

Capítulo 29

Concreto de Cimento Portland

Paulo Helene

Universidade de São Paulo

Tibério Andrade

Universidade Federal de Pernambuco

29.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar o concreto, sua história, sua composição básica e suas propriedades, ressaltando a contribuição da tecnologia do concreto para a evolução das estruturas e o desenvolvimento da humanidade. Considerando que se trata de apenas um capítulo de um livro de materiais de construção procurou-se concentrar nos fundamentos e na normalização atual¹.

O concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural e de construção civil da atualidade. Mesmo sendo o mais recente dos materiais de construção de estruturas, pode ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida.

Sua descoberta no fim do século XIX e seu intensivo uso no século XX, que o transformaram no material mais consumido pelo homem depois da água, revolucionaram a arte de projetar e construir estruturas cuja evolução sempre esteve associada ao desenvolvimento das civilizações ao longo da história da humanidade.

Na antiguidade, os egípcios foram grandes construtores e dominaram a arte de construir estruturas com blocos de rocha, mas não esgotaram o enorme potencial desse material. Os engenheiros da idade média ainda levariam aos mais belos usos esse nobre material de construção, com a construção das espetaculares igrejas góticas, explorando os limites construtivos de estruturas em rocha.

A rocha começou a ser usada com tecnologia por volta de 2750 a.C. no Egito, e permaneceu como líder dos materiais estruturais por 4500 anos até

¹ Para conhecer mais sobre este material recomenda-se consultar o livro "ISAIA, G. C. (ed.) **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2v, 2005."

a chegada do aço e das estruturas metálicas, por ocasião da Revolução Industrial (1750 a 1850 d.C.).

No Brasil, assim como em outros países do mundo, o concreto tem um papel de destaque sendo o principal e mais consumido material de construção. Ao olhar a história da humanidade, principalmente aquela escrita por obras de arquitetura e engenharia, é interessante constatar como as grandes mudanças na forma de construir se devem à descoberta de novos materiais estruturais e como o domínio do conhecimento sobre materiais estruturais marcaram o poder e o desenvolvimento das nações ao longo dos anos.

29.1.1 Concreto, desenvolvimento, ciência e tecnologia

Duas das mais desenvolvidas e poderosas sociedades atuais, os Estados Unidos e o Canadá, consideram o investimento no estudo das estruturas de concreto, como um dos mais importantes investimentos na ciência e tecnologia para obter e manter a qualidade de vida de seu povo e a liderança de seu parque industrial. Essas sociedades entendem que o profundo conhecimento sobre concreto posiciona e mantém a sua indústria na fronteira do conhecimento, assegurando sua alta competitividade.

Há quase duas décadas atrás, em 1989, a *National Science Foundation* nos Estados Unidos e o *National Research Council* no Canadá aprovaram o apoio financeiro expressivo, aos consagrados programas *ACBM Center for Advanced Cement-Based Materials*² na Universidade de Northwestern e *Béton Canada*³, em Sherbrooke, entendendo que, o estudo de concreto deve estar inserido no conhecimento estratégico da “inteligência” de seus países ao lado de recursos naturais, saúde, biotecnologia, eletrônica, espaço sideral e outras.

Com a mesma visão moderna e abrangente, a *FHWA Federal Highway Administration* nos Estados Unidos e a *Comunidade Européia* têm investido pesado no melhor conhecimento das estruturas de concreto. Essas sociedades entendem, há anos, que esse material e suas estruturas ainda têm muito por desenvolver-se e que vale a pena apostar nesse conhecimento.

O resultado não podia ser melhor. O concreto de cimento Portland apresentou uma enorme evolução nas duas últimas décadas, que se pode chamar de uma verdadeira 4ª revolução na arte de projetar e construir estruturas.

A reconhecida *Scientific American*⁴ publicou mais de 250 documentos nos

² A partir de 1989, nos Estados Unidos, a NSF *National Science Foundation* reconhece a importância e passa a apoiar o *ACBM Center for Advanced Cement-based Materials*, liderado pelo Prof. Surendra Shah da *Northwestern University*, que junto com outras universidades e o NIST (*National Institute of Standards and Technology*) passam a pesquisar e desenvolver o concreto de forma sistêmica e científica, privilegiando três temas: utilização de resíduos; previsão da vida útil e concreto de alto desempenho.

