

Aditivos especiais e as propriedades reológicas do concreto de fluidez controlada

DANILA F. FERRAZ – CIENTISTA SÊNIOR

GCP APPLIED TECHNOLOGIES

I. INTRODUÇÃO

○ concreto convencional tem sido usado como material de construção desde que Joseph Aspdin inventou o cimento Portland em 1824. Ele funciona muito bem para muitos projetos de construção, pois pode ser facilmente moldado. Após endurecido, tem boa resistência à água e a resistência à compressão axial pode ser adequada de acordo com os materiais utilizados e a especificação de cada projeto[1]. No entanto, exige uma enorme quantidade de mão de obra e equipamentos, apenas para bombear, aplicar e dar acabamento.

O concreto autoadensável surgiu,

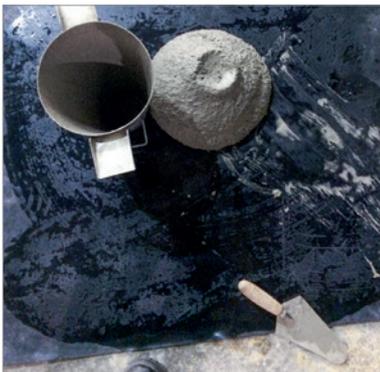
em parte, para resolver esses problemas. Tem grande habilidade passante e alta fluidez. Isso reduz a mão de obra envolvida no bombeamento e aplicação do concreto. No entanto, o concreto autoadensável é mais custoso para ser produzido, por requerer alto conteúdo de pó, como o cimento e finos de agregados, que, ainda assim, pode não resolver inteiramente possíveis problemas reológicos, contemplando ser uma mistura sensível, requerendo um controle de qualidade extra pela concretreira, para minimizar a variabilidade do lote. Muitas vezes, pode apresentar segregação e exsudação, necessitando, como dito acima, de uma maior quantidade de cimento, para manter a estabilidade da mistura, sem que essa quantidade de cimento seja realmente necessária para o desenvolvimento das resistências do concreto. Com isso, o concreto autoadensável é utilizado apenas para projetos especiais.

Uma nova categoria de concreto chamada de “Control Flow Concrete” ou concreto de fluidez controlada surgiu recentemente para colmatar a lacuna entre o concreto convencional e o autoadensável[1]. Oferece muitas das características desejáveis de cada tipo de concreto, sem seus respectivos aspectos negativos. Assim como o concreto

autoadensável, o concreto de fluidez controlada é fácil de bombear e aplicar, sem impactar negativamente a estabilidade ou a resistência à segregação. Não requer um controle de qualidade extensivo para produzir, portanto elimina alguns dos custos de mão de obra que vêm com concreto autoadensável.

O concreto de fluidez controlada (CFC) utiliza desenhos de mistura de concreto convencional, com menor teor de pó do que os concretos autoadensáveis, e permite o uso de agregados maiores, reduzindo ainda mais os custos de materiais. Antes de selecionar o tipo de concreto para cada projeto, é importante entender as características de fluidez de cada um, bem como os requisitos de aplicação de cada projeto. Uma certa manutenção de abatimento é necessária para o transporte e aplicação do concreto, porém os aditivos especiais utilizados para produzir o CFC permitem que a manutenção seja adequada para cada aplicação, sem apresentar altos retardos de pega.

Os superplastificantes podem ser usados para dispersar as partículas de cimento e reduzir a tensão de escoamento do concreto. No entanto, doses elevadas de superplastificantes tradicionais podem causar segregação, conforme ilustrado na Figura 3.



► **Figura 1**

Concreto convencional com aditivo MRWR (polifuncional)



► **Figura 2**

Concreto de fluidez controlada com PCMV (poli-carboxilato modificador de viscosidade)

Para melhorar essa propriedade do concreto, uma nova tecnologia de aditivos (PCMV) permite a dispersão das partículas de cimento com controle das propriedades reológicas do concreto, sendo resistentes à segregação e possuindo alta fluidez usando traços convencionais, conforme demonstrado na Figura 2, esse aditivo cumpre com os requisitos da norma ABNT NBR 11768:2019. O uso destes aditivos permite uma boa fluidez, sem a neces-



► **Figura 3**

Concreto autoadensável com HRWR (superplastificante)

sidade de altas doses, nem alto teor de finos. Isto significa que o concreto de fluidez controlada pode ser produzido de forma relativamente barata em comparação com concreto autoadensável.

