

2

Dosagem

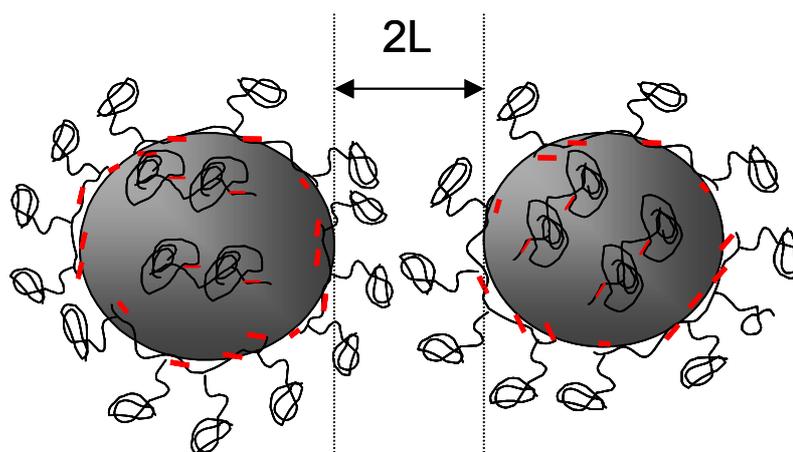
O reflexo das alterações dos materiais sob as características de trabalhabilidade é fundamental para o desenvolvimento da dosagem do concreto auto-adensável e, por isso, a exposição desses conceitos precede a apresentação dos métodos descritos neste capítulo. Percebe-se que são muitos os métodos de dosagem encontrados na bibliografia técnica. A presente dissertação preocupa-se em tecer comentários a respeito basicamente de dois métodos principais, considerados fundamentais para a abordagem proposta: Método Japonês, elaborado por Okamura, por ser o precursor e estabelecer os principais conceitos da tecnologia do CAA; e uma adaptação desse método, aplicado à indústria de pré-fabricado. Em seguida, é feita uma análise crítica geral e apresentada a nova metodologia proposta para dosagem do concreto auto-adensável, fundamentada no método IBRACON.

2.1 Alterações na composição do concreto e seus reflexos nos parâmetros reológicos fundamentais

A maioria das alterações que se produz na composição do concreto afeta sua resposta reológica. O conteúdo de água afeta de forma notória a viscosidade plástica (η) e a resistência ao fluxo ou tensão de escoamento (σ_0), com uma maior

quantidade de água ambos os parâmetros são reduzidos de forma significativa (CASTRO, 2007^{2.1}; ZERBINO & BARRAGÁN, 2007^{2.2}).

Os aditivos redutores de água, em especial os superplastificantes, reduzem ligeiramente a viscosidade plástica, mas diminuem em grande medida a resistência ao fluxo (ZERBINO & BARRAGÁN, 2007). Isso se deve ao fato de que as adições de superplastificantes de base policarboxilato de última geração interagem com as partículas do cimento introduzindo uma camada de adsorção que evita a aproximação entre elas por meio de uma combinação de repulsões eletrostáticas, que confere as mesmas cargas e, portanto, provocando repulsão, além de um efeito denominado repulsão estéricas, que é produzido pela presença de cadeias longas, que agem como barreira entre as partículas de cimento e possuem um forte efeito dispersante; conseqüentemente, reduzindo a tensão de escoamento do material (Fig. 2.1). Como as partículas estão dispersas, existe uma pequena mudança da viscosidade plástica (CASTRO, 2007).



Figuras 2.1 Esquema de repulsão estérica em aditivos policarboxilatos^{1.3}.

Apesar da diminuição do σ_0 da mistura, apenas a utilização de superplastificante não é suficiente para obter um CAA, pois conduzirá a obtenção de uma mistura segregável. De forma que, para evitar a segregação entre a água e os

^{2.1} CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. Tese de doutorado – Universidade de São Paulo. Departamento de Ciência e Engenharia dos Materiais, São Carlos, 303p., 2007;

^{2.2} ZERBINO, R; BARRAGÁN, B. *Propriedades reológicas del hormigón autocompactable*. In: **Revista Concreto & Construções**. Ed. IBRACON. n. 47. São Paulo, p. 61-66, 2007;

^{2.3} Figura extraída de arquivos da Sika Brasil.

sólidos, são essenciais uma redução da quantidade de água livre na mistura, além de utilizar uma maior quantidade de finos (FAVA & FORNASIER, 2004^{2.4}).

O ar incorporado reduz ambos os parâmetros reológicos (σ_0 e η), pois as adições de incorporadores de ar introduzem bolhas esféricas na mistura, que agem como esferas rolantes para permitir que as partículas maiores escoem mais facilmente sobre as demais partículas (CASTRO, 2007).

Contudo, devem-se tomar alguns cuidados quanto ao conteúdo de ar incorporado, pois elevados teores do mesmo podem ocasionar efeitos negativos quanto à superfície de acabamento de elementos em concreto, aderência com armaduras, durabilidade, etc. Inclusive, pensando nesse aspecto, grande parte dos aditivos redutores de água, sobretudo, os de alta eficiência, como os superplastificantes de 3º geração, incorporam agentes anti-espumantes em sua composição. Atualmente, a grande demanda por aditivos incorporadores tem sido em obras de barragens para concreto massa, que utilizam um baixo teor de cimento.

A Fig. 2.2 esquematiza o efeito da alteração nos conteúdos de água, superplastificantes e ar incorporado sobre os parâmetros reológicos do concreto fresco.

