

Capítulo 12

Dosagem dos Concretos de Cimento Portland

Bernardo F. Tutikian

UNISINOS

Paulo Helene

PhD Engenharia & Consultoria

12.1 Introdução e Importância do Tema

Entende-se por estudo de dosagem dos concretos de cimento Portland os procedimentos necessários à obtenção da melhor proporção entre os materiais constitutivos do concreto, também conhecido por traço. Essa proporção ideal pode ser expressa em massa ou em volume, sendo preferível e sempre mais rigorosa a proporção expressa em massa seca de materiais.

Hoje, deve-se considerar como materiais passíveis de uso nos concretos e possíveis de serem utilizados num estudo de dosagem: *os vários cimentos, os agregados miúdos, os agregados graúdos, a água, o ar incorporado, o ar aprisionado, os aditivos, as adições, os pigmentos e as fibras*. Com relação aos agregados, pode ser feita distinção entre agregados reciclados, artificiais ou industrializados e naturais.

No Brasil, ainda não há um texto consensual de como deve ser um estudo de dosagem. A inexistência de um consenso nacional cristalizado numa norma brasileira sobre os procedimentos e parâmetros de dosagem tem levado vários pesquisadores a proporem seus próprios métodos de dosagem, muitas vezes confundidos com uma recomendação da instituição para a qual trabalham, ou através da qual foram publicados.

Assim ocorreu com o método de dosagem IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), proposto inicialmente por Ary Frederico Torres (1927), Simão Prizskulnik (1977) e Carlos Tango (1986); com o método de dosagem INT (Instituto Nacional de Tecnologia), no Rio de Janeiro, proposto por Fernando Luiz Lobo Carneiro (1937); com o método de dosagem ITERS (Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul), proposto por Eládio Petrucci (1985); com o método da ABCP, proposto, inicialmente, por Ary Torres e Carlos Rosman (1956), que atualmente adota uma adaptação do método americano do ACI. Vallete (1949), De Larrard (1990), Helene

& Terzian (1992), Alaejos y Cánovas (1994), Isaia (1995), Berenice Carbonari (1996), Vitervo O'Reilly (1998), Aitcin (1998) e Tutikian (2007), entre outros, também são métodos de dosagem conhecidos e utilizados no Brasil.

Apesar de os métodos de dosagem diferirem entre si, certas atividades são comuns a todos, como, por exemplo, o cálculo da resistência média de dosagem, a correlação da resistência à compressão com a relação água/cimento para determinado tipo e classe de cimento, sempre e quando um estudo de dosagem tiver por objetivo a obtenção de uma resistência especificada, sem descuidar da economia e da sustentabilidade que sempre devem nortear um estudo de dosagem contemporâneo.

Um estudo de dosagem deve ser realizado visando obter a mistura ideal e mais econômica, numa determinada região e com os materiais ali disponíveis, para atender uma série de requisitos. Essa série será maior ou menor, segundo a complexidade do trabalho a ser realizado e segundo o grau de esclarecimento técnico e prático do usuário do concreto que demandou o estudo.

Em princípio, os requisitos básicos usuais a serem atendidos podem ser englobados nos descritos a seguir.

A **resistência mecânica** do concreto é o parâmetro mais frequentemente especificado. A resistência à compressão é a mais utilizada, embora a resistência à tração por flexão também seja muito comum em projetos de pavimentos de concreto. A resistência à compressão dos concretos tem sido tradicionalmente utilizada como parâmetro principal de dosagem e controle da qualidade dos concretos destinados a obras correntes. Isso se deve, por um lado, à relativa simplicidade do procedimento de moldagem dos corpos-de-prova e do ensaio de compressão, e, por outro, ao fato de a resistência à compressão ser um parâmetro sensível às alterações de composição da mistura, permitindo inferir modificações em outras propriedades do concreto. No Brasil, os métodos para obtenção da resistência à compressão do concreto estão especificados nos métodos de ensaio ABNT NBR 5738:2003 e ABNT NBR 5739:2007, no procedimento de concreto ABNT NBR 12655:2006, no procedimento de projeto ABNT NBR 6118:2007 e no procedimento de execução ABNT NBR 14931:2004. Caso o parâmetro principal a ser atendido seja a resistência à compressão, esta deverá encaixar-se na **classificação** determinada pela ABNT NBR 8953:2009.

Todos os concretos requerem uma certa **trabalhabilidade**, adequada a cada situação específica. Os condicionantes vêm definidos pelos projetos arquitetônicos e estruturais (fôrmas, taxas de armadura, detalhes geométricos), pelos equipamentos a serem utilizados (bomba, carrinhos, giricas, caçambas, projeção, submerso, autoadensável), pelas necessidades de acabamento (sarrafeado, polido, lixado, aparente, desempenado) e pelas condições ambientais (temperatura, insolação, ventos, umidade relativa). Os concretos devem ser coesos e viscosos, ou seja, para cada caso devem permitir ser transportados adequadamente até sua posição final sem apresentar segregação,

bicheiras, ninhos, exsudação, variações de cor e escorrimentos exagerados. A trabalhabilidade do concreto é uma variável complexa que depende de fatores intrínsecos e extrínsecos ao material, conforme alerta Tattersall (1978). No caso da consideração exclusiva de fatores intrínsecos ao concreto, adota-se, no Brasil, a consistência do concreto fresco como o parâmetro principal. Essa consistência pode ser obtida a partir da retirada de amostra representativa conforme ABNT NBR NM 33:1998 e ensaio em conformidade com ABNT NBR NM 67:1998 Concreto. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Método de Ensaio, equivalente à *ASTM C143/C143M-10a Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*.

Com relação ao requisito **durabilidade**, salienta-se que os concretos devem ser duráveis frente às solicitações às quais será exposto durante sua vida útil. A durabilidade depende tanto de fatores extrínsecos aos concretos, tais como presença de sais, maresia, chuvas ácidas, umidade relativa, natureza das solicitações mecânicas a que ficarem sujeitos (carga monotônica, cíclica, longa ou curta duração, impactos), quanto de fatores intrínsecos, tais como tipo de cimento, relação a/c, adições, aditivos e outros. O conceito de durabilidade está associado ao dos mecanismos de transporte ou de penetração de agentes agressivos em materiais porosos: capilaridade, difusibilidade, migração iônica e permeabilidade. A durabilidade é considerada um tema muito complexo que depende de muitas variáveis e, por isso, ainda não tem um método consensual para ser medida. Do ponto de vista do projeto estrutural, a ABNT NBR 6118:2007, a ABNT NBR 12655:2006 e a ABNT NBR 14931:2004 buscam assegurar certa durabilidade da estrutura a partir das especificações de relação água/cimento máxima; da resistência à compressão mínima; da espessura mínima de cobrimento de concreto à armadura e ao consumo mínimo de cimento, para cada uma das condições de exposição previstas a que estarão submetidos os elementos estruturais de uma obra ao longo de sua vida útil;

Com referência à **deformabilidade**, cada vez mais, o módulo de elasticidade, a retração hidráulica, a deformação inicial ou imediata e, principalmente, a deformação lenta (fluência) do concreto têm sido especificadas pelos projetistas estruturais mais esclarecidos. Essas deformações próprias de todos os materiais de construção podem ter, no caso do concreto, grandes e nefastas interferências com os demais elementos construtivos (paredes, pisos, caixilhos, elevadores, escadas rolantes, pontes rolantes, etc.). Por essa razão, progressivamente vêm sendo incluídas como requisitos importantes nos estudos de dosagem. As deformações do concreto podem ser medidas por meio dos métodos ABNT NBR 8224:1983, ABNT NBR 8522:2008 e ABNT NBR NM 131:1984;

Um dos requisitos atuais que paulatinamente vem sendo inserido nos estudos de dosagem é construir mais com menos consumo de matérias primas, ou seja, cuidar do ambiente através de uma visão de **sustentabilidade**. Em geral, em muitas estruturas é possível reduzir consumo de concreto através do aumento da

resistência mecânica, principalmente em pilares, como conseguido nos pilares do *e-Tower* (HARTMANN & HELENE, 2003), cuja alteração de 40MPa para 80MPa reduziu em 70% o consumo de agregados, 20% o de cimento, 40% o de água e reduziu as quantidades de fôrmas e da armadura de aço. Esse fato já vem sendo observado no concreto há anos, cuja resistência tem aumentado de forma contínua, principalmente na última década. Em parte, isso se deve também à evolução da qualidade do cimento Portland que tem apresentado melhor desempenho mecânico.

Hoje, o mercado e as técnicas construtivas exigem concretos de alta resistência (CAR ou *HSC High Strength Concrete*); concretos de alto desempenho (CAD ou *HPC High-Performance Concrete*); concretos autoadensáveis (CAA ou *SCC Self-Compacting Concrete*); concretos com altos teores de adições e pozolanas; concretos aparentes; concretos coloridos; concretos brancos; concretos com agregados reciclados, concretos duráveis e muitos outros. Para cada um deles existe, na literatura especializada, uma série de métodos de dosagem que prometem obter o concreto ideal ao menor custo possível. Essa grande oferta de alternativas está transformando cada vez mais a atividade de dosagem numa atividade específica, complexa e dispendiosa.

É muito comum constatar que certos profissionais inseguros relegam seus conhecimentos básicos, fundamentais e imutáveis de tecnologia de concreto em busca de receitas novas e mágicas que, infelizmente, nem sempre dão bons resultados.

As principais propriedades do concreto endurecido são normalmente expressas pelo projetista das estruturas, enquanto que as propriedades do concreto fresco são determinadas pelos equipamentos e técnicas de execução – transporte, lançamentos e adensamento do concreto, – bem como pelas próprias características geométricas da estrutura a ser concretada.

Cabe ao tecnologista de concreto conciliar essas exigências, satisfazendo a ambos por meio de um concreto o mais econômico possível. Apesar de óbvia, esta última condição é frequentemente esquecida, uma vez que há engenheiros que se orgulham de produzirem ou empregarem em suas obras concretos com características e custo, muito acima das necessárias. Infelizmente, também há aqueles que, por omissão ou falta de conhecimento, não utilizam o concreto com as propriedades requeridas e comprometem a segurança, a durabilidade, a deformabilidade e os custos futuros de manutenção.

Qualquer estudo de dosagem dos concretos tem fundamentos científicos e tecnológicos fortes, mas sempre envolve uma parte experimental em laboratório e/ou campo, o que faz com que certos pesquisadores e profissionais considerem a dosagem do concreto mais como uma arte do que uma ciência (MEHTA & MONTEIRO, 2008). De qualquer forma, somente àqueles capazes de dominar essas duas características são conferidos os grandes benefícios econômicos e técnicos de um correto uso de um concreto bem dosado.

Atualmente, no Brasil, são produzidos cerca de 20 milhões de m³ de concreto/ano em Centrais de Concreto, denominadas Empresas de Serviços de Concretagem. Uma economia de 5kg de cimento por m³, proporcionada por uma melhor dosagem, poderia acarretar uma redução da emissão de 100.000t de dióxido de carbono (CO₂) à atmosfera, assim como uma redução de agregados por aumento de resistência mecânica do concreto pode representar milhares de toneladas de economia de recursos naturais.

Concluindo, pode-se relacionar os seguintes princípios da dosagem dos concretos:

- A resistência à compressão de um concreto é 95% explicada pela resistência da pasta;
- A máxima resistência será, teoricamente, alcançada com uma pasta de cimento simples;
- Para cada dimensão máxima característica do agregado graúdo há um ponto ótimo de resistência do concreto, crescente com a redução dessa dimensão;
- A resistência à compressão dos concretos depende essencialmente da relação a/c;
- Um concreto corrente será tanto mais econômico quanto maior a dimensão máxima característica do agregado graúdo e quanto menor o seu abatimento, ou seja, concretos de consistência seca, para uma mesma resistência, são mais baratos que de consistência plástica ou fluída;
- A consistência de um concreto fresco depende essencialmente da quantidade de água por m³;
- Para uma dada resistência e uma dada consistência, há uma distribuição granulométrica ótima (combinação miúdo/grauído) que minimiza a quantidade de pasta;
- O rendimento da relação resistência à compressão (MPa) / consumo de cimento (kg/m³) tem um ponto ótimo máximo, para cada traço e aumenta com o crescimento da resistência, ou seja, quanto maior a resistência de um concreto, maior seu rendimento em MPa/kg. Um concreto corrente de 20MPa pode ter rendimento baixo, da ordem de 0,08MPa/kg (BOGGIO, 2000), enquanto um concreto de elevado desempenho e resistência pode ter rendimento alto, mais do que o dobro, da ordem de 0,20MPa/kg (LIBÓRIO, 2008) a 0,40MPa/kg (ISALA, 1995).

12.2 Histórico Internacional e Nacional

12.2.1 Histórico Internacional

Até o século XIX, pouco se conhecia acerca do proporcionamento adequado dos materiais constitutivos dos concretos e argamassas. Em 1828, na França, Louis J. Vicat (*apud* Ferrari, 1968) constatou experimentalmente que uma determinada

relação cimento/areia conduzia à máxima resistência das argamassas. O autor também fez considerações sobre os inconvenientes do excesso e da insuficiência de areia no traço e descreveu que, na mesma época, Rondelet, em 1830, preconizou a utilização de areia tão grossa quanto possível para obtenção de argamassas e concretos econômicos.

Esses conceitos centenários vigoram até hoje, apesar de estar atualmente comprovada a sua inconsistência tecnológica, ou seja, é possível obter concretos equivalentes técnica e economicamente tanto com o uso de areias finas, quanto com o emprego de areias grossas. Além disso, não é verdade que todos os concretos com elevado consumo de cimento têm desempenho superior a outros concretos com menos cimento.

Préau, em 1881, apresentou formalmente um método de dosagem das argamassas e concretos. Propôs que fosse determinado o volume de vazios da areia e que o volume da pasta aglomerante deveria ser 5% superior ao volume de vazios encontrado no agregado miúdo. A seguir, dever-se-ia determinar o volume de vazios da pedra, a partir do qual se calcula o volume da argamassa como sendo 10% superior ao volume de vazios do agregado graúdo (COUTINHO, 1973). Esses conceitos básicos de proporcionamento permanecem até hoje em certos métodos de dosagem, como o do ACI 211.1-91.

Considera-se, no entanto, que o primeiro estudo de proporcionamento racional dos materiais tenha sido realizado por René Ferét, na época chefe do Laboratório de “*Ponts et Chaussées*”, na França. Em 1896, propôs uma parábola como melhor modelo matemático de correlação entre resistência à compressão e volume de água mais ar do concreto (FERRARI, 1968).

