

Avaliação da reologia de concretos autoadensáveis contendo filers de britagem

Rheology evaluation of self-compacting concretes containing quarry by-product powders

Rudiele Aparecida Schankoski¹, Ronaldo Pilar¹,
Rafael Pileggi², Luiz Roberto Prudêncio Jr¹

¹ Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

e-mail: rudiele@gmail.com; ronaldo_pilar@hotmail.com; prudenciouk@hotmail.com

² Universidade de São Paulo – USP

e-mail: rafael.pileggi@poli.usp.br

RESUMO

Grandes quantidades de materiais finos (na forma de pó) são coletados e armazenados nas pedreiras, constituindo um sério problema ambiental, pela falta de destinação específica para esse resíduo. No entanto, esses materiais poderiam ser utilizados como um filer em concreto autoadensável (CAA), o qual necessita de um grande volume de finos na sua constituição. Desta forma, neste trabalho, foram investigados os efeitos do filer calcário (empregado como referência), filer diabásico e gnáissico, nas propriedades de CAAs. A influência da mineralogia, forma e tamanho das partículas foram avaliadas por meio de ensaios no estado fresco (monopontos e reométricos) e ensaios no estado endurecido de CAAs. Os resultados mostraram que concretos contendo filer gnáissico ou diabásico podem apresentar propriedades reológicas similares aos concretos contendo filer calcário, quando apresentam distribuição granulométrica e tamanho de partícula similar ao filer calcário usualmente utilizado (d_{50} entre 30 e 40 μm). Além disso, CAAs contendo filer diabásico apresentaram resistência à compressão superior aos concretos dosados com os demais filers. Diante dos resultados, pode-se concluir que os filers de diabásio e gnaisse apresentam potencial para serem utilizados como materiais alternativos ao filer calcário em CAA, embora possam demandar maior quantidade de aditivo superplastificante para atingir propriedades comparáveis no estado fresco.

Palavras-chave: filer, reologia, CAA.

ABSTRACT

Large amounts of powders have been collected in quarries and storage of these by-product dusts is a serious environmental concern. However, these materials may be used as a filler in self-compacting concrete (SCC), which requires a large amount of fines in its composition. Thus, in this paper, the effects of limestone filler, diabase, and gneiss quarry powder on the properties of self-compacting concrete were investigated. The influence of the mineralogy, shape and particle size distribution were evaluated by rheometry, and by fresh and hardened concrete properties. SCC containing gneissic or diabasic powder can show rheological parameters values very similar to those of SCC containing limestone filler when the material has the same particle size to that of an usual limestone filler (d_{50} between 30 e 40 μm). SCC containing diabasic powder showed higher compressive strength than that of SCC containing limestone filler or gneiss powder. It was found that diabasic and gneissic quarry powders could be used successfully for producing SCC, although a higher superplasticizer content was required than that of SCC containing limestone filler.

Keywords: quarry dust, rheology, SCC.

1. INTRODUÇÃO

Na produção de agregados para concreto, o processo de trituração e beneficiamento de rochas gera uma

grande quantidade de material na forma de pó. Especialmente 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. Segundo ABNT NBR 7211 [1], pó ou material pulverulento é todo material passando na peneira 200 (abertura de 0,075 mm). A presença de material pulverulento nos agregados está intimamente relacionada à futura demanda de água dos concretos dosados. Desta forma, atualmente, esses materiais finos não possuem uma destinação específica, sendo considerados um resíduo ambiental, os quais, em muitos casos, ficam depositados na própria pedreira.

Dados de uma pedreira localizada na grande Florianópolis-SC 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. Este fato não ocorre só no Brasil. Segundo [2,3] na Grécia são produzidas cerca de 10 milhões de toneladas por ano de finos de britagem devido à exploração de pedreiras, representando cerca de 10-15% da produção total de agregados do país. Na Grã-Bretanha são produzidas, anualmente, 41,3 milhões de toneladas desses finos [4]. Nos Estados Unidos, estima-se que mais de 100 milhões de toneladas de finos são armazenadas como resíduos em cada ano [5].

Uma das aplicações possíveis e eficientes para esse material, aqui chamado de filer de britagem, 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) [6]. Filers de basalto, granito, mármore e calcário já foram testados por alguns autores em pastas, argamassas e concretos, especialmente CAA. Os autores reportam vantagens com a utilização desses materiais alternativos na mistura, tais como melhorias nas propriedades mecânicas, melhora na trabalhabilidade e redução do custo [6–12]. Finos de outras rochas foram pouco estudados para CAA e as pesquisas que existem não se concentram em sua mineralogia, caracterização da forma e propriedades superficiais das suas partículas, tampouco na determinação dos parâmetros reológicos do concreto com eles confeccionados. Inexistem, por exemplo, estudos publicados acerca da utilização de filers diabásicos em CAA, e os estudos realizados com filer gnáissico são escassos, não abrangendo as peculiaridades citadas anteriormente. HO et al [7] estudaram filer de britagem de origem gnáissica e calcária e concluíram que a presença de filer gnáissico aumentou a demanda de aditivo superplastificante para uma mesma trabalhabilidade de CAAs, mas apresentaram incremento de cerca de 15% na resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Aliado a isso, sabe-se que a qualidade do concreto e a garantia da trabalhabilidade e estabilidade adequadas estão intimamente ligadas às propriedades reológicas da mistura fresca. A reologia interfere também nas propriedades mecânicas e de durabilidade, já que é possível atenuar falhas devido às propriedades de fluxo. Apesar disso, atualmente não é comum o uso da reologia na concepção do CAA de forma direta.

Desta forma, o objetivo da presente pesquisa foi avaliar o desempenho de filers de britagem de origem diabásica e gnáissica nas propriedades do estado fresco de concretos autoadensáveis e compará-los com o de misturas feitas com filer calcário, material muito utilizado no Brasil como promotor de viscosidade do CAA. As duas mineralogias alternativas de filers foram escolhidas por atualmente serem escassos, e em alguns pontos inexistentes, os estudos em relação a utilização desses tipos de material em CAA.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foi utilizado cimento Portland CP V ARI [13], com a composição química e física apresentada na Tabela 1 (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.