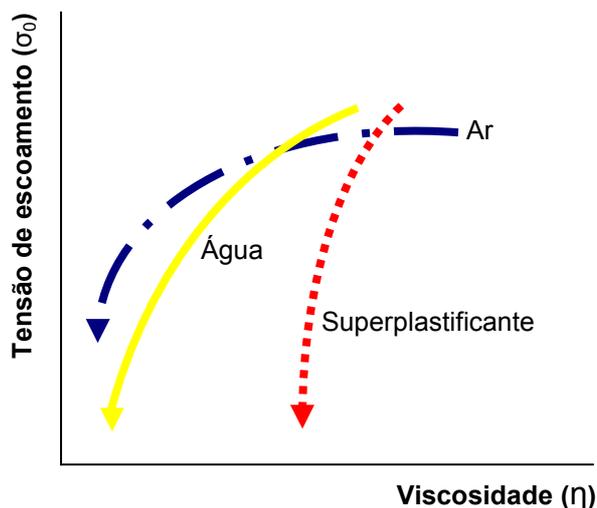


Figura 2.2 Efeito sobre os parâmetros reológicos do incremento no conteúdo de água, superplastificante e ar intencionalmente incorporado (adaptado de ZERBINO & BARRAGÁN, 2007).

^{2.4} FAVA, C.; FORNASIER, G. *Homígonos autocompactantes*. In: *Homígonos especiais*. Ed. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Santa Fe, p. 57-96, 2004;

A influência dos agregados sobre as propriedades reológicas do concreto fresco está relacionada principalmente com a quantidade dos mesmos que compõe a mistura e com a sua granulometria, de modo que é possível verificar-se um aumento na tensão de escoamento e na viscosidade plástica com uma incorporação de agregados à pasta de cimento, sendo que esse aumento cresce na medida em que o teor de agregados aumenta (STRUBLE *et al.* 1998 *apud* CASTRO, 2007)^{2.5}.

Segundo Okamura & Ouchi (2003)^{2.6}, isso pode ser explicado pela freqüente colisão e contato entre as partículas de agregado que aumenta quando a distância relativa entre essas partículas diminui e, então, a tensão interna da mistura pode aumentar quando o concreto é deformado, particularmente perto de obstáculos. Pesquisadores têm descoberto que a energia necessária para o espalhamento do concreto é consumida pelo aumento da tensão interna, resultando em bloqueio das partículas de agregado. Por isso, limitando o conteúdo de agregado graúdo, cuja energia consumida é particularmente intensa, em um nível abaixo do concreto convencional, é necessário para evitar esse tipo de bloqueio.

Contudo, dependendo do caso, esse bloqueio também pode estar sendo parcialmente gerado pela colisão dos agregados graúdos de grande dimensão característica nos espaços restritos da fôrma; para essa situação a correção deve ser feita reduzindo o seu tamanho máximo.

Acrescenta-se ainda a esse raciocínio que o tipo de agregado utilizado interfere de forma significativa nas constantes reológicas, ou seja, sua origem mineralógica, forma da partícula, rugosidade, quantidade de materiais pulverulentos, etc.

A redução do atrito entre os agregados pode ser favorecida, também, com a utilização de uma distribuição contínua de tamanho das partículas dos agregados, cimento e adições (FAVA & FORNASIER, 2004), ou ainda, segundo Struble *et al.* (1998) *apud* Castro (2007), tomando a granulometria mais densa, o que torna possível reduzir os valores dos parâmetros reológicos fundamentais (σ_0 e η).

^{2.5} STRUBLE, L et al. *Rheology of cement paste and concrete*. In: **Cement, Concrete and Aggregates**, v.20, n.2, p. 269-277, December, 1998 *apud* CASTRO, 2007.

^{2.6} OKAMURA, H.; OUCHI, M. *Self-compacting concrete*. In: **Journal of advanced concrete technology**, v.1, n. 1, p. 5-15, 2003;

A redução da tensão de escoamento e da viscosidade plástica pode ser explicada pela granulometria melhorada dos aglomerantes e adições em geral, devido ao efeito lubrificante concedido pelas pequenas partículas que possivelmente reduzem o imbricamento (colisão ou atrito) entre os agregados. Sendo que, quanto mais finas e esféricas forem essas partículas, maior a redução observada para os parâmetros reológicos (NEHDI, MINDESS & AİTCIN, 1998 *apud* CASTRO, 2007 ^{2.7}; ZHANG & HAN, 2000 *apud* CASTRO, 2007 ^{2.8}).

Inclusive, 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 melhoria da trabalhabilidade do concreto. Porém, ao atingir valores maiores de substituição, os parâmetros reológicos começam a aumentar consideravelmente, pois elevados teores de adição resultam em uma grande elevação de superfície específica da mistura, o que poderá resultar, dependendo do nível de fluidez do concreto fresco, em um aumento dos valores dos parâmetros reológicos.

Por todos os fatores apresentados, é necessário um adequado proporcionamento entre todos os materiais que compõem a mistura de um concreto auto-adensável.

2.2 Métodos de dosagem para o CAA

2.2.1 Método de Okamura

O Método Japonês de dosagem do CAA é baseado em pesquisas iniciadas na década de oitenta pelo professor Okamura, na Universidade de Tóquio. O protótipo deste método foi primeiramente completado em 1988, usando materiais disponíveis no mercado (OKAMURA & OUCHI, 2003), segundo a Fig. 2.3.

^{2.7} NEHDI, M.; MINDESS. S.; AİTCIN, P. C. *Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles*. In: **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 5, p. 687-697, May, 1998 *apud* CASTRO, 2007;

^{2.8} ZHANG, X.; HAN, J. *The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste*. In: **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 5, p. 827-830, May, 2000 *apud* CASTRO, 2007

AR	AGUA	FINOS	AREIA	BRITA
AR	AGUA	CIMENTO	AREIA	BRITA

Figura 2.3 Comparação da proporção dos materiais entre o concreto convencional (abaixo) e auto-adensável (acima) (OKAMURA & OUCHI, 2003).

Foi proposto um método de dosagem em que os agregados graúdos e miúdos são fixados e onde as características de auto-adensabilidade podem ser atingidas simplesmente pelo ajuste da relação água/finos (a/f) e dosagem do aditivo (OKAMURA & OZAWA, 1995)^{2,9}, representado pela Fig. 2.4.