Em 1918, Duff A. Abrams, após o estudo de inúmeros traços e análise de mais de 50.000 corpos-de-prova, enunciou a “Lei de Abrams”, mundialmente aceita até os dias de hoje. Abrams introduziu também o termo “Módulo de Finura”, que propôs representar, por meio de um único índice, a distribuição granulométrica dos agregados. O índice assim obtido mostrou-se tão útil que foi adotado mundialmente nas normas de agregados para concreto, inclusive na brasileira, a ABNT NBR 7211:2009. E ainda introduziu uma equação que correlaciona o módulo de finura ideal do agregado total com sua dimensão máxima, como segue:

$$MF = 7,94 + 3,32 \bullet \log D_{m\acute{a}x} \quad (\text{Equação 1})$$

em que:

MF = módulo de finura dos agregados;

$D_{m\acute{a}x}$ = dimensão máxima característica do agregado.

A contribuição de Abrams foi ainda mais significativa: introduziu a noção de trabalhabilidade do concreto e propôs a medida da sua consistência em 1922, por meio de um molde tronco de cone de altura 30cm e bases 10cm e 20cm. Essa proposta

entrou na utilização corrente da produção mundial de concreto, transformando-se no único método normalizado no Brasil para medida da consistência do concreto fresco até 1986, quando foi introduzido também o método do espalhamento na mesa, atualmente em vigor, porém ainda muito pouco conhecido e utilizado.

Segundo Draffin (1943), dois pesquisadores da Universidade de Illinois, Talbot e Richart, questionaram, por volta de 1923, a validade da abrangência do modelo de Abrams, que afirmava ser a resistência do concreto determinada essencialmente pela relação a/c. Talbot e Richart defendiam que a magnitude do total de vazios no concreto – os espaços ocupados pela água e pelo ar – era o que determinava a resistência final. Com o advento das técnicas de incorporação de ar e com o uso de concretos de consistência seca – de difícil adensamento –, comprovou-se que a teoria universal de Abrams realmente tem suas limitações, requerendo pequenos ajustes quando não se trata de concretos plásticos nem de concretos com baixos teores de ar aprisionado.

Em 1932, Inge Lyse publicou sua contribuição ao estudo da dosagem dos concretos, demonstrando que, respeitados certos limites e mantidos os mesmos materiais, é possível considerar a massa de água por unidade de volume de concreto como a principal determinante da consistência do concreto fresco, qualquer que seja a proporção dos materiais da mistura. Lyse sugeriu ainda empregar a Lei de Abrams com relação água/cimento em massa e não em volume, como originalmente proposto por Abrams.

Em 1925, Bolomey reintroduziu o conceito de granulometria contínua iniciado por Fuller & Thompson (1907), como a ideal para concretos (NEWLON JR., 1976). Contrariando essa tendência à granulometria contínua, Roger Vallete, em 1949, propôs o modelo válido para a situação de granulometria descontínua: o agregado primário de dimensão D_1 , composto apenas por grãos dessa dimensão, deve ser misturado com o agregado secundário, uniforme também e de dimensão D_2 , de forma que D_2 se ajuste aos vazios deixados por D_1 , sem que a distância entre os grãos do primário seja aumentada, ou seja, sem expansão do volume de vazios de D_1 . O agregado terciário deverá ser uniforme e de dimensão D_3 tal que se ajuste nos vazios da mistura de D_1 e D_2 , sem alterar a distância entre os grãos, e assim sucessivamente até o cimento.

Apesar de lógica e de impor-se à razão como uma verdade intuitiva, esses métodos baseados na granulometria descontínua não se generalizaram devido à dificuldade de obter, prática e economicamente, agregados com grãos uniformes que obedeçam a uma dada relação geométrica, variável de uma a outra situação. Hoje, são utilizados nos estudos de dosagem de concretos de elevada resistência à abrasão, como pisos industriais, em geral, ainda viabilizados comercialmente somente por empresas especializadas que dispõem de uma bateria de peneiras para classificar e industrializar os agregados.

Em 1944, foi publicado o primeiro texto consensual sobre dosagem dos concretos elaborado pelo Committee 613, instalado sob a coordenação de Robert F. Blanks do *Bureau of Reclamation-USA*, publicado pelo *American Concrete*

Institute-ACI, após oito anos de intensas discussões (CORDON, 1974). A recomendação americana para dosagem foi alterada, em 1970, de *ACI-613* para *ACI-211*. O método de dosagem recomendado pelo ACI teve grande aceitação entre os tecnologistas nacionais, sendo traduzido e divulgado pela ABCP nos dias atuais e largamente empregado também em toda a América Latina.

Em maio de 1954, em Londres, a *Cement and Concrete Association-C&CA* promoveu o *Symposium on Mix Design and Quality Control of Concrete*, resgatando a importância dos ingleses na contribuição ao desenvolvimento da dosagem dos concretos (ANDREW, 1954). Destaca-se o trabalho de McIntosh (1954) sobre os princípios básicos da dosagem dos concretos. Esse evento alcança absoluto sucesso e pode ser considerado como uma das maiores contribuições ao desenvolvimento da tecnologia do concreto, principalmente com relação aos parâmetros de dosagem e controle da qualidade.

O trabalho de Sparkes (1954), que apresentou uma revisão do estado de conhecimento da época sobre o controle da qualidade do concreto, recuperou contribuições fundamentais de Stanton Walker (1944) e Morgan (1944) sobre os critérios de dosagem do concreto com base na resistência à compressão especificada no projeto estrutural. Os ingleses tiveram, nesse evento, o mérito de vislumbrar a estreita relação que há entre os parâmetros de dosagem, os de segurança estrutural e os de controle de qualidade do concreto.

Em 1958, na Alemanha, Kurt Waltz publicou as recomendações para dosagem e fabricação de concreto com propriedades específicas. Introduziu uma proposta para curvas de referência da correlação da resistência à compressão dos concretos com a resistência dos cimentos, que seria adotada, posteriormente, por volta de 1970, nas normas alemãs *DIN 1945 – Dimensionamento e Execução das Construções de Concreto e Concreto Armado* e *DIN 1164 – Cimentos*, conhecidas posteriormente como curvas de Waltz (COUTINHO, 1973).

Em 1955, Murdock & Brook (1979) apresentaram um modelo para a trabalhabilidade dos concretos frescos que passou a ser mundialmente conhecido.

$$\text{Modelo de Murdock: } FC = 0,74 \cdot \left\{ \frac{10 \cdot \left[\frac{a}{c} - \left(\frac{a}{c} \right)_{pn} \right]}{f_s \cdot f_a \cdot \left(\frac{\gamma_c}{\gamma_m} \cdot m - 2 \right)} + 0,67 \right\} \quad (\text{Equação 2})$$

em que:

FC = fator de compactação. É o método de ensaio de consistência do concreto fresco utilizado frequentemente na Inglaterra, BS 1881-103 *Testing Concrete. Method for Determination of Compaction Factor* British Standards Institution BSI, e que tem correlação forte com o abatimento (*slump*). *FC* máximo possível é 1 e corresponde a concretos auto-adensáveis;

$\left(\frac{a}{c} \right)_{pn}$ = relação água/cimento da pasta de consistência normal (0,23 a 0,31);

f_s = índice de superfície dos agregados;

f_a = índice de angulosidade dos agregados (1,0 a 3,0);

m = relação agregados/cimento em massa seca.

γ_c e γ_m = massa específica do cimento e dos agregados, respectivamente.

Em 1948, os franceses Robert L'Hermite & Tournon apresentaram seus primeiros estudos sobre a vibração e reologia do concreto fresco, levados a cabo no *Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques – CERILH*, dando início a uma nova forma de direcionar os estudos de dosagem dos concretos.

Suas propostas foram aceitas e desenvolvidas a partir do final da década de 60 por Bombléd (1973) na França, Tattersall (1978) em Londres e Tattersall & Banfill (1983), que acreditaram ser conveniente caracterizar o concreto fresco com os parâmetros dos modelos reológicos clássicos formulados por Eugene Bingham, em 1916.

O estudo da reologia dos concretos frescos, apesar de iniciados há mais de 60 anos, ainda não convenceu o meio técnico de sua efetiva utilidade. Estudos mais recentes de Koehler *et al.* (2003) apontam para o desenvolvimento de novos reômetros, mais potentes e mais modernos.

Com o auxílio de computadores para processar simulações e com a colaboração científica de outras disciplinas, como, por exemplo, da física e da química, espera-se que a reologia venha demonstrar em breve uma efetiva contribuição ao desenvolvimento dos concretos e da construção civil, deixando de ficar restrita a estudos especulativos de laboratório.

Admite-se que a teoria atual mais abrangente das técnicas de dosagem foi proposta por Treval Powers em 1966. A partir de estudos no concreto fresco e no concreto endurecido, é possível, com base nos modelos de Powers (1968), representar o comportamento resistente integral do concreto, tendo em conta as envoltórias de Mohr-Coulomb¹.

Powers deduziu teoricamente que a resistência à compressão, à paridade de outras condições depende somente da relação gel/espaco da pasta, conforme o modelo:

$$\text{Modelo de Powers:} \quad f_c = k_1 \cdot \left[\frac{0,68 \cdot \alpha}{0,32 \cdot \alpha + \frac{a}{c}} \right]^{k_2} \quad (\text{Equação 3})$$

em que:

f_c = resistência à compressão, em MPa;

α = grau de hidratação do cimento (varia de 0 para concreto recém-misturado a 1 para condições ideais de cura após tempo infinito);

k_1 = constante que depende dos materiais (em geral da ordem de 120);

k_2 = constante que depende dos materiais (em geral da ordem de 3);

a/c = relação água/cimento em massa (caso houver vazios devido ao ar aprisionado em valor superior a 1% em volume, estes devem ser somados em volume à massa de água).

Analisando essa equação, pode-se observar que, para alterar a resistência à compressão, deve-se atuar sobre o grau de hidratação ou sobre a relação água/cimento.

¹ Charles-Augustin de Coulomb (1736 – 1806) foi um físico francês. Christian Otto Mohr (1835 – 1918) foi um engenheiro civil alemão. A teoria chamada de Mohr-Coulomb é um modelo matemático adequado para descrever a resposta dos materiais frágeis como o concreto.

A alteração do grau de hidratação é conseguida por meio de:

- mudança do tipo de cimento (composição química e/ou características físicas);
- alteração nas condições de cura (idade, pressão, umidade e temperatura);
- emprego de aditivos aceleradores ou retardadores.

A alteração da relação água/cimento pode ser alcançada por meio de:

- mudança do tipo de cimento (finura ou composição química);
- mudança dos agregados (textura, dimensão, granulometria, absorção d'água);
- emprego de aditivos redutores de água ou superplastificantes.

Em 2002, Kosmatka *et al.*, da *Portland Cement Association PCA*, publicaram a 14ª edição do boletim denominado *Design and Control of Concrete Mixtures* que apresentava uma versão atualizada do primeiro boletim da PCA publicado na década de 20. O capítulo 9 desse boletim trata em detalhes dos métodos de dosagem, recorrendo sobre quatro alternativas diferentes, sendo duas delas bem similares à do ACI 211. Recentemente, no começo deste ano, PCA publica a 15ª versão atualizada desse método largamente adotado nos Estados Unidos, desta vez tendo como autores Kosmatka & Wilson (2011).

12.2.2 A evolução dos estudos de dosagem no Brasil

O início da tecnologia no Brasil está ligado à instalação, pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), do Gabinete de Resistências dos Materiais, em 1899. Em 1926, denominou-se Laboratório de Ensaios de Materiais e, a partir de 1934, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

A partir de 1920, ocorre um grande desenvolvimento da engenharia nacional, e as obras de concreto armado passam a assumir cada vez maior importância. Inicia-se a produção brasileira de cimentos Portland. O Prof. Ary Frederico Torres, então diretor do laboratório de Ensaios de Materiais, publicou, em 1927, o primeiro número do Boletim EPUSP, intitulado “Dosagem dos Concretos”, que constitui uma obra histórica de confirmação dos modelos propostos por Ferét e Abrams, já citados.

Em dezembro de 1931, o Eng. Rômulo de Lemos Romano publicou o Boletim n. 5 do laboratório de Materiais da EPUSP, no qual apresentou um balanço da situação dos cimentos existentes no mercado. Em 1933, junto com Ary Torres, propôs, no Boletim n.11, um método para o ensaio mecânico dos cimentos que daria origem, mais tarde, em 1940, à fundação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ao método brasileiro de ensaio de cimento MB-1 (VASCONCELOS, 1985).

Nessa época, no Rio de Janeiro, o Eng. Alberto Pastor de Oliveira, do Instituto Nacional de Tecnologia (INT), publicou, em 1939, a primeira aplicação dos conceitos estatísticos no controle da resistência à compressão do concreto, analisando 600 corpos-de-prova de uma mesma obra. Na época, também fazia parte da equipe do INT o Eng.

Fernando Luiz Lobo Carneiro, que publicou, em 1937, o seu método de dosagem dos concretos plásticos, ampliado em 1943 para concretos de consistência seca.

No ano de 1944, por ocasião do Simpósio de Estruturas realizado no Rio de Janeiro, promovido pelo INT, Lobo Carneiro propôs a adoção de resistência de dosagem tendo como base valores mínimos representados pelo quantil de 2.5%. Essas ideias eram avançadíssimas para a época, uma vez que, internacionalmente, apenas poucos meses antes haviam sido publicados os trabalhos clássicos de Morgan & Walker (1944). Esses pesquisadores propuseram, no entanto, a adoção de uma resistência mínima que fosse ultrapassada em 99% das vezes, ou seja, correspondente ao quantil de 1%.

A história demonstrou que Lobo Carneiro estava mais próximo do consenso, pois, atualmente, adota-se, em nível mundial, a resistência mínima (característica) como aquela que corresponde ao quantil de 5% (HELENE, 1999).

Ruy Aguiar da Silva Leme, da EPUSP, em 1953, e Francisco de Assis Basílio, da ABCP, em 1954, reforçaram uma vez mais a importância da consideração da variabilidade da resistência do concreto nos critérios de dosagem e defenderam a adoção do coeficiente de variação como parâmetro de referência de rigor da produção de concreto. Suas ideias prevaleceram na elaboração do texto na ABNT NB 1:1960 – *Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado*.