O concreto de fluidez controlada possui resistência à compressão equivalente ao concreto convencional.

Neste trabalho foram feitos estudos em reometria de concreto e comparativamente com medidas de *slump* convencional. Três traços foram utilizados: uma mistura (traço) para obter uma fluidez medida em cone de *slump* de 600 mm para o concreto de fluidez controlada, utilizando o aditivo PCMV; um segundo traço, com mesma abertura, porém, com o aditivo base poliacarboxilato convencional HRWR; e, por fim, um terceiro desenho de mistura utilizando o aditivo convencional base lignosulfonato MRWR, buscando a fluidez em cone de *slump* de 120mm. Foi medido o torque de escoamento no reômetro, a fim de converter o concreto convencional em concreto de fluidez controlada, apenas com a substituição do aditivo convencional MRWR por aditivo especial PCMV.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O trabalho foi realizado com cimento Portland CPV, e aditivos conhecidos como MRWR para concreto convencional, PCMV para concreto de fluidez controlada e HRWR base poliacarboxilato para concreto de alta fluidez.

2.2 Métodos de ensaio

2.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO

► Distribuição Granulométrica a

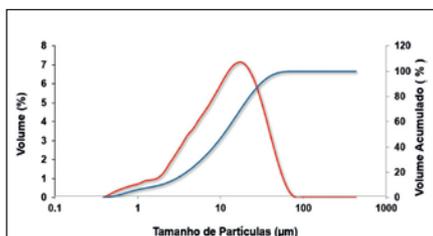
Laser: quantificada em um equipamento da marca Sympatec, modelo Qicpic, com faixa de detecção de 0,05 a 555 μm . Cerca de 50 ml de água foi misturada com 1g de cimento e a suspensão agitada em um misturador de bancada (IKA, Labortechnik RW20) a 1500 rpm por 2 minutos. O material foi adicionado no equipamento e iniciou-se o ensaio com as leituras do tamanho de partícula sendo realizadas com a aplicação de ultrassom.

► **Área Superficial Específica:** as medidas foram realizadas em um equipamento Belsorp Max, com pré-tratamento das amostras em temperatura de 40°C e pressão de 10-2 kPa por 24 horas em um equipamento Belprep vac-II.

► **Densidade Real:** determinada em um equipamento Multipicnometer, da marca Quantachrome MVP 5DC e o resultado quantificado por uma média de 5 leituras.

► **Fluorescência de Raios X:** realizada seguindo as diretrizes gerais da ISO/FDIS 29581-2:2009 (E) "Cement – Test Methods – Part 2: Chemical analysis by X-ray fluorescence". Utilizou-se espectrômetro de fluorescência de raios X, marca PANalytical, modelo Minipal Cement, com pastilhas fundidas em máquina de fusão marca Claisse modelo M4, utilizando-se fundentes à base de mistura de tetraborato de lítio/metaborato de lítio, com proporção de 1,0g de amostra para 6,75g de fundente. O espectrômetro foi calibrado utilizando-se padrões internos e verificado com padrões NIST 638, IPT 35 e IPT 48.

► **Difração de Raios X:** o ensaio foi realizado em um equipamento



► **Figura 4**

Distribuição granulométrica do cimento utilizado no estudo

Empyrean, Panalytical, com detector PIXcel3D, com radiação de cobre, utilizando uma fenda automática de 0,5°, filtro de níquel e frequência de spinning de 2 segundos por rotação. As medidas foram feitas com passo de 0,013°, permanecendo em cada passo por 60 segundos, no intervalo de $5^\circ < 2^\circ < 70^\circ$. Optou-se por esta configuração de ensaio visando a obtenção da contagem do pico máximo em torno de 30.000. Na Figura 4 é apresentada a distribuição de tamanho de partículas do cimento, juntamente com os resultados de densidade real e área superficial específica.