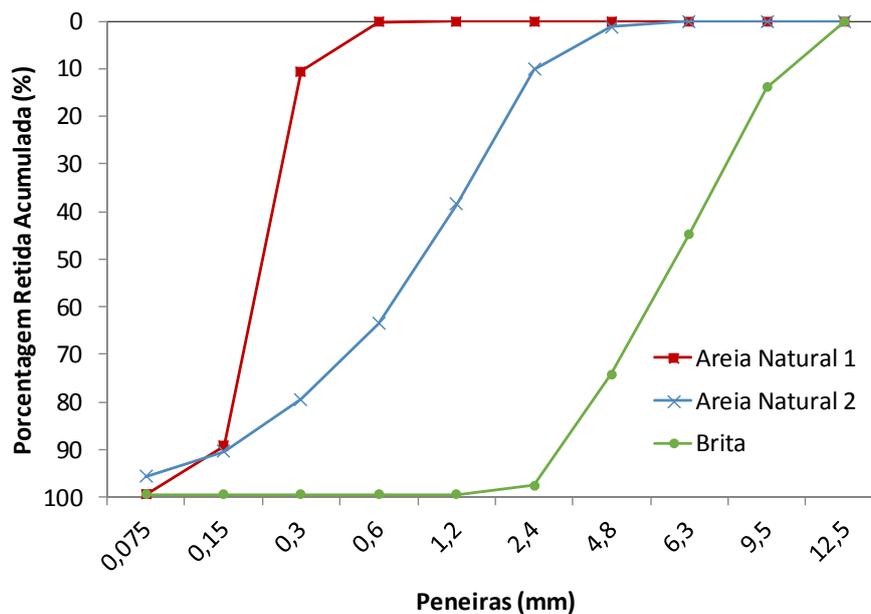
Como agregados, utilizou-se uma composição de 60% de areia natural fina com 40% de areia natural média grossa, e brita 9,5/12,5 de origem granítica. A caracterização dos agregados pode ser visualizada na Tabela 2 e na Figura 1.

Tabela 1: 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 2: 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 1:** 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 gnaisses (representado como G). A caracterização química e física dos filers pode ser visualizada na Tabela 3.

Tabela 3: Características químicas e físicas dos filers.

Fíler	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 D₅₀¹ de 38, 33 e 153 µm (representado como C38, D33 e G153 na Tabela 4). Além da granulometria in natura, foram testados filers com distribuições granulométricas mais finas, para verificar a influência do tamanho das partículas nas propriedades reológicas da mistura. O filer de gnaisse foi moído até chegar a um D₅₀ de 34 µm, para ficar próximo aos demais filers testados. Todos os filers ainda foram moídos para atingir um D₅₀ igual a 16 µm, valor próximo ao cimento utilizado neste trabalho (D₅₀ do cimento igual a 15,19 µm), uma vez que, é comum CA-As apresentarem acréscimo do consumo de cimento, para atender a demanda de finos necessária para promover a viscosidade adequada da mistura. Os filers de calcário e diabásio também foram testados em uma granulometria intermediária, com D₅₀ de 24 µm.

Um moinho de bolas foi utilizado para moer os filers. Foram utilizadas 60 bolas metálicas padronizadas, e o tempo no moinho variou em função do tipo de filer e do D₅₀ desejado. A Tabela 4 mostra o D₅₀ dos filers e as Figuras 2-4 mostram as distribuições granulométricas a laser de todos os tipos de finos utilizados, antes e após a moagem. Os filers com mesmo D₅₀ apresentam curvas granulométricas similares.

Tabela 4: D₅₀ dos filers utilizados.

Fíler	D ₅₀ (µm)	Denominação
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
Gnaisse sem moer	153,80	G153
Gnaisse granulometria próxima ao filer calcário in natura	34,15	G34
Gnaisse granulometria próxima ao cimento	16,56	G16

¹ D₅₀: 50% das partículas apresentam diâmetro abaixo do D₅₀.

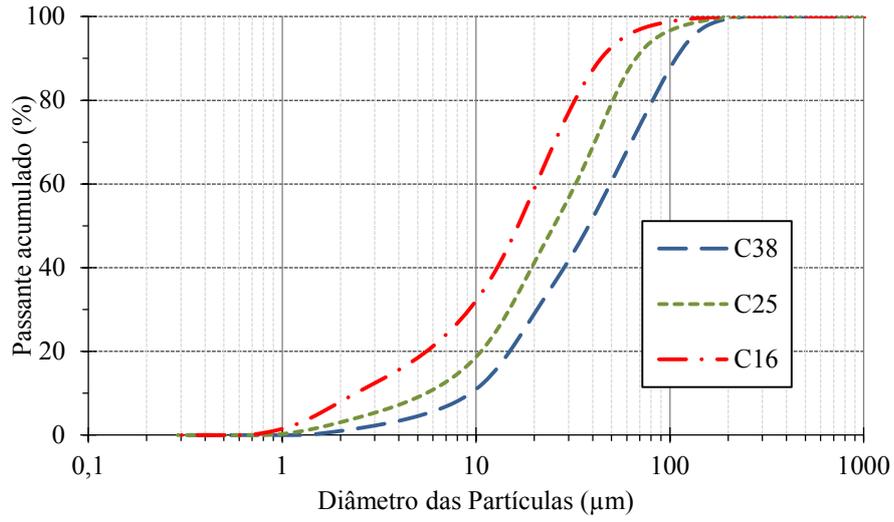


Figura 2: Calcário – Distribuição granulométrica a laser para cada D₅₀.

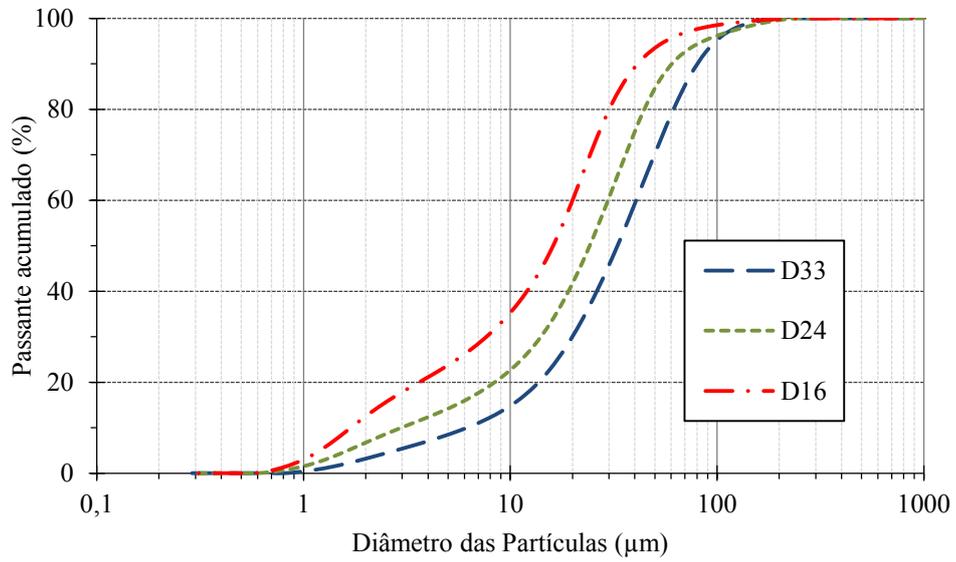


Figura 3: Diabásio – Distribuição granulométrica a laser para cada D₅₀.

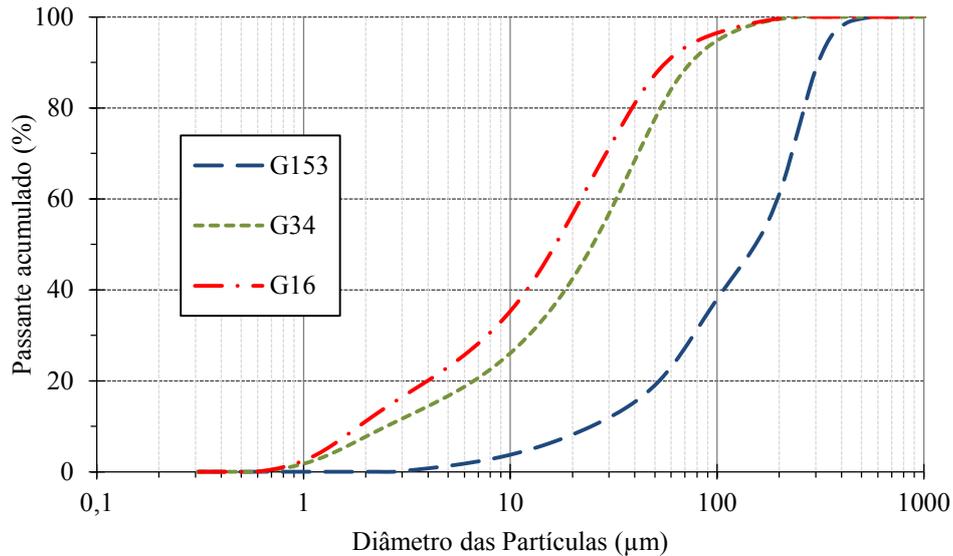


Figura 4: Gnaisse – Distribuição granulométrica a laser para cada D_{50} .

2.2 Análise das partículas

Cada tipo de filer foi examinado utilizando MEV (microscopia eletrônica de varredura) para caracterizar a forma das partículas, conforme especificado em FELEKOGLU [14]. As imagens foram analisadas utilizando o software Image Tool Version 3.0 (IT3), e caracterizadas utilizando as equações propostas por KUO [15]:

$$RA = \frac{\text{Comprimento}}{\text{Largura}} \quad (1)$$

$$\text{Angularidade} = \left(\frac{\text{Perímetro}_p}{\text{Perímetro}_e} \right)^2 \quad (2)$$

$$\text{Rugosidade} = \left(\frac{\text{Perímetro}}{\text{Perímetro}_p} \right)^2 \quad (3)$$

Onde RA é a relação de aspecto; Perímetro_p é o perímetro do polígono que circunscribe a partícula; Perímetro_e é o perímetro da elipse com a mesma área e mesma relação de aspecto que a partícula.

A Figura 5 mostra a diferença entre os três parâmetros analisados nas equações citadas. Percebe-se que as três partículas apresentam forma circular, e, por conseguinte, as relações de aspecto são quase iguais. A ilustração (b) tem uma irregularidade de superfície com frequência menor do que a ilustração (c). Isso resulta em uma maior angularidade de (b) em relação a (c). A ilustração (c), por sua vez, apresenta uma maior rugosidade superficial.

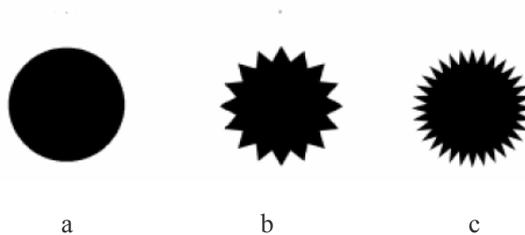


Figura 5: Partículas com formas arredondadas, mas com diferentes angularidades e texturas [16].

No mínimo 100 partículas foram analisadas para cada tipo de filer em cada granulometria. Após a remoção dos valores espúrios, foram consideradas as médias para cada um dos parâmetros.

2.3 Proporções e Mistura

O traço das misturas foi baseado na recomendação da EFNARC [17] para SCC. A proporção dos materiais está apresentada na Tabela 5. Nota-se que não se alterou o volume de filer empregado nas misturas de concreto. Uma das variáveis analisadas, além da origem mineralógica, foi a distribuição granulométrica para cada tipo de filer, a qual, neste trabalho, foi representada pelo D_{50} . Os concretos foram misturados em betoneira de eixo inclinado. Todas as substituições de filer 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 [18] 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, iria-se produzir misturas muito diferentes e sem aplicação prática.

Tabela 5: Composição dos concretos dosados (kg/m^3).

Concreto	Cimento	Filer			Areia		Brita	Água a/c=0,53	Aditivo	
		Calcário	Diabásio	Gnaisse	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

2.4 Ensaios

Foram realizados os ensaios de caracterização de concreto autoadensável prescritos pela ABNT NBR 15823[18]: *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 reômetro Pheso, instalado no laboratório de Microestrutura do departamento de Engenharia Civil da Poli/USP (Figura 6), 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 [19], a reologia do concreto pode ser simulada utilizando o modelo de Bingham, conforme equação 4. Como o reômetro utilizado mede Torque e rotação, a equação 5 pode ser utilizada para modelar os parâmetros reológicos da mistura [20].

$$\tau = \tau_0 + \eta \times \gamma \quad (4)$$

Onde,

τ : tensão de cisalhamento (Pa);

τ_0 : tensão de escoamento (Pa);

γ : taxa de cisalhamento (1/s); e

η : viscosidade (Pa.s)

$$T = T_0 + v \times R \quad (5)$$

Onde,

T: torque (N.m)

T_0 : intersecção da reta com o eixo y;

v : inclinação da reta;

R: rotação (RPM).

Além dos testes no estado fresco, corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm foram moldados e rompidos aos 28 dias para ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade [21–23].



Figura 6: Reômetro Pheso.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise das Partículas

As imagens obtidas pelo MEV foram trabalhadas em preto e branco, sendo os sólidos (grãos) pretos e a matriz branca. A forma básica, o formato e o tamanho de todas as partículas permaneceram intactas. O software estabelece um traço de contorno para todas as partículas e calcula os parâmetros necessários. Dez imagens de MEV foram capturadas e analisadas para cada um dos finos utilizados. A Figura 7 mostra exemplos representativos dessas imagens.

A Tabela 6 apresenta os fatores médios de relação de aspecto, angularidade e rugosidade calculados para cada filer (equações 1-3). A relação de aspecto é próxima a 1 para partículas equidimensionais ou esféricas. Valores distantes de 1 indicam partículas mais alongadas e planas. As partículas de calcário apresentaram os valores mais próximos a 1. A angularidade para um círculo ou para uma elipse é igual a 1. Para partículas angulares, o valor se afasta de 1. Assim, altos valores desse parâmetro indicam um alto grau de angularidade.

O filer de gnaiss, que se apresentava in natura com a maior relação de aspecto, melhorou significativamente sua forma após o processo de moagem. No entanto, dependendo do filer e do grau de moagem, a relação de aspecto e angularidade apresentaram aumentos (C25 e D24). Isso é consistente com o trabalho de FELEKOGLU [14] que usou o processo de moagem em partículas de calcário e quartzo e notou que o efeito de moagem no cálculo da forma e da textura da superfície podem diferir com o tipo de finos utilizado. O autor também percebeu que, após a moagem de até 3 horas, as partículas ficaram mais alongadas.

A rugosidade aumenta quando a textura das partículas também aumenta (e consequentemente o seu perímetro), enquanto não muda o perímetro do polígono delimitador. Com exceção da D24, as partículas de gnaiss apresentaram os valores de rugosidade mais baixos entre os filer analisados. Segundo KUO [24] uma diferença de 0,01 na angularidade e na rugosidade é considerada significativa.

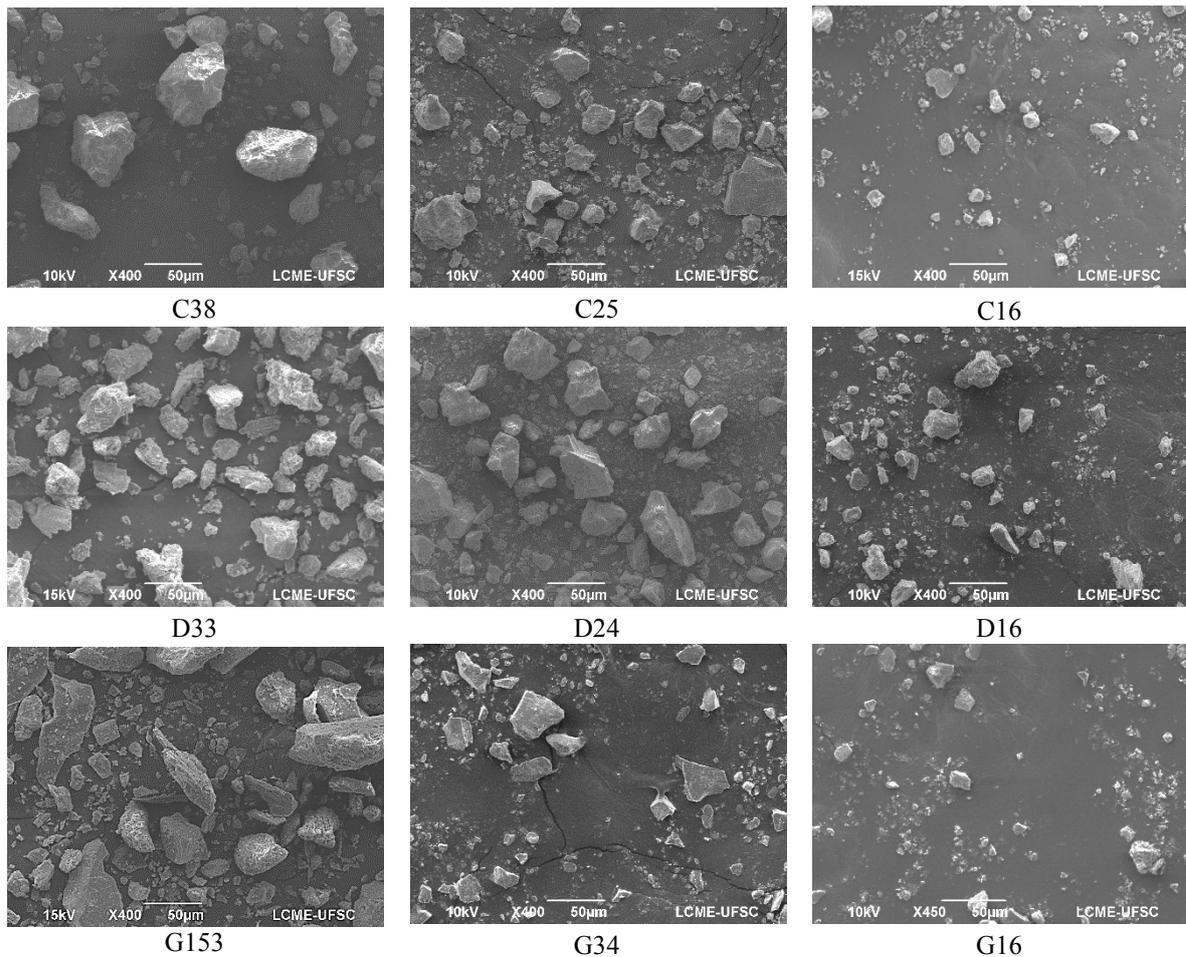


Figura 7: Imagens obtidas por MEV.

Tabela 6: Resultados da análise de imagens.

Filer	Relação de Aspecto	Angularidade	Rugosidade
C38	1,42	1,11	1,33
C25	1,46	1,13	1,29
C16	1,41	1,12	1,30
D33	1,55	1,14	1,35
D24	1,59	1,15	1,26
D16	1,48	1,12	1,29
G153	1,76	1,17	1,28
G34	1,57	1,13	1,28
G16	1,54	1,15	1,24

A Figura 8 mostra a correlação entre a análise das partículas de filer e a dosagem de superplastificante dos concretos. Quando a relação de aspecto e a angularidade se aproximam de 1, as misturas tendem a demandar menor quantidade de aditivo para atingir a fluidez desejada, uma vez que a forma das partículas contribui para a trabalhabilidade do concreto. Em relação a rugosidade, foi observado o oposto. No entanto, é percebe-se que as partículas com maiores rugosidades também foram aquelas que apresentaram as menores relações de aspecto. Desta forma, a rugosidade pode não ter um papel importante na trabalhabilidade das misturas, e/ou suas implicações são minimizadas pelo efeito da relação de aspecto. Vale salientar que essas conclusões podem estar atreladas aos teores de aditivo utilizado, uma vez que esse comportamento é afetado por

outros parâmetros, como área superficial das partículas.

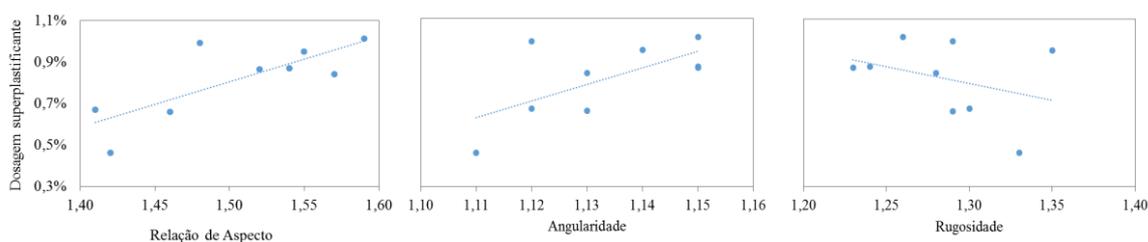


Figura 8: Relação entre a demanda de superplastificantes dos concretos com a análise das partículas de fillers (relação de aspecto, angularidade e rugosidade), independente da mineralogia.

3.2 Resultados dos ensaios no Estado Fresco e Endurecido dos Concretos.

Os resultados dos ensaios monopontos no estado fresco e estado endurecido dos CAAs estão apresentados na Tabela 7.

Percebe-se que todos os concretos ficaram dentro da faixa estipulada inicialmente para o *slump flow* (70 ± 5 cm). No entanto, quando utilizado filer 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 [18] com relação aos resultados de funil (VS2: 9 a 25 s). O filer 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 filer não são adequados para garantir a viscosidade e a estabilidade da mistura autoadensável.

Nos demais fillers, 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 [18] 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 7: Resultado dos ensaios no estado fresco e endurecido dos CAAs.

Concreto	Slump Flow (cm)	Funil V (s)	Caixa L	Coluna (%)	Resistência à Compressão (MPa)	Desvio Resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Módulo (GPa)
C38	71,5	13,13	0,82	3,53	51,4	2,7	32,9	0,5
C25	74,0	12,76	0,89	4,30	56,4	1,3	29,9	3,1
C16	70,0	11,36	0,89	7,75	55,1	1,6	26,9	3,6
D33	72,5	17,00	0,83	0,30	60,5	3,0	37,6	3,3
D24	75,0	10,79	0,87	6,14	61,5	1,0	36,8	4,3
D16	70,0	10,33	0,89	8,94	62,8	1,8	35,0	4,9
G153 *	68,5	72,12	0,70	18,99	54,0	0,8	28,2	2,5
G34	73,5	15,10	0,94	5,74	56,6	3,1	26,3	4,2
G16	75,0	14,60	0,91	3,85	54,3	1,8	26,9	1,6

* ocorreu exsudação

A Tabela 7 também mostra os resultados de resistência à compressão dos CAA. Os concretos contendo filer calcário e gnáissico apresentaram resistências similares, entre 51 e 56 MPa. No entanto, todos os concretos contendo filer diabásio apresentaram valores acima de 60 MPa. De acordo com SADEK, ELAT-TAR e ALI [25], o uso de pós de pedra (filer de britagem) de algumas origens mineralógicas, podem melhorar a resistência mecânica dos concretos devido ao efeito filer e/ou a um pequeno efeito pozolânico, pela presença de alta quantidade de SiO_2 amorfa, grande área superficial e reatividade do material. Esse aumento da resistência a compressão pode diminuir, consequentemente, o consumo de cimento e reduzir o custo da produção do concreto.

Observa-se que o módulo de elasticidade dos concretos dosados com diabásio também foi maior do que os demais concretos. Como o módulo de elasticidade do concreto é diretamente relacionado com o módulo de elasticidade dos seus constituintes, e sabendo que todos os demais materiais foram os mesmos para todos os concretos, com exceção do filer, pode-se concluir que o diabásio apresenta maior módulo de elasticidade do que o calcário e o gnaíse estudados. Esse fato pode ter contribuído para o efeito global nas propriedades mecânicas, inclusive na resistência à compressão.

Pode-se observar também que, comparando concretos contendo filers de mesma origem mineralógica, aqueles com filers mais finos (C25, C16, D24, D16, G34) apresentaram resistência à compressão superior do que os concretos com filers mais grossos (C38, D33 e G153). Isso pode ser resultado do melhor empacotamento de partículas, que aumenta a compacidade da matriz [26].

3.3 Reometria

Os resultados obtidos pelo reômetro Pheso podem ser observados nas Figuras 9-11, que representa o modelo de ajuste linear dos CAA dosados. As curvas pontilhadas representam a aceleração e as contínuas, a desaceleração.

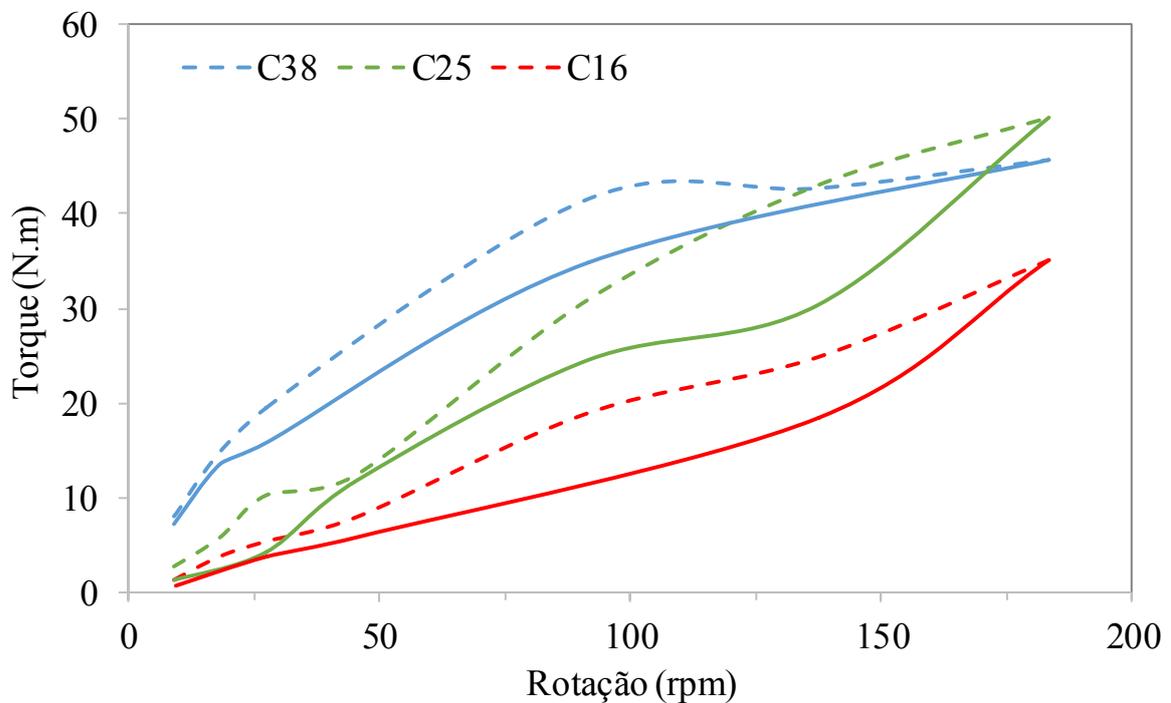


Figura 9: Torque x rotação (resultados reométricos) dos CAAs dosados com filer calcário de diferentes granulometrias.

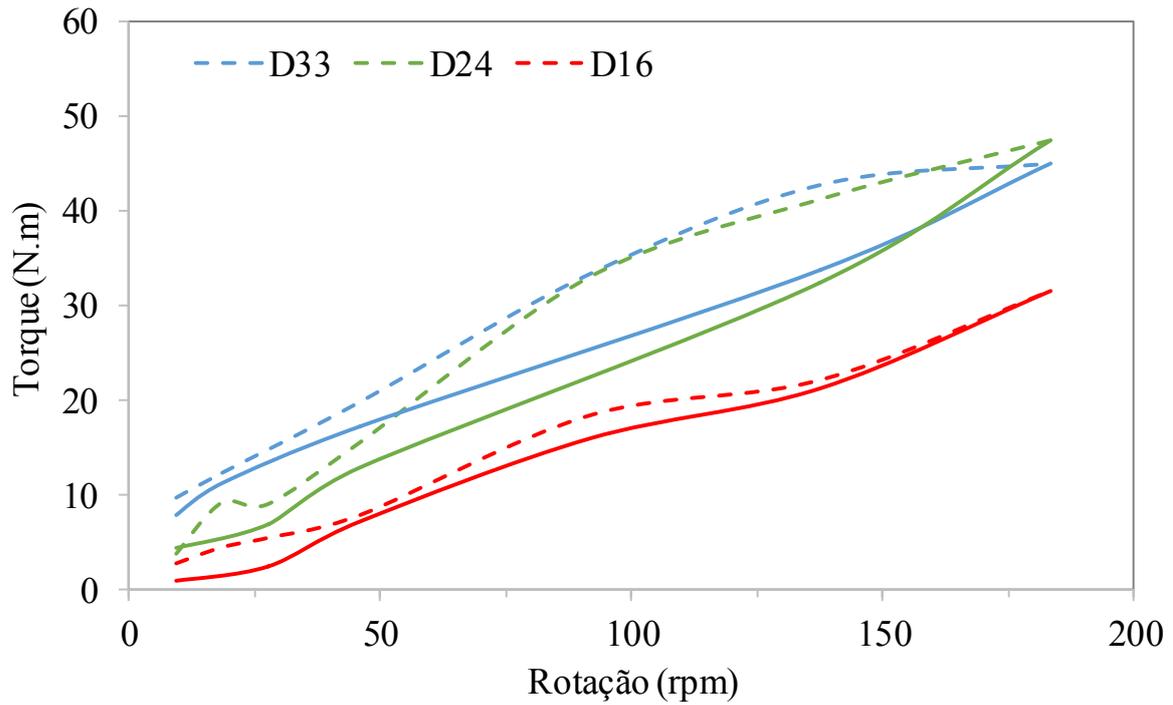


Figura 10: Torque x rotação (resultados reométricos) dos CAAs dosados com filer diabásio de diferentes granulometrias.

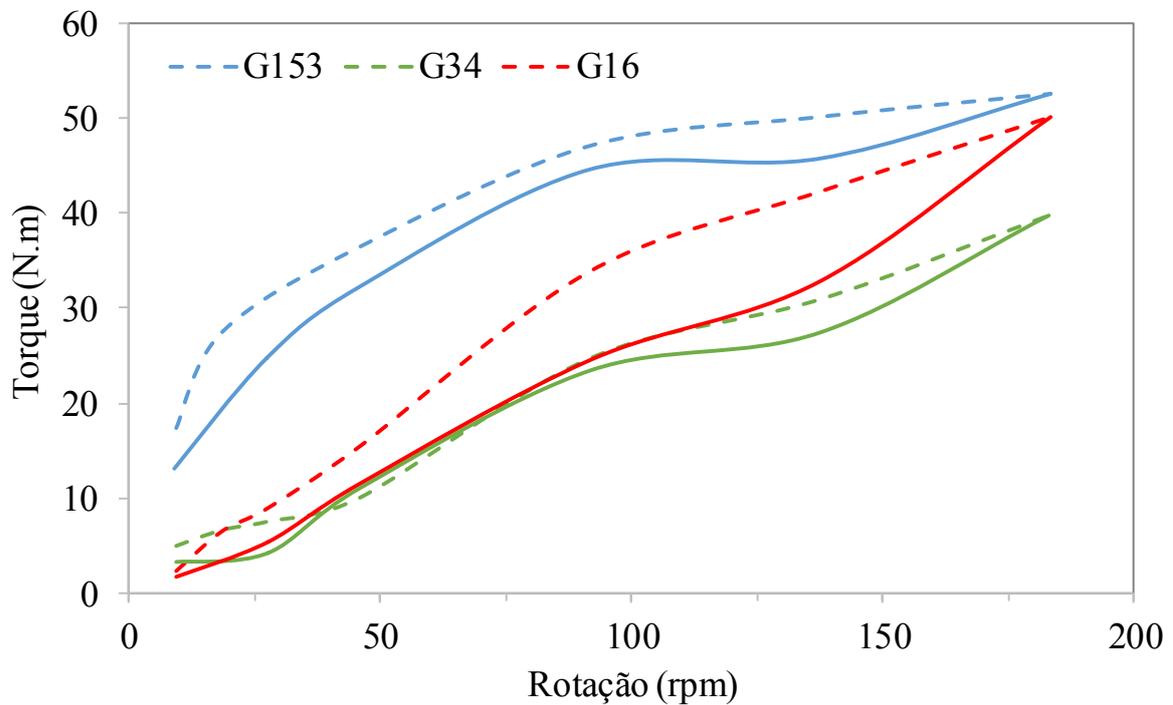


Figura 11: Torque x rotação (resultados reométricos) dos CAAs dosados com filer gnaisse.

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.

Linearizando os dados da curva decrescente e empregando a Equação 5, obtém-se o coeficiente angular da reta. Esse valor pode ser relacionado a viscosidade da mistura e é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: 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 [27]. 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 [7,28–31]. Desta forma, considerando o concreto contendo C38 como um concreto referência, pode-se analisar os filers diabásio e gnaisse 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 CAAs.

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 (Figura 10). 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 gnaïsse 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.

4. CONCLUSÕES

Os resultados do trabalho mostraram que filers de diabásio e gnaïsse 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 filers alternativos apresentaram características reológicas similares às do concreto dosado com filer calcário, embora demandaram maior quantidade de aditivo superplastificante.

Aliado a isso, percebeu-se que o uso de filers 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).

Percebeu-se também uma tendência de aumento da resistência à compressão em concretos contendo filers mais finos, em relação aos concretos dosados com filers in natura, para todas as mineralogias. Isso ocorre, possivelmente, pelo fato do esqueleto granular ficar mais compacto.

A forma das partículas de diabásio e gnaïsse tendem a ser mais alongadas e lamelares do que as partículas de filer calcário. No entanto, não foi observado relação direta entre os parâmetros reológicos dos concretos e as propriedades das partículas (relação de aspecto, angularidade e rugosidade), possivelmente porque a ação do aditivo superplastificante (diferente em cada mistura, para que todas fossem classificadas com autoadensáveis) anulou esses possíveis efeitos. Esse fato é considerado um fator positivo para o uso desses materiais alternativos, uma vez que os problemas de forma das partículas, relatados por muitos autores, podem ser corrigidos apenas com ajustes no teor de superplastificante.

Em relação à resistência mecânica, o uso de filer de gnaïsse conduziu às mesmas resistências à compressão dos concretos contendo filer calcário. Por outro lado, concretos dosados com filer de diabásio apresentaram incremento de aproximadamente 10 MPa na resistência à compressão, em relação ao concreto dosado com filer calcário in natura. O acréscimo de resistência pode ser em função do maior módulo de elasticidade dos concretos dosados com filer diabásio e por um possível efeito pozolânico do material. O desempenho mecânico superior das misturas contendo filer diabásio, pode permitir reduções no consumo de cimento das misturas quando o filer calcário é substituído por esse filer.

Diante disso, percebe-se que filers de diabásio e gnaïsse possuem potencial para serem empregados como material alternativos ao filer 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.

5. AGRADECIMENTOS

Capex pelo apoio financeiro. Processos: 99999.008308/2014-04 e 99999.008307/2014-08

LCME: Laboratório Central de Microscopia Eletrônica – UFSC

Cimentos Itambé

Departamento de Engenharia de Construção Civil- Poli-USP

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ABNT NBR 7211, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7211: *Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro, 2009.
- [2] GALETAKIS, M., PIPERIDI, C., VASILIOU, A., *et al.*, “Experimental investigation of the utilization of quarry dust for the production of microcement-based building elements by self-flowing molding casting”, *Constr. Build. Mater.* V. 107, n. 15. pp 247–254. Mar, 2016.
- [3] GALETAKIS, M., ALEVIZOS, G., LEVENTAKIS, K. “Evaluation of fine limestone quarry by-products, for the production of building elements - An experimental approach”, *Constr. Build. Mater.* V.26, n.1. pp 122–130, Jan, 2012.
- [4] MANNING, D., VETTERLEIN, J. *Exploitation and Use of Quarry Fines*, In Mist Project - Solutions. 44, 1–60. Manchester, England, 2004.
- [5] STEWART, J., JUSTIN, N., JUENGUER, M., *et al.*, *Characterizing minus no.200 fine aggregate for performance in concrete*, Analysis, In: Research Report Icar 107-1, pp 1–184. Texas, USA, 2003.
- [6] FELEKOGLU, B. “Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case)”, *Resour. Conserv. Recycl.*, v. 51, n. 4, pp 770–791. Oct, 2007.
- [7] HO, D.W.S., SHEINN, A.M.M., NG, C.C., *et al.*, “The use of quarry dust for SCC applications”, *Cem. Concr. Res.*, v 32, n.4 pp505–511. April, 2002.
- [8] BELAIDI, A.S.E., AZZOUZ, L., KADRI, E., *et al.*, “Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete”, *Constr. Build. Mater.*, v. 31. 251–257, 2012.
- [9] UYSAL, M. “Self-compacting concrete incorporating filler additives: Performance at high temperatures”, *Constr. Build. Mater.*, v. 26 . n. 1, pp 701–706. Jan, 2012.
- [10] DEHWAH, H.A.F. “Mechanical properties of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume or fly ash”, *Constr. Build. Mater*, v. 26 . n. 1, pp 547–551. Jan, 2012.
- [11] ALIABDO, A.A., ABD ELMOATY, A.E.M., AUDA, E.M. “Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete”, *Constr. Build. Mater*, v. 50 . n 15, pp 28–41. Jan, 2014.
- [12] TENNICH, M., KALLEL, A., BEN OUEZDOU, M. “Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes”, *Constr. Build. Mater*, v. 91, n. 30, pp 65–70. Aug, 2015.
- [13] ABNT NBR 5733, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5733: *Cimento Portland de alta resistência inicial*, Rio de Janeiro, 1991.
- [14] FELEKOGLU, B. “A new approach to the characterisation of particle shape and surface properties of powders employed in concrete industry”, *Constr. Build. Mater*, v. 23, n 2, pp 1154–1162, Fev, 2009.
- [15] KUO, C.-Y., FREEMAN, R. “Imaging Indices for Quantification of Shape, Angularity, and Surface Texture of Aggregates”, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, n.1721, pp. 57–65, 2000.
- [16] MASAD, E., SAADEH, S., AL-ROUSAN, T., *et al.*, “Computations of particle surface characteristics using optical and X-ray CT images”, *Computational Materials Science*, v. 34, pp 406-424, January, 2005.
- [17] EFNARC, *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*, Eur. Guidel. Self Compact. Concr. UK, 2005.
- [18] ABNT NBR 15823, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 15823: *Concreto autodensável 1-6.*, Rio de Janeiro, 2012.
- [19] TATTERSALL, G.H., BANFILL, P.F.G. *The rheology of fresh concrete*, Pitman Advanced Publishing Program, 1 ed., London, 1983.
- [20] JAU, W.C., YANG, C.T. “Development of a modified concrete rheometer to measure the rheological behavior of conventional and self-consolidating concretes”, *Cem. Concr. Compos*, v. 32, n. 6, pp 450–460. July, 2010.

- [21] ABNT NBR 5738, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738: *Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*, Rio de Janeiro, 2016.
- [22] ABNT NBR 5739, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739: *Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2007.
- [23] ABNT NBR 8522, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8522: *Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. Rio de Janeiro, 2008.
- [24] KUO, C.-Y. “Correlating Permanent Deformation Characteristics of Hot Mix Asphalt with Aggregate Geometric Irregularities”, *Journal of Testing and Evaluation*, v. 30, n. 2, pp. 136–144. March, 2002.
- [25] SADEK, D.M., EL-ATTAR, M.M., ALI, H.A. “Reusing of Marble and Granite Powders in Self-Compacting Concrete for Sustainable Development”, *Journal of Cleaner Production*, v.121, n. 10, pp.19-32, May, 2016.
- [26] CHATEAU, X. “Particle packing and the rheology of concrete”. In *Understanding the Rheology of Concrete*, cap. 6, pp. 117-143, Edited by Roussel Elsevier, Woodhead Publishing, 2012.
- [27] BANFILL, P.F. “The rheology of fresh cement and concrete - a review”, In: *11th Int. Cem. Chem. Congr.*, pp. 1-13, Durban, May, 2003.
- [28] BOSILJKOV, V.B. “SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler”, *Cem. Concr. Res*, v. 33, n. 9, pp 1279–1286, 2003.
- [29] ZHU, W., GIBBS, J.C. “Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete”, *Cem. Concr. Res*, v.35, n.8, pp 1457–1462. Aug, 2005.
- [30] DOMONE, P.L. “A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete”, *Cem. Concr. Compos*, v. 29. pp 1–12. Sept, 2007.
- [31] ESPING, O. “Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete”, *Cem. Concr. Res*, v.38, n.7, pp 938–944, 2008.