³ Em 1989 o *National Research Council* no Canadá, instituiu o *Network of Centres of Excellence* (Rede de Centros de Excelência) que passou a apoiar expressivamente os 14 principais centros e áreas de pesquisa e desenvolvimento do Canadá. O projeto *Béton Canada* (Concreto Canadá), liderado pelo Prof. Pierre-Claude Aitcin da Universidade de Sherbrook, tinha o seguinte objetivo: *A missão do Concrete Canada é colocar a indústria da construção canadense na posição de liderança da tecnologia do concreto, para reforçar sua competitividade*. Além de outras universidades envolvia 65 empresas.

⁴ www.sciam.com

últimos dez anos, sobre pesquisa e desenvolvimento em concreto. A *Science News on line*⁵ tem publicado freqüentemente muitas inovações em tecnologia de concreto tais como: *High-Performance Concrete* (Concreto de Alto Desempenho); *High-Strength Concrete* (Concreto de Alta Resistência); *Ultra-high Performance Concrete* (Concreto de Ultra-alta resistência); *Translucid Concrete* (Concreto Translúcido); *Glass Fiber Reinforced Concrete* (Concreto Reforçado com Fibras de Vidro); *Steel Fiber Reinforced Concrete* (Concreto Reforçado com Fibras de Aço); *Self-cleaning Concrete* (Concreto Autolimpante); *Reactive Powder Concrete* (Concreto de Pós Reativos); *Fibers Concrete* (Concreto com Fibras), e muitas outras

Também a consagrada *Popular Science Magazine*⁶ reconheceu o “*conductive concrete*” (concreto condutivo) como a mais importante inovação do mundo no ano de 1996 (uma década atrás). Em 2005/2006, o *National Building Museum*, em Washington, Estados Unidos, apresentou a exposição *New Architecture in Concrete* (Nova Arquitetura em Concreto), carinhosamente chamada de “*liquid stone*” (pedra líquida) com 30 inovações no campo da tecnologia e das estruturas de concreto. Na França, o *Musée des Arts et Métiers*, em Paris, esteve apresentando de 2005 a 2007, a maravilhosa exposição “*Bétons: étonnez-vous!*” (Concreto: surpreendei-vos!), onde é possível admirar-se com a história e a contribuição do concreto à melhoria da saúde e da qualidade de vida dos povos.

Essa é a visão que se pretende dar desse material de construção neste capítulo: um material atual e de importância vital para a economia e o negócio da construção, o chamado “*construbusiness*”⁷; um material fundamental para a arquitetura moderna; um material rico e versátil para escrever a história contemporânea através de monumentos originais e duráveis; e principalmente um material fundamental para o desenvolvimento da ciência aplicada, da engenharia e da qualidade de vida de um povo, o suficiente e indispensável para estar entre os prioritários investimentos tanto nas grandes quanto nas pequenas nações.

29.1.2 Os primeiros passos

Para entender as outras três primeiras grandes revoluções na arte de projetar e construir estruturas, deve-se começar retrocedendo a mais de 48 séculos atrás, quando a sociedade Egípcia reconheceu a enorme contribuição do brilhante político e alquimista **Imhotep**⁸, nomeando-o, por primeira vez na história da humanidade, com o nobre título de *Arquiteto*, já que a denominação de Engenheiro Civil somente seria adotada muitos séculos depois.

A denominação destacada de **Arquiteto** deveu-se exatamente ao fato de ele ter projetado e construído a primeira pirâmide durável do planeta, a *Pirâmide escalonada de Djeser* (Figura 1), toda em blocos de rocha, assim

⁵ www.sciencenews.org

⁶ www.popsoci.com

⁷ Ver conceitos e importância deste termo no Capítulo 1 deste livro.

⁸ Imhotep é considerado como o primeiro arquiteto e médico na história. Projetou a Pirâmide de Djoser (Pirâmide dos degraus) em Saqqara, Egito. Pode ter sido o responsável pela primeira utilização de colunas na arquitetura.

chamada em homenagem ao então imperador egípcio Djoser. Esse Mausoléu, que substituiu os anteriores, provavelmente em madeira, argila e cerâmica, mostrou-se muito mais durável e competente para proteger para a eternidade os restos mortais e mumificados dos imperadores egípcios.