Na Tabela 1, são apresentadas as espécies químicas do ligante obtidas por fluorescência de raios X e a composição mineralógica. Trata-se de um cimento que está em conformidade com as normalizações técnicas com predominância de silicatos. As demais fases mineralógicas apontam para a presença das fases do clínquer, gipsita e portlandita (indicando pequeno grau de hidratação).

2.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ADITIVOS

► **Teor de Sólidos:** A quantidade de material não volátil foi determina-

da de acordo com a ABNT NBR 11768-3 Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 3: Ensaio de caracterização – Item 6. Determinação do teor de sólidos.

- **pH:** determinado de acordo com a norma ABNT NBR 11768-3 Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 3: Ensaio de caracterização – Item 5- Determinação de pH.
- **Massa Específica:** determinada utilizando-se um picnômetro metálico de acordo com a norma ABNT NBR 11768-3 Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 3: Ensaio de caracterização – Item 7 Determinação da massa específica.

As características dos aditivos utilizados são apresentadas na Tabela 2, resultados obtidos de acordo com a norma ABNT NBR 11768-3:2019.

2.3 Desenho de mistura

O desenho de mistura utilizado neste estudo está demonstrado na Tabela 3, bem como a dose de cada aditivo. Para os três concretos, foi utilizado o mesmo desenho de mistura apenas modificando o tipo de aditivo para converter o concreto convencional em concreto de fluidez controlada [3].

2.4 Procedimento de mistura

A mistura dos concretos foi realizada em betoneira convencional de eixo inclinado, com capacidade de 120 L. O procedimento adotado foi o mesmo para todas as misturas para evitar qualquer influência de variáveis intervenientes originadas na produção das misturas e seguiu a sequência descrita a seguir:

► **Tabela 1 – Análise química e mineralógica do cimento**

Determinações (%)	CP V ARI	Determinações (%)	CP V ARI
SiO ₂	18.6	Alita	66.8
Al ₂ O ₃	4.8	Belita	9.6
Fe ₂ O ₃	2.5	Brownmillerita	5.4
CaO	61.2	C3A_cúbico	3.5
MgO	5.3	C3A-ortorrômbico	1.3
SO ₃	3	Periclasio	4.9
Na ₂ O	0.1	Portlandita	—
K ₂ O	0.9	Calcita	3.5
TiO ₂	0.2	Gesso	3.5
P ₂ O ₅	0.1	Hemidrato	1.5
Mn ₂ O ₃	0.1		
SrO	0		
Cr ₂ O ₃	<0.01		
ZnO	<0.01		
LOI	3.1		
Equivalente alcalino (em Na ₂ O) *	0.8		



► Tabela 2 – Características dos aditivos

Ensaio	HRWR	PCMV	MRWR
Cor	Laranja	Azul	Marrom
Homogeneidade	Homogêneo	Homogêneo	Homogêneo
Teor de sólidos (%)	29,0	29,0	34,0
pH a 25°C	3,50	3,50	7,85
Peso específico a 25°C (g/cm³)	1,09	1,10	1,18

- Umedeceu-se a betoneira;
- Colocaram-se os agregados graúdos;
- Adicionou-se 50% da água e ligou-se a betoneira por 1 minuto;
- Colocou-se o agregado miúdo e misturou-se por mais 1 minuto;
- Adicionou-se o cimento, e misturou-se por mais 1 minuto;
- O restante da água e o aditivo foram adicionados na sequência;
- A mistura foi realizada durante os 5 minutos seguintes.

Após a completa mistura, o concreto foi separado em partes para a utilização nos ensaios de slump e reometria rotacional, realizados concomitantemente.

O ensaio de slump, ou seja, ensaio de abatimento do cone de Abrams, é utilizado para avaliar a capacidade de fluidez do concreto não confinado, sob

ação do peso próprio. Com a retirada do cone e o espalhamento do concreto, mediram-se os diâmetros em dois eixos perpendiculares entre si. Para este trabalho, foram considerados os valores entre 430mm e 650mm para o concreto de fluidez controlada[5].

