

6

Considerações finais

Neste último capítulo, são apresentados os principais resultados e conclusões obtidas a partir do programa experimental e investigativo realizado na presente dissertação.

6.1 Conclusões propriamente ditas

6.1.1 Reologia, métodos de avaliação e classificação do CAA

6.1.1.1 Reologia aplicada

A partir do exame da bibliografia técnica especializada e também comprovado por meio dos ensaios e práticas realizadas neste trabalho, pôde-se evidenciar que as constantes reológicas fundamentais devem cumprir duas condicionantes principais para que um concreto auto-adensável tenha uma adequada autocompactabilidade: um valor muito pequeno ou nulo de tensão de escoamento (σ_0), de forma tal que o concreto se comporte aproximadamente com um fluido Newtoniano, o que implica que o concreto auto-adensável CAA deverá ter uma elevada fluidez; e um valor moderado (e de moderado a baixo) para viscosidade (η), pois uma viscosidade muito baixa pode prejudicar a estabilidade da mistura, enquanto uma elevada viscosidade pode levar a bloqueios dos agregados em contato com as armaduras e deficiência no acabamento superficial do concreto.

Os aditivos base policarboxilato diminuem em grande medida a σ_0 , contudo apenas a sua utilização não é suficiente para obter um concreto auto-adensável,

pois conduzirá à obtenção de uma mistura segregável. De forma que, para evitar a segregação, é fundamental uma redução da quantidade de água livre na mistura, além de utilizar uma maior quantidade de finos.

A substituição de parte do cimento ou agregado miúdo por adição mineral (de área superficial maior que o material substituído) demonstrou, nas práticas realizadas no presente trabalho, até um determinado valor limite, poder resultar em uma redução da tensão de escoamento e viscosidade plástica, medidos de forma indireta pelos ensaios de *Slump*, *Flow T50* e *V-funnel*, devido, sobretudo, à melhoria da granulometria da mistura pela presença de grãos mais finos. Porém, ao atingir determinados níveis de substituição, os parâmetros reológicos começam a aumentar consideravelmente, pois em elevados teores de adição, uma grande quantidade de superfície sólida com uma área específica alta é introduzida, o que poderá resultar, dependendo do nível de fluidez pretendida, em um aumento dos valores dos parâmetros reológicos. Sendo que, os traços do CAA nível *Slump flow 3 - SF3* (760-850mm), devido à sua característica de alto nível de fluidez, concomitantemente com baixa viscosidade, gerou uma maior dificuldade para garantir a estabilidade da mistura, quanto à segregação de seus componentes, o que ocasionou a necessidade de um conteúdo muito maior de adições minerais se comparado com os traços de CAA nível *Slump flow 2 - SF2* (650-750mm).

Contudo, o aumento da deformabilidade do CAA está ligado diretamente ao aumento do volume de argamassa total do concreto, pois se diminui a colisão entre as partículas de agregados graúdos da mistura.

6.1.1.2 Ensaios específicos de trabalhabilidade do concreto fresco

A análise crítica dos principais ensaios de trabalhabilidade disponíveis para o concreto auto-adensável, possibilitaram uma grande correlação com os parâmetros reológicos fundamentais e, principalmente, com a prática de aplicação, validando-se assim para a qualificação do CAA para a produção em indústria de pré-fabricados de concreto.

Dos ensaios realizados conclui-se que o *Slump flow* é suficiente apenas para caracterização do CAA (em desenvolvimento de dosagem) aplicado a situações simples, como no caso de placas ou painéis normalmente de pequena extensão,

não armados e de topo livre, embora seja normalmente indicado como teste para todas as aplicações.

Apesar disso, como o *Slump flow* possibilita, além da análise da fluidez do CAA (é claro, quando não confinado por fôrmas e armaduras), também uma avaliação visual prévia se está havendo segregação ou não, que somados a facilidade de execução do ensaio, acaba por tornar o mesmo muito adequado para o controle de qualidade de produção. Já os ensaios de avaliação qualitativa da viscosidade, habilidade passante e resistência à segregação devem ser empreendidos neste controle, caso seja especificado, dependendo da complexidade dos elementos estruturais a serem concretados.