Figura 1. Pirâmide escalonada de Djoser, considerada a primeira pirâmide em rocha projetada e construída pelo homem. Seu autor, Imhotep, é considerado o primeiro **Arquiteto** da humanidade (<http://www.utexas.edu/courses/classicalarch/images.html>)

Era por volta de 2.750 a.C., e essa forma de projetar e construir pode ser considerada a 1ª grande revolução. Os egípcios, melhor dito, o Arquiteto Imhotep tinha introduzido, provavelmente sem o saber, o conceito de vida útil na construção civil. Para se ter uma idéia da evolução que isso representou para a sociedade egípcia e para a humanidade, pode-se citar que, mesmo muitos séculos depois, outros povos da antiguidade ainda engatinhavam na arte de construir estruturas. Por exemplo, na Inglaterra, outro monumento histórico, também em rocha, denominado *Stonehenge*⁹, datado da época de 2300 a.C., ou seja, depois de mais de 300 anos, ainda era muito menos elaborado do ponto de vista da engenharia de estruturas.

Os Arquitetos egípcios haviam descoberto os métodos e procedimentos adequados para trabalhar corretamente a rocha como material de construção de estruturas, estáveis e duráveis, em substituição à madeira e à argila até então os mais utilizados. Cerca de apenas 200 anos depois, não sem antes serem vítimas de alguns colapsos de pirâmides que os ajudaram a evoluir, os arquitetos egípcios projetaram e construíram a Pirâmide de Khufu (Figura 2), em homenagem ao imperador Khufu, também conhecido por Queóps, considerada uma das 7 maravilhas da antiguidade, com impressionantes 147m de altura.

⁹ É composto de um grande círculo de megalitos cuja construção data entre 2500 a.C. e 2000 a.C. Em 2200 a.C. tomou seu aspecto atual, quando foram transportados 32 blocos desde as montanhas de Preseli, ao sudoeste de Gales, Grã-Bretanha.

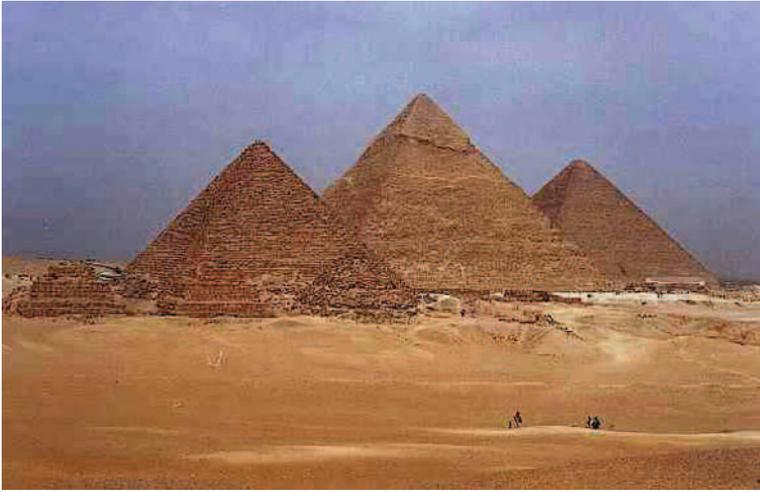


Figura 2. Pirâmide de Khufu, considerada a pirâmide mais majestosa do antigo Egito. Uma das 7 maravilhas da antiguidade. (<http://www.carpom.hpg.ig.com.br/Piramide6.jpg>)

Com esse material de construção, eles conseguiram construir uma das mais duráveis e resistentes obras de Engenharia da humanidade, hoje com cerca de 4500 anos, e, ainda existente e majestosa, mostrando ao mundo o poder e o desenvolvimento da civilização egípcia. Muito posteriormente, outras grandes civilizações, tais como: a Grega; a Persa; a Romana; a Maia; a Inca; a Asteca e os grandes arquitetos da Idade Média e do Renascimento fizeram uso da rocha e escreveram a história da humanidade por meio de suas obras seguras, bonitas, funcionais e duráveis, que complementam e ilustram a história tradicional escrita por letras e palavras em pergaminhos.

As *Catedrais de Colônia e de Notre Dame* exploraram com seus arcos góticos e belos espaços internos, os limites de sofisticação e combinação da rocha natural e bem trabalhada como material estrutural. As edificações dessa época, no entanto, estavam restritas a vãos em forma de arco ou abóbadas com dimensões inferiores a 45m, paredes portantes, pisos e coberturas planas de madeira e com vão bem limitado, o que impedia construções em altura e com grandes espaços internos.