Embora o resultado do espalhamento seja expresso apenas pelo diâmetro medido, este ensaio permite analisar visualmente a ocorrência de segregação de materiais ou exsudação da água do concreto em fluxo livre. Contudo, este é um indicativo qualitativo e, portanto, não quantificável para a aceitação ou não de um concreto, mas pode ajudar na avaliação da adequação das misturas utilizadas, principalmente para essa nova classe de concreto.

► Tabela 3 – Composição do desenho de mistura do concreto convencional

	MRWR	HRWR	PCMV
Cimento CP V ARI	315	315	315
Areia natural fina	512	512	512
Areia artificial de rocha	341	341	341
Brita 0 – 3/8 9,5mm	287	287	287
Brita 1 – 5/8 19mm	670	670	670
Água	172	172	172
Dose do aditivo	0.8	0.8	0.8
Flow (mm)	155	655	645
a/c	0.55	0.55	0.55

3. MÉTODOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

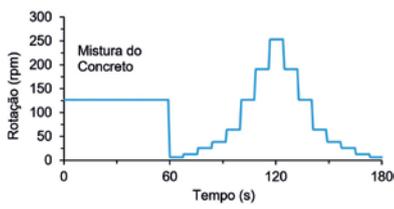
3.1 Reometria rotacional

Para o ensaio de reometria, foi utilizado um reômetro tipo planetário ilustrado na Figura 5.

O ensaio consiste no cisalhamento de um volume de aproximadamente 18 litros de material, utilizando-se uma cuba metálica e hélices adaptadas para o ensaio em concreto, especialmente projetadas para não induzir a segregação. Durante os primeiros 60 segundos do ensaio, o material foi re-homogeneizado, para evitar que o teste fosse realizado com material sedimentado, visto que a mistura foi realizada na betoneira e o concreto foi deslocado até o equipamento. Em seguida, foi aplicado um ciclo de cisalhamento, variando-se a velocidade de rotação de 50 a 250 rpm e retornando a 50 rpm. Em cada patamar



► Figura 5
Reômetro utilizado nos estudos



► **Figura 6**
Esquema do ensaio de reometria rotacional

adotado, a velocidade foi mantida por 7 segundos, conforme procedimento ilustrado na Figura 6 [2].

Os resultados obtidos foram compilados em um gráfico de torque em função da rotação aplicada. O torque de escoamento e a viscosidade aparente foram obtidos a partir do modelo reológico de Bingham, aplicado na etapa de desaceleração da rotação, ou seja, após a imposição da maior condição de cisalhamento e melhor dispersão das partículas. Os parâmetros foram, então, determinados através da inserção de uma linha de tendência linear para esses pontos, sendo o coeficiente angular da reta um parâmetro para a avaliação da viscosidade e a interseção com o eixo das ordenadas um parâmetro de avaliação da tensão de escoamento [2].

O ensaio de ciclo de cisalhamento permite definir o perfil reológico de cada

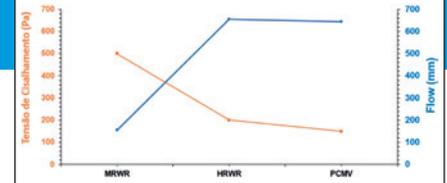
composição e estimar o torque de escoamento, a viscosidade aparente e a área de histerese dos concretos, sendo este último relacionado com o perfil de tixotropia dos materiais. Após o ciclo de cisalhamento, o abatimento dos concretos foi mensurado de acordo com a ABNT NM 67/1998.

A partir da aplicação do ciclo de cisalhamento, o concreto foi avaliado em diferentes solicitações. Como resposta foi obtida uma curva de variação do torque em função da solicitação aplicada. Os dados de tensão de cisalhamento foram comparados aos dados de abatimento por cone de Abrams. No ensaio de abatimento, o escoamento do concreto é provocado e mantido pelo peso próprio da composição. Tal fato foi observado neste estudo como demonstrado no Gráfico 1.

É possível verificar que conforme a tensão de cisalhamento é diminuída para cada tipo de concreto, o *flow* é aumentado.