Dos três tipos de teste de habilidade passante ensaiados, o *J-ring* é o menos exigente deles. Recomenda-se este ensaio apenas para dosagens onde o CAA irá espalhar-se por superfícies não confinadas por fôrmas e apresentando apenas o impedimento de armaduras. Este é o caso de placas ou painéis normalmente de pequena ou médias extensão, pouco armados e de topo livre.

O ensaio do *L-box* simula condições práticas semelhantes as quais o concreto estará submetido na concretagem das vigas protendidas perfil “I”, que são um dos tipos de elemento mais complexos de serem executados na produção de pré-fabricados.

De menor sensibilidade que o *L-box*, o *U-box* também avalia a habilidade do concreto passar por obstáculos. Pode ser usado para qualificar o concreto auto-adensável para aplicação em vigas calhas pré-fabricadas.

Adicionalmente, o ensaio do *L-box*, assim como os ensaios em caixa, de uma forma geral, incluindo o *U-box* e o *V-funnel*, permitem uma apreciação visual da capacidade de preenchimento dos espaços e auto-nivelamento do CAA.

O ensaio de *Column* demonstrou ser, neste estudo, muito mais simples e rápido como critério de análise de quantificação do nível de segregação do CAA do que o *U-Shaped Pipe*. Isso porque é possível, após 20 ou 30 minutos, iniciar a coleta de material, tempo suficiente para o assentamento do agregado graúdo. Sendo que, no ensaio do *U-Pipe*, só é possível retirar as amostras após aproximadamente 2,5h, já no período de início de pega do concreto.

6.1.1.3 Classificação da consistência

Foi verificado que, a exemplo do que é praticado no exterior (EPG, 2005)^{6.1}, não é possível estabelecer um único tipo de concreto auto-adensável para todas as aplicações. Ou seja, o nível de auto-adensabilidade requerido vai depender das características dos elementos a serem moldados.

De forma que, o nível de fluidez SF2 demonstrou ser adequado para a grande maioria dos casos onde o CAA é aplicado em indústria de pré-fabricados. Quanto ao CAA nível *Slump flow* 1 – SF1 (550-650mm), observa-se que tem restritas aplicações. Contudo, existem casos onde apenas o nível SF3 pode ser empregado.

Destaca-se que, a viscosidade nível VS1 / VF1 - *Viscosity Slump* T500 $\leq 2s$ e *Viscosity Funnel* $\leq 8s$ permitiram um nível superior de acabamento dos elementos pré-fabricados, minimizando sobremaneira a necessidade de reparos.

A habilidade passante nível *passing ability* PA 2 - *L-box* $\geq 0,80$ com 3 armaduras é necessária dada a complexidade de forma e quantidade de armaduras de algumas peças produzidas, particularmente o perfil tipo “1”.

O nível de resistência à segregação nível *segregation resistance* SR - Column ou *U-pipe* $\leq 10\%$ é importante para resistir, sobretudo, às solicitações de transporte em fábrica, por meio de caminhão e ponte rolante, além de resistir à grande energia com a qual o concreto é lançada da saída do misturador.

6.1.2 Nova metodologia de dosagem proposta

Acredita-se que a nova metodologia de dosagem proposta, fundamentada no método IBRACON (HELENE, 2005)^{6.2}, pode contribuir com o objetivo principal proposto neste trabalho, ao possibilitar uma maior disseminação dessa nova tecnologia no país, particularmente na indústria onde foi desenvolvido o plano experimental dessa dissertação, que teve uma aplicação pioneira em escala de produção.

^{6.1} EPG – *European Project Group* (BIBM; CEMBUREAU; ERMCO; EFCA; EFNARC). “**The European guidelines for self compacting concrete**”. 63p., 2005;

^{6.2} HELENE, P. Dosagem do Concreto de Cimento Portland, In: ISAIA, G. C., Editor. **In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. Ed. IBRACON, São Paulo, v. 1, p. 75-107, 2005;

Destaca-se, como possível contribuição dessa dissertação ao referido método, o acréscimo de alguns ensaios de trabalhabilidade do concreto fresco, que se tornam fundamentais para uma aplicação prática deste novo material. E, principalmente, a consideração da correção da coesão do concreto fresco por finos pozolânicos ou não pozolânicos, dependendo do tipo de traço, onde formulações mais pobres em cimento exigem maior teor de substituição de finos, quando comparadas com composições mais ricas, pensando nos aspectos de trabalhabilidade e possibilitando a criação de uma correlação entre a relação agregados/cimento (m) e o teor ótimo de substituição (T), acrescentando um 4º quadrante ao Diagrama de Dosagem do método original.