29.1.3 As maravilhosas estruturas metálicas

A 2ª grande revolução na arte de projetar e construir estruturas ocorreu somente com a Revolução Industrial, ou seja, nos fins do século XVIII e princípios do século XIX, com a chegada do aço para a construção de estruturas. Foi então que a Engenharia conseguiu construir pontes de grandes vãos. A primeira delas foi a ponte metálica construída em 1781, em arco e ainda com modestos 30m de luz, denominada *Coalbrookdale Bridge*, situada em Telford, região admitida como centro da Revolução

Industrial, na Inglaterra, e que até hoje se encontra em uso para pedestres.

Em 1883, os americanos surpreenderam o mundo construindo a maravilhosa *Ponte do Brooklin* em Nova York, vedete de filmes até hoje (Figura 3). É interessante notar que as fundações dessa ponte foram construídas originalmente em alvenaria de blocos de rocha, pois não havia ainda o concreto armado. Tratava-se de, e ainda é, uma linda ponte suspensa viabilizada pelos cabos de aço galvanizados, patenteados e fornecidos por John Augustus Roebling, proprietário da mais consagrada e famosa casa de cabos e cordoalhas de aço da época. Roebling acabou fornecendo cabos também para a ponte *Golden Gate*, inaugurada em 1936, com fundações de concreto, e centenas de outras, entre elas a *Puente Leonel Viera*, entre Maldonado e Punta del Este no Uruguai, inaugurada em 1963.



Figura 3. A majestosa ponte metálica do Brooklin, em Nova York, inaugurada em 1883. (http://home.hia.no/~magnb04/NYC_New_York_Brooklyn_Bridge_from_World_Trade_Center_b.jpg)

Ainda no século XIX, utilizando de forma magistral esse novo material de construção, Gustave Eiffel, na França, projetou e construiu uma das mais emblemáticas obras de Engenharia, a majestosa *La Tour Eiffel* (Figura 4), inaugurada em 1889, com 312m de altura, superando por primeira vez, depois de 4400 anos, a altura da *Pirâmide egípcia de Khufu*, monumento mais alto até então construído pelo homem. Desde sua inauguração, essa torre desperta o interesse e a curiosidade de milhões de visitantes a Paris, tendo recebido em 2006 mais de 6.500.000 turistas. Até essa época o aço estrutural vinha sendo utilizado principalmente para construir pontes e torres, sendo pouco empregado em edifícios que ainda continuavam sendo construídos com paredes estruturais de alvenaria portante e pisos de madeira.



Figura 4. Torre Eiffel em Paris com 312m de altura superou por larga margem a altura da pirâmide de Khufu, com 147m, até então, a mais alta estrutura construída pela Engenharia.

Para alcançar maior amplitude de uso foi necessário ainda que esse, então, novo material de construção de estruturas, o aço estrutural e a tecnologia dele decorrente, recebessem o impulso de dois importantes descobrimentos e suas respectivas patentes. A primeira, em 1853 no estado de Nova York, onde Elisha Graves Otis desenvolveu o primeiro elevador seguro, sem risco de queda que é utilizado até hoje nas edificações altas do mundo inteiro. Na prática, o primeiro elevador elétrico Otis somente foi instalado em 1889 num hotel em Nova York. A segunda, também nos Estados Unidos, com a contribuição de Leroy Buffington que em 1888 patenteou a forma de construir estruturas através de um esqueleto reticular (pilares, vigas e lajes) em substituição às paredes portantes, que passaram a ter apenas função de vedação, revolucionando a forma de projetar e construir edifícios¹⁰.

Esses desenvolvimentos deram origem, por volta de 1891, ao início dos arranha-céus estabelecido com a inauguração do edifício Wainwright com 42m de altura em St. Louis (Figura 5), nos Estados Unidos. Essa nova forma de construir ficou conhecida como “Escola de Chicago”, sendo o Arquiteto Louis Henry Sullivan considerado seu ícone e, a partir daí o projeto e construção de edifícios em altura desenvolveu-se enormemente, sendo a principal forma de construir dos dias atuais.