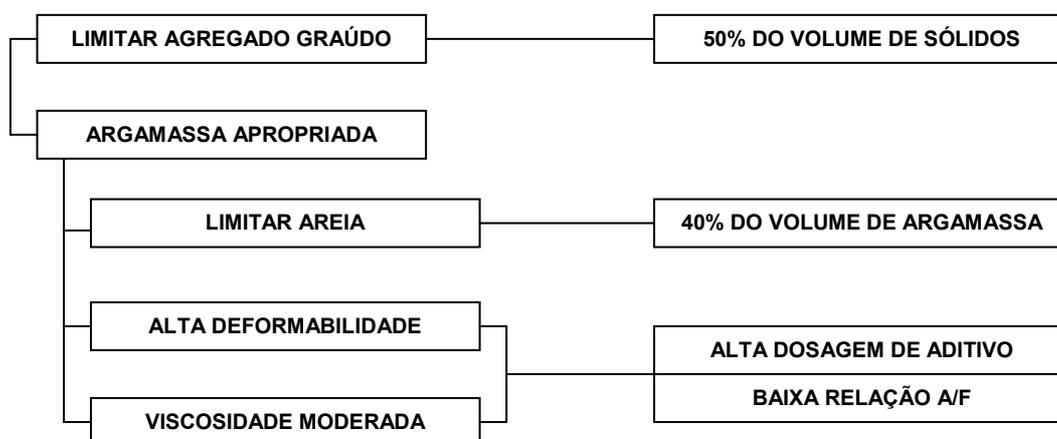


Figura 2.4 Esquema do procedimento de dosagem do CAA (OKAMURA & OZAWA, 1995).

Ou seja, segundo o Método Japonês, o CAA deve apresentar basicamente:

- a) Conteúdo de agregado graúdo, fixada em 50% do volume sólido;
- b) Agregado miúdo fixado em 40% do volume da argamassa;

^{2,9} OKAMURA, H.; OZAWA, K. *Mix-design for self-compacting concrete*. Concrete library of JSCE, v. 25, p.107-120, 1995;

- c) Baixa relação água/finos (a/f), assumindo um volume de 0,9 – 1,0, dependendo das características dos finos;
- d) Superdosagem de aditivo superplastificante.

Ressalta-se que o volume de agregado graúdo corresponde a 50% do volume total de agregado no estado compactado (CAVALCANTI, 2006)^{2.10}. Ou seja, no cálculo do volume considera-se o valor da massa unitária.

Segundo Bennenk (2007b)^{2.11}, a pesquisa japonesa aborda o desenvolvimento da dosagem do CAA passo a passo, conforme a Fig. 2.5.

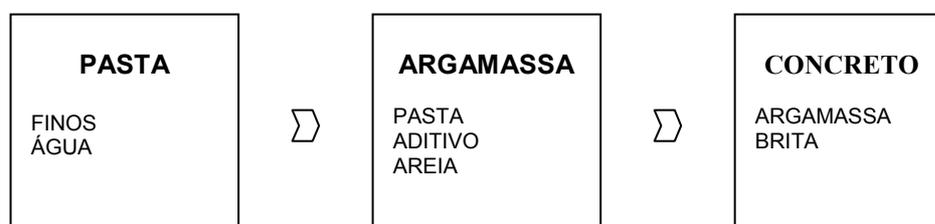


Figura 2.5 Desenvolvimento do concreto via pasta e argamassa (BENNENK, 2007b).

Pasta (P-Paste)

A pasta consiste dos finos (cimento + adições em geral) e água. Segundo Bennenk (2007b), existe uma relação quase linear entre a deformabilidade da pasta, seu relativo espalhamento e a relação água/finos. Mais água significa maior *Slump flow*.

Para o ensaio de pasta e argamassa é utilizado um mini-slump, de dimensões 100X70X60mm (diâmetro da base e topo X altura). Esse teste é repetido após 5 minutos com a mesma mistura, representado pela Equação 2.1, obtendo a Equação 2.2:

^{2.10} CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. Dissertação, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 141 p., 2006;

^{2.11} BENNENK, W. *The mix design of self compacting concrete*. In: **Cape town international concrete conference & Exhibition**, p. 16-19, 2007b;

$$Fp = \frac{(SFp_1 + SFp_2) + (SFp_3 + SFp_4)}{4} \quad \text{Equação 2.1}$$

$$\Gamma p = \left(\frac{Fp}{F_0} \right)^2 - 1 \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:

Fp : média das medidas dos diâmetros perpendiculares do *Slump flow* em pasta;

Γp : deformabilidade da pasta;

F_0 : 100mm, diâmetro da base do mini-slump;

SFp_i : medidas dos diâmetros perpendiculares do *Slump flow* em pasta.

Segundo o Método, o Flow para a pasta deve ser perto de 245mm (Bennenk, 2007b).

Argamassa (M-Mortar)

A argamassa consiste da pasta, um aditivo superplastificante e areia. Como a composição da pasta já foi definida, um número de variáveis precisa ser dosado para a definição da argamassa.

Segundo Okamura & Ouchi (2003), os testes propostos para argamassa são também indicados para obtenção de parâmetros como a sua deformabilidade e viscosidade e definem os índices Γm e Rm , conforme apontadas nas Equações 2.3, 2.4 e 2.5.

$$Fm = \frac{(SFm_1 + SFm_2)}{2} \quad \text{Equação 2.3}$$

$$\Gamma m = \left(\frac{Fm}{F_0} \right)^2 - 1 \quad \text{Equação 2.4}$$

$$Rm = \frac{10}{tm} \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde:

F_m : média das medidas dos diâmetros perpendiculares do *slump flow* para argamassa;

Γ_m : deformabilidade da argamassa;

R_m : viscosidade da argamassa;

SFm_i : medidas dos diâmetros perpendiculares do *Slump flow* para argamassa;

F_0 : 100mm, diâmetro da parte inferior do tronco de cone;

tm : tempo que a argamassa escoar pelo *V-funnel*.

Sendo que, um grande Γ_m indica alta deformabilidade e um pequeno R_m indica alta viscosidade.