Adicionalmente, quando comparados os componentes dos traços em volume e peso obtidos a partir da nova metodologia com os tipicamente encontrados na bibliografia, percebe-se que os valores foram compatíveis com vários indicadores estabelecidos, o que comprova a eficácia dessa nova metodologia para a dosagem do CAA.

6.1.3 Resultados experimentais obtidos

Para um dado m e tipo de concreto (sem adição, com metacaulim ou filer), na medida em que se aumenta o nível de auto-adensabilidade (de SF2 para SF3), e, por conseqüência, o α e o T (para os traços com adição), para obter as características de trabalhabilidade necessárias, há uma maior necessidade de água para cobrir o aumento da superfície específica da mistura, o que acarreta uma maior relação a/ag e menor f_{c28} .

Do contrário, se considerarmos para um dado tipo de concreto e resistência fixa (seja 55MPa, 65MPa ou 75MPa), percebe-se que, quanto maior o nível de auto-adensabilidade, menor é o valor de m , por conseqüência, maior é o consumo de cimento e também menor é o fator água/aglomerantes.

No meio técnico brasileiro, em geral, é comum associar a relação a/ag praticamente como o único fator que governa a resistência à compressão do concreto. Todavia, a análise dos resultados apresentados nos diversos traços realizados neste estudo experimental, permite verificar que a presença de adição, o

teor de argamassa e o nível de fluidez ou auto-adensabilidade usados, são imperativos na determinação do fator a/ag e f_{c28} .

Observou-se também que, o aumento do teor de argamassa, por sua vez, ocasiona uma dosagem maior de aditivo, aumento do consumo de cimento, adições e, conseqüentemente, aumento dos custos. Daí conclui-se que, quanto menor o teor de argamassa necessário para obter as características de fluidez, habilidade passante, resistência à segregação e viscosidade necessárias, mais econômicas são as misturas.

Adicionalmente observa-se que, na medida em que se aumenta a resistência do concreto, observa-se uma tendência a redução do custo dos materiais constituintes para cada MPa produzido, o que vem a contribuir para a implementação do CAA de alta resistência.

6.1.3.1 CAA com adição

Conforme observado no estudo de dosagem, para um dado m qualquer e nível de auto-adensabilidade, a presença de adição, na dosagem do CAA, possibilitou um aumento do f_{c28} , comparados com os traços sem adição.

No caso do metacaulim, isso pode ser atribuído ao grande efeito pozolânico que esse tipo de adição possui, maior até que o próprio cimento, aumentando assim a resistência, além da melhora a granulometria devido à presença de grãos mais finos.

Já para o filer, esse efeito provavelmente se deve ao grande aumento no volume de pasta, obtido por substituição a areia. O aumento do volume de pasta lubrifica a mistura e diminui o atrito entre as partículas maiores de brita, reduzindo em grande medida a quantidade de água.

Adicionalmente, o aumento da resistência pode ser atribuído à melhora do empacotamento das partículas da mistura, devido à presença de adições, reduzindo a porosidade do concreto.

Sendo que o T aumenta gradualmente na medida que se caminha dos traços médios para os traços pobres, justamente para compensar os finos, de maneira que,

para o CAA com filer, o T cresce em um consciente maior, em comparação ao CAA com metacaulim, devido à grande finura dessa última adição.

Contudo, para os traços mais ricos, os teores de substituição poderiam ser mínimos ou desnecessários, pensando no aspecto de coesão. Todavia, a presença de adição, conforme mencionado, pode colaborar para um aumento da resistência, contribuindo para a obtenção de traços com custos mais competitivos. Porém, se deve observar que, existe um limite para o incremento de adições, pois superdosagens desse material podem prejudicar a trabalhabilidade do CAA.