¹⁰ LEPIK, Andres. *Sky Scrapers*. New York, Prestel publishing, 2004. ISBN 3-7913-3155-8



Figura 5 - Edifício Wainwright em St. Louis, Estados Unidos, considerado um dos primeiros “arranha-céu” em estrutura metálica com 42m de altura, inaugurado em 1891. (http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Wainwright_building_st_louis_USA.jpg)

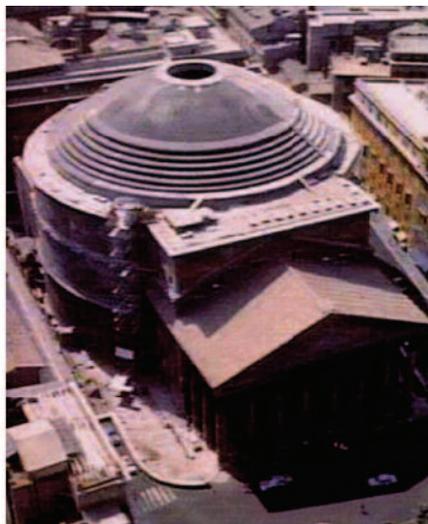


Figura 6 - Cúpula do Panteão de Roma, construída em concreto simples, com uso de agregados leves, pozolana e cal 118-125 d.C

29.1.4 O concreto como material estrutural

Apesar do *concreto simples*, ter sido magnificamente aplicado em centenas de quilômetros de rodovias e pavimentos do império Romano como na *Via Apia*, existente até hoje nos arredores de Roma, seu uso mais espetacular foi na cúpula de maior vão livre da antiguidade, o *Panteão de Roma*, com 44m de luz (Fig. 6), cujo vão livre somente foi superado em 1912, na cobertura de um centro de exposições na Alemanha⁸.

Tratava-se de um concreto primitivo, obtido da mistura de cal hidratada com argila pozolânica, abundante na região de Pozzuoli nas cercanias de Nápoles, que o transformava em um material muito durável mas, ainda, com resistências baixas, comparadas às de hoje. Nessa cúpula foi utilizado com maestria todo o saber da época¹¹, contraventando os esforços horizontais da base com paredes estáveis e estruturais de 6m de largura; espessura da cúpula variável e decrescente dos apoios para o centro; concreto com densidade variável e decrescente dos apoios ao centro através do uso de diferentes agregados (calcário, carvão, tijolos e pedra pome); fôrmas de bronze com caixões tipo “cubetas” para reduzir peso de material e um eficiente adensamento e acabamento superficial.

¹¹ ISAIA, G. C. Concreto: da Era Clássica à Contemporânea. In: ISAIA, G. C. (ed) **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Instituto Brasileiro do concreto, 2005, p. 1-43.

Depois dessa vitoriosa façanha estrutural, a Engenharia não mais utilizou esse concreto como material estrutural em obras importantes e parece ter esquecido esse conhecimento por muitos séculos⁸.

O concreto da era atual teve início somente após a patente do cimento Portland por John Aspdin¹² em 1824 na Inglaterra. Nesses primeiros anos, mesmo nos Estados Unidos, França e Inglaterra, que eram as três nações mais desenvolvidas da época, pouca aplicação significativa teve, destacando-se as patentes dos franceses Joseph-Louis Lambot, em 1855, para construir barcos, e, de Joseph Monier para construir vasos em 1867 (e postes e vigas em 1878), basicamente em argamassa armada. A Monier também é creditado o projeto e construção da primeira ponte de argamassa armada, inaugurada em 1875 no Castelo de Chazelet¹³.

Sentindo o potencial desse novo material estrutural, o engenheiro alemão Gustav Adolf Wayss compra a patente de Monier e desenvolve o uso do concreto armado, dando grande impulso a sua empresa *Wayss & Freytag* a partir de 1875, empresa essa que nos primórdios de 1900 teve grande influência no Brasil, Uruguai e Argentina, através de suas filiais.

Na mesma época, em 1878, Thaddeus Hyatt, patenteia nos Estados Unidos o concreto armado e em 1893 constrói o primeiro edifício na Califórnia, mas perde para os alemães e franceses na velocidade de transferência desta nova tecnologia aos demais países.

Naquele século XIX, pesquisadores do quilate de Louis Vicat¹⁴, Henry Le Châtelier¹⁵ e René Féret¹⁶ trataram de tornar esse novo material, o concreto de cimento Portland, mais conhecido e mais confiável, resultando no interesse de seu uso generalizado em estruturas.

Com o embasamento teórico e experimental sobre a confiabilidade desse novo material estrutural, assegurado por esses e outros pesquisadores, e, dispondo de um produto industrializado, o francês François Hennebique¹⁷, construtor, desenvolveu o sistema e obteve uma patente, em 1892, para o completo projeto e construção de edificações com base num novo processo construtivo por ele denominado de “*béton armé*” cujos primeiros desenhos estão mostrados na Figura 7.