3.2 Torque de escoamento

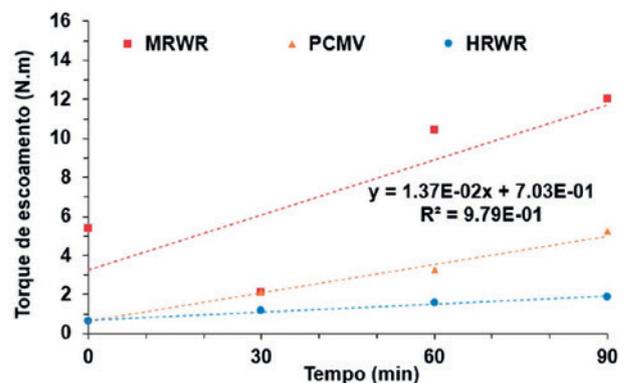
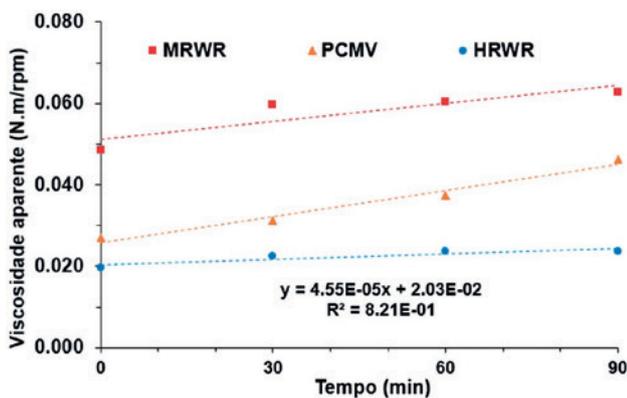
O torque de escoamento é a medida da força necessária para iniciar o



► **Gráfico 1**
Tensão de cisalhamento versus flow dos três concretos

movimento do concreto em repouso. Esta informação é útil porque quanto menor o esforço necessário para mover o concreto, menor é a tensão física em pessoal e equipamentos no local de trabalho [5] [6]. No Gráfico 2, estão demonstrados os resultados comparativos de viscosidade aparente e torque de escoamento dos três concretos [2].

O concreto convencional com aditivo MRWR (polifuncional) tem um maior torque de escoamento, o que requer a maior força para iniciar este tipo de movimento do concreto. O concreto com superplastificante HRWR move-se ainda mais facilmente, exigindo uma pequena fração da força para iniciar o movimento a partir do repouso. O concreto de fluidez controlada com PCMV, por sua vez, apresenta tensão de escoamento intermediária entre concreto convencional com MRWR e o concreto com aditivo HRWR. No Gráfico 2, demonstram-se os



► **Gráfico 2**
Torque de escoamento e viscosidade aparente dos distintos concretos estudados



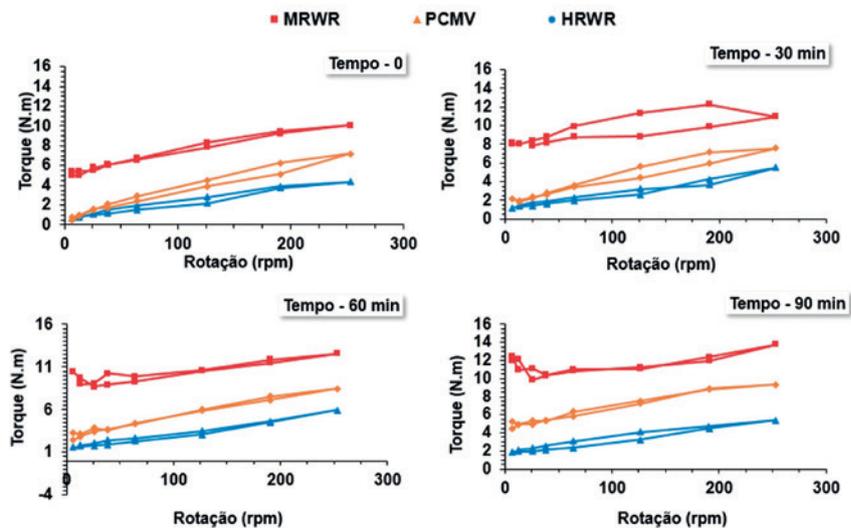
resultados de reometria em concreto, comparativamente aos diferentes tipos de concreto [5] [6]. O concreto de fluidez controlada apresenta viscosidade mais alta do que o concreto autoadensável com HRWR (tem mais resistência ao fluxo) e menor tendência à segregação, mas muito menor que o concreto convencional, o qual apresenta maior viscosidade aparente, e assim, maior o esforço para colocação do concreto [2].