Particularmente, observa-se que existem duas famílias de concreto auto-adensável com filer calcário para o nível de auto-adensabilidade SF2, pois na dosagem da primeira, com esse tipo de adição, observou-se justamente que o teor de substituição aumentava sensivelmente na medida que se caminha do traço médio para os traços pobres. Contudo, para o caso dos traços mais ricos, conforme apontado, o T resultou muito baixo. Todavia, esse fato ocasionou uma grande diferença na quantidade de filer entre os traços mais pobres, comparados com os traços mais ricos, o que gerou uma também diferenciação na coloração superficial do concreto fresco e acabado. Os concretos com baixo consumo de filer ficaram com um tom de cinza claro, enquanto os traços com alto consumo dessa adição tiveram um tom de cinza escuro.

Como normalmente é possível obter uma maior economia de aço com concretos de altas resistências aplicados em pilares (que trabalham à compressão) do que em vigas, cujo esforço principal de tração é absorvido pelas armaduras, é mais vantajoso usar concreto de resistências maiores nesses primeiros elementos construtivos. Contudo, em se tratando de concreto aparente, que é o caso da grande maioria das peças pré-fabricadas, por razões estéticas, não pode haver uma diferenciação de coloração entre diferentes elementos estruturais, em uma mesma obra, o que fez necessário a dosagem de concretos mais ricos (de m menor) com uma maior quantidade de adição (CAA com filer 2), a fim de guardar uma maior unidade de coloração entre os traços de uma mesma família, pois os traços com filer 1 não são operacionais.

O problema da diferenciação de coloração foi, então, resolvida para o caso dos concretos com o mesmo nível de auto-adensabilidade (no caso, o SF2).

Todavia, quando se compara o consumo médio de filer usado nos traços SF2, com os traços SF3 percebe-se também uma diferença considerável nos valores usados para este tipo de adição, o que resultará em uma também diferença de coloração entre níveis de auto-adensabilidade, tornando-se, assim, a dosagem com filer (quando esse apresenta tons cinza escuros) muito complexa, dado que a partir de determinados teores, há um aumento gradual da viscosidade da mistura.

6.1.3.2 CAA sem adição

Conforme mencionado, o α é ajustado no traço médio, que tem por base a resistência média em torno da qual se pretende atingir, mas deve ser adequado para obter as características de trabalhabilidade necessárias dos traços mais pobres, desde que estes estejam dentro do intervalo de resistência pretendida.

Então, a confecção dos traços auxiliares acontece teoricamente nos traços ricos (de m menor, e, portanto, com mais cimento) com um conteúdo de argamassa um pouco maior do que o teoricamente necessário para conseguir a coesão desejada, pois mantendo-se o mesmo α , para toda a família estudada, como prevê o método, para atender ao traço médio, muito pobre e pobre com a quantidade de finos necessária, para obter a coesão da mistura, é necessário elevar o teor de argamassa.

Logo, os traços ricos e muitos ricos admitiriam um α menor. É justamente por esse motivo que a dosagem é realizada com base no traço médio e não pode ter um intervalo muito grande de resistência.

Os traços de CAA com cimento ARI nível SF2 e SF3 sem adição, justamente porque a falta de adições minerais acaba por gerar um incremento adicional do teor de argamassa para manter as características requeridas de auto-adensabilidade, tornando-se, inevitavelmente, conforme apontado no estudo de viabilidade, menos econômicos.

6.1.3.3 CAA branco

O teor de argamassa obtida, no caso do concreto com cimento branco, foi menor tanto para o REF ($\alpha = 45\%$) quanto para o auto-adensável ($\alpha = 59\%$),

comparado com cimento ARI. Isso se deve em parte à maior finura do cimento branco, em relação ao CP V, que contribui positivamente para a coesão do CAA.

Um teor de argamassa menor possível é desejável, neste caso, não apenas por fatores econômicos, mas, sobretudo, porque quando aplicado na produção de painéis arquitetônicos, o concreto branco terá, na maioria dos casos, a sua superfície jateada, resultando os agregados expostos, que deve estar em evidência, aproximando-se, assim, do efeito de pedra natural.

6.1.4 Produção, produtividade e viabilidade de implantação

A avaliação do custo unitário do concreto auto-adensável demonstrou ser este mais caro em comparação ao concreto convencional, da mesma classe de resistência, conforme já era esperado. Considerando um f_{c28} padrão de 50MPa, com uso de metacaulim, para o nível de auto-adensabilidade SF2 (que é adequado para a grande maioria das aplicações), o custo ficou cerca de 15% maior, dado em relação ao traço REF 2 ($\alpha = 53\%$); segundo empregado no estudo de caso da empresa estudada.

Contudo, a análise do custo de produção comprovou que o CAA torna-se apenas 2% mais dispendioso que o concreto comum. Isso se deve a redução do número de mão de obra consumida, devido à eliminação de sub-etapas de produção, tais como: vibração, espalhamento do concreto com enxada, além de minimizar os procedimentos de desempenho, dispensando o uso de compactador. Entretanto agrega a vantagem de possibilitar um aumento de 19% na capacidade produtiva da fábrica, apenas pela simples mudança do concreto. Isso se deve à maior agilidade obtida no processo de moldagem e também à possibilidade de permitir um maior nível de organização na frequência produtiva, por admitir concretagem noturnas, resultando ainda em um menor nível de ruído, com conseguinte melhoria das condições de trabalho.

Além de todas essas vantagens tangíveis, foi possível agregar uma melhoria significativa da qualidade de acabamento superficial das peças pré-fabricadas, devido à minimização do aparecimento de bolhas e macro defeitos resultantes do processo de moldagem, assim como uma economia de energia e menor desgaste

das fôrmas, pela eliminação dos vibradores, que são benefícios mais difíceis de se computar. Tornando-se assim um material muito vantajoso para o setor de pré-fabricados de concreto, conforme já é apontado no exterior, muito embora o custo da mão de obra no Brasil seja, comparativamente, ainda, muito barato, em relação a países mais desenvolvidos.

Todavia, ficou muito claro que a implantação do CAA não se dá por uma simples substituição em relação ao concreto convencional, pois envolve uma grande reestruturação na indústria de pré-fabricados, como: adequado controle de qualidade, sobretudo, do concreto fresco; tempo de homogeneização um pouco maior; cuidados com moldagem para possibilitar o escape do ar; cobertura das armaduras; investimentos em sensores de umidade para central de concreto e em compra e reforma de fôrmas e caçambas.

6.2 Publicações realizadas

6.2.1 Livros

BELOHUBY, M.; ALENCAR, R.S.A. Tecnologia do concreto pré-fabricado: Inovações e aplicação. In: **MANUAL MUNTE de projetos em pré-fabricados de concreto**. 2. ed., p. 511-531, 2007;

6.2.2 Congressos

ALENCAR, R. S. A; HELENE, P. R. L. *Diseño de la mezcla del hormigón autocompactante por el método brasileño*. In: **1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante**. Valencia, p. 257-266, 2008;

6.2.3 Revistas

ALENCAR, R. S. A; HELENE, P. R. L. Concreto auto-adensável de elevada resistência: Inovação tecnológica na indústria de pré-fabricados. In: **Revista Concreto & Construções**. Ed. IBRACON. n. 43. São Paulo, p. 46-52, 2006;

Participação em Mesa Redonda da sobre Concreto auto-adensável, com comentários e textos para publicação: In: **Revista Construção Mercado**. Ed. PINI. n. 70. São Paulo, p. 60-64, 2007.

6.3 Sugestões para trabalhos futuros

Sugerem-se alguns assuntos principais para a realização de trabalhos futuros, com a intenção de esclarecer alguns pontos que não foram tratados na presente dissertação, mas que também são de grande importância para a evolução da tecnologia do concreto auto-adensável, a saber:

- Durabilidade – Qual é o efeito do aumento de finos, conforme evidenciado no CAA, na microestrutura e zona de transição do concreto? Pode-se perceber que, na medida que se aumenta o nível de auto-adensabilidade, houve uma redução da relação a/ag , para uma determinada resistência fixa. Será que isso se deve a uma melhoria da qualidade da estrutura da pasta e zona de transição pasta-agregado, que se tornam mais densas, para compensar a redução do conteúdo de brita, que é o componente mais resistente da mistura?
- Dosagem - do CAA com baixo conteúdo de finos, utilizando-se aditivos modificadores de viscosidade.
- Produtividade - na etapa de reparos dos elementos pré-fabricados de concreto, pois neste trabalho não foi possível obter maiores informações quantitativas dessa etapa, visto que na indústria de pré-fabricados o reparo é considerado um sub-trabalho e, portanto, não há normalmente muitos registros do mesmo que permitam um estudo mais aprofundado das melhorias obtidas com o uso do CAA.