¹²John Aspdin nasceu em Leeds, Condado de Yorkshire, Inglaterra e em 21 de outubro de 1824, solicitou a patente nº 5022 para “...um aperfeiçoamento no método de produzir pedra artificial...”

¹³ *Argamassa armada ou Cimento Armado* eram denominações da época para o Concreto Armado de hoje.

¹⁴ Louis Vicat (1786-1861) Engenheiro francês, inventor do cimento artificial. Estudou o tempo de pega de argamassas e inventou novos cimentos artificiais em 1817. Inventou também a Agulha de Vicat que ainda é usada para determinação do tempo de pega de concretos e cimentos.

¹⁵ Henry Louis Le Chatelier (1850-1936) Químico francês, Engenheiro consultor da companhia de cimento Société des Chaux et Ciments Pavin de Lafarge.

¹⁶ René Feret foi chefe do Laboratório de “Ponts et Chaussées”, Paris, e em 1892 formulou a lei fundamental que relaciona resistência à compressão de argamassas com sua compacidade. (HELENE, Paulo & TERZIAN, Paulo. **Manual de Dosagem e Controle dos Concretos de Cimento Portland**. São Paulo, PINI, 1993. 350 p.

¹⁷François Hennebique (1842 - 1921), construtor francês, considerado como o inventor das estruturas de concreto armado. Em 1879 construiu a primeira laje de concreto armado e, em 1892, o primeiro prédio com este material.

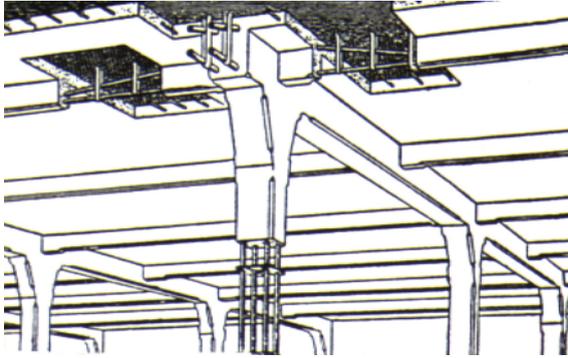


Figura 7 - Desenho típico de um projeto e construção de edifícios com estruturas de concreto armado de acordo com a patente de Hennebique em 1892. (<http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/BSI/HISTORY/reinfo-1.jpg>)

Hennebique, que também projetou e construiu a primeira ponte de concreto armado em Châtelleraut, em 1899, mostrou que havia resolvido os problemas de ligação e engastamento entre vigas, pilares e lajes. Para demonstrar as vantagens e segurança desse novo sistema construtivo, ele projetou e construiu o primeiro edifício totalmente de concreto armado, com pilares, vigas e lajes, similar ao que hoje se pratica em todas as nações do mundo.

Demonstrou ser possível, seguro e durável, substituir as paredes portantes por paredes de vedação e os pisos metálicos ou de madeira por lajes de concreto armado, inaugurando em 1901 um edifício de 7 andares onde fez sua residência e seu escritório de negócios, conforme mostrado na Figura 8.



Figura 8 - Edifício de Hennebique. Rue Danton n.1. Quartier Latin, Paris, 1901.
Vida útil comprovada de mais de 100 anos!

Seu descobrimento representou uma 3ª revolução tão impressionante na forma de projetar e construir estruturas, que, em apenas uma década, sua empresa construiu mais de 7000 edifícios e constituiu 62 escritórios espalhados pelas principais cidades do mundo, nos quatro principais continentes da época: Europa, América, África e Ásia. O principal *slogan* de seu negócio era: “...nunca mais risco de incêndio...”.

Graças aos métodos de cálculo desenvolvidos por Möersch⁸ e Köenen⁸ na Alemanha e Coignet⁸ e Hennebique na França, em 1903, a Suíça e a Alemanha publicam as duas primeiras normas de projeto e execução de estruturas de concreto armado, seguidas pela França em 1906, pela Inglaterra em 1907, e pelos Estados Unidos em 1910.

O Brasil publica sua primeira norma em 1931¹⁸, depois de haver projetado e construído dois recordes mundiais em altura, os edifícios *A Noite*, no Rio de Janeiro e *Martinelli* em São Paulo, ambos em fins da década de 20, com mais de 100m de altura. Um pouco antes, em meados da década de 20, o *Palácio Salvo* em Montevideú (Fig. 9), por primeira vez alcançou os 100m de altura e pode ser considerado o primeiro arranha-céu em concreto armado do mundