

3

Planejamento experimental

Essa etapa é composta pela exposição das variáveis de estudo, caracterização dos materiais, consistência do concreto fresco, plano experimental com as famílias de concreto estudadas, ensaios de trabalhabilidade realizados e procedimentos gerais adotados no experimento.

3.1 Variáveis de estudo

3.1.1 Parâmetros fixados

Para a realização deste plano experimental foram utilizados os seguintes materiais:

- Cimento Portland de alta resistência inicial – CPV ARI /PLUS;
- Cimento Portland Branco – CPB 40;
- Filer calcário e argila calcinada, também conhecida como Metacaulim / HP Branco;
- Aditivo superplastificante base policarboxilato de última geração - Viscocrete 3535 CB e Viscocrete 20HE^{3.1};
- Areia branca e areia rosa, quartzosas;
- Granilha branca, brita 0 e brita 1/2 de granito.

^{3.1}Neste trabalho os aditivos Viscocrete 3535 CB e Viscocrete 20HE serão designados doravante pelas iniciais PC1 e PC2, respectivamente.

A caracterização destes materiais esta apresentada no Anexo 1.

3.1.2 Variáveis independentes: Premissas

A seguir são apresentadas as premissas, que são variáveis determinadas neste plano de trabalho com o intuito de verificar o reflexo de suas modificações sobre as variáveis dependentes de estudo.

3.1.2.1 Consistência do concreto fresco

▪ Cimento ARI:

Os traços referência foram dosados para dois tipos de abatimento. O primeiro de 110+/-10mm, usado para um concreto menos argamassado, aplicado em vigas e pilares. O segundo de 140+/-10mm, destinado para lajes e painéis, que são elementos cuja dimensão horizontal é predominante, que geram uma maior necessidade de acabamento superficial (da 4° fase do elemento pré-fabricado), quando comparados com a primeira aplicação e, por isso, tem que ser mais argamassados. Também o concreto com slump e argamassa maior, de uma forma geral, pode ser destinado para elementos densamente armados.

Os traços de concretos auto-adensáveis foram confeccionados para duas categorias de fluidez: SF2 e SF3. Quanto ao nível de viscosidade, habilidade passante e resistência à segregação, todos os concretos foram dosados para atenderem aos requisitos mais exigentes, conforme é apresentado a seguir:

a) Espalhamento - *Slump flow* SF2 660-750mm e SF3 760-850mm: o nível de fluidez SF2 foi escolhido por ser adequado para a maioria dos casos onde o CAA é aplicado em fábrica. O nível SF3, embora não tenha uma utilização na mesma escala que o SF2, é necessário para moldagem em peças muito complexas e densamente armadas. O nível SF1 550-650mm tem aplicações restritas em planta de pré-fabricados e, por isso, não é objeto desse estudo.

b) Viscosidade - VS1 / VF1, *Slump flow* T500 $\leq 2s$ e *V-funnel* $\leq 8s$: a viscosidade aplicada para os concretos auto-adensáveis na indústria de pré-fabricados deve ser de baixa a moderada, para facilitar o escape do ar aprisionado na moldagem, permitindo assim um nível superior de acabamento, característico deste tipo de produção, onde a maioria das peças são de concreto aparente ou arquitetônico.

c) Habilidade passante - PA2 *L-box* $\geq 0,80$ com 3 armaduras: é especificado o nível de habilidade passante PA2, que é o mais exigente, dado a complexidade de muitos elementos pré-fabricados, conforme apresentado no Capítulo 2.

d) Resistência à segregação - SR2 ≤ 10 (%): O nível de segregação pretendido é dos maiores, para resistir, sobretudo, às solicitações de transporte em ponte rolante e caminhão e também à grande energia com que o CAA é lançado na saída do misturador.