Segundo Bennenk (2007b), nesse método o valor de Γ_m aproximadamente 5, enquanto que o *V-funnel* estabelecido pelo R_m esta por volta de 1, o *Slump-flow* é de aproximadamente 245mm e o tempo do *V-funnel* é 10 segundos.

Para Okaura & Ouchi (2003), o *Flow* e o *Funnel* usados para argamassas e pastas têm sido propostos para caracterizar os materiais usados no CAA, ex. finos, areia e superplastificante.

Concreto (C-Concrete)

Para o teste na fase concreto, recomenda-se o ensaio do *U-box*. De modo que, concretos com uma diferença de altura entre os compartimentos do equipamento menor que 30mm podem ser considerados auto-adensáveis. Se o concreto provar ter uma auto-compactabilidade inadequada através deste teste, a proporção da mistura deve ser ajustada (Okamura & Ouchi, 2003).

Slump-flow e o *Funnel* para concreto definem, respectivamente, os índices Γ_c e R_c , que são expressos pelas Equações 2.6, 2.7 e 2.8:

$$Fc = \frac{(SFc_1 + SFc_2)}{2} \quad \text{Equação 2.6}$$

$$\Gamma c = \left(\frac{Fc}{Fc_0} \right)^2 - 1 \quad \text{Equação 2.7}$$

$$Rc = \frac{10}{tc} \quad \text{Equação 2.8}$$

Onde:

Fc : média das medidas dos diâmetros perpendiculares do *Slump flow* para o concreto;

Γc : deformabilidade do concreto;

Rc : viscosidade do concreto;

SFc_i : são medidas dos diâmetros perpendiculares do *Slump flow* para concretos;

Fc_0 : 200mm, diâmetro da parte inferior do tronco de cone;

tc : tempo que o concreto escoa pelo *V-funnel*.

Okamura & Ouchi (2003) advertem que, diferentemente da dosagem do concreto convencional, onde normalmente procura-se fixar a relação água/cimento como um parâmetro para atingir determinados níveis de resistência desejados, com o CAA a relação água/finos tem sido mais decisiva, sendo que, na maioria dos casos, a resistência requerida não é governada pela relação a/c, e sim, pela relação a/f, que é baixa o suficiente para atingir a resistência para as estruturas correntes.

Uma ressalva deve ser feita, contudo, na análise da relação a/f quando uma quantidade muito grande dos finos for constituída por adições do tipo filer calcário, já que é um material não-pozolânico.

Para esses autores, como as características dos finos e do aditivo superplastificante afetam largamente as propriedades da argamassa, a própria relação água/finos e dosagem do aditivo não podem ser fixadas sem testes de dosagem para confirmação.

Bennenk (2007b) relata que, no método japonês, agregados graúdos com mais de 20mm de dimensão são empregados e o volume de ar incorporado está entre 1 a 2% em circunstâncias normais. O *Slump flow* está entre 500 e 650mm e o *V-funnel*, entre 7 a 11 segundos. O tempo de alcance do *Flow* na marca de 500mm está entre 3 a 15 segundos. Para CAA usado para concretar elementos com armadura pesada, o *Flow* fica entre 600 a 700mm e o *Funnel*, entre 9 a 20 segundos. Se um dos testes falharem, é necessário voltar para o estágio da dosagem da argamassa e ajustar a composição da mistura.

2.2.2 Método Japonês modificado para aplicação na indústria de pré-fabricados da Holanda

Para Bennenk (2007b), uma aplicação direta do CAA, através das especificações japonesas, na Holanda não seria possível. Isso se deve, em parte, à grande demanda da produção de pré-fabricados, que exige um proporcionamento mais otimizado, e, também, em parte, aos diferentes tipos de materiais disponíveis.

Pasta (*P-Paste*)

Bennenk (2007b) realiza ensaios de acordo com procedimentos especificados pelo EPG (2005)^{2.12}, para verificação da relação da água-retida, em l, requerida para umedecer a superfície das partículas de finos. Para cada tipo de fino aplicado, deve ser definida essa relação separadamente.

Testes para uma variedade de combinações de cimento e outros finos em geral não são necessários. Quando β_p para o cimento, como também para os finos, for conhecido, a relação da água-retida da mistura (β_{mix}) pode ser calculada como se segue, na Equação 2.9:

$$\beta_{p_{mix}} = \delta\%x\beta_{p_1} + (100 - \delta) x \beta_{p_2} \quad \text{Equação 2.9}$$

^{2.12} EPG – *European Project Group* (BIBM; CEMBUREAU; ERMCO; EFCA; EFNARC). “**The European guidelines for self compacting concrete**”. 63p., 2005;

Onde:

β_{mix} : relação de água retida na mistura, em l;

β_{p_i} : água retida para umedecer 1 l de finos, em l.

δ : finos;

Diferentemente do Japão, onde o *flow* para a pasta deve ser perto de 245mm, para a indústria de pré-fabricados da Holanda um *flow* de 325+/-25mm é preferível.

Argamassa (M-Mortar)

Segundo Bennenk (2007b), no teste da argamassa, o volume de água irá reduzir multiplicando β_{mix} por um coeficiente de correção, que varia entre $0.80 \leq k_p \leq 0.95$. Assim, a relação água/finos, pode ser definida na Equação 2.10:

$$V_a / V_f = k_p \times \beta_{p_i} \times \beta_{mix}$$

Equação 2.10

Onde:

V_a : volume de água, em l;

V_f : volume de finos, em l;

k_p : coeficiente de correção;

β_{mix} : relação de água retida na mistura, em l;

Com o volume de água e finos conhecidos, agora precisa ser calculada a porcentagem de aditivo requerida. O volume de areia, então, tem que ser escolhido, para a Holanda é de 45%, em alguns casos pode ser ainda maior, para obter um traço viável. No método japonês, a areia é fixada em 40% do volume de argamassa; portanto, 60% do volume de argamassa é pasta. O volume de água inclui o volume de aditivo.

Segundo Bennenk (2007b), um aumento do volume de finos resulta mais viscosidade e, por consequência, um tempo maior de *V-funnel*. Mais aditivo mostra um *Slump flow* maior.

O objetivo inicial é atingido pela modificação da porcentagem do superplastificante, pois um incremento da água irá resultar na redução da resistência, como também da durabilidade. Se usada uma outra quantidade de areia, um outro teste deve ser repetido para achar a porcentagem ideal novamente da água e aditivo.

Nas práticas realizadas na Holanda, são admitidos Γ_m aproximadamente 8 e R_m entre 0,8 e 1,2, com um valor de Flow maior 300mm e V-funnel entre 8 e 12 segundos.

Concreto (C-Concrete)

De acordo com o método citado, o volume total de agregado graúdo é maior que 50% do total de sólidos, em alguns casos maior até que 55%. Existe a possibilidade de usar agregados com tamanho máximo de 32mm, de forma que as porcentagens de partículas maiores ou iguais a 32mm sejam limitadas a 20%.

A mistura é inicialmente inspecionada visualmente. O primeiro passo é controlar o *Slump-flow* e o *V-funnel*. O *V-funnel* é desenvolvido para o concreto fresco que apresenta dimensão de agregado de até 20mm. Na seqüência de ensaios, são medidos o ar incorporado e o espalhamento após 30 e 60 minutos.

Segundo Bennenk (2007b), o *Slump-flow* é, na maioria das vezes, escolhido para ser maior que 650mm. Até 800 a 900mm, é freqüentemente empregado. Usualmente, o tempo do *V-funnel* está entre 5 a 12 segundos. Isto tudo depende do tipo de produto que está sendo concretado. E, para encerrar a dosagem, o concreto tem que passar pelos ensaios do *U-box* e *Kajima vessel*.

2.2.3 Outros métodos de dosagem do CAA & Críticas principais

A análise comparativa dos dois métodos de dosagem apresentados permite considerar que as práticas de proporcionamento dos materiais aplicadas nos Países Baixos representam um avanço em relação ao Método Japonês, pois se adotam porcentagens mais flexíveis, que permitem o uso de um maior volume de agregados caso a caso, podendo gerar uma otimização maior do traço. Ao contrário, o Método de Okamura, apesar de ter sido muito importante para o desenvolvimento moderno do CAA, inclusive dando as bases para o estudo desse material, apresenta uma dosagem baseada em limites superiores de pasta e com proporções de agregados altamente abrangentes.

A metodologia adotada por Gomes (2002)^{2.13} considera a dosagem do CAA de alta resistência baseada em duas etapas principais: pasta e esqueleto granular, obtidos de forma independente. O esqueleto granular é determinado com o mínimo de vazios. O ponto de saturação do aditivo e a relação água/cimento são obtidos através de testes com mini-slump. A relação água/cimento, normalmente, se mantém de 0,35 a 0,4. Após as fases pasta e esqueleto granular finalizadas, procedem-se testes de trabalhabilidade com a mistura, do tipo *Slump flow*, *L-box*, *V-funnel* e *U-shaped pipe*, para definir o volume mínimo de pasta no concreto para atender aos requisitos de auto-adensabilidade.

Contudo, esse procedimento pode algumas vezes tornar-se de difícil aplicabilidade, pois não demonstra qualquer preocupação com a resistência à compressão, devido à fixação de valores muito baixos para a relação a/c, que resultaram para todos os casos em concretos de altíssimo desempenho.

O método Melo & Repette, apresentado em Melo (2005)^{2.14}, definem um proporcionamento do CAA, tomando-se como ponto de partida a resistência a compressão de 20 a 40 MPa. Primeiramente, o aditivo é dosado na fase pasta, ensaiada por meio do *mini-slump*; um segundo passo é a dosagem do aditivo na argamassa, onde se processa os ensaios de espalhamento e *V-funnel* e, por fim, há um ajuste no concreto, realizando-se os ensaios do *Flow*, *V-funnel* e *L-box*.

^{2.13} GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete**. Tese de doutorado. Barcelona, 139p.,2002;

^{2.14} MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário**. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 180 p., 2005;

Resistências à compressão da ordem requerida foram possíveis no experimento realizado por Melo (2005), em decorrência do uso de filer calcário, contudo a níveis de auto-adensabilidade menores, comparados com os propostos neste trabalho.

Segundo Alencar & Helene (2008)^{2.15}, de forma geral, os métodos de dosagem do CAA existentes na bibliografia tentam definir o conteúdo de aditivo superplastificante com base na saturação da pasta, da argamassa, ou ainda, na pasta e mais adiante na argamassa e outra vez no final no concreto. Esses passos intermediários e pouco objetivos acabam por gerar um procedimento lento e trabalhoso sem fundamento tecnológico nem científico, pois o conteúdo ideal e ótimo do aditivo depende da interação de todos os elementos do traço, ou seja, cimento, adições, areia e brita, e isso só é possível quando se produz o concreto. Portanto, recomenda-se que o ajuste do conteúdo ideal de aditivo seja realizado diretamente no concreto.

Tutikian (2004)^{2.16} considera o ajuste do superplastificante diretamente na fase concreto. Adicionalmente, elabora um importante conceito de acerto da coesão do CAA com adição por substituição do cimento por finos pozolânicos, ou do agregado miúdo por finos não pozolânicos, que inclusive foi usado na metodologia proposta no presente trabalho.

Contudo, observa-se que a substituição de materiais com maior área superficial resolve a questão da coesão, porém deve ser acompanhado por um acréscimo gradual do teor de argamassa, e conseqüente, redução do consumo de agregado graúdo, necessário para que o concreto adquira maior habilidade passante, conforme verificado experimentalmente nesse trabalho. Porém, Tutikian (2004), além de considerar apenas o ensaio do *Flow* como medida de trabalhabilidade do concreto fresco, que não é suficiente para caracterizar todas as características exigidas do CAA, conforme visto no Capítulo 1, também, emprega

^{2.15} 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, Febr., p. 257-266, 2008;*

^{2.16} TUTIKIAN, B. F. **Métodos para dosagem de concretos auto-adensáveis** – Porto Alegre: Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 148p., 2004;

baixos teores de argamassa, que resultam em traços com menor nível de auto-adsorbabilidade, diferentemente dos propostos na presente dissertação.