No campo das aplicações práticas, destacam-se as cartilhas e ábacos de traços de concreto elaborados por Abílio de Azevedo Caldas Branco. Segundo Vasconcelos (1985), esse engenheiro foi quem mais contribuiu, no Brasil, para levar os métodos de dosagem ao alcance dos mestres-de-obra e até aos engenheiros pouco dedicados ao estudo teórico. Evidentemente, tratava-se da primeira aproximação do traço ótimo, em geral com excesso de ligante, antieconômico e pouco sustentável.

Em 1951, o Prof. Eládio Petrucci, da Seção de Aglomerantes e Concretos do ITES, apresentou o método de dosagem por ele desenvolvido. Esse método diferia dos existentes por ser mais simples, desviando-se do enquadramento da granulometria dos agregados a curvas ou faixas preestabelecidas, e por abandonar a composição total com módulo de finura compreendido entre limites estreitos e ótimos. Petrucci enfatizava, no seu método, a composição que conduzisse à máxima trabalhabilidade dos concretos, observada a partir de experimentos em laboratório e obra.

Petrucci transferiu-se para São Paulo e assumiu a disciplina de Materiais de Construção do Curso de Engenharia Civil da EPUSP (PETRUCCI, 1965). A partir da publicação da primeira versão de seu livro “Concreto de Cimento Portland”, patrocinado pela ABCP, em 1963, consolidou a tecnologia do concreto no Brasil, sendo, a partir de então, respeitado e conhecido no Brasil e na América Latina. Seu método de dosagem é adotado com pequenos ajustes pelo IPT, pela EPUSP e por outros centros de pesquisa que passaram a difundi-lo nacionalmente e a empregá-lo nos estudos correntes de dosagem, sendo hoje conhecido por método IBRACON de dosagem dos concretos.

Anos antes, em 1956, foi publicado pela Associação Brasileira de Cimento Portland-ABCP o método para dosagem racional do concreto elaborado por Ary Torres e

Carlos Eduardo Rosman do IPT. Nessa proposta, já eram incorporados os conhecimentos da estatística para a adoção da resistência média de dosagem.

Por ocasião da reunião do Grupo Latino-Americano da *Reunión Internationale de Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions*- GLA-RILEM, ocorrida em Santiago do Chile, em novembro de 1965, o Eng. Francisco de Assis Basílio da ABCP apresentou um resumo das práticas correntes de dosagem do concreto no Brasil, destacando as adotadas e difundidas pelo INT, IPT, ITES e ABCP. Ressaltava que os métodos se destinavam à dosagem dos concretos para as obras correntes de engenharia, uma vez que os concretos pesados, concretos leves, concretos massa e concretos de consistência seca requeriam métodos específicos ou, no mínimo, uma adaptação dos citados.

Gilberto Molinari, do IPT, demonstrando apurada visão tecnológica, fundou junto com Basílio, Petrucci, Falcão Bauer, Kuperman, Prizskulnik, Sbrighi, Paulon, Vasconcelos, Isaia e outros, em 1972, o Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, que passou a representar, a partir de então, o mais expressivo canal de divulgação dos trabalhos sobre concreto no país.

São inúmeras as publicações de interesse no extenso acervo do IBRACON, cabendo ressaltar as comunicações de Hernani Sávio Sobral (1977) sobre a generalização das técnicas de dosagem efetuada a partir do método de Powers; a de Wander Miranda de Camargo (1977), na mesma linha de pensamento de obtenção de um modelo único que possa ser aplicado para representar indistintamente o comportamento do concreto fresco e endurecido em qualquer situação; e a de Simão Prizskulnik (1977) que, pela primeira vez no país, apresentou um trabalho sobre as propriedades reológicas das pastas, argamassas e concretos.

A partir de 1965 ocorreu grande desenvolvimento com o início da construção das grandes barragens brasileiras, no domínio da tecnologia do concreto massa. O eng. Walton Pacelli de Andrade, o eng. Rubens Bittencourt, junto com outros pesquisadores do Laboratório de Furnas, podem ser considerados os pioneiros no Brasil ao apresentarem, em julho de 1981, um método de dosagem para concretos massa.

Em 1984, a ABCP publicou o estudo técnico de autoria de Publio Penna Firme Rodrigues, denominado Parâmetros de Dosagem do Concreto, que representa uma versão adaptada, atualizada, moderna, simples e objetiva do método de dosagem americano, descrito no ACI 211.

Em 1986, Carlos Tango, do IPT, publicou aplicações do método de dosagem na época adotado no Instituto. Em 1992, Helene e Terzian publicaram o *Manual de dosagem e controle do concreto*, que reúne os resultados das pesquisas de mestrado e de doutorado de Paulo Helene levadas a cabo na EPUSP e no IPT por vários anos, com a larga experiência de campo e de laboratório do Eng. Paulo Terzian.

Seguiram-se publicações de grande penetração que introduziram novos aspectos mais contemporâneos como teores elevados de adições, tais como as teses de Geraldo Isaia (1995) e Bernardo Tutikian (2007), conceitos pragmáticos e científicos de compacidade tais como De Larrard (1990) e Vitervo O'Reilly (1998) e outras publicações citadas neste capítulo.

Para sintetizar cronologicamente a evolução nacional e internacional dos métodos de dosagem, apresenta-se, no Quadro 1, um resumo do exposto.

Quadro 1 – Síntese histórica da evolução dos métodos de dosagem dos concretos.

Período	Pesquisador		Contribuição
até 1891, "princípios da tecnologia de cimentos e argamassas"	Joseph Aspdin Louis Vicat Rondelet Préadeau	1824 1828 1830 1881	- patenteia processo de fabricação de cimento Portland. - importância da granulometria da areia; inconvenientes do excesso de água - finura da areia é fundamental. - fundamentos da granulometria descontínua.
1892 a 1951 "fundamentos dos métodos clássicos de dosagem"	René F��ret Fuller Duff Abrams Bolomey Ary Torres Du Sablon Inge Lyse Lobo Carneiro Blanks Valette Petrucci	1892 1901 1918 1925 1927 1927 1932 1937 1944 1949 1951	- lei fundamental de correla��o entre resistência e compacidade. - curva de referência (parábola) para granulometria ideal. - lei universalmente aceita de correla��o entre resistência e rela��o a/c; módulo de finura; cone de abatimento para medida de consistência. - melhora a curva de referência de Fuller. - confirma modelos de F��ret e Abrams e propõe método do módulo de finura no Brasil. - princípios da granulometria descontínua. - demonstra a importância da água por unidade de volume na defini��o da consistência do concreto. - métodos de dosagem do INT com base nas curvas de Bolomey - texto consensual do ACI (na época 613, atual 211). - método de dosagem com base na granulometria descontínua e água de molhagem. - método de dosagem ITERS.
1936 a 1978 "Considera��o dos parâmetros estatísticos"	Paulo S�� Oliveira Walker Morgan Carneiro Leme C&CA Basílio ABNT, NB-1 CEB, CIB, FIP, R��lem, ABNT NBR-6118 ABNT NBR12655	1936 1939 1944 1944 1944 1953 1954 1954 1960 1972 1978 2000	- aplica��o da estatística às características das madeiras. - aplica��o da estatística ao controle da resistência do concreto. - aplica��o dos conceitos da probabilidade �� dosagem do concreto (1%). - dosagem do concreto com base em resistências mínimas (1,0%). - dosagem do concreto com base em resistências mínimas (2,5 %). - conceito moderno de coeficiente de segurança. - s��mpo��s sobre dosagem e controle da qualidade do concreto. - influência do coeficiente de varia��o na dosagem. - adota exclusivamente o coeficiente de varia��o como parâmetro característico da produ��o de concreto. - privilegia o desvio-padrão como parâmetro característico da produ��o de concreto. - adota exclusivamente o desvio-padrão como parâmetro característico da produ��o de concreto. - adota os dois parâmetros como característicos da produ��o de concreto.
1950 a 1978 "teorias abrangentes"	L'Hermite Tattersall Bombed Powers Sobral Camargo Priszkulnik Tattersall	1950 1957 1968 1968 1977 1977 1978	- introduz o modelo reológico para representar o comportamento do concreto fresco. - aprofunda os estudos de reologia. - aprofunda os estudos de reologia do concreto fresco correlacionando-o ao concreto endurecido. - propõe um modelo abrangente de comportamento do concreto. - introduz o modelo de Powers no Brasil. - propõe uma representa��o do comportamento resistente integral do concreto. - introduz os modelos reológicos no Brasil. - publica um resumo das teorias sobre reologia e trabalhabilidade dos concretos frescos.
1958 a 2011 "aperfeiçoamento, simplifica��es e extensão dos parâmetros de dosagem"	Kurt Walz Murdock Priszkulnik & Kirilos Fusco Rodrigues Tango De Larrard Helene & Terzian Geraldo Isaia Viterbo O'Reilly Bernardo Tutikian Kosmatka & Wilson	1958 1960 1974 1979 1990 1986 1990 1992 1995 1998 2007 2011	- introduz a curva de referência da resistência do cimento com a rela��o a/c. - apresenta uma fórmula simplificada de representa��o dos fatores que influem na trabalhabilidade. - introduzem o diagrama de dosagem dos concretos nos estudos de dosagem dos concretos. - ressalta a importância da variabilidade da resistência do cimento sobre a resistência do concreto. - apresenta a versão nacional do método de dosagem do ACI incluindo parâmetros obtidos da correla��es atualizadas. - publica aplica��es do método IPT de dosagem. - introduz conceitos de misturas compactas. - publicam manual sobre dosagem e controle dos concretos no Brasil. - introduz conceito de misturas binárias e ternárias. - introduz metodologia prática de obter misturas compactas. - publica método de dosagem para concretos auto-adensáveis. - PCA publica 15�� versão do manual de dosagem dos concretos.

12.3 Definições e Terminologia: Resistência Média de Dosagem

A resistência média prevista para a dosagem não é diretamente o f_{ck} e sim o f_{cmj} . Para determinação do f_{cmj} adota-se a equação recomendada na ABNT NBR 12655:2006:

$$f_{cmj} = f_{ck} + 1,65 \cdot s_d \quad (\text{Equação 4}) \quad e \quad s_d = k_n \cdot s_n \quad (\text{Equação 5})$$

em que:

f_{cmj} = resistência média do concreto à compressão a j dias de idade, em MPa;

f_{ck} = resistência característica do concreto à compressão, em MPa;

s_d = desvio-padrão da dosagem, em MPa;

k_n = coeficiente que depende do número n de resultados disponíveis;

s_n = desvio padrão obtido de uma amostra com n resultados disponíveis;

n = número de ensaios disponíveis.

Observa-se que tanto para o f_{cmj} quanto para o f_{ck} as idades de projeto não estão definidas, cabendo ao projetista estrutural da edificação, em conjunto com o tecnologista de concreto, definir a idade de controle e cálculo destes parâmetros. A idade depende do período que se pretende desenformar a estrutura ou aplicar tensão nos cabos, iniciar um carregamento construtivo dos próximos andares, o tempo que se pretende ocupar o prédio, entre outros fatores únicos de cada empreendimento. Quanto maior for a idade de controle, mais econômico e sustentável será o concreto. Porém, se não especificado, entende-se como parâmetro os 28 dias.

O Quadro 2 apresenta os valores de k_n em função do número (n) de ensaios.

Quadro 2 – Valores de k_n em função do número de ensaios.

n	20	25	30	50	200
k_n	1,35	1,30	1,25	1,20	1,10

O Quadro 3 apresenta o valor do desvio-padrão, de acordo com a medição dos componentes do concreto e a verificação do teor de umidade, ou seja, em função do rigor da produção do concreto.

Quadro 3 – Valores de s_d em função do rigor da produção.

s_d	condição	classe	tipo de concreto
4,0	A	C10 a C80	Cimento e agregado medidos em massa e água medida em medidor com determinação do teor de umidade dos agregados.
5,5	B	C10 a C25	Cimento medido em massa e a água é medida em volume mediante dispositivo dosador. Os agregados são medidos em massa combinada com volume para o C25 e em volume para até C20, com a umidade do agregado miúdo determinada ao menos três vezes durante o turno de concretagem, realizando as correções através da curva de inchamento da areia.
7,0	C	C10 e C15	Cimento medido em massa, os agregados em volume, água medida em medidor e a umidade dos agregados sendo estimada.

Para a **condição de preparo A**, é necessária a utilização de balanças de previsão de várias capacidades, ou equipamentos similares, além de uma organização e infraestrutura equivalente no local de preparo do concreto, o que inviabiliza sua configuração na grande maioria de obras, e até em muitas empresas de pré-fabricados. A **condição de preparo C** também é inviável em muitos casos, mas devido à classe de resistência à compressão do concreto permitida, de até 15MPa, o que não é comum quando se abrange os concretos para fins estruturais. Por isso, a empresa para dosar concreto no local de aplicação provavelmente irá se restringir à **condição de preparo B** e apenas até a resistência à compressão de 25MPa, impossibilitando sua utilização para fins mais nobres e até em locais com maior agressividade, como nas zonas de respingo de maré, industriais ou nas marítimas. Este fato é um problema sério em cidades e regiões do país, e são muitas, que não contam com empresas fornecedoras de concreto pré-misturado.

Observa-se que o limite da ABNT NBR 12655:2006 para a **condição de preparo B**, os 25MPa, é extremamente conservador. Com a forma de dosagem da mistura estipulada neste item, pode-se facilmente chegar a concretos de até 50MPa, sem comprometer a confiabilidade da operação.

12.4 Leis Clássicas da Tecnologia do Concreto

Em tecnologia de concreto, tem sido adotados como leis de comportamento os seguintes modelos que governam a interação das principais variáveis em jogo:

- Modelo de Powers (1966) conforme já apresentado neste capítulo, ou Lei de Abrams (1918): “a resistência de um concreto, numa determinada idade (f_{cj}), é inversamente proporcional à relação água cimento (a/c).”

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{9/c}} \quad (\text{Equação 6})$$

- Lei de Lyse (1932): “fixados o cimento e agregados, a consistência do concreto fresco depende preponderantemente da quantidade de água por m³ de concreto” e pode ser, simplificada, expressa por:

$$m = k_3 + k_4 \bullet \frac{a}{c} \quad (\text{Equação 7})$$

- Lei de Prizkulnik & Kirilos (1974): “o consumo de cimento por m³ de concreto varia na proporção inversa da relação em massa seca de agregados/cimento (m).”

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \bullet m} \quad (\text{Equação 8})$$

em que:

f_{cj} = resistência à compressão do concreto para a idade de j dias, em MPa;

m = relação em massa seca de agregados/cimento, em kg/kg;

a/c = relação em massa de água/cimento, em kg/kg;

C = consumo de cimento por m³ de concreto adensado em kg/m³;

k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 e k_6 são constantes particulares de cada conjunto de mesmos materiais.