▪ Cimento Branco:

Para os traços de referência do concreto com cimento branco foi adotado apenas o abatimento de 110 \pm 10mm. Também para o concreto auto-adensável branco, objetiva-se trabalhar apenas o nível de fluidez SF2, já que na quase totalidade dos casos, este concreto é utilizado na camada superficial, de *facing*, dos painéis arquitetônicos, que são horizontais, com topo livre e não armados, pois a armadura só é colocada posteriormente, imediatamente antes da concretagem da camada de concreto cinza e que, portanto, resulta relativamente simples.

Mesmo assim, os traços de CAA branco foram avaliados nos demais ensaios de trabalhabilidade do concreto fresco com os mesmo parâmetros estabelecidos para o concreto com cimento ARI. A exceção, conforme apontado, se deu apenas no quesito fluidez.

3.1.2.2 Teor de aditivo

O teor de aditivo foi determinado pelo ponto de saturação ou teor ótimo^{3,2}, ajustado no traço médio e verificado posteriormente para todas as mistura de cada família estudada, conforme apresentado no Capítulo 2.

Observa-se que, foram empregados dois aditivos diferentes nesse trabalho, muito embora ambos os materiais PC1 e PC2 tenham conferido os níveis de auto-adensabilidade objetivados. Os resultados apontaram que o segundo, apesar de ter requerido um menor porcentual comparado com o primeiro, apresentou, entretanto, a desvantagem de diminuir sensivelmente o tempo de manutenção de trabalhabilidade quando comparado ao PC1, dosado em concretos de referência e auto-adensáveis nível SF2.

E, embora o pré-fabricado tenha uma aplicação muito mais rápida do concreto, se comparado ao fornecido em obra por concreteira, ele deve apresentar um mínimo de tempo de trabalho para possibilitar o acabamento superficial dos elementos estruturais e arquitetônicos, o que foi discutido no Capítulo 5 - Produção.

Por isso, foi eleito o aditivo PC1 para os ensaios em concreto comum e CAA SF2. Contudo, esse mesmo aditivo quando dosado para o CAA SF3 resultou em uma dosagem superior comparada ao SF2, o que já era esperado a exemplo do que aconteceu acima, porém isso teve por consequência um retardo nos tempo de início de pega, bem como uma redução significativa das resistências iniciais. Esse fato levou a escolha, no caso do CAA SF3, do uso do aditivo PC2.

Deve-se esclarecer que, apesar de que a análise de parâmetros com o tempo de início de pega e resistência em tenras idades não sejam objetos de apreciação sistemática desse trabalho, os mesmos devem ser considerados para

^{3,2} O teor de saturação pode ser entendido como a maior quantidade de aditivo adicionada ao concreto a partir da qual não há melhora significativa na plasticidade ou redução da água necessária para garantir as mesmas propriedades reológicas. Pode também ser denominado teor ótimo de dosagem, pois é a taxa de adição para a qual o ganho de fluidez é máximo (HARTMANN, 2002). Dosagens menores que esse teor têm desempenho inferior. Dosagens maiores, além de não representarem melhoria significativa podem produzir efeitos secundários geralmente indesejados, tais como retardo dos tempos de pega e da evolução da resistência mecânica, segregação e exsudação do concreto fresco, além de incorporação de elevados teores de ar (AÏTCIN *et al.*, 1994).

uma aplicação prática em produção, a fim de não inviabilizar todo o estudo elaborado.

3.1.2.3 Famílias de concreto

Foi previamente determinado pelo menos cinco traços para cada família de concreto deste estudo experimental, pesquisando-se misturas muito ricas, ricas, médias, pobres e muito pobres, em decorrência do método de dosagem adotado.

Para o cimento ARI, o intervalo de análise de resistência pretendida é de 50 a 70MPa aos 28dias. No caso de não terem sido atingidos os valores de resistência objetivados, foi previsto um número adicional de traços mais pobres e/ou mais ricos, em relação aos testados, de modo que não seja preciso extrapolar as curvas de dosagem.

Os traços de CAA com cimento ARI foram dosados sem adição e com metacaulim e filer calcário. Os traços de referência não usaram adição, conforme é apresentado na Tab. 3.1.

Já os traços com concreto branco foram dosados apenas sem adição, conforme pode ser visualizado na Tab. 3.2.