2.2.4 Proporções típicas dos materiais

O EPG (2005), sem a intenção de dar recomendações para a dosagem, indica na Tabela 2.1 as proporções típicas dos constituintes em peso e em volume por m³ do CAA encontrados na bibliografia técnica. Contudo, faz a ressalva que alguns métodos de dosagens do CAA ficam fora dessas proporções em um ou mais constituintes.

Tabela 2.1 Proporções típicas dos constituintes em peso e em volume para o m³ do CAA (EPG, 2005).

Constituintes	Massa (kg)	Volume (l)
finos	380 - 600	
pasta		300 - 380
água	150 - 210	150 - 210
agregado graúdo	750 - 1000	270 - 360
areia*		
água / finos		0,85 - 1,10

*Conteúdo equilibra-se com o volume dos outros componentes, tipicamente 48 - 55% do total de agregados em peso.

2.3 Método de dosagem IBRACON para concreto convencional

Foi desenvolvido por pesquisadores do Instituto Tecnológico do Estado de São Paulo – IPT e da Escola Politécnica da USP e vem tendo larga e vitoriosa aplicação no país, desde a década de 70. Ora chamado Método EPUSP, ora IPT/EPUSP, ora Método Helene & Terzian (1993) ^{2.17}, por ser nacionalmente conhecido e por ter contado com a colaboração de vários pesquisadores ao longo

^{2.17} HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo, p.349, 1993;

dos anos de seu aprimoramento, foi denominado, mais recentemente, como Método IBRACON Instituto Brasileiro do Concreto (HELENE, 2005)^{2.18}.

Esse método prevê um ajuste experimental das proporções entre os materiais constituintes do concreto, com base na busca de um conteúdo ideal de argamassa seca (α) (Equação 2.11), através de um traço intermediário (1: m) dos demais previstos (1:m-1; 1:m+1, etc), que contenham ou estejam próximos ao traço resposta pretendido.

Para produzir o primeiro traço em laboratório, deve-se variar o conteúdo de argamassa seca, começando com um α baixo, da ordem de 0,33%, dependendo muito dos materiais escolhidos, e subir este de 0,02 em 0,02, aproximadamente, até encontrar o ponto ótimo por meio de observações visuais da mistura, combinadas com manuseio do concreto com colher de pedreiro, para verificar o aspecto de trabalhabilidade e acabamento, além da realização do ensaio do slump para visualização da coesão do concreto fresco.

Definido o α no traço médio, para um certo e elegido abatimento, os demais traços são facilmente obtidos mantendo-se constante o conteúdo de argamassa, o slump e a relação água/ materiais secos (H) (Equação 2.12) com valores muito próximos:

Teor de argamassa seca	$\alpha = \frac{1 + a}{1 + m}$	Equação 2.11
------------------------	--------------------------------	---------------------

Grau de hidratação	$H = \frac{a / ag}{1 + m}$	Equação 2.12
--------------------	----------------------------	---------------------

Onde:

$m=a+b$: relação em massa de agregado seco/cimento, em kg/kg;

a : relação agregado miúdo seco/cimento em massa, em kg/kg;

b : relação agregado graúdo seco/cimento em massa, em kg/kg.

^{2.18} HELENE, P. Dosagem do Concreto de Cimento Portland, In: ISAIA, G. C., Editor. **In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo, v. 1, p. 75-107, 2005;

Esse número de traços, no mínimo três, permite um ajuste das equações de correlação de dosagem (Equação 2.13, 2.14 e 2.15), possibilitando a construção do Diagrama que correlaciona as funções: f_{cj} (Mpa) \leftrightarrow a/ag (kg/kg) \leftrightarrow m (kg/kg) \leftrightarrow C_{cim} (kg/m³); onde a partir do qual, por regressão linear, obtém-se qualquer resistência que se queira dentro do intervalo estudado, para traços de uma mesma família.

Abrams (1918)	$f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}}$	Equação 2.13
---------------	-------------------------------	---------------------

Lyse (1932)	$m = k_3 + k_4 \times \frac{a}{c}$	Equação 2.14
-------------	------------------------------------	---------------------

Priszkulnik & Kirilos (1974)	$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \times m}$	Equação 2.15
------------------------------	---------------------------------------	---------------------

Onde:

f_c : resistência à compressão axial, em MPa;

a/ag : relação em massa de água/aglomerante, em kg/kg;

C : consumo de cimento por m³ de concreto em kg/m³;

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$: são constantes particulares de cada conjunto de materiais.

O Diagrama de Dosagem proposto por este método facilita sobremaneira o entendimento do comportamento de uma determinada família de concreto de mesmo abatimento, mas de propriedades muito diferentes depois de endurecido, conforme se apresenta um exemplo na Fig. 2.6.

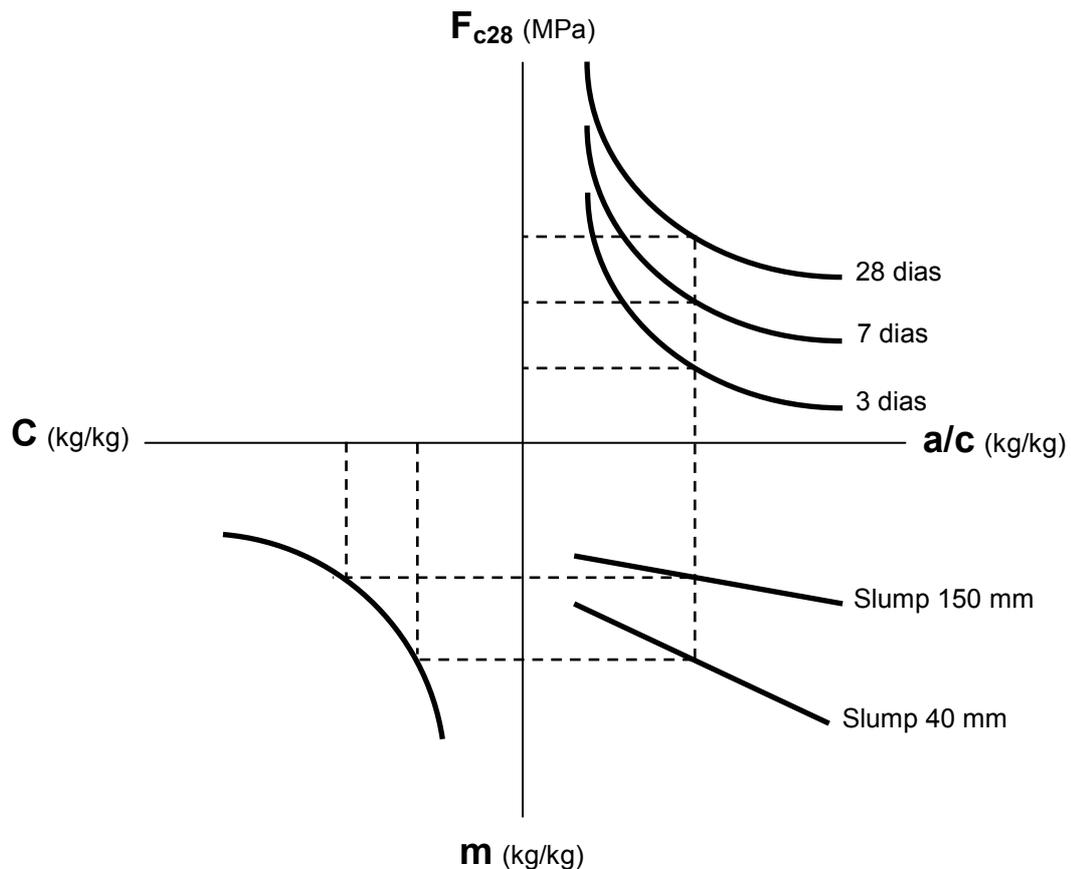


Figura 2.6 Diagrama de dosagem dos concretos de cimento Portland.

2.4 Nova metodologia de dosagem desenvolvida ^{2.19}

A primeira inovação pretendida por essa metodologia é a introdução do conceito de correção da coesão do concreto fresco, para apoiar a grande fluidez, com incremento de adições minerais para a substituição parcial do cimento por metacaulim (fino pozolânico), ou do agregado miúdo por filer calcário (fino não-pozolânico), de uma área superficial maior que o material substituído, onde misturas mais pobres em cimento exigem um maior teor de substituição de finos em comparação com composições mais ricas, para guardar as mesmas características de trabalhabilidade. Isso faz possível a criação de uma correlação entre a relação agregado/cimento (m) e o conteúdo ideal de substituição (T), agregando um 4º quadrante ao Diagrama de Dosagem do método original (Equação 2. 16):

^{2.19} Essa seção esta baseada no artigo apresentado por este autor em: ALENCAR & HELENE (2008).

Alencar (2006) (ALENCAR & HELENE, 2006)^{2.20} $m = k_7 + k_8 \times T$ **Equação 2.16**

Onde:

T : teor de substituição em massa de cimento ou areia seca por finos correspondentes kg/kg;

m : relação em massa de agregado seco / cimento;

k_7, k_8 : são constantes particulares de cada conjunto de materiais.

Conforme anteriormente colocado, a substituição de materiais com uma área superficial maior resolve a questão da coesão, não obstante deve ser acompanhado por um aumento do conteúdo de argamassa (α), necessário para que o concreto adquira maior habilidade de passar por entre as armaduras.

A segunda inovação ao Método IBRACON é a abordagem de alguns ensaios específicos do concreto fresco, que não eram considerados na dosagem do concreto comum, para a verificação da capacidade de enchimento por ação do seu peso próprio, de passagem por restrições e armaduras com apropriado nível de resistência a segregação; que são básicos para a qualificação desse novo material para um uso prático.

2.4.1 Ajuste do traço médio

Inicia-se a dosagem pelo ajuste do traço médio seguindo duas etapas principais, a saber:

Fase de proporcionamento - adota-se um valor de m , com base na resistência média prevista. Então, o proporcionamento dos materiais segue os passos:

^{2.20} 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;

1° Passo - Teor de argamassa (α);

2° Passo - Teor de substituição (T);

3° Passo - Aditivo;

3° Passo - Relação a/ag.

Fase de verificação - a cada ajuste de materiais realizado, verifica-se a possibilidade da realização de ensaios de trabalhabilidade para confirmação do atendimento ou não do concreto ao nível de auto-adensabilidade objetivado. Para essa confirmação, é necessário realizar seqüencialmente ao menos nos ensaios de:

1° Passo - *Slump flow* e *Slump flow T500*;

2° Passo - *L-box*;

3° Passo - *V-funnel* e *V-funnel 5min*;

4° Passo - *Column technique*.

Caso a mistura não atenda a um determinado ensaio, não se deve prosseguir com os demais. Então, é necessário voltar ao ajuste de materiais anterior e perseguir no passo subsequente, para só então retomar os ensaios de trabalhabilidade.

Na primeira tentativa de obter o CAA, o teor de argamassa é utilizado apenas pouco acima do empregado para os materiais utilizados no concreto comum (da ordem de 53%), com um T , percentual de aditivos e relação a/ag baixos. Caso não seja possível obter um CAA com as características requeridas, deve-se percorrer ao 2° passo, testando porcentagens crescentes do teor de substituição, até o momento que não se verifique melhoras significativas na mistura, dando continuidade aos passos 3° e 4°, onde se assume a mesma posição. Se o CAA não foi alcançado, retorna-se novamente ao ajuste do teor de argamassa (1° passo) (crescendo 3 pontos – 56%), mantendo-se o T , a relação a/ag e a porcentagem de aditivo usados na tentativa anterior, e assim sucessivamente.