12.5 Procedimento de Dosagem Experimental: Método IBRACON

12.5.1 Conceituação

Como apresentados, vários são os métodos de dosagem disponíveis na literatura especializada. Considera-se, no entanto, que o método proposto inicialmente por Eládio Petrucci (1965) e posteriormente modificado com contribuições de pesquisadores do IPT, Prizskulnik, Kirilos, Terzian e Tango, e da EPUSP, Helene, é um dos métodos mais versáteis, simples e capazes de fornecer uma resposta profícua aos requisitos exigidos de um concreto, atendendo tanto às exigências técnicas dos projetistas estruturais, quanto às econômicas, de sustentabilidade e de produtividade dos construtores e usuários dos concretos.

O método, na sua versão atual, busca obter o comportamento mecânico e reológico do concreto de forma unívoca com os materiais escolhidos. É um método que pode classificar-se como teórico-experimental, em que há uma parte experimental de laboratório precedida por uma parte analítica de cálculo baseada em leis de comportamento dos concretos.

O método considera a relação a/c como o parâmetro mais importante para o concreto estrutural. Definidos os materiais e essa relação a/c, a resistência e durabilidade do concreto passam a ser únicas, sempre que seja mantida a mesma trabalhabilidade da mistura.

Esse método não exige conhecimentos prévios sobre o cimento, as adições e os agregados, apesar de que, sob o ponto de vista da durabilidade, sempre é conveniente contar com informação de ensaios prévios de laboratório, como: reatividade álcali-agregado, presença de sulfatos, de matérias carbonosas, presença de pó e de argila, granulometria e outros.

É um método que combina conceitos teóricos de comportamento do concreto de uma forma analítica desenvolvida em gabinete, mas continua requerendo um estudo experimental em laboratório. Esse experimento, nesse caso, é fundamental, pois, ao se fixar o mesmo abatimento para diferentes proporções de teor de argamassa seca (α), pretende-se encontrar a mínima quantidade de água para obter a trabalhabilidade especificada. Dessa forma, é otimizada a proporção entre agregados miúdos e graúdos com bases experimentais nas quais está implicitamente incluída a interferência do cimento, agregados, adições e de outros materiais utilizados.

Isso lhe confere uma vantagem em relação a outros métodos que apenas tratam de otimizar, por separado, por um lado, a mistura de agregado miúdo/agregado graúdo com bases em curvas granulométricas ideais, e por outro a pasta de cimento, adições e aditivos, esperando que, assim, isoladamente otimizadas, conduzirão a um concreto ótimo ao serem juntadas na betoneira.

Os métodos do ACI 211.1-91, de Carbonari, de O'Reilly, De Larrard e outros que se utilizam desses princípios, parecem não considerar a grande influência da granulometria, da finura e das características do cimento e das suas adições no comportamento final do concreto fresco e endurecido.

Considerar a participação dos finos torna-se ainda mais interessante quando se considera que os cimentos atuais contêm muitas adições incorporadas (escórias, pozolanas, calcário, sílica ativa, metacaulim e outras) que podem ter grande influência na otimização final das proporções dos diferentes materiais constitutivos da mistura a ser escolhida.

Em resumo, o método IBRACON entende que a melhor proporção entre os agregados disponíveis é aquela que consome a menor quantidade de água para obter um dado abatimento requerido e faz isso considerando a interferência do aglomerante (cimento + adições) na proporção total de materiais. Portanto não se trata de obter a máxima compacidade do esqueleto granular, mas sim de obter o mínimo consumo de água para uma requerida consistência, o que vai resultar na máxima resistência à compressão daquele concreto. Poder-se-ia associar a uma “mistura” dos métodos baseados nas granulometria contínua (máxima trabalhabilidade) com métodos que se fundamentam na granulometria descontínua (máxima compacidade).

Os limites de aplicação conhecidos desse método IBRACON são:

- resistência à compressão: $5\text{MPa} \leq f_c \leq 150\text{MPa}$
- relação a/c: $0,15 \leq a/c \leq 1,50$
- abatimento: $0\text{mm} \leq \text{abatimento} \leq \text{autoadensável}$
- dimensão máxima do agregado: $4,8\text{mm} \leq D_{\text{max}} \leq 100\text{mm}$
- teor de argamassa seca: $30\% < \alpha < 90\%$
- fator água/ materiais secos: $5\% < H < 12\%$
- módulo de finura do agregado: qualquer
- distribuição granulométrica dos agregados: qualquer
- massa específica do concreto: $> 1500\text{kg/m}^3$

O método adota ainda como modelos de comportamento:

• teor de argamassa seca $= \frac{1+a}{1+m}$ (Equação 9)

• relação água/materiais secos: $H = \frac{a/c}{(1+m)}$ (Equação 10)

• consumo de cimento/ m^3 : $C = \frac{\gamma}{1 + a + p + \frac{a}{c}}$ (Equação 11)

em que:

C = consumo de cimento por m^3 de concreto adensado em kg/m^3 ;

γ = massa específica do concreto, medida em kg/m^3 ;

a/c = relação água/cimento em massa em kg/kg ;

a = relação agregado miúdo seco/cimento em massa em kg/kg ;

$m = a + p$ = relação agregados secos/cimento em massa em kg/kg ;

p = relação agregado graúdo seco/cimento em massa em kg/kg ;

α = teor de argamassa seca na mistura seca deve ser constante para uma determinada família para assegurar a mesma coesão do concreto fresco, em kg/kg ;

H = relação água/materiais secos deve ser constante para uma determinada família para assegurar o mesmo abatimento, em kg/kg ;

k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 e k_6 à constantes que dependem exclusivamente do processo, ou seja:

- dos materiais (cimento, agregados, adições, aditivos e fibras utilizados);
- da consistência do concreto fresco (abatimento);
- dos equipamentos (betoneira);
- da mão-de-obra;
- das operações de ensaio (moldagem, cura, capeamento, ensaio)

12.5.2 Principais passos do método IBRACON

Os passos principais do método IBRACON estão indicados no fluxograma da Figura 1.

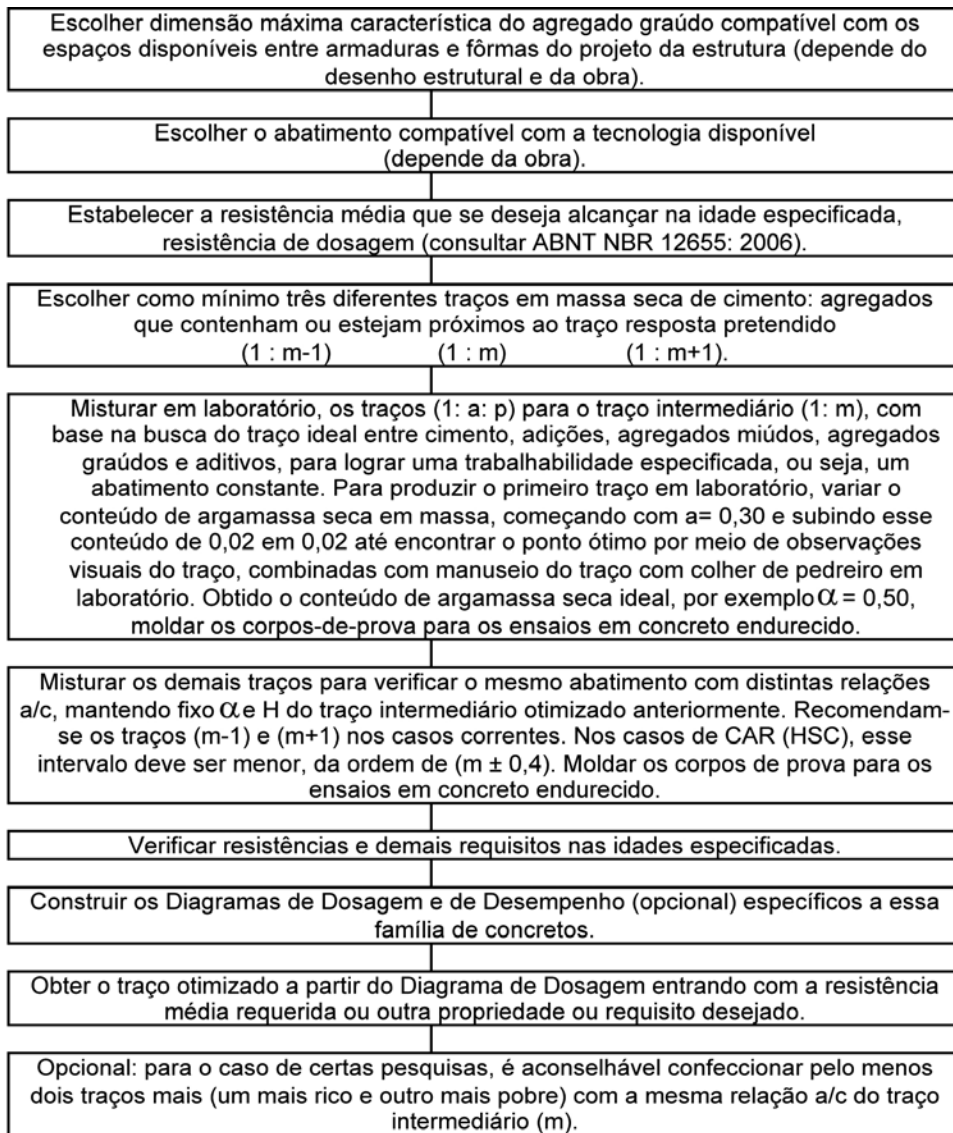


Figura 1 – Diagrama de fluxo do método de dosagem IBRACON.

Para esse método, o traço resposta deve ser obtido, de preferência, por interpolação ou, eventualmente, pela extrapolação, para um determinado abatimento, atendendo à resistência requerida ou às demais propriedades requeridas.

12.5.3 Sequência de atividades para obtenção do traço básico

Uma sequência bem detalhada, ilustrada com fotos, com formulários e exemplos de uma correta utilização do método de dosagem, pode ser encontrada no manual de autoria de Helene & Terzian (1992), o qual tem 350 páginas e é considerado a primeira publicação detalhada, didática e completa sobre o método aqui exposto.

Para fins deste capítulo, recomenda-se a seguinte sequência de atividades a serem desenvolvidas no laboratório para bem conduzir a parte experimental do método de dosagem apresentado:

- 1) Imprimir a betoneira com uma porção de argamassa (> 20 kg) com o traço 1:2, $a/c < 0,6$. Deixar o material excedente cair livremente, quando a betoneira estiver com a abertura (boca) para baixo e em movimento;
- 2) Após pesar e lançar os primeiros materiais na betoneira, deve-se misturá-los durante cinco (5) minutos, com uma parada intermediária para limpeza das pás das betoneiras. Ao final, verificar se é possível efetuar o abatimento do tronco de cone, ou seja, se há coesão e plasticidade adequada;
- 3) Para a introdução dos materiais de modo individual dentro da betoneira, deve-se obedecer à seguinte ordem preferencial: água (80%); agregado graúdo (100%); fibra de aço, (100%); cimento (100%); adições minerais (100%); aditivo plastificante (100%); agregado miúdo (100%). Misturar por cinco (5) minutos. Claro está que as fibras, as adições e os aditivos são dispensáveis na maioria dos casos e basta não os incluir na betoneira, mas a sequência é sempre a mesma;
- 4) A seguir, quando for o caso, adicionar as fibras de polipropileno e o superplastificante de terceira geração (policarboxalato) e misturar por mais 20 minutos (*obs. esse prazo apesar de aparentemente longo, é necessário em certas situações conforme experiência dos autores*).
- 5) Adicionar água aos poucos, observando e controlando até obter o abatimento requerido;
- 6) Para a definição do teor ideal de argamassa, deve-se realizar o procedimento baseado em observações práticas descrito a seguir, para cada teor de argamassa;
 - a) Com a betoneira desligada, retirar todo material aderido nas pás e superfície interna e misturar novamente;
 - b) Passar a colher de pedreiro sobre a superfície do concreto fresco, introduzir na massa e levantar no sentido vertical para verificar se a superfície exposta está com vazios, indicando falta de argamassa;
 - c) Introduzir novamente a colher de pedreiro no concreto e retirar uma parte do mesmo, levantando-o até a região superior da cuba da betoneira. Com o material nessa posição, verificar se há desprendimento de agregado graúdo da massa, o que indica falta de argamassa na mistura.

Após essa observação, soltar a porção de concreto que está sobre a colher e verificar se ela cai de modo coeso e homogêneo, o que indica teor de argamassa adequado;

- d) Após o ensaio de abatimento, estando ainda o concreto com o formato de tronco de cone, deve-se bater suavemente na lateral inferior do mesmo, com auxílio da haste de socamento, com o objetivo de verificar sua queda. Se esta se realiza de modo homogêneo e coeso, sem desprendimento de porções, indica que o concreto está com teor de argamassa considerado adequado;
 - e) Na mesma amostra em que foi feito o ensaio de abatimento, deve ser observada se a superfície lateral do concreto está compacta, sem apresentar vazios;
 - f) Outra observação a ser realizada é se ao redor da base de concreto com formato de tronco de cone aparece uma camada de água oriunda da mistura. Essa ocorrência evidencia que há tendência de exsudação de água nesta mistura por falta de finos, que pode ser corrigida com mudança na granulometria da areia, colocar ou aumentar o teor de adições minerais ou de mais cimento;
 - g) O teor final de argamassa seca depende ainda de um fator externo que é a possibilidade de perda de argamassa no processo de transporte e lançamento (principalmente a quantidade retida na fôrma, na armadura, na tubulação da bomba, ou quando se utiliza de bica de madeira para o lançamento). Esse valor em processos usuais pode ser estimado entre 2% a 4% de “perdas”;
 - h) Realizar uma nova mistura com o traço intermediário, com o teor de argamassa definitivo e determinar todas as características do concreto fresco:
 - relação água/cimento, necessária para obter a consistência desejada;
 - consumo de cimento por metro cúbico de concreto;
 - consumo de água por metro cúbico de concreto;
 - massa específica do concreto fresco;
 - abatimento do tronco de cone;
 - teor de ar aprisionado.
- e calcular as constantes dessa família do traço intermediário (m):
- teor de argamassa seca (α) em kg/kg;
 - relação água/materiais secos (H) em kg/kg.

