de 79,63%. Essa nova massa residual é utilizada para a quantificação de hidratos e hidróxido de cálcio da amostra. Os resultados podem ser observados na Tabela E4.

Tabela E4: Resultados de termogravimetria corrigidos para a pasta L0 (contendo fíler calcário).

Pasta	Água Combinada (%)	Hidróxido de Cálcio (%)	
	C-S-H + Aluminatos	H ₂ O	Ca(OH) ₂
Valores de referência para cálculo	16,39	2,96	12,18
L0.2 corrigido (massa residual)	20,58*	3,72*	15,30

*Fator de correção (FC) \approx 1,256 (100/79,63)

APÊNDICE F

Figura F1: Concretos com fíler calcário - verificação da ausência de segregação das misturas.



Figura F2: Concretos com fíler diabásico - verificação da ausência de segregação das misturas.



Figura F3: Concretos com filler gnáissico - verificação da ausência de segregação das misturas.

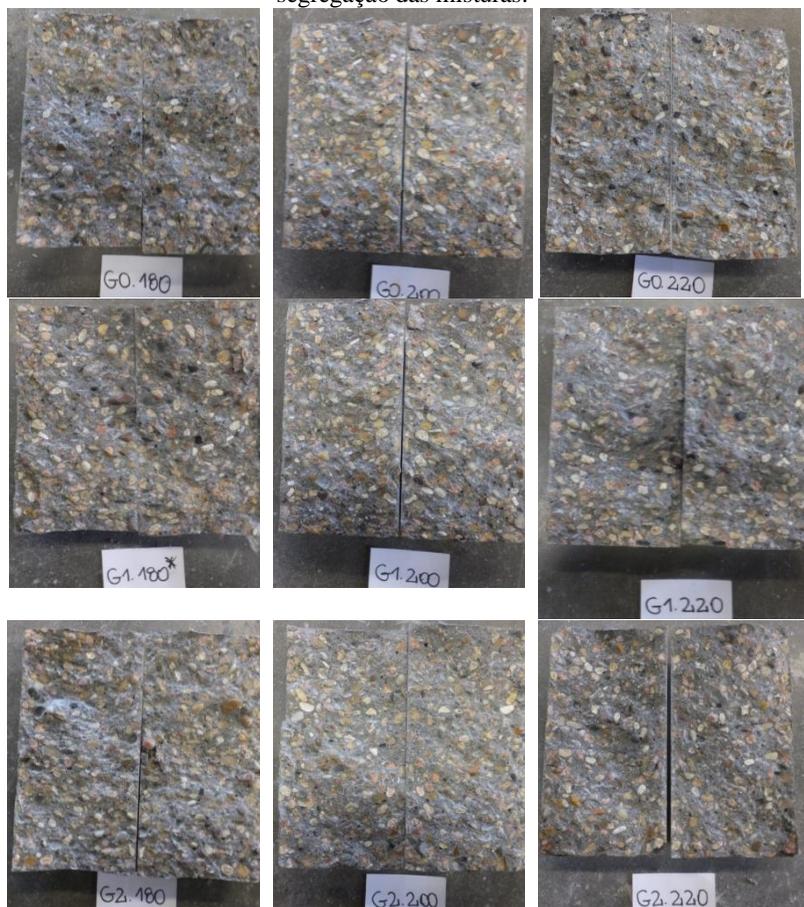


Figura F4: Concretos sem fíler - verificação da ausência de segregação das misturas.

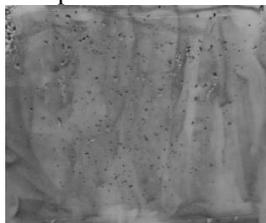


APÊNDICE G - Qualidade Superficial do CAA

Figura G1: Qualidade superficial dos concretos contendo calcário.



L0.180



L0.200



L0.220



L1.180



L1.200



L1.220



L2.180



L2.200



L2.220

Figura G2: Qualidade superficial dos concretos contendo diabásio.



D0.180



D0.200



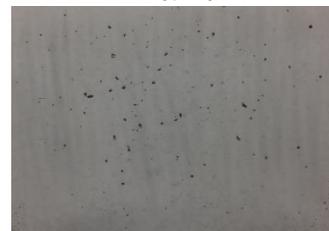
D0.220



D1.180



D1.200



D1.220



D2.180



D2.200



D2.220

Figura G3: Qualidade superficial dos concretos contendo gnaisse.



G0.180



G0.200



G0.220



G1.180



G1.200



G1.220



G2.180



G2.200



G2.220

ANEXO A

Detalhamento dos Métodos de Dosagem de CAA

A.1 METODO BUI E MONTGMORY

Os estudos dos autores iniciam-se na fase sólida (fase de agregados) e baseia-se em critérios de bloqueio, resistência à segregação e capacidade de deformação adequada ao uso.

O volume máximo de agregados por ser calculado utilizando a Equação:

$$V_{abmax} = \frac{\rho_g + (\rho_s - \rho_g) \times Nga}{\sum \frac{Pv_{gmm} \times Nga \times \rho_s}{V_{abm}} + \sum \frac{Pv_{snn} \times (1 - Nga) \times \rho_s}{V_{abn}}}$$

Onde,

V_{abmax} : volume máximo de agregados admissível para que não ocorra o bloqueio;

Nga : proporção de agregado grosso (em massa);

ρ_g e ρ_s : massa específica dos agregados grossos e finos, respectivamente;

Pv_{gmm} : relação entre o volume de agregado graúdo “m” e o volume total de agregado graúdo;

Pv_{snn} : relação entre o volume de agregado fino “n” e volume total de agregado miúdo;

V_{abm} e V_{abn} : são os volumes de bloqueio do grupo “m” e “n” em agregados grossos e finos, respectivamente;

Os volumes de bloqueio (V_{abm} e V_{abn}) podem ser calculados da seguinte forma:

$$V_{abm} = N_{abm} \times V_t$$

$$V_{abn} = N_{abn} \times V_t$$

Onde V_t : volume total de concreto;

N_{abm} e N_{abn} são calculados em função da relação entre o espaçamento da armadura e as dimensões de cada fração dos agregados (D_{ca}) e em função de um coeficiente (C_k) determinado pela fórmula:

$$C_k = -0,0875 K + 0,55$$

No qual, K é a relação entre o diâmetro do armadura e o tamanho máximo do agregado (D_{max}).

a) Para $1 < D_{ca} < 2,6$

$$N_{abm} = N_{abn} = (C_k / 1,6) D_{ca} - (C_k / 1,6)$$

b) Para $2,6 < D_{ca} < 15$

$$N_{abm} = N_{abn} = ((0,84 - C_k) / 12,4) D_{ca} + C_k 1,2097 - 0,1761$$

c) Para $D_{ca} > 15$

$$N_{abm} = N_{abn} = 0,84$$

O resultado dos testes mostraram que os critérios de bloqueio são úteis para previsão de um volume mínimo de pasta necessário para o CAA fluir entre as barras da armadura.

A concepção da fase líquida se baseia em uma fórmula para calcular o espaçamento médio (D_{ss}) entre as superfícies das partículas no concreto, conforme Equação.

$$D_{ss} = Dva \left(\sqrt[3]{1 + \frac{Vpw - Void}{Vt - Vpw}} - 1 \right)$$

Onde,

D_{ss} é o espaçamento médio entre as superfícies das partículas (as partículas são consideradas esférica);

Vpw : volume de pasta;

Void: volume de vazios entre agregados compactados;

Vt : volume total de concreto;

Dva : diâmetro médio da partícula, que é dada através de uma média ponderada, em função do somatório dos diâmetros de cada fração (D_i) multiplicado pela massa retida na peneira correspondente (M_i):

$$Dva = \frac{\sum D_i \times M_i}{\sum M_i}$$

O volume mínimo exigido de pasta (V_{pdmin}) no CAA pode ser calculada da seguinte forma:

$$V_{pdmin} = Vt - \frac{Vt - Void}{\left(\frac{D_{ssmin}}{D_{av}} + 1\right)^3}$$

Onde

V_{pdmin} : volume de pasta mínima exigida (l / m^3), para dada composição de agregados;

Void: volume de vazios da matriz agregada compactado (l / m^3);

D_{ssmin} : espaçamento médio mínimo exigido (mm) entre as superfícies das partículas de agregado, calculados a partir de critérios para a fase líquida;

Dva : diâmetro médio das partículas de agregado (mm)

Segundo os autores, a partir dessas fórmulas é possível dosar uma mistura de CAA com os seguintes parâmetros:

- Durabilidade (redução da retração);
- Eficiência econômica (baixa volume de paste e teor de superplastificante reduzido);
- Redução da necessidade de testes de laboratórios extensos;
- Capacidade de ser aplicado em diferentes tipos de materiais.

Os autores ainda citam alguns resultados dos métodos de ensaio tradicionais, para balizar os estudos:

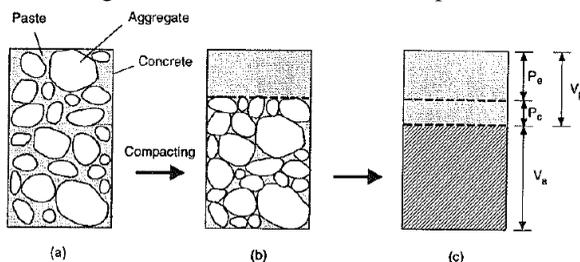
- Slump flow deve ser maior que 650mm, a fim de ter um bom fluxo, deformabilidade e boa aparência superficial);
- O tempo para atingir a abertura de 500mm (T50) não deve ser maior que 12 segundos;
- A dosagem de superplastificante deve ser inferior a 15kg/m^3 (materiais sólidos).

A.2 OH, NOGUCHI E TOMOSAWA (1999) – EXCESSO DE PASTA

Os autores propuseram um método para determinar propriedades reológicas de concretos auto-adensáveis por meio do volume de pasta que envolve os agregados. Isso é útil para determinar a quantidade de aglomerantes e demais finos necessários para um valor de viscosidade e tensão de escoamento necessária para moldagem de diferentes peças. Os autores elaboraram uma equação que determina o excesso de espessura da pasta ao redor dos agregados, em função do diâmetro médio, número de partículas e área superficial dos agregados. O excesso de pasta corresponde a pasta que envolve os grãos e proporciona mobilidade a mistura, e não aquela que preenche os vazios deixados no empacotamento dos agregados. Outras equações relacionam o valor da espessura da pasta com a viscosidade ou com a tensão de escoamento estimada em reômetro de concreto.

De acordo com os autores, para o concreto atingir elevada trabalhabilidade, é necessário ter um bom espaçamento entre os agregados, de forma a minimizar o atrito entre eles. A Figura A1 mostra um exemplo de uma mistura com adequado espaçamento entre os agregados, envoltos por pasta de cimento.

Figura A1.1: Teoria do excesso de pasta.



Paste: pasta; Aggregate: agregado; Compacting: compactação.

Fonte: OH, NOGUCHI E TOMOSAWA (1999).

Se os agregados fossem compactados e a pasta em torno deles fosse retirada, obter-se-ia a situação ilustrada na Figura A1.1.b. Neste caso, o volume de pasta entre os agregados é apenas o suficiente para preencher os espaços vazios, essa pasta é chamada de “Pasta compacta” (Pc). E a pasta de cimento que envolve os agregados é chamada de “excesso de pasta” (Pe) e é calculado de acordo com a equação.

$$P_e = V_p - P_c$$

Onde,

V_p é o volume total da pasta;

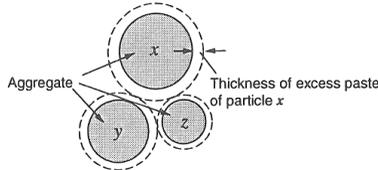
Também pode-se calcular a espessura do excesso de pasta (t_p):

$$t_p = P_e/S$$

Onde,

S: área superficial dos agregados.

Figura A1.2: Espessura do excesso de pasta.



Aggregate: agregado; Thickness of excess paste of particle x: espessura do excesso de pasta da partícula x.

Fonte: OH, NOGUCHI E TOMOSAWA (1999).

Para utilização na dosagem, os autores determinaram a espessura relativa do excesso de pasta “r”:

$$r = \frac{P_e}{\sum_i^n n_i s_i D_{pi}}$$

P_e : volume do excesso de pasta

n : número de partículas de uma determinada fração (determinado pelo método do peso);

s : área superficial da fração;

D_p : diâmetro da fração.

O volume do excesso de pasta em torno de um determinado de agregado x , P_{ex} , pode ser calculado:

$$P_{ex} = t_{px} \times S_x$$

Os autores definiram então, as constantes relativas reológicas, determinadas em função da espessura relativa do excesso de pasta:

$\eta_r = 0,0705 \times r^{-1,69} + 1$ viscosidade relativa

$\tau_{yr} = 0,0525 \times r^{-2,22} + 1$ tensão de escoamento relativa

Os autores consideram essas equações consistentes para estimar com precisão o valor de viscosidade e tensão de escoamento de uma determinada mistura.

Esse procedimento, apesar de não contemplar todos os parâmetros de dosagem de um CAA, apresenta correlações interessantes para o início de um estudo de dosagem. Atualmente, Li et al (2012) propuseram um novo método de dosagem para CAA com base nas características dos materiais, incorporando o conceito da espessura da pasta em torno do agregado. O método proposto por

esses autores não pode ser explanado neste trabalho, pois não está disponível na base de dados.

A.3 MÉTODO NAN SU, HSU CHAI (2001)

O método proposto pelos autores é composto por uma série de equações que definem a proporção inicial de um CAA. A principal consideração do método é compor os agregados objetivando o menor teor de vazios. Neste estudo, o “fator de embalagem do agregado” (PF) denominado pelo autor, é definido como a razão da massa unitária compactada e a massa unitária solta. Um valor elevado de PF implica em uma maior quantidade de agregados grossos e finos e conseqüentemente, uma menor quantidade de pasta, reduzindo o custo do concreto e melhorando a durabilidade em função da menor retração. Por outro lado, sua capacidade de fluir, a capacidade de auto-compactação e a resistência à compressão serão reduzidas. Portanto, é importante determinar um valor ótimo de PF. Os teores de agregados finos e grossos podem ser determinados pelas equações:

$$W_g = PF \times W_{gL} \left(1 - \frac{S}{a}\right) \quad W_s = PF \times W_{sL} \times \frac{S}{a}$$

onde

W_g : teor de agregados graúdos em CAA (kg / m^3);

W_s : teor de agregados finos em CAA (kg / m^3);

W_{gL} : massa unitária solta do agregado graúdo (kg / m^3);

W_{sL} : massa unitária solta do agregado miúdo (kg / m^3);

PF: fator de empacotamento, a razão entre a massa unitária compactada e a massa unitária solta;

S/a : proporção de agregados miúdos em relação aos agregados totais, que varia de 50% a 57% do volume.

Os autores consideram que cada kg de cimento proporciona um incremento de 0,14 MPa (20 psi) na resistência do concreto, portanto, para definir a quantidade de cimento, é empregada a equação:

$$C = \frac{f'c}{20}$$

onde C : teor de cimento (kg / m^3),

$f'c$: resistência à compressão requerida (psi).

Com a relação água/cimento pré-determinada, o teor de água na mistura pode ser calculado:

$$W_{wc} = \left(\frac{W}{C}\right) C$$

onde W_{wc} : quantidade de água necessária (kg / m^3),

W/C : relação água/cimento, determinada em função das solicitações locais.

Como o CAA necessita de uma grande quantidade de finos, o método considera a utilização de cinza volante e escória de alto forno para garantir a resistência à segregação e elevar a porcentagem de pasta, enquanto que a quantidade de cimento é determinada apenas em função da resistência a

compressão. Como já se tem as quantidades de todos os outros componentes do CAA, a diferença do volume para completar 1m^3 corresponde ao volume das duas adições, conforme equação:

$$V_{Pf} + V_{PB} = 1 - \frac{W_g}{1000 \times G_G} - \frac{W_s}{1000 \times G_S} - \frac{C}{1000 \times G_C} - \frac{W_{wc}}{1000 \times G_w} - V_a$$

onde

V_{Pf} : Volume de cinza volante;

V_{PB} : Volume de escória de alto forno;

G_g : massa específica do agregado graúdo;

G_s : massa específica do agregado fino;

G_c : massa específica do cimento;

G_w : massa específica da água;

V_a : teor de ar em CAA (%).

A porcentagem dos dois materiais pozolânicos pode ser ajustada, de acordo com a equação:

$$V_{Pf} + V_{PB} = \left(1 + \frac{W}{F}\right) \times A\% \times \frac{W_{pm}}{1000 \times G_f} + \left(1 + \frac{W}{S}\right) \times B\% \times \frac{W_{pm}}{1000 \times G_B}$$

$$V_{pcv} + V_{pes} = \left(1 + \frac{a}{cv}\right) \times CV\% \times \frac{M_t}{1000 \times M_{espcv}} + \left(1 + \frac{a}{es}\right) \times ES\% \times \frac{M_t}{1000 \times M_{espes}}$$

Mt: massa total dos dois materiais pozolânicos (kg/m^3);

CV: porcentagem de cinza volante (%);

ES: porcentagem de escória de alto forno, em massa (%);

V_{pcv} e V_{pes} : volume de cinza volante e escória de alto forno, respectivamente;

a/cv: relação água/cinza volante;

a/es: relação água/ escória;

Mespcv: massa específica da cinza volante;

Mespes: massa específica da escória de alto forno.

De acordo com os autores, a CV% e ES% são definidas pela experiência do profissional ou pelas características dos materiais. O cálculo das massas das adições é feito diretamente pela equação:

$$M_{cv} = CV\% \times M_t$$

$$M_{ês} = ES\% \times M_t$$

A água requerida para a mistura devido a estes materiais é:

$$A_{cv} = a/cv \times M_{cv}$$

$$A_{es} = a/es \times M_{ês}$$

A quantidade de água total é a soma de água requerida pelo cimento, cinza volante e escória de alto forno, como mostra a equação abaixo, e se recomenda que fique entre 160 e 185 kg/m^3 .

$$A_r = A_c + A_{cv} + A_{es}$$

Definição do teor de aditivo:

$$M_{sp} = n\% \times (C + M_{cv} + M_{ês})$$

$$\text{Asp} = (1 - m\%) \times \text{Msp}$$

Msp: massa de aditivo;

m%: teor de partículas sólidas do aditivo;

Asp: quantidade de água presente no aditivo;

n%: teor de aditivo em relação a massa de cimento;

Os primeiros traços devem ser rodados para observar se a mistura está de acordo com o planejado e para que se realizem os ensaios de trabalhabilidade propostos.

A1.4 MÉTODO BUI E MONTGMORY (1999)

O método é baseado nas duas fases do concreto: sólida e líquida. Na fase líquida são considerados os materiais finos da mistura. Com base nos critérios propostos pelos autores, é possível estimar o volume mínimo de pasta e o máximo volume de agregados que não cause bloqueio da mistura. Com as equações propostas no método, pode-se definir o espaço médio entre agregados, que é dependente da relação água/finos e do diâmetro médio dos agregados graúdos. O método se propõe a determinar alguns parâmetros teoricamente, para reduzir o tempo de ajuste do concreto experimentalmente. Como é um método numérico, as equações para definição dos parâmetros de dosagem são apresentadas no Anexo A. Esse modelo foi posteriormente expandido por Shah, Akkaya e Bui (2002), que incluíram os efeitos dos agregados de forma mais consistente.

A1.5 MÉTODO PETERSSON E BILLBERG - CBI – Swedish Cement and Concrete Research Institute (1999)

De acordo com Billberg (2002), o método baseia-se no pressuposto de que o CAA é uma suspensão de agregados em uma pasta. O modelo considera a presença de duas fases no concreto, designadas por fase líquida e sólida. A fase sólida inclui os agregados grossos e finos (partículas maiores que 0,125mm) e o restante constitui a fase líquida (ou microargamassa, como é denominado pelo método). O método objetiva a determinação da proporção ótima entre o agregado graúdo e o miúdo, a fim de minimizar o volume de vazios e, conseqüentemente, o volume de pasta. Para isso, os autores utilizam o conceito de distância máxima entre partículas e um critério de bloqueio (como o ensaio de caixa-L ou caixa-U). O valor ótimo da razão agregado grosso pelo agregado total é atingido com o menor volume de pasta possível e a uma distância interpartículas que não ocorra o bloqueio (NUNES, 2001). Os autores enfatizam que é necessário considerar não só o volume de vazios, mas também a superfície específica das partículas dos agregados.

Assumindo que a forma das partículas do agregado é esférica e conhecendo a distribuição granulométrica dos agregados, é possível calcular a distância média entre as partículas para um dado volume de pasta e uma determinada razão volumétrica entre o agregado grosso e o fino. A lamelalidade dos grãos pode ser considerada aplicando um fator de angulosidade; o volume mínimo de pasta para evitar o bloqueio é determinado, inicialmente, com base nos critérios apresentados por Bui e Montgomery (1999).

Neste método é necessária a determinação experimental do volume de vazios da fase sólida compactada. Pode-se estudar diferentes proporções entre agregado grosso e fino e um dado volume de pasta para que conduza a uma maior distância interpartículas. A partir desses estudos é possível obter uma curva, que fornece o volume mínimo de pasta em função da razão entre o agregado grosso e o fino, e então se estimar uma composição inicial.

O método ainda utiliza viscosímetros para o estudo do uso dos diferentes tipos de cimentos, adições e aditivos em pastas e argamassas para o CAA. Os autores chegaram à conclusão de que era necessária uma quantidade de finos no intervalo de 500 - 520 kg/m³ de concreto para se alcançar boas propriedades reológicas sem qualquer segregação. Posteriormente, são avaliadas as propriedades de autocompactibilidade do concreto e são previstos dois ensaios: *slump flow* e caixa-L. Os critérios de aceitação destes podem ser adaptados conforme o tipo de aplicação. Caso as propriedades do concreto não sejam adequadas, o volume da pasta ou a sua composição deverá ser alterado e os ensaios repetidos.

A1.6 OH, NOGUCHI E TOMOSAWA (1999) – EXCESSO DE PASTA

Os autores propuseram um método para determinar propriedades reológicas de concretos autoadensáveis por meio do volume de pasta que envolve os agregados. Isso é útil para determinar a quantidade de aglomerantes e demais finos necessários para um valor de viscosidade e tensão de escoamento necessário para a moldagem de diferentes peças. Os autores elaboraram uma equação que determina o excesso de espessura da pasta ao redor dos agregados em função do diâmetro médio, número de partículas e área superficial dos agregados. O excesso de pasta corresponde à pasta que envolve os grãos e proporciona mobilidade a mistura, e não àquela que preenche os vazios deixados no empacotamento dos agregados. Outras equações relacionam o valor da espessura da pasta à viscosidade ou à tensão de escoamento estimada em reômetro de concreto.

De acordo com os autores, para o concreto atingir elevada trabalhabilidade, é necessário ter um bom espaçamento entre os agregados, de forma a minimizar o atrito entre eles. Os autores denominam de “Pasta compacta” (Pc) o volume de pasta que preenche os vazios entre os agregados e de “Excesso de pasta” (Pe) a pasta de cimento que envolve os agregados e permite a mobilidade.

Utilizando as características dos agregados, o excesso de pasta pode ser calculado. Para a utilização na dosagem, os autores determinaram a espessura relativa do excesso de pasta “r”, que pode ser calculada para todas as granulometrias do agregado pelo somatório de cada fração de tamanho individual, tal como mostrado na Equação 25.

$$r = \frac{P_e}{\sum_i^n n_i S_i D_{pi}} \quad \text{Equação 25}$$

Onde,

Pe: volume do excesso de pasta;

n: número de partículas de uma determinada fração (determinado pelo método do peso);
 s: área superficial da fração; e
 D_p: diâmetro da fração.

Os autores definiram, então, as constantes relativas reológicas, determinadas em função da espessura relativa do excesso de pasta (Equação 26 e Equação 27).

$$\eta_r = 0,0705 \times r^{-1,69} + 1 \quad \text{Equação 26}$$

$$\tau_{yr} = 0,0525 \times r^{-2,22} + 1 \quad \text{Equação 27}$$

Onde,

η_r : viscosidade relativa; e

τ_{yr} : tensão de escoamento relativa.

Esse procedimento, apesar de não contemplar todos os parâmetros de dosagem de um CAA, apresenta correlações interessantes para o início de um estudo de dosagem. Atualmente, Li et al. (2012) propuseram um novo método de dosagem para CAA com base nas características dos materiais, incorporando o conceito da espessura da pasta em torno do agregado.

A1.7 MÉTODO SU, HSU CHAI (2001)

O método proposto pelos autores é composto por uma série de equações que definem a proporção inicial de um CAA. A principal consideração do método é compor os agregados objetivando o menor teor de vazios. Neste estudo, o “fator de embalagem do agregado” (PF) denominado pelos autores é definido como a razão da massa unitária compactada e a massa unitária solta. Um valor elevado de PF implica em uma maior quantidade de agregados grossos e finos e, conseqüentemente, em uma menor quantidade de pasta, reduzindo o custo do concreto e melhorando a durabilidade em função da menor retração. Por outro lado, sua capacidade de fluir, a capacidade de autocompactação e a resistência à compressão serão reduzidas. Portanto, é importante determinar um valor ótimo de PF. Os teores de agregados finos e grossos podem ser determinados pela Equação 28 e pela Equação 29.

$$W_g = PF \times W_{gL} \left(1 - \frac{S}{a} \right) \quad \text{Equação 28}$$

$$W_m = PF \times W_{mL} \times \frac{S}{a} \quad \text{Equação 29}$$

Onde,

W_g : teor de agregados graúdos em CAA (kg/m³);

W_m : teor de agregados miúdos em CAA (kg/m³);

W_{gL} : massa unitária solta do agregado graúdo (kg/m³);

W_{mL} : massa unitária solta do agregado miúdo (kg/m³);

PF: fator de empacotamento, a razão entre a massa unitária compactada e a massa unitária solta; e

S/a : proporção de agregados miúdos em relação aos agregados totais, que varia de 50% a 57% do volume.

Os autores consideram que cada kg de cimento proporciona um incremento de 0,14 MPa (20 psi) na resistência do concreto; portanto, para definir a quantidade de cimento, é empregada a Equação 30.

$$C = \frac{f'c}{20} \quad \text{Equação 30}$$

Onde,

C : teor de cimento (kg/m^3); e

$f'c$: resistência à compressão requerida (psi).

No terceiro passo do modelo, o conteúdo de água é calculado a partir da relação água/cimento necessária para se obter a resistência requerida. No quarto passo, determina-se o volume total de cinza volante e escória para completar 1m^3 de concreto, pois já se conhece todas as quantidades dos outros materiais. Posteriormente, determina-se a quantidade de água a ser adicionada por conta das adições incorporadas. A quantidade de água total é a soma de água requerida pelo cimento, cinza volante e escória de alto forno e se recomenda que fique entre 160 e 185 kg/m^3 . A quantidade de aditivo é calculada em relação à massa de cimento, sabendo, a priori, o teor a ser adicionado. Por fim, são feitas misturas de concreto para serem avaliadas e ajustadas.

A1.8 MÉTODO DE GOMES (2002)

O método de Gomes consiste em um procedimento experimental para concreto autoadensável de alta resistência. Esse procedimento constitui uma extensão do desenvolvido por Toralles et al. (1996).

O procedimento proposto por Gomes foi fundamentado na otimização separada da fase pasta e do esqueleto granular no concreto. A pasta é constituída por cimento, adições (sílica ativa, fíler), água e superplastificante, enquanto que o esqueleto granular é definido pela relação ótima entre agregado miúdo e agregado graúdo, por meio da máxima massa unitária solta, de forma que proporcionem o menor volume de vazios interpartículas. Devem ser empregados agregados com dimensão máxima característica de 20 mm ou inferior.

O autor utiliza as seguintes relações: água/cimento (a/c); adição/cimento (sf/c ou f/c , sílica ativa e fíler, respectivamente) e superplastificante sólido/cimento (sp/c). É recomendado que o teor de sílica ativa seja fixado em 10% da massa de cimento (sf/c igual a 0,1), levando em consideração que este é um percentual ótimo para um concreto de alta resistência. Como este método é destinado a concretos de elevada resistência à compressão, inicialmente a relação água/finos deverá ser fixada em 0,4 e ser diminuída até atingir a resistência desejada.

A relação sp/c é definida por meio do ponto de saturação do aditivo superplastificante, determinado em pasta por meio do Cone de Marsh. Essa medida significa o teor de aditivo para o qual um incremento da dosagem do mesmo não provoca nenhuma melhora significativa no tempo de escoamento da pasta. Como a dosagem de superplastificante depende da relação f/c da pasta,

devem ser realizados testes de ponto de saturação, adotando valores de 0,1 a 0,5 para f/c.

Os teores de adição (fíler) são definidos pelo teste do *mini-slump*, que, segundo o autor, deve ser de 180 mm (± 10), e tempo de abertura no diâmetro de 115 (T115) no intervalo de 2 a 3,5 segundos. Os ensaios são realizados com diferentes relações de f/c, cada um com sua dosagem de superplastificante correspondente ao ponto de saturação.

Em função desses parâmetros pré-estabelecidos, parte-se para a produção do concreto, na qual é ajustado o volume de pasta, baseando-se nos ensaios de espalhamento, funil V, caixa L e caixa U, conforme recomendações da Tabela A1. São fabricados concretos com diferentes quantidades ótimas de pasta em função de cada tipo de aplicação. A quantidade mínima de pasta deve preencher os vazios do esqueleto granular, proporcionando a característica de autoadensamento no estado fresco e a resistência à compressão desejada no estado endurecido.

Tabela A1: Faixa dos parâmetros que asseguram o autoadensamento dos concretos segundo Gomes (2002).

Propriedades	Ensaio	Parâmetros	Faixa ideal
Capacidade de preenchimento	<i>Slump flow</i>	Extensão final do fluxo	60 a 75 cm
		T ₅₀	5 \pm 2 s
	Funil V	Tempo total de fluxo	10 \pm 3 s
Capacidade de Passagem	Caixa L	T _{L20} ¹	1 \pm 0,5 s.
		T _{L40} ¹	1,5 a 3,0 s
		H ₂ /H ₁	$\geq 0,80$
Estabilidade	Tubo em U ²	Relação de segregação	$\geq 0,90$

¹ T_{L20} e T_{L40}: tempo para que o fluxo alcance um comprimento horizontal de 20 cm e de 40 cm, respectivamente.

² Tubo em U é um tipo de coluna de segregação. A relação de segregação é determinada dividindo a massa dos agregados existentes da segunda fatia pela primeira fatia.

Fonte: GOMES (2002).

A1.9 MÉTODO MELO-REPETTE (2005)

No método Melo-Repette, citado em Melo (2005), deve-se, primeiramente, determinar a relação água/cimento para a resistência estipulada, utilizando, para isso, curvas de dosagem referentes ao tipo de cimento empregado. Na fase pasta determina-se o teor de adição (fíler) a partir de critérios de controle de segregação. Na fase argamassa há uma confirmação do teor de adição, que pode ser incorporado em substituição ao cimento e determinação do volume de agregado miúdo em função dos resultados de espalhamento e funil V. O volume de agregado graúdo é determinado em relação ao volume total de

concreto, de forma a obter misturas adequadas em função dos ensaios de espalhamento, fluidez e capacidade de passagem e preenchimento. Com estes mesmos ensaios, faz-se o ajuste final do teor de aditivo no concreto.

Esse método é destinado a uma família de CAA com resistências à compressão entre 20 e 45 MPa, nas quais os finos presentes são compostos pelo cimento e filler. Para a definição das proporções nesta faixa de resistência propõe-se definir, no mínimo, três resistências no intervalo de interesse, sendo dois valores extremos e um intermediário, preferencialmente, correspondente à média aritmética dos extremos.

O teor de finos deve ser determinado para cada relação água/cimento especificada. Desde que a pasta se mostre instável, incorpora-se filler (somente a porção passante na peneira 0,075 mm) em intervalos de 5% em volume, até se obter uma resistência à segregação satisfatória. Esse teor de finos pode ser ajustado posteriormente nos testes em argamassa, para que o efeito do aditivo superplastificante seja corrigido.

O teor de agregado miúdo deve ser ajustado para uma única relação água/cimento (a intermediária), sendo o valor encontrado adotado para as demais misturas. De acordo com os autores, o volume de agregado miúdo em relação ao volume total da pasta deve ser, preferencialmente, não inferior a 35% e não superior a 55%. Parte-se, portanto, de 40%, e são feitos incrementos do material em intervalos de 2,5 ou 5%. As argamassas são avaliadas em função dos ensaios de espalhamento (200 a 280 mm) e Funil V (3,5 a 10 segundos), incorporando-se aditivo superplastificante em intervalos de 0,05% ou menores, partindo-se do teor de 0,1% (massa de sólidos do aditivo em relação à massa de cimento). Dessa forma, se está estabelecendo sempre o teor mínimo de aditivo para aquele teor de agregado miúdo. É importante que sejam descartadas as misturas que apresentem tendência à segregação. O volume ideal de agregado miúdo é selecionado dentre as misturas que contêm o maior teor desse material e que atendem aos parâmetros dos ensaios.

Após a definição da quantidade de agregado miúdo, o teor de filler deve ser aumentado em relação ao que foi definido em pasta, podendo ser adotado um aumento de 5%. Esse ajuste deve ser feito a partir da incorporação de aditivo, podendo-se partir do teor definido na etapa de ajuste do agregado miúdo e adicionar incrementos de 0,05% ou menos. As argamassas são avaliadas novamente pelos ensaios de espalhamento e fluidez, porém, com outras faixas de aceitação: diâmetro de espalhamento entre 250 e 280 mm (realizado com molde tronco-cônico com diâmetros de 70 e 100 mm e altura de 60 mm) e tempo de escoamento no Funil V entre 5 e 10 segundos.

A resistência à compressão deve ser avaliada, inicialmente, nas argamassas, para que se possa verificar se a relação água/cimento definida foi adequada para a obtenção da resistência desejada.

Empregando-se a argamassa com teor intermediário de água/cimento definido anteriormente, prepara-se concretos com diferentes teores de agregado graúdos. Os autores sugerem os seguintes teores em relação ao volume total de concreto: 25; 28,5; 30; 31,5 e 33%, e que os agregados tenham dimensão máxima

de 10 mm. Devem ser realizados os ensaios de espalhamento, Funil V e Caixa L (H_2/H_1) com os seguintes limites de aceitação: 600-700 mm; 10s e 0,8, respectivamente. O teor de aditivo deve ser ajustado sempre que houver necessidade. O teor ideal de agregado graúdo é o máximo possível para que sejam atendidos os requisitos dos ensaios, empregando-se um teor de aditivo preferencialmente menor que 0,3%.

O método prevê a moldagem de corpos de prova para resistência à compressão e ao módulo de elasticidade.

A1.10 EFNARC

Em 2002 e 2005 a EFNARC publicou uma série de informações sobre concreto autoadensável, incluindo parâmetros de dosagem orientativos, baseada no Método de Dosagem Racional, também chamado de Método Japonês, proposto por Okamura.

De acordo com essas publicações, a dosagem deve seguir as seguintes recomendações:

- selecionar o desempenho exigido com base na especificação do comprador;
- selecionar os materiais constituintes;
- compor a mistura: avaliar a demanda de água e otimizar o fluxo e a estabilidade da pasta; determinar a proporção de areia; testar a sensibilidade para pequenas variações de quantidades (robustez); adicionar uma quantidade adequada de agregado graúdo;
- verificar ou ajustar o desempenho do concreto por meio de testes de laboratório (estado fresco e endurecido);
- se os testes forem satisfatórios, proceder à verificação e ao ajuste do desempenho da mistura em escala real; se insatisfatório, deve-se avaliar materiais alternativos ou considerar as seguintes mudanças:
 - ajustar a proporção de cimento/finos e a razão água/finos e testar as propriedades de fluxo da pasta;
 - experimentar diferentes tipos de adições (se disponível);
 - ajustar as proporções do agregado fino e da dosagem de superplastificante;
 - considerar o uso de um agente modificador de viscosidade para reduzir a sensibilidade da mistura; e
 - ajustar a proporção ou o tamanho do agregado graúdo.

O método prescreve algumas recomendações para o início do processo de dosagem, mas salienta que essas proporções são apenas uma indicação e que misturas de CAA podem não atender a todos os itens simultaneamente.

A1.11 TUTIKIAN E DAL MOLIN (2007)

O método proposto por Tutikian e Dal Molin utiliza os conceitos de O'Reilly (1992) para determinar o empacotamento granular máximo, os conceitos de De Larrard (1999) para a escolha dos materiais e o diagrama de dosagem do método IPT/EPUSP. O método de O'Reilly é destinado a concretos convencionais e salienta a importância da determinação da relação ótima dos

agregados graúdos e miúdos, que é encontrada em função dos vazios de cada proporção. Da mesma forma, De Larrard (1999) propôs um método de dosagem científico aplicável a todos os tipos de concreto, inclusive o CAA, que foi denominado de Modelo de Empacotamento Compressivo, que visa obter uma mistura com o máximo de empacotamento possível de seus agregados, a qual resultaria em um menor consumo de pasta no concreto.

No método Tutikian e Dal Molin, após a escolha dos materiais é determinada a proporção entre os materiais granulares, objetivando a menor quantidade de vazios. Para isso, deve-se empacotar todos os componentes do CAA, dois a dois e em ordem decrescente de diâmetro das partículas. Se forem utilizados materiais pozolânicos ou escória de alto-forno, eles devem ser empacotados após a areia e serão considerados, até o final do processo, como agregados. O único elemento que não é empacotado é o cimento. Com o esqueleto granular da mistura já determinado, há uma grande probabilidade de que o CAA não segregue e nem ocorra excesso de material fino. A não-confirmação desse fato sugere que os materiais escolhidos não são adequados para a confecção de CAA e devem ser substituídos.

Para a determinação da relação água/cimento deve-se consultar o histórico de resistência de outros concretos com os mesmos materiais. A partir disso, deve-se escolher um traço intermediário (da curva que será confeccionada) para se realizar a mistura de ajuste, a fim de se confirmar a relação água/cimento e, principalmente, se determinar, experimentalmente o teor de aditivo superplastificante. Todos os ensaios de trabalhabilidade devem ser realizados para se ter certeza de que o teor de aditivo está realmente correto.

Mantendo o esqueleto granular e o teor de aditivo superplastificante percentualmente constantes, realiza-se a mistura dos traços rico, intermediário e pobre. Os autores salientam que o teor de argamassa seca de todos os pontos da curva não será constante. O que permitirá que todos os pontos sejam considerados da mesma família e possam ser plotados nos mesmos gráficos será a constância do teor de aditivo e as proporções entre todos os agregados (incluindo aqui os finos).

Para a confecção da curva, a única variável desconhecida é a relação água/cimento (se tem apenas uma aproximação). De acordo com a aplicação do CAA, a água será dosada a fim de tornar a mistura mais ou menos fluida, porém, em tese, a resistência à segregação e a habilidade de passar por obstáculos já estão garantidas com a compacidade dos agregados.

Após a realização de todos os ensaios do estado fresco previsto, são moldados corpos de prova a fim de determinar a resistência à compressão e outras propriedades de interesse (resistência à tração, módulo de elasticidade etc.). Com os resultados é possível desenhar o diagrama de dosagem de forma similar ao método IPT/EPUSP, para os três quadrantes principais. Os autores incorporaram um quarto quadrante para determinação do teor de argamassa do traço e do custo do concreto.

A1.12 ACI Committee 237 (2007)

O método de dosagem prescrito pelo ACI consiste em técnica experimental, fundamentalmente dependente do dosador. O guia estabelece alguns pontos iniciais, com os quais são confeccionados CAA e estão apresentados na Tabela A2. O método não cita nenhum procedimento para determinar o tipo ou o teor de aditivos. Contudo, faz algumas recomendações sobre algumas adições que podem ser incorporadas como finos e também em relação aos agregados.

Com os parâmetros iniciais devem ser dosados os CAA. As misturas são avaliadas pelos métodos citados. Dependendo dos resultados desses testes e da observação do dosador, são realizados os ajustes necessários.

Tabela A2: Parâmetros para dosagem de CAA – ACI Committe 237.

Componentes	Considerações	Quantidade
Agregados graúdos	Dim. Máx.: 12,5 mm	28 - 32% ²
	Dim. Máx.: 10,0 mm	Até 50% ²
Finos ¹ (materiais menores que 0,125mm)	Slump flow: < 550 mm	355 – 385 kg/m ³
	Slump flow: 550 – 600 mm	385 – 445 kg/m ³
	Sump flow: > 650 mm	458 kg/m ³ ou mais.
Pasta		34- 40% ²
Argamassa		68 – 72% ²
Relação Água/Materiais Cimentíceos		0,32 – 0,45

¹ O total de finos pode ser reduzido com o uso de aditivo modificador de viscosidade.

² As porcentagens referem-se ao volume total da mistura.

Fonte: ACI Committe 237 (2007).

ANEXO B

Apreciação Petrográfica – Fíler Gnáissico

MATERIAL ENSAIADO	
Amostras coletadas e descritas durante a elaboração do Relatório Final de Pesquisa da Pedreira Rio Zoada, com ensaios e descrições registrados junto ao Processo DNPM 815.075/1990, no Ministério de Minas e Energia - Departamento Nacional de Produção Mineral - Superintendência de Santa Catarina.	
AMOSTRA OGIF-1-H	
Cor: Cinza esbranquiçada, com bandas relativamente de tonalidades mais escuras.	
Estrutura: Bandamento Gnáissico, definido por bandamento e orientação de minerais. O bandamento é marcante, caracterizado pela intercalação de níveis micáceos (biotita) moderadamente orientados e níveis quartzo-feldspáticos.	
Textura: Granolepidoblástica, com granulação média a grossa.	
Mineralogia	% Aproximada (Avaliação Microscópica)
Quartzo	25
Feldspato Plagioclásio (Oligoclásio)	20
Feldspato Alcalino (Microclínio)	15
Biotita	20
Anfibólio (Hornblenda)	10
Opacos	5
Óxidos	5
Apatita	Traços
Zircão	Traços
Clorita	Traços
Teste para Ácido Clorídrico: Não reativo.	
Alteração: Rocha Sã.	
Classificação Macroscópica (Genérica): Gnaisse.	
Classificação Microscópica: Biotita-Microclínio-Oligoclásio-Quartzo Gnaisse.	
Propriedades Físico-Mecânicas: Rocha Muito Coerente.	
Forma dos Fragmentos: Forma equidimensional.	

Fonte: Infracul Agregados