Foram moldados quatro (4) corpos de prova (CPs) 10X20cm (diâmetro x altura) para a idade de 28 dias, totalizando 220 CPs de previsão inicial.

3.1.3 Variáveis dependentes: Resultados

As variáveis dependentes são influenciáveis pelas variáveis independentes, ou seja, são os resultados obtidos e buscam determinar algumas propriedades principais dos concretos de estudo:

Tabela 3.1 Traços de previsão inicial para as famílias de concreto com cimento ARI.

| | Concreto | Nº de traços | Nº CPs 28dias |
|-----|--------------------|--------------|------------------|
| CC | REF 1 | 5 | 20 |
| | REF 2 | 5 | 20 |
| SF2 | CAA sem adição | 5 | 20 |
| | CAA com metac. | 5 | 20 |
| | CAA com filer 1 | 5 | 20 |
| SF3 | CAA com filer 2 | 5 | 20 |
| | CAA sem adição | 5 | 20 |
| | CAA com metac. | 5 | 20 |
| | CAA com filer | 5 | 20 |
| | Total | 45 | 180 |

Tabela 3.2 Traços de previsão inicial para as famílias de concreto com cimento branco.

| | Concreto | Nº de traços | Nº CPs 28dias |
|-----|--------------|--------------|------------------|
| CC | REF 1 | 5 | 20 |
| SF2 | CAA sem | 5 | 20 |
| | Total | 10 | 40 |

3.1.3.1 Resistência à compressão axial

Realizada aos 28 dias segundo procedimentos da NBR 5739^{3.3}.

3.1.3.2 Teor de substituição de cimento e areia por finos correspondentes (T)

É determinado com base na nova metodologia de dosagem proposta no Capítulo 2.

3.1.3.3 Ensaios de trabalhabilidade do concreto fresco

Conforme apresentado, os ensaios de trabalhabilidade selecionados neste trabalho estão subdivididos em testes de: fluidez, viscosidade, habilidade passante e coesão, como podem ser vislumbrados a seguir:

a) Fluidez:

- *Slump flow*, em mm (ASTM C 1611/C 1611M^{3.4}; EN 12350-8, 2007^{3.5})

b) Viscosidade:

- *Slump flow T 50cm*, em seg (ASTM C 1611/C 1611M; ; EN 12350-8, 2007);
- *V-funil*, em seg (EN12350-9, 2007)^{3.6};
- *V-funil 5min*, em seg (EN12350-9, 2007);

^{3.3} ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. NBR 5739**. Rio de Janeiro, 1994;

^{3.4} AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete. C 1611**. Philadelphia, 2006;

^{3.5} EUROPEAN STANDARD (EN). **Testing fresh concrete – Part 8: Self-compacting concrete – Slump-flow test. EN 12350-8**. Brussels, 2007;

^{3.6} _____. **Testing fresh concrete – Part 9: Self-compacting concrete – V-funnel test. EN 12350-9**. Brussels, 2007;

c) Habilidade passante:

- *J-ring*, em mm (ASTM C 1621/C 1621M^{3.7}; EN12350-12, 2007^{3.8});
- *L-box*, H2/H1, em mm (EFNARC, 2001^{3.9}; EN12350-10, 2007^{3.10});
- *U-box*, R1-R2, em mm (HAYAKAWA, M.; MATSUAKA, Y.; SHINDOH, T., 1993)^{3.11};

d) Coesão:

- *U-shaped pipe test*, P1/P2 e P1/P3, em kg/kg (GOMES, 2002)^{3.12};
- *Column technique*, [CAb-CAt/CAb+CAt]*100, em porcentagem (ASTM C 1610/C 1610M)^{3.13}.

Todos estes aparelhos foram previamente lubrificados com óleo desmoldante (mineral ou vegetal de baixa viscosidade) antes do uso, evitando assim a absorção de água e atrito com o concreto fresco.

3.1.4 Variáveis intervenientes

São variáveis que embora exerçam efeito sobre as dependentes não se objetiva controlar suas variações, sendo somente medidas:

- a) Massa específica do concreto fresco (kg/m³) e teor de ar incorporado (%) (NBR 9833)^{3.14};

^{3.7} ASTM. **Standard test for passing ability of self-consolidating concrete by j-ring. C 1621.** Philadelphia, 2006;

^{3.8} _____. **Testing fresh concrete – Part 12: Self-compacting concrete – J-ring test. EN 12350-12.** Brussels, 2007;

^{3.9} EFNARC - EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. **Specification and guidelines for self-compacting concrete.** In: EFNARC. London, February, 32p., 2002;

^{3.10} _____. **Testing fresh concrete – Part 10: Self-compacting concrete – L-box test. EN 12350-10.** Brussels, 2007;

^{3.11} HAYAKAWA, M.; MATSUAKA, Y.; SHINDOH, T. **Developmente & Application of super workable concrete.** In: **RILEM International workshop on special concretes: Workability and mixing**, p. 183-190, 1993

^{3.12} GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete.** Tese de doutorado. Barcelona, 139p., 2002;

^{3.13} ASTM. **Standard test for static segregation of self-consolidating concrete using column technique. C 1610.** Philadelphia, 2006;

- b) Relação água / aglomerantes (a/ag) (kg/kg);
- c) Relação água / finos (a/f) (kg/kg);
- d) Teor de a/ag / materiais secos (H);
- e) Teor de areia / agregados totais (kg/m³);
- f) Volume de areia / volume de argamassa (m³/m³);
- g) Volume de brita compactada / Volume de agregados totais (m³/m³);
- h) Volume de pasta (m³);
- i) Consumo e volume dos materiais constituintes individuais da mistura.

Observa-se que, embora não haja o interesse direto em controlar o consumo de materiais, tem-se como premissa obter misturas de concreto que apresentem viabilidade técnico-econômica.

3.2 Procedimentos adotados

3.2.1 Mistura

Foi utilizada betoneira de eixo vertical (tombamento) com capacidade nominal de 300L, previamente umedecida.

3.2.1.1 Seqüência de colocação dos materiais

A seqüência de colocação dos materiais na betoneira foi:

- 1° Adição do agregado graúdo e aditivo, que foi primeiramente disperso em um grande volume de água de amassamento, aproximadamente 60% do total. Então, se procede a mistura desses componentes por 30 segundos;
- 2° Acréscimo de cimento, mais 60 segundos de mistura;
- 3° Areia;
- 4° Restante da água.

^{3.14} ABNT. **Concreto fresco – Determinação do teor de ar pelo método pressométrico: método de ensaio. NBR 11686**. Rio de Janeiro, 1990;

3.2.1.2 Tempo de homogeneização

O tempo médio de mistura variou dependendo do tipo de concreto, em função do maior ou menor teor de argamassa (α), de modo a garantir uma mistura adequada dos materiais:

- a) Traço referência REF – 10 minutos;
- b) CAA SF2 – 15 minutos;
- c) CAA SF3 – 20 minutos.

O tempo elevado para homogeneização se deve ao fato da mistura em betoneira não ter o mesmo nível de eficácia, quando comparado a um misturador utilizado na central de concreto de indústrias de pré-fabricado, onde é possível obter misturas homogêneas a 1/5 do tempo especificado acima.

3.2.2 Moldagem, armazenamento, cura e preparação dos corpos de prova

Os concretos auto-adensáveis foram moldados sem adensamento mecânico, enquanto os concretos de referências foram adensados com vibrador de agulha, segundo a NBR 5738^{3.15}.

Após a moldagem, os CPs foram cobertos com filme plástico e mantidos em descanso em ambiente coberto por 24 h. Posteriormente, foram retirados das fôrmas e levados para a câmara úmida até o momento do rompimento.

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial, as bases dos CPs foram retificadas por processo mecânico com a intenção de garantir planicidade e paralelismo entre as mesmas.

^{3.15} **Concreto – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. NBR 5738.** Rio de Janeiro, 1994;