Obs.: o acerto do teor de argamassa seca (α) nada mais é do que a substituição gradativa de agregado graúdo pelo agregado miúdo, sem interferir no consumo de cimento. Por exemplo, um traço 1: 5, α de 50% apresenta um traço unitário de 1: 2: 3, ao aumentarmos o α para 52%, o traço fica 1: 2,12: 2,88, ou seja, com o mesmo consumo de cimento, com 0,12 a mais de

areia e com 0,12 a menos de brita. Claro que, pela tecnologia do concreto, sabe-se que ao aumentar o α aumenta a quantidade de areia, o que diminui o módulo de finura dos agregados.

12.5.4 Traços auxiliares

Mantendo constante o teor de argamassa (α) e a relação da água/materiais secos (H), calcular analiticamente as proporções para, pelo menos, mais dois traços, um mais rico tipo (1: m-1 ou 1: m-0,5) e um mais pobre tipo (1: m+1 ou 1: m+0,5). Produzir esses traços em laboratório, com os mesmos materiais, mão-de-obra e equipamentos e, se possível, nas mesmas condições ambientais. Sempre colocar somente 80% da água e “dosar” os 20% restantes para “ajustar” o abatimento (trabalhabilidade) desejado. Medir no final a quantidade de água efetivamente necessária para conseguir o *slump* requerido. Para esses traços, moldar e ensaiar corpos-de-prova e fazer todas as determinações no concreto fresco.

12.5.5 Traço final para obra

Com os dados e resultados obtidos no estudo experimental (mínimo três traços da mesma família e com mesmo abatimento), deve-se construir as correlações entre traço de concreto e relação água/cimento, $f_c = \text{função}(a/c)$, consumo de cimento e traço, $C = \text{função}(m)$ e relação total de agregados secos/cimento, $m = \text{função}(a/c)$ utilizando as leis de comportamento em tecnologia de concreto adotadas neste método e o diagrama de dosagem.

A construção dessas correlações dará origem ao chamado Diagrama de Dosagem, que é válido somente para o mesmo tipo e classe de cimento e adições minerais, mesmos agregados, mesmos equipamentos e manutenção das demais variabilidades e materiais sob controle. Com esse diagrama, é possível obter vários concretos com propriedades bem distintas quando endurecido, porém pertencentes sempre a uma mesma “família”.

12.6 Construção do Diagrama de Dosagem

Com os resultados obtidos e processados, deve ser construído o chamado “Diagrama de Dosagem”, introduzido por Prizskulnik & Kirilos, em 1974, que corresponde ao modelo de comportamento das misturas do estudo em andamento e que facilita sobremaneira o entendimento do comportamento dessa família de concretos de mesmo abatimento, mas de propriedades muito diferentes depois de endurecidos, conforme se apresenta de forma ilustrativa na Figura 2.

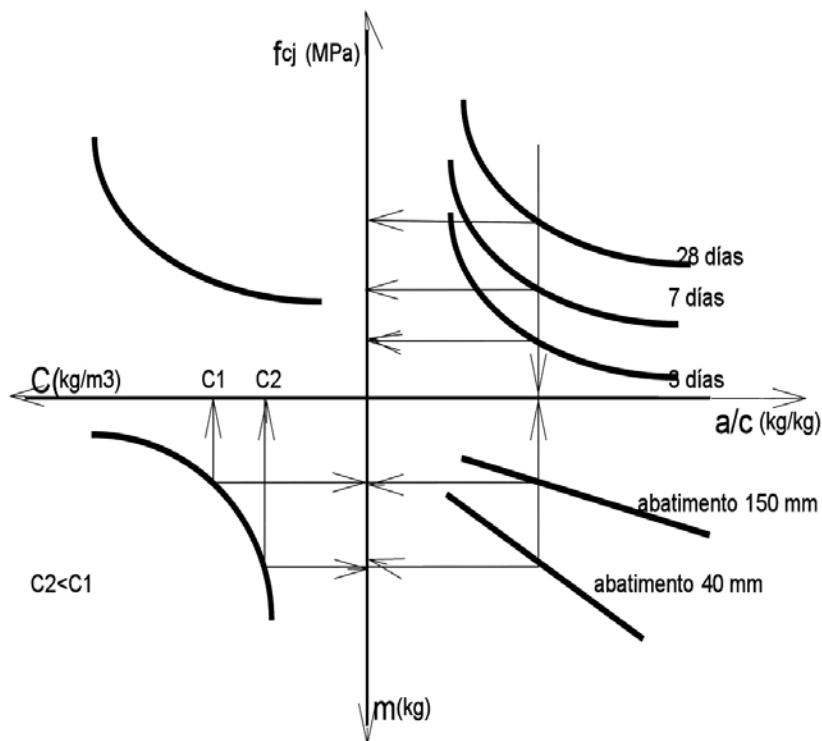


Figura 2 – Diagrama de dosagem dos concretos de cimento Portland.

O “Modelo de Comportamento do Concreto da Figura 2 mostra:

- no 1º quadrante: ajustar aos resultados obtidos a lei de Abrams (1918) ou o Modelo de Powers (1966) já discutido neste capítulo, através de métodos dos mínimos quadrados, por exemplo;
- no 2º quadrante: ajustar aos resultados obtidos a lei de Lyse (1932);
- no 3º quadrante: ajustar aos resultados pela lei de Prizskulnik & Kirilos (1974);
- no 4º quadrante: correlacionar a resistência à compressão com o consumo de cimento (rendimento em MPa/kg), observando que, preferencialmente, deve-se considerar somente consumo de cimento Portland (sem adições), pois assim haverá uma melhor avaliação indireta da sustentabilidade em termos de redução de emissão de gases estufa.

12.6.1 Exemplo

Apresenta-se na Figura 3 o Diagrama de Dosagem típico de uma família de concretos com consistência fluida, mesmo teor de argamassa e mesmos materiais, porém com diferentes resistências, módulos, permeabilidade, difusibilidade, etc.

Observe-se que, no 4º quadrante, a análise de sustentabilidade tanto pode ser

realizada tomando-se por base o consumo total de materiais cimentícios (cimento + escória + metacaulim), quanto tomando-se por base apenas o consumo de cimento Portland, uma vez que é o clínquer o maior responsável, nesta fase que já se dispõem dos resíduos industriais, pela emissão de gases estufa.

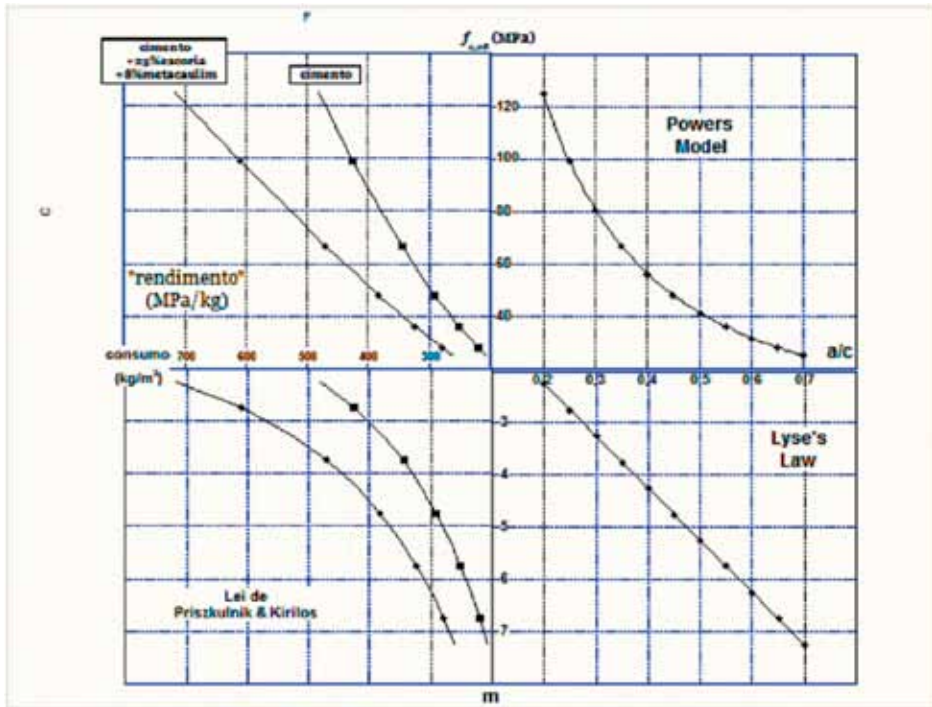


Figura 3 – Diagrama de dosagem típico de uma família de concreto de mesmos materiais e mesma consistência, porém com propriedades (resistência, módulo de elasticidade, resistividade, difusibilidade, absorção de água, permeabilidade, entre outras) bem diferentes qualquer que seja o traço escolhido.

O rendimento no caso de considerar todos os materiais cimentícios variou neste caso de 0,17MPa/kg (5,8kg/MPa) para $f_c = 120\text{MPa}$ a 0,11MPa/kg (8,7kg/MPa) para $f_c = 40\text{MPa}$. Considerando apenas o consumo de cimento, obtêm-se 0,25MPa/kg (4kg/MPa) para $f_c = 120\text{MPa}$ e 0,15MPa/kg (6,7kg/MPa) para $f_c = 40\text{MPa}$.

Essa constatação confirma uma vez mais que, em princípio e para essa análise expedita somente em nível de material, os concretos de alta resistência são mais sustentáveis que os concretos de resistência usual.

12.6.2 Curva de custo no Diagrama de Dosagem

Além de todas as curvas mencionadas, ainda pode-se incluir a **curva de custo** dos concretos, no quarto quadrante, correlacionando o custo com a resistência à

compressão. Este procedimento, introduzido nos anos 70 em uma disciplina da pós-graduação da POLI pelos professores Paulo Helene e Carlos Tango, está descrito com detalhes em Tutikian (2007). Na Figura 4 é mostrado um exemplo típico do descrito.

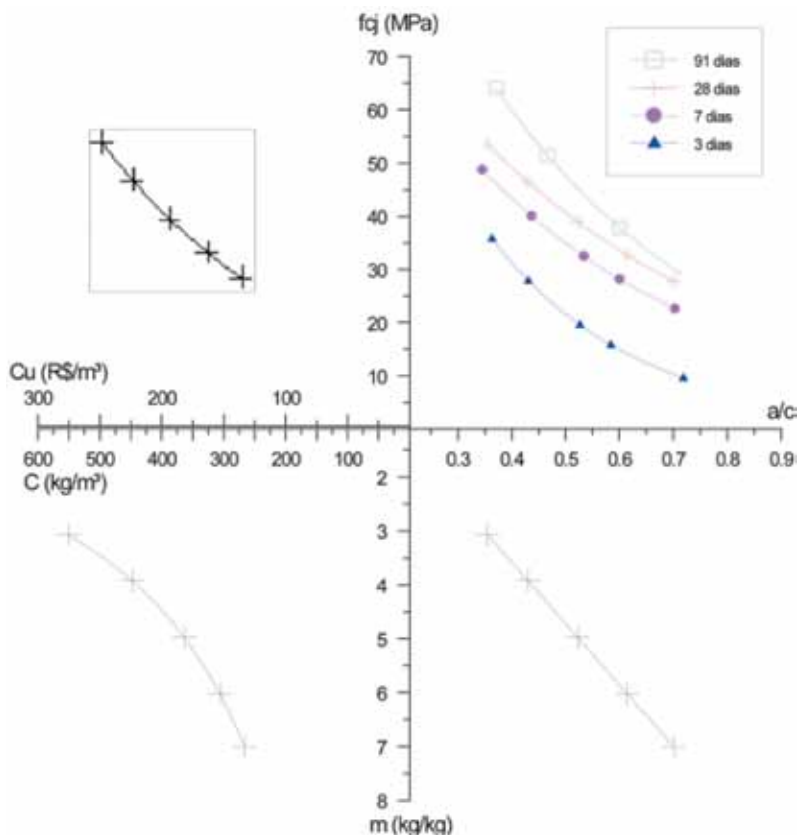


Figura 4 – Diagrama de Dosagem com a curva de custo no quarto quadrante, correlacionando resistência à compressão e custo de concreto por metro cúbico. O gráfico deve sempre ser utilizado no sentido horário a partir da curva de custo e para aproximações.

Observa-se que o eixo negativo X é utilizado para representar o consumo de cimento por m³ de concreto e o custo, em reais por m³. Este tipo de análise é muito importante para todos os casos, pois uma dosagem eficiente é aquela que chega ao traço de concreto para suprir as necessidades técnicas ao menor custo possível. Em locais onde há situações específicas, como no caso do Norte do Brasil, onde o custo do agregado graúdo é elevado em comparação a outras regiões, esta análise é fundamental. Nestes casos, utilizar argamassa como material estrutural é mais econômico do que o concreto, apesar de nem sempre ser viável tecnicamente. Por isso, uma curva de custo fornece uma resposta rápida ao profissional responsável pela dosagem, permitindo que haja uma velocidade de resposta rápida aos desafios particulares.

12.6.3 Diagrama de Desempenho

Outra possibilidade para o profissional responsável pela dosagem de um concreto é a realização de um **Diagrama de Desempenho**, também descrito com detalhes em Tutikian (2007). Esse diagrama permite a plotagem no mesmo gráfico da resistência à compressão junto com outras propriedades mecânicas e de durabilidade, como o módulo de deformação, a resistência à tração, a permeabilidade, a penetração de íons cloretos, entre outros. Similarmente, Isaia (1995) apresenta esquema semelhante para dosagem em função de propriedades da durabilidade, para concreto com adições minerais. Um exemplo do Diagrama de Desempenho encontra-se na Figura 5.