Destaca-se que, a dosagem inicia-se sempre com proporções baixas de α , T e aditivo que vão sendo incrementadas pouco a pouco, buscando, assim, uma maior otimização dos materiais. Contudo, observa-se que, na medida que aumenta-se o α e o T normalmente, há a necessidade de aumentar também a quantidade de aditivo e, muitas vezes, a relação a/ag , devido ao aumento da superfície específica da mistura.

A proporção do T cresce a cada ajuste dependendo muito do tipo de adição; no caso do metacaulim, pode-se partir de um teor de 4% e aumentar 1% a cada nova tentativa. Já, com o filer, inicia-se a dosagem com aproximadamente 7% e cresce em média 2% por tentativa.

Um esquema para obter o traço médio é apresentado na Fig. 2.7.

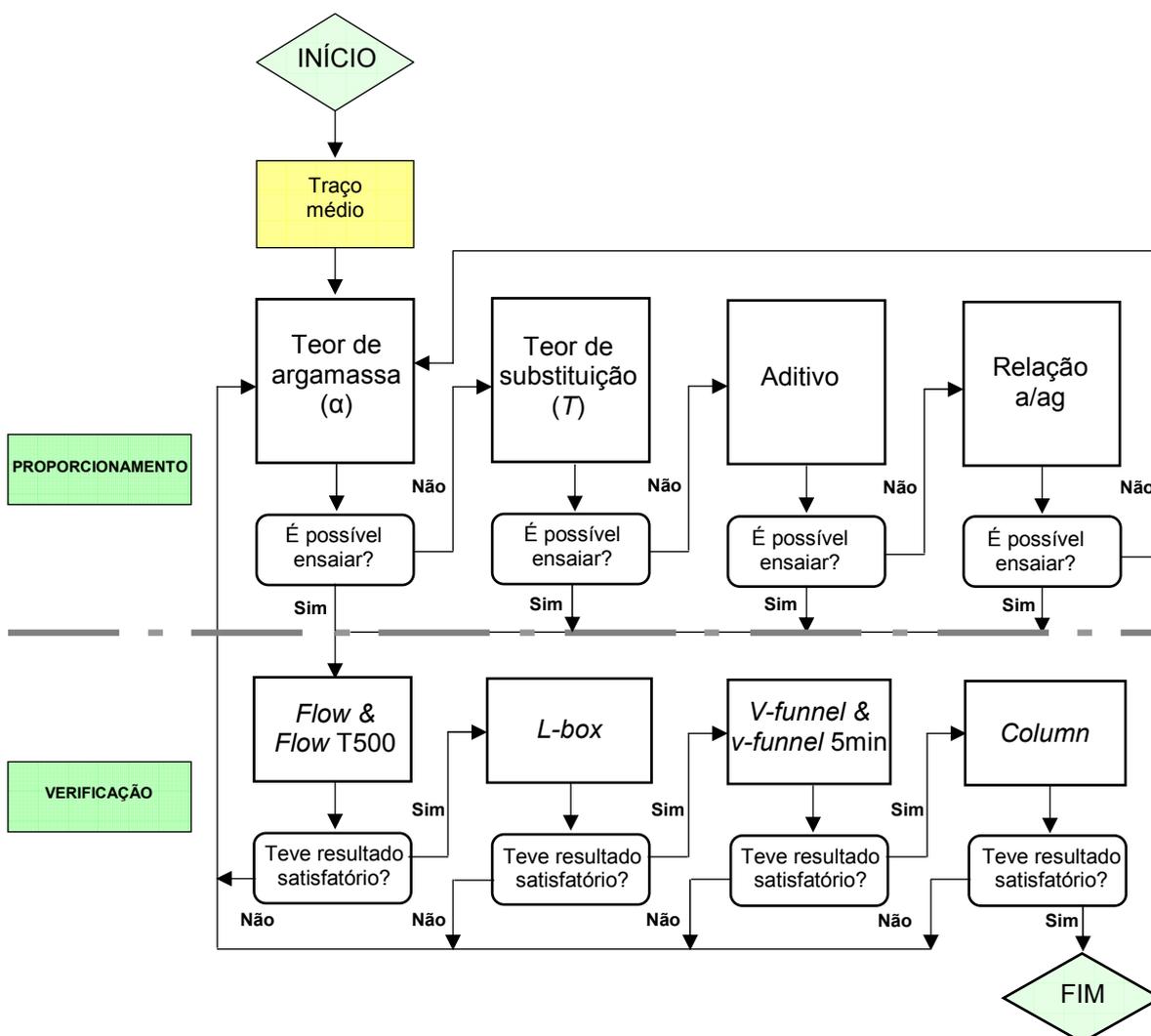


Figura 2.7 Seqüência geral de tomada de decisão para o proporcionamento dos materiais do traço médio para o CAA com adição, segundo o método proposto (ALENCAR & HELENE, 2008).

Nesse estudo de dosagem, a porcentagem de aditivo é calculada sob a massa dos aglomerantes (cimento + metacaulim). Contudo, o filer calcário não será computado, pois está sendo considerado como material inerte.

Deve-se aumentar a quantidade de água para chegar no nível de auto-adsensibilidade, sem exsudação e segregação aparentes. Por isso, esse é um passo a ser dado de forma muito criteriosa, para não correr o risco de perder a mistura.

2.4.2 Traços auxiliares

Produzir os traços auxiliares: muito rico, rico, muito pobre e pobre, com o mesmo teor de argamassa determinado no traço médio, com um T , um teor ótimo de aditivo e relação a/ag , verificado experimentalmente em cada mistura, dadas as características requeridas. Para isso, os traços devem ser testados nos equipamentos de trabalhabilidade. Então, montar o Diagrama de Dosagem.

Este método também prevê a dosagem do CAA sem adição mineral; nesse caso, em vez de aumentar o T para conseguir um traço com maior coesão, se aumenta o teor de argamassa, tanto para possibilitar maior habilidade passante, como para aumentar a quantidade de finos da mistura.

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