Para corroborar com esses resultados, uma avaliação das propriedades reológicas foi feita ao longo do tempo, para avaliar o comportamento de cada concreto, simulando o período de transporte. Os ensaios foram feitos em distintas rotações nos tempos 0 minutos, 30 minutos, 60 minutos e 90 minutos.

Durante o período de 90 minutos avaliado, o concreto utilizando o MRWR (polifuncional) apresentou o maior torque do início ao final do estudo, sendo que o incremento no torque ao longo do tempo foi significativamente maior do que o dos dois concretos. Isso demonstra que o concreto de fluidez controlada apresenta uma estabilidade maior ao longo do tempo, similar ao HRWR (superplastificante), principalmente nos primeiros 60 minutos.

4. CONCLUSÕES

O concreto de fluidez controlada (*Control Flow Concrete – CFC*) é uma



► Gráfico 3

Resultados de reometria ao longo do tempo

nova categoria de concreto altamente fluido, que proporciona um comportamento reológico distinto em comparação com o concreto convencional e o autoadensável. Este tipo de concreto fluido é possível de ser elaborado devido ao uso dos aditivos especiais policarboxilato modificador de viscosidade (PCMV), que trabalham com misturas convencionais. O CFC oferece vantagens na diminuição da demanda de mão de obra e tempo para colocação de concreto, sem risco de segregação, e tem benefícios ambientais em comparação com o concreto autoadensável, e mais fácil colocação do que o concreto convencional, pois apresenta resultados de viscosidade aparente intermediária entre o concreto convencional com MRWR e autoadensável com

HRWR, além do torque de escoamento ser intermediário o que demonstra que o CFC é mais fácil de iniciar a fluir do que o concreto convencional e evita o consumo excessivo de cimento do que o concreto autoadensável.

Em última análise, o concreto de fluidez controlada mostra uma promessa considerável para reduzir o tremendo esforço físico associado/envolvido com o uso de concreto tradicional, sem deixar o concreto vulnerável a possíveis segregações e sem a necessidade de utilizar concreto de alto custo. Para muitos projetos que exigem concreto altamente fluido, o concreto de fluidez controlada oferece o melhor de ambos os mundos: o concreto que é fácil de trabalhar, mas sem altos custos de produção e custos de controle de qualidade. ◀

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT NBR 11768:2019 – Aditivo químicos para concreto de cimento Portland: São Paulo: ABNT 2019
- [2] BURNS, E., RIEDER, A., CURTO, J., TREGGER, N., Control Flow Concrete. 15th International Congress on the Chemistry of Cement, Prague. 2019.
- [3] LYRA, J.S., ROMANO R.C.O., PILEGGI, R.G., GOLVEA, D. Consolidação de pastas cimentícias contendo policarboxilatos um estudo calorimétrico e reológico. Associação Brasileira de Cerâmica, ANO LVIII – VOL. 58, 346 – ABR/MAI/JUN 2012.
- [4] KOSMATKA, S.H and WILSON, M.L – Design and Control of Concrete Mixtures –The Guide to applications, method and materials – Fifteenth Edition – 2012.
- [5] RAMACHADRAN, V.S. Concrete. Admixtures Handbook, Properties, Science and Technology. Institute of Research in Construction National Research Council Canadá, Ottawa. 2nd edition. 1995.
- [6] ROUSSEL N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications, Cement and Construction Research, 36 (10) 1797–1806, 2006a.
- [7] ROUSSEL N., Correlation between yield stress and slump: Comparison between numerical simulations and concrete rheometer results, Materials Structure. 39 (4), 501–509, 2006b.