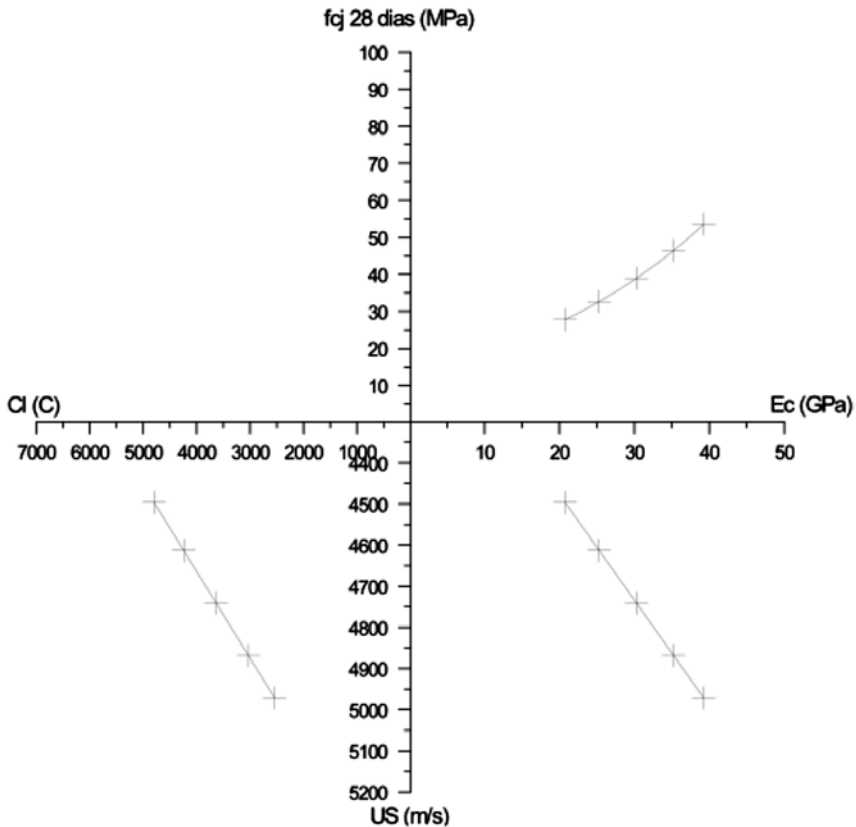


Figura 5 – Exemplo de Diagrama de Desempenho, correlacionando resistência à compressão, módulo de deformação, velocidade de propagação das ondas de ultra-som e penetração de íons cloretos, para a mesma família de concreto.

Observa-se que, partindo de qualquer valor de resistência à compressão, chega-se aos valores das outras propriedades, ou vice-versa. Por exemplo, pode-se fixar a penetração de íons cloretos em 1500 Coulombs, devido à agressividade do meio, e a partir disso, verificar qual resistência à compressão

terá a mistura. Claro que sempre deve-se realizar os cálculos através das equações de comportamento e o gráfico é apenas usado para uma rápida e aproximada visualização. Após determinar a resistência à compressão, utiliza-se o Diagrama de Dosagem para determinar todos os parâmetros do traço, inclusive o custo.

12.7 Avaliação das Operações de Ensaio

As operações de ensaio podem aumentar a variabilidade do concreto e obrigar à elevação da resistência média de dosagem com consequente aumento do custo do concreto.

O desvio-padrão do processo de produção e ensaio, mais conhecido por desvio-padrão do concreto s_c , é resultado de:

$$s_c^2 = s_{c,ef}^2 + s_e^2 \quad (\text{Equação 12})$$

em que:

s_c = desvio-padrão do processo de produção e ensaio do concreto, em MPa (geralmente adota-se $s_d = s_c$);

$s_{c,ef}$ = desvio-padrão efetivo ou real do processo de produção do concreto, em MPa;

s_e = desvio-padrão das operações de ensaio, em MPa.

Assim, $v_e = s_e / f_{cm}$ é definido como coeficiente de variação das operações de ensaio, em porcentagem.

O coeficiente de variação de ensaio v_e deve estar adequado aos limites indicados na Quadro 4 que definem a eficiência das operações de ensaio (ABNT NBR 7212:1984).

Quadro 4 – Coeficiente de variação das operações de ensaio.

local de preparo do concreto	coeficiente de variação			
	nível 1	nível 2	nível 3	nível 4
na central	3%	3 a 5%	5 a 6%	>6%
no laboratório	2%	2 a 4%	4 a 5%	>5%

Cálculo de s_e e v_e

$$s_e = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{1,128 \cdot n} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_{c1} - f_{c2})}{1,128 \cdot n} \quad (\text{Equação 13}) \quad \text{e} \quad v_e = \frac{s_e}{f_{cm}} \quad (\text{Equação 14})$$

em que:

A_i = diferença (amplitude) entre o maior e o menor resultado obtido dos corpos-de-prova irmãos que representam um mesmo exemplar;

n = número de exemplares considerados;

f_{cm} = média dos 2n corpos-de-prova ($n > 9$);

f_{c1}, f_{c2} = resultados de cada corpo-de-prova de um mesmo exemplar, irmãos;

1,128 = constante da teoria das probabilidades referida a 2 cps irmãos, pois, no caso de 3 ou mais, muda o valor da constante.

Quanto maior for o desvio padrão e o coeficiente de variabilidade dos concretos, menos homogênea é a produção, fazendo com que seja necessário aumentar o f_{cm} , para não comprometer o f_{ck} de projeto. Por isso, diz-se que investir em qualidade na produção, para manter os resultados mais homogêneos possíveis, gera um grande benefício econômico à empresa.

12.8 Estudo de Dosagem para Fins de Pesquisas

Um estudo de dosagem de concreto é necessário e conveniente para a maioria dos trabalhos de pesquisa experimental, de tal sorte que o tema é amplamente estudado nos diferentes centros de ensino e pesquisa do país.

Recomenda-se para a pesquisa de uma determinada propriedade do concreto, por exemplo, o módulo de elasticidade ou resistência à tração por compressão diametral ou qualquer outra propriedade, que seja realizado um estudo de dosagem com, pelo menos, cinco traços. Utilizam-se os três traços já apresentados (intermediário mais dois auxiliares, todos de mesma consistência) e moldam-se corpos-de-prova para mais dois traços especiais de mesma a/c do traço intermediário (porém consistência variável). Assim tem-se: 1: m-1; 1:m:a/c; 1:m+1; 1:m-1:a/c; 1:m+1:a/c.

Como referência histórica, pode-se recomendar a consulta a Helene (1987) e Monteiro, Helene & Kang (1993). É comum verificar na literatura que um plano inadequado de dosagem pode conduzir a conclusões equivocadas e contraditórias.

12.9 Outros Métodos de Dosagem

12.9.1 Método do ACI

Atualmente, o método do *American Concrete Institute*, conhecido por ACI 211.1-91 (*Reapproved*, 2009), denominado *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete* considera tabelas e gráficos elaborados a partir de valores médios de resultados experimentais. O método abrange uma classe de resistência à compressão do concreto, aos 28 dias de idade, entre 15MPa e 40MPa e relações a/c de 0,39 a 0,79. A consistência do concreto fresco para bons resultados do método deve estar de plástica (50mm) à fluída (150mm).

Este método foi desenvolvido de maneira a fornecer um baixo teor de areia para misturas plásticas, que além do benefício econômico, permite ao operador identificar se a mistura estiver pouco ou muito argamassada, apenas visualmente (SHILSTONE, 1990). Caso haja necessidade de correção do traço, uma vez que a mistura esteja pouco argamassada, deve-se acrescentar mais areia à mistura, mantendo-se constante a relação a/c.

A desvantagem do método é que os valores a partir dos quais é realizado o proporcionamento dos materiais são todos tabelados e essas tabelas não abrangem todos os tipos de materiais existentes. No caso da resistência à compressão obtida ser diferente da esperada, é preciso que se faça uma nova dosagem, a fim de corrigir-se a relação a/c, e um novo acerto de trabalhabilidade com novo teor de argamassa.

O ACI apresenta ainda um método de dosagem para concretos leves e estruturais, denominado *ACI 211.2-98 (Reapproved, 2004) – Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete*; outro método para concretos de consistência seca é o *ACI 211.3R-02 (Reapproved, 2009) – Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete*; e ainda há um quarto método de dosagem para concretos de alta resistência, denominado *ACI 211.4R-08. Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials*.

Todos esses métodos do ACI padecem dos mesmos problemas de estarem limitados a valores tabelados e a conduzirem a uma única mistura-resposta que, se não atender, exigirá novo estudo experimental. O método IBRACON exige apenas um estudo experimental que dá origem a uma família cujas propriedades ficam explicitadas no Diagrama de Dosagem dispensando novos estudos experimentais para aqueles mesmos materiais.

12.9.2 Método de De Larrard

Trata-se de um método para composição, em princípio, de qualquer tipo de concreto, de resistência normal, de alto desempenho, com pós-reativos, jateado, autoadensável, compactado a rolo e de diferentes densidades.

François De Larrard (1990) é um pesquisador francês e seu método se baseia no empacotamento de partículas, visando à máxima compacidade possível e diminuição do risco de segregação, para otimização da mistura granular seca, recuperando muito das idéias dos tradicionais métodos de granulometria descontínua do início do século XX.

O método não é de fácil aplicação, por depender de programas computacionais e ensaios de viscosidade com viscosímetros e reômetros de difícil obtenção. A determinação do pacote granular é através da clássica forma de objetivar a combinação dos agregados de forma que minimize a porosidade, diminuindo o consumo de pasta na mistura. No passado, os métodos de granulometria descontínua e de máxima compacidade por tentativa e erro para se chegar ao máximo empacotamento granulométrico também foram utilizados com sucesso. A contribuição deste método francês é obter a máxima compactação com recursos computacionais, em princípio válida para quaisquer forma e tamanho de partículas de agregados.

Uma vez obtida a máxima compacidade da mistura granular, o método de *De Larrard* se propõe a viabilizar a correlação com propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido através de formulações matemáticas equivalentes aos modelos clássicos de correlação entre propriedades, próprios da tecnologia de concreto.

12.9.3 Método de Vitervo O'Reilly

Trata-se de um método para composição, em princípio, de qualquer tipo de concreto, principalmente concretos correntes e concretos de alta resistência. O método tem forte base experimental e está focado na economia de cimento.

Vitervo O'Reilly (1998) é um pesquisador cubano, que já esteve no Brasil várias vezes, tendo seus cursos nos Congressos do IBRACON a maior audiência entre todos os cursos oferecidos nos últimos 10 anos. Seu método foi desenvolvido na década de 80 e publicado em vários países: Cuba, Espanha, México, Colômbia, Vietnam, China, Brasil, entre outros. O princípio é semelhante ao de De Larrard e também se baseia no empacotamento de partículas, visando à máxima compacidade possível e à diminuição do consumo de cimento, para otimização da mistura granular seca, recuperando muito das ideias dos métodos de granulometria descontínua.

O método também não é de fácil aplicação, por depender de extenso programa experimental, em que através de passos a serem seguidos no laboratório obtém-se a mistura mais compacta. No fundo, a determinação do pacote granular é através da clássica forma de objetivar a combinação dos agregados de forma que minimize a porosidade, diminuindo o consumo de pasta na mistura.

12.10 Concretos Especiais

Concretos especiais são aqueles que apresentam características específicas para atender às necessidades das obras onde os concretos convencionais não podem ser aplicados. Eles melhoram as deficiências do concreto convencional ou incorporam propriedades não usuais ao material correntemente utilizado.

Os principais concretos especiais são: o concreto de alta resistência, de alto desempenho, autoadensável, massa, rolado, leve, pesado, com resíduos reciclados, projetado, com polímeros, fibras, colorido, branco, graute, com aditivos e adições especiais, e os concretos do futuro: com cura interna, condutivos eletricamente, com retração reduzida ou nula, concreto auto limpante, concreto fotogravado, concreto translúcido e outros.

12.10.1 Concreto de Alta Resistência (CAR ou HSC)

Consideram-se concretos de alta resistência CAR (ou HSC, *high strength concrete*) os concretos que superam a resistência à compressão de 50MPa aos 28 dias de idade. Para obter essas resistências, é necessário que sejam compactos e apresentem reduzida microfissuração, razão por que muitas vezes são confundidos com concretos de alto desempenho CAD (ou HPC, *high performance concrete*).

Na realidade, entende-se por HPC ou CAD todos os concretos que tenham alguma propriedade acima das usuais, não necessariamente somente a resistência.

A FHWA – *Federal Highway Administration* dos Estados Unidos, conforme relatado por Goodspeed, Vanikar & Cook (1998), classifica os concretos de acordo com vários parâmetros. No caso do Brasil, é conveniente considerar pelo menos os requerimentos indicados no Quadro 5, adaptados da FWHA.

Segundo Maldonado (2005), os métodos de dosagem para dosar CAD devem atender aos objetivos de proporcionar misturas facilmente manuseáveis com resistências mecânicas elevadas, bem como proporcionar uma durabilidade compatível com as expectativas do projeto, mas que, ao mesmo tempo, sejam simples, rápidos, econômicos e permitam correções futuras do traço inicial com grande facilidade.

Para os estudos de dosagem dos concretos CAD ou HPC, CAR ou HSC, CAA ou SCC, o método IBRACON se aplica na íntegra, cuidando apenas de se manter o consumo de cimento e a relação a/c baixos pelo uso inteligente de aditivos redutores de água de grande eficiência, conforme demonstrado por Tutikian (2007).

Quadro 5 – Requerimentos recomendáveis para concretos CAR ou CAD.

Propriedade	Método de ensaio	Classes de concreto			
		D	C	B	A
Resistência à carbonatação (coeficiente de carbonatação).	RILEM CPC 18 exposição natural	$\leq 1,8$ $\frac{mm}{\sqrt{ano}}$	$\leq 1,3$ $\frac{mm}{\sqrt{ano}}$	$\leq 0,9$ $\frac{mm}{\sqrt{ano}}$	$\leq 0,50$ $\frac{mm}{\sqrt{ano}}$
Resistência à delaminação p/50 ciclos (classificação visual).	ASTM C 672-03	$3 > x > 2$	$2 > x > 1$	$1 > x > 0$	$0 = x$
Resistência à abrasão.	ASTM C 944 (2005)e1	$2 > x > 1$ mm	$1 > x > 0.5$ mm	$0.5 > x > 0.25$ mm	$0.25 > x$ mm
Resistência à penetração de Cl ⁻	ASTM C 1202-10 AASHTO T277-07	$3000 > x > 2000$ C	$2000 > x > 1000$ C	$1000 > x > 500$ C	$500 \geq x$ C
Retração de secagem.	ASTM C 157-08	$700 > x > 600$ m/m	$600 > x > 500$ m/m	$500 > x > 400$ m/m	$400 \geq x$ m/m
Deformação sob carga.	ASTM C 152	$75 > x > 60$ $\mu m/MPa$	$60 > x > 45$ $\mu m/MPa$	$45 > x > 30$ $\mu m/MPa$	$30 \geq x$ $\mu m/MPa$
Resistência à compressão aos 28d.	ASTM C 39-10 AASHTO T 22-07	$55 > x > 40$ MPa	$70 > x > 55$ MPa	$100 > x > 70$ MPa	$100 \leq x$ MPa
Módulo de elasticidade aos 28d (cordal p/ $0,4 \cdot f_c$).	ASTM C 469-10	$40 > x > 30$ GPa	$45 > x > 35$ GPa	$50 > x > 40$ GPa	$45 \leq x$ GPa
Resistência à flexão aos 28d.	ASTM C 78-10 AASHTO T 97-03	$5 > x > 4$ MPa	$7 > x > 5$ MPa	$10 > x > 7$ MPa	$10 \leq x$ MPa
Rendimento a 28d MPa/kg*100.	f_c / C	≥ 13	≥ 15	≥ 17	≥ 20

O Brasil detém o recorde de resistência à compressão de concreto aplicado em obra nos cinco pilares de sete pavimentos iniciais do edifício *e-Tower* em São Paulo, desde 2002, quando os pilares foram concretados. Os estudos de dosagem estiveram a cargo do Prof. Paulo Helene e da então mestranda Carine Hartmann, que utilizou o método IBRACON de dosagem, obtendo resistências médias de 125MPa aos 28 dias de idade em corpos-de-prova cilíndricos. O concreto foi dosado em usina, misturado no balão do caminhão betoneira e transportado por 40 minutos no pesado trânsito de São Paulo.

Ficou então comprovado o limite de resistência possível na região urbana de São Paulo. Naquela época foi alcançado 125MPa de média, não justificando preconceitos e falsos mitos sobre a impossibilidade de obtenção de concretos de alta resistência em canteiros de obra, produzido por Central locada em centros urbanos.

Além de agregar valor às obras e prestígio a suas construtoras e projetistas, cabe ressaltar que o uso de concretos com vida útil de mais de 350 anos também contribui sobremaneira à preservação dos recursos naturais, assegurando o tão desejado desenvolvimento sustentável com preservação do meio ambiente².

12.10.2 Concreto Autoadensável (CAA ou SCC)

O conceito de concreto autoadensável CAA (SCC, *self-compacting concrete*) foi introduzido pelo Prof. Okamura (OUCHI *et al.*, 1997) da Universidade de Tóquio em 1986 com o objetivo de aumentar a durabilidade e a confiabilidade das estruturas de concreto, ao mesmo tempo em que reduzia o ruído durante o lançamento e adensamento do concreto nas obras.

A vitoriosa experiência japonesa foi seguida por outros pesquisadores Ambroise & Péra (2001); Daczko & Constantiner (2001); EFNARC (2002); Gettu & Aguiló (2003) e outros. No Brasil, registra-se a tese de doutorado de Tutikian (2007), a dissertação de mestrado de Alencar (2008) e os trabalhos de Johnson; Ros & Barbosa (2005), e os livros de Tutikian & Dal Molin (2008) e de Gomes & Barros (2009), que identificaram uma série de vantagens importantes no uso dos concretos CAA, tais como:

- Menor dependência da formação e experiência dos operários para obter estruturas duráveis;
- Redução dos riscos de ninhos e bicheiras;
- Redução dos prazos de obras;
- Maior liberdade aos arquitetos para projetar formas complexas;
- Redução do ruído com vantagens em centros urbanos, inclusive viabilizando trabalhos noturnos;
- Redução dos riscos de doenças do trabalho (audição);
- Aumento da vida útil das fôrmas com maior reaproveitamento;
- Maior produtividade e sustentabilidade.

Do ponto de vista dos materiais, os CAA (SCC) utilizam praticamente os mesmos materiais dos demais concretos correntes. Entretanto, são imprescindíveis as adições finas, os aditivos superplastificantes e os agentes modificadores de viscosidade VMA. Os agentes VMA são aditivos químicos que melhoram substancialmente a coesão e, portanto, reduzem a exsudação e a segregação (RIXOM & MAILVAGANAM, 1999 e MEIRELES, 2010).

Os estudos de dosagem de concretos CAA (SCC) podem e devem utilizar os mesmos conceitos e princípios do método IBRACON descrito neste capítulo, mas os

² Ficha técnica da estrutura do e-Tower: Construtora: Tecnum Engenharia; Projeto arquitetônico: Aflalo & Gasperini; Projeto estrutural: França e Associados; Proprietários: Munir Abbud Empreendimentos Imobiliários; Pavimentos: 37 pavimentos + 4 subsolos + térreo; Altura: a partir do térreo: 149m, e, a partir do subsolo: 165m; Concreteira: Engemix; Aditivos: Grace (Adva e Recover) e MBT (Glenium); Pigmentos: Bayer.

ensaios de avaliação são específicos e bem diferenciados para permitir comprovar a sua capacidade de ser autoadensável.

Os principais métodos de ensaio empregados em concretos CAA (SCC) estão indicados no documento da RILEM *Technical Committee 174-SCC Self-Compacting Concrete* (2004) e na ABNT NBR 15823:2010, a saber:

- Medição de fluidez, através do ensaio de espalhamento com o cone de Abrams (*slump flow test*);
- Ensaio de viscosidade plástica aparente, através da medição do tempo de escoamento t_{500} , sob fluxo livre com o cone de Abrams;
- Ensaio de habilidade passante, através do ensaio do anel J, sob fluxo livre;
- Ensaio de habilidade passante, através do ensaio da caixa L, sob fluxo confinado;
- Ensaio de viscosidade plástica aparente, através do ensaio do funil V, sob fluxo confinado;
- Ensaio de resistência à segregação, através da coluna de segregação.

12.10.3 Concreto Aparente, Colorido e Branco³

O uso do concreto aparente, seja ele cinza, colorido ou branco agrega várias vantagens para a engenharia, tais como valor estético, originalidade, desenvolvimento tecnológico, durabilidade e preservação do meio ambiente. Além de economia para a obra, devido à agilidade e menor tempo com manutenção, pois dispensa a aplicação de revestimento. No entanto exige-se um maior controle tecnológico e alguns cuidados especiais, principalmente na produção do concreto e execução da estrutura.

O cimento é o material que tem maior influência na cor final do concreto. Por isso, deve-se escolher um tipo e um fabricante que possam ser mantidos constantes durante a obra. Concretos produzidos com cimentos contendo escórias de alto forno, tipo CP III, quando em contato com a atmosfera, tornam-se mais claros na superfície que os concretos com cimento Portland comum, tipo CP I, CP II, CP V ARI ou mesmo o CP IV. A execução de concreto aparente com cimentos contendo adições tipo escória, pozolanas, sílica ativa e metacaulim deve ser bastante controlada, na medida em que uma pequena variação nos teores dessas adições pode alterar consideravelmente a coloração final do concreto. A utilização do cimento branco é essencial para concretos brancos, mas altamente recomendada para concretos pigmentados, pois a cor do pigmento se distribui melhor e com mais homogeneidade do que se utiliza cimentos cinzas.

Deve-se utilizar o mesmo agregado miúdo em toda a obra, de forma a evitar alterações de coloração. Esse material deve ser submetido à caracterização mineralógica e petrográfica, visando identificar possíveis materiais reativos, como algumas piritas que ao longo do tempo reagem formando manchas com aspecto de ferrugem.

Do ponto de vista da dosagem, aplica-se integralmente o método IBRACON. As propriedades de durabilidade requeridas para o concreto aparente devem ser mais exigentes, por isso recomenda-se que a relação a/c seja inferior a 0,45 e a resistência à compressão

³ Consultar também os capítulos 45 e 46 deste livro

sempre superior a 40MPa. Aconselha-se o uso de cimentos com baixo teor de silicato tri-cálcico (C_3A), pois estes formam o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) em grande quantidade e velocidade, podendo ocasionar futuras eflorescências em presença de água e ocasionar a falsa pega, fenômeno comum principalmente em dias quentes e secos. O traço deve sempre ser um pouco mais argamassado que o ideal (cerca de 4% a mais) para assegurar bom acabamento superficial. O ideal, inclusive, é que o concreto aparente seja também autoadensável, para eliminar a chance de falhas de concretagem. Reparos posteriores, mesmo que bem executados, ficam visíveis por toda a vida útil da estrutura.

A desenforma deve ser realizada sempre à mesma idade, pois a coloração do concreto é influenciada pelo tempo em que ele não fica diretamente em contato com o ar.

No final da obra, as superfícies de concreto aparente normal, colorido ou branco, devem ser lavadas com emprego de jato de água à pressão. Para sua melhor manutenção ao longo da vida útil, recomenda-se aplicação de hidrofugantes de superfície tipo silanos e siloxanos. Vernizes de base acrílico e sistemas duplo tipo epóxi-poliuretano também podem ser utilizados, porém conferem brilho à superfície. Eventualmente podem ser utilizados produtos de revestimento contendo teores elevados de dióxido de titânio (TiO_2) que têm papel de modificar a tensão superficial da água sobre a superfície do concreto, tornando-o auto-limpante.

A tonalidade do cimento é essencial para o concreto branco. Os cimentos brancos a serem utilizados em concreto branco devem ter índices mínimos de reflectância de 85 (POSITIERI, 2005). A coloração do concreto pode ser alterada com a utilização de óxidos metálicos (ferro, cromo, titânio, cobalto, manganês) ou pigmentos sintetizados pela indústria química. Os pigmentos devem atender às especificações da ASTM C 979-10.

O controle da cor dos concretos coloridos ou brancos pode ser realizado por sistemas de medição de cor tipo CIELAB (POSITIERI, 2005), que consiste num gráfico cartesiano espacial que descreve a cor de uma fonte de luz refletida por uma superfície sob condições padrões de iluminação. Sua principal vantagem está em reduzir os erros de análises subjetivas com sistemas de cartas padrões comparativas de cor. Para tal, é necessário medir e calcular os parâmetros cromáticos como a saturação de cor C^* , a cor total E^* e suas variações.

Para manter o concreto colorido ou branco, sem manchas de ferrugem, é essencial que as armaduras de arranque sejam protegidas contra a corrosão com a própria nata de cimento colorido ou de cimento branco. Nas fôrmas, a utilização de desmoldantes correntes à base de óleos minerais é inadequada, recomendando-se as ceras parafínicas, aplicadas em película fina e contínua com o auxílio de uma pistola. A seleção do tipo e forma dos espaçadores e pastilhas é também essencial na qualidade de acabamento do concreto aparente colorido ou branco.

De modo a assegurar homogeneidade, as superfícies devem ser desmoldadas o mais cedo possível, mas sempre de uma forma contínua e rápida (CARVALHO, 1999). A cura com água do concreto logo após a concretagem é essencial para reduzir riscos de fissuras. O processo mais fácil para manter boas condições de umidade durante a cura

é a aspersão de água de forma uniforme e controlada. Recomendam-se sistemas de aspersão tipo bico de jardim com formação de névoa (FONSECA, 2003).

Destaca-se o pioneirismo e profundidade com que a UFRGS, através do NORIE e LEME, vem tratando do estudo dos concretos brancos no Brasil, podendo-se citar: Klein; Gastal; Campagnolo & Silva Filho (2001) e Silva Filho, Kirchheim, Tutikian & Dal Molin (2004) nos estudos e desenvolvimento de concreto autoadensável branco para o Museu Iberê Camargo em Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

Uma das mais importantes obras de concreto colorido de alta resistência é o concreto utilizado na estrutura do Hotel Unique, em São Paulo. Projetado pelo arquiteto Ruy Ohtake, a realização do concreto representou um verdadeiro desafio, pois há paredes cujas faces opostas são de concretos com cores diferentes⁴.

12.10.4 Concreto sustentável⁵

Os estudos de concreto sustentável incluem todos aqueles que consigam reduzir a emissão de gases prejudiciais na atmosfera durante a fabricação dos cimentos, ou que se preste a consumir rejeitos industriais, inclusive entulho da própria construção. Os princípios e procedimentos do método de dosagem IBRACON se aplicam perfeitamente, tomando-se os cuidados de bem elaborar os procedimentos de preparação dos rejeitos e entulhos reciclados a serem incorporados ao concreto.

Concretos especiais e sustentáveis, com altos teores de adições minerais, requerem modificação na determinação do teor de argamassa, quando se realiza a substituição em igualdade de massa, devido ao aumento do volume de pasta decorrente das diferenças de massas específicas (principalmente quando se utiliza cinza volante e metacaulim). Uma vez encontrado o teor de argamassa ideal, do traço básico 1:m, transforma-se o teor de argamassa em volume e se mantém constante este último, fazendo-se as correções no teor de areia (miúdos).

Praticamente todos os centros de pesquisa em concreto do país estão engajados nestes estudos. Vale à pena consultar a edição 37 da Revista Concreto & Construções (2004) do IBRACON, que dedicou toda essa edição ao tema sustentabilidade. Faz-se reverência à primeira tese nacional sobre o tema, abordando a questão da dosagem e da durabilidade de concretos sustentáveis de Isaia (1995), que empregou pozolanas em substituição a até 50% do cimento, em massa. Também Levy (2001) mostrou ser vantajoso o emprego de agregados reciclados provenientes de concreto e de produtos cerâmicos.

12.11 Referências Bibliográficas

- ABRAMS, D. A. *Design of concrete mixtures*. Structural Materials Research Laboratory. Chicago: Lewis Institute, 1918.
- AITCIN, P. C. *High-Performance Concrete*. Londres: E&FN Spon, 1998. 591p.
- ALAEJOS GUTIERREZ, M.P. & CÁNOVAS, M.F. *Dosificación de hormigones de alta resistencia*. In: Revista Cemento-Hormigón, n. 738, 1994.

⁴ Ficha técnica do Hotel Unique/SP: Construtora → Método Engenharia; Arquiteto → Ruy Ohtake; Projeto estrutural → Mário Franco; Central de concreto → Engemix; Consultor de concreto → Paulo Helene; Cores → cinza, grafite, vermelho.

⁵ Consultar também o capítulo 50 deste livro

- ALENCAR, R. A. **Dosagem do concreto autoadensável : produção de pré-fabricados**. 2008. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- ALVES, M. F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência**. 2000. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS, Porto Alegre, 2000.
- AMBROISE, J.; PÉRA, J. **Properties of self-leveling concrete: influence of a viscosity agent and cement content**. In: ACI SP 200. V.M.Malhotra, American Concrete Institute, 2001.
- ANDRADE, W. P. Um método de dosagem para concreto massa. In: COLÓQUIO SOBRE CONCRETO MASSA, 1981, São Paulo, SP. *Anais*. São Paulo: IBRACON, 1981.
- ANDREW, R. P. (Ed.). **Mix design and quality control of concrete**. Proceedings. London: C&CA, 1954.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto. Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- _____. **NBR 5739: Concreto. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- _____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- _____. **NBR 7211: Agregado para concreto. Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- _____. **NBR 7212: Execução de concreto em central**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- _____. **NBR 8224: Concreto endurecido. Determinação da fluência. Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.
- _____. **NBR 8522: Concreto. Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- _____. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais. Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- _____. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland. Preparo, controle e recebimento. Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- _____. **NBR 14931: Execução de Estruturas de Concreto. Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- _____. **NBR NM 33: Concreto. Amostragem de concreto fresco**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- _____. **NBR NM 67: Concreto. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- _____. **NBR NM 131: Concreto Endurecido. Determinação da retração hidráulica ou higrométrica. Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- BASÍLIO, F.A. **Influência do coeficiente de variação na dosagem dos concretos**. São Paulo: ABCP, 1954.
- _____. **Práticas de dosagem do concreto no Brasil**. In: Reunión del GLARILEM, 1965, Santiago, Chile. Práticas correntes de dosagem de concreto nos países latino-americanos, s.n.t.
- BINGHAM, E.C. **An Investigation of the Laws of Plastic Flow**. U.S. Bureau of Standards Bulletin, 13, 1916, p. 309-353.
- BOGGIO, A.J. **Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de Concretos de Cimento Portland**. 2000. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS, Porto Alegre, 2000.
- CAMARGO, W. M. Fixação na dosagem das propriedades finais dos concretos: correlação entre as propriedades de composição do concreto fresco e as propriedades tecnológicas do concreto endurecido. In: COLÓQUIO SOBRE DOSAGEM DO CONCRETO, 1977, São Paulo-SP. *Anais*. São Paulo: IBRACON, 1977.
- CARBONARI, B. T. **Estudio paramétrico de variables y componentes relativos a la dosificación y producción de hormigones de alta performance**. 1996. PhD Thesis - Universidad Politécnica de Catalunya. Escuela Técnica Superior Dènginyers de Camins, Canals i Ports, Barcelona, 1996.
- CARVALHO, F. **Hormigones Coloreados**. Madrid: INTEMAC, 1999. Tesis doctoral, 1999.
- CORDON, W. A. **History of Proportioning**. American Concrete Institute. Proportioning concretes mixes. Detroit, 1974, p.167-76. (SP, 46)
- COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. v. 1, Lisboa: LNEC, 1973.
- CONCRETO & CONSTRUÇÕES. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, n. 37, ano XI, 2004.
- DACZKO, J.A. & CONSTANTINER, D. Rheodynamic Concrete. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43, 2001, Foz do Iguaçu-PR. *Anais*. São Paulo: IBRACON, 2001.
- DE LARRARD, F. **A method for proportioning high-strength concrete mixtures**. Cement, Concrete and Aggregates, 12 (1), p. 47-52, 1990.
- DRAFFIN, J.O. A brief history of lime, cement, concrete and reinforced concrete. **Journal of the Western Society of Engineers**, v. 48, n. 1, p.14-47, mar. 1943.
- EFNARC. **Specification guidelines for self-compacting concrete**. Farnham, UK: European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures, 2001.
- FERRARI, F. Cenzo storico sui legante idraulici. **II Cemento**, v. 65, n. 762, p.147-50, 1968a.
- _____. Cenzo storico sui legante idraulici. **II Cemento**, v. 65, n. 763, p.179-87, 1968b.
- _____. Cenzo storico sui legante idraulici. **II Cemento**, v. 65, n. 764, p.221-33, 1968c.
- FONSECA, A. Betão Branco. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 5, 2003, São Paulo-SP. *Anais*. v.1. São Paulo: SmartSystem, 2003.
- FULLER, W. B.; THOMPSON, S. E. The Laws of Proportioning Concrete. **ASCE. Transactions**, v. 59, p. 67-143. 1907.
- GETTU, R.; AGULLÓ, L. **Estado del Arte del Hormigón Autocompactable y su Caracterización**. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, E.T.S., Informe C4745/1, 2003.
- GOMES, P.C.C.; BARROS, A.R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: PINI, 2009.
- GOODSPEED, C.; VANIKAR, S.; COOK, R. HPC Defined for Highway Structures. **Concrete International, ACI**, Feb. 1996.

- HARTMANN, C. T. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**. 2002. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- HARTMANN, C.; HELENE, P. HPCC in Brazilian Office Tower. **Concrete International**. ACI, American Concrete Institute, v. 25, n. 12, p. 64-68, 2003.
- HELENE, P.; TERZIAN, P. R. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 350 p.
- HELENE, P. **100 anos Construindo a Tecnologia do Concreto**. São Paulo. Boletim Histórico encartado na Revista Politécnica, n.217, 1999. p. 18-21 (*comemoração do centenário do IPT*)
- _____. Concreto de elevado desempenho – o material para construção das obras no ano 2000. **Revista Engenharia e Construção**, n. 18, p. 11-13, 1998.
- ISAIA, G.C. **Efeito de Misturas Binárias e Ternárias de Pozolanas em Concreto de Elevado Desempenho: Um Estudo com Vistas à Corrosão da Armadura**. 1995. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- JOHNSON, W.R.V.; ROS, P.S.; BARBOSA, M.P. Estudo da influência da granulometria dos sólidos na composição de concretos auto-adensáveis. Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON). **Revista Concreto**, ano XXXIII, n. 37, fev. 2005. p. 46-53.
- KLEIN, D. L.; GASTAL, F. P. S. L.; CAMPAGNOLO, J. L.; SILVA FILHO, L. C. P. **Análise de materiais e definição de traço para utilização na confecção de concreto branco para o Museu Iberê Camargo**. Porto Alegre: UFRGS, 2001.
- KOEHLER, E. P.; FOWLER, D. W.; FERRARIS, C. F. **Summary of Concrete Workability Test Methods. ICAR Report 105.1**. In: ICAR 105: Measuring the Workability of High Fines Concrete. Aggregates Foundation for Technology, Research and Education International Center for Aggregates Research, University of Texas, Austin, 2003.
- KOSMATKA, S.H. & WILSON, M. L. **Design and control of concrete mixtures**. EB001. Portland Cement Association PCA. 15. Illinois: Skokie, 2011. 460 p.
- KOSMATKA, S.H.; KERKHOFF, B. & PANARESE, W.C. **Design and control of concrete mixtures**. EB001. Portland Cement Association PCA. 14. Illinois: Skokie, 2002. 372 p.
- KUROIWA, S. **Application of super workable concrete to construction of a 20-story building**. In: ACI SP-140: High performance concrete. 1993.
- L'HERMITE, R.; TOURNON, G. **La Vibration du Béton Frais**. Paris: CERILH, 1948 (pub. tech. 2).
- LEME, R. A. S. **Conceito moderno de coeficiente de segurança**. Engenharia, v. 12, n. 135, 1953.
- LEVY, S.M. **Durabilidade de concretos com agregados reciclados de concreto e alvenaria**. 2001. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- LIBÓRIO, J. B. L.; CATOIA, T.; PEREIRA, T. A. C.; CATOIA, B.; SANCHES, J. E. R.; CATAI, E. Concreto auto-adensável com baixo consumo de cimento. In: 50º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, **Anais**. Salvador: IBRACON, 2008.
- LOBO CARNEIRO, F. L. Os coeficientes de segurança e as tensões admissíveis em peças de concreto simples e de concreto armado. In: SYMPOSIUM DE ESTRUTURAS, 1944. **Anais**. v. 2. Rio de Janeiro: INT, 1944. p. 82-126.
- LOBO CARNEIRO, F. L. **Dosagem dos concretos plásticos**. Rio de Janeiro: INT, 1937.
- LYSE, Inge. Tests on consistency and strength of concrete having constant water content. **American Society for Testing and Materials**, Proc., v. 32, part 2, p.629-36, dec. 1932.
- MAILVAGANAM, N. **Admixture compatibility in special concretes**. In: CANMET/ACI Conf., 2, 1999, Gramado, Brasil. ACI SP 186, eds. V. M. Malhotra et al. American Concrete Institute, 1999. p. 615-34.
- MALDONADO, N. G. **Hacia una metodología comprensiva de dosificación de hormigones de alta performance**. Mendoza: 2005. Tesis Doctoral. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Mendoza, 2005.
- MARTINS, V. C. **Otimização dos processos de dosagem e proporcionamento do concreto dosado em central com a utilização de aditivos superplastificantes**. 2005. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- MCINTOSH, J. D. Basic principles of concrete mix design. In: ANDREW, R. P. (Ed.). **Mix design and quality control of concrete. Proceedings**. Symposium London: CCA, 1954. p.3-27.
- MEIRELES, D. **Contribuição aos estudos de uso de aditivos modificadores de viscosidade em concreto autoadensável**. 2010. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.
- MEHTA, K.P.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.
- MONTEIRO, P. J. M.; HELENE, P.; KANG, S. Designing Concrete Mixtures for Strength, Elastic Modulus and Fracture Energy. **Materials and Structures**, v. 26, 1993.
- MORGAN, E. E. The design of concrete mixes on a minimum strength basis. **The Engineer**, v. 177, n. 4611, p. 400-2, may. 26, 1944.
- MURDOCK, L. J.; BROOK, K.M. **Concrete materials and practice**. 5. ed. London: Edward Arnold Publishers, 1979.
- NEWLON JR., H. (Ed.). **A selection of historical American papers on concrete: 1876-1926**. Detroit: ACI, 1976, p.234. (SP, 52.)
- O'REILLY, V. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. São Paulo: PINI, 1998.
- OKAMURA, H.; OZAWA, K.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Structural Concrete**, v. 1, n. 1, p. 3-17, 2000.
- OLIVEIRA, A. P. **O controle de concreto numa construção**. Rio de Janeiro: INT, 1939.
- OUCHI, M.; HIBINO, M.; OKAMURA, H. Effect of superplasticizer on self-compactability of fresh concrete. **Transportation Research Record**, paper 970284, n. 1574, p. 37-40, 1997.
- PETRUCCI, E.G.R. **Dosagem de concretos de cimento: prática corrente no Rio Grande do Sul, Brasil**. In: REUNION DEL GLARILEM, 1985, Santiago, Chile. **Anais...** Práticas correntes de dosagem de concreto nos países latino-americanos, s.n.t.

- POSITIERI, M. J. **Durabilidad de concretos coloreados**. Córdoba, Argentina: 2005. Tesis doctoral. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba, 2005.
- POWERS, T.C. **Properties of fresh concrete**. New York: John Wiley & Sons, 1968.
- _____. **The Nature of Concrete**. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials. STP n. 169-A, 1966. p. 61-72, American Society for Testing and Materials ASTM.
- PRISZKULNIK, S.; KIRILOS, J. P. Considerações sobre a resistência à compressão de concretos preparados com cimentos Portland comum tipos CP-250, CP-320 e CP-400, e a sua durabilidade. In: ENCONTRO NACIONAL DA CONSTRUÇÃO, 2, 8-13 dez. 1974, Rio de Janeiro, J. **Anais**. Rio de Janeiro: ENC, 1974.
- PRISZKULNIK, S. Aspectos reológicos do concreto fresco e sua dosagem: métodos ACI e do ITES. In: COLÓQUIO SOBRE DOSAGEM DO CONCRETO, 1977, São Paulo, SP. **Anais**. São Paulo: IBRACON, 1977.
- RIXOM, M. R.; MAILVAGANAM, N. P. **Chemical admixtures for concrete**. 3. ed. Londres: E&FN Spon, 1999.
- RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. São Paulo: ABCP, 1984.
- SABLON, L. Le béton rationnel : méthodes pratiques pour la réalisation des mortiers et des bétons offrant les qualités désirées aux prix de revient minimum. **Annales des Ponts et Chaussées**, v. 97, n.1, 1927.
- SHILSTONE, J. M. **Concrete Mixture Optimization**. American Concrete Institute, Concrete Mixtures, Compilation 12, 1990. p. 31-7.
- SILVA FILHO, L. C.; KIRCHHEIM, A. P.; TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. C. **Desenvolvimento de Concreto Autoadensável Branco para o Museu Iherê Camargo**. Porto Alegre, UFRGS, Rel. Técnico 31/2004.
- SILVA JR., J. F. Contribuição para o estudo da dosagem dos concretos. **Revista Politécnica**, n. 144, p. 213-17, maio 1944.
- SOBRAL, H.S. A. Generalização das técnicas de dosagem: método de Powers. In: COLÓQUIO SOBRE DOSAGEM DO CONCRETO, 1977, São Paulo-SP. **Anais**. São Paulo: IBRACON, 1977. p. 21.
- SPARKES, F. N. The control of concrete quality: a review of the present position. In: ANDREW, R.P. (Ed.). **Mix design and quality control of concrete**. **Proceedings Symposium London: CCA, 1954**, p.211-27
- TANGO, C. E. S.; SAAD, V. M. K. Incrementos no Método de Dosagem IPT para concretos com amplo espectro de desempenho. In: CONGRESSO IBRACON, 43, 2001, Fortaleza, CE. **Anais**. Fortaleza: IBRACON, 2001.
- TANGO, C. E. S. **A dosagem IPT – aplicações**. A Construção em São Paulo, seção Concreto, n. 1994 e n. 1998, n. 1745. São Paulo: Publicação IPT, 1986.
- TANGO, C. E. S.; MACHADO, J. R. A.; DIONISI, A.; HIGA, C. K. Dosagem de Concreto com Auxílio de Microcomputador. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 36, data, Porto Alegre, RS. **Anais**. Local: IBRACON, 19-23,1994, 14p.
- TATTERSALL, G. H. & BANFILL, P. F. G. **The rheology of fresh concrete**. Marshfield, MA: Pitman Publishing, 1983.
- TATTERSALL, G.H. **The workability of fresh concrete**. London: Viewpoint, 1978.
- TORRES, A. F.; ROSMAN C. E. **Método para dosagem racional do concreto**. São Paulo ABCP, 1956.
- TORRES, A. F. **Dosagem dos concretos**. Boletim EPUSP, n. 1. São Paulo: Escola Polytechnica, 1927.
- TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2004.
- _____. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2007.
- TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. C. **Concreto Autoadensável**. São Paulo: PINI, 2008.
- VALLETTE, R. **Composition des bétons mise au point de la question**. **Annales des Ponts et Chaussées**, v. 97, n. 1-19, mars./avr.1949.
- _____. **Manuel de composition des bétons**: Méthode expérimentale Valette. Paris: Eyrolles, 1964. p.29.
- VASCONCELOS, A. C. **Concreto no Brasil**: recordes, realizações, história. São Paulo: Copiare, 1985.
- WALKER, S. Application of Theory of probability to design of concrete for strength specifications. **Rock Products**, v. 47, p. 400-2, may 26, 1944.
- ZERBINO, R. Caracterización Reológica de Hormigones Autocompactables. Sobral, In: Simpósio Internacional sobre Concretos Especiais, 3, maio 2006, Sobral, CE. **Anais**. Sobral: IBRACON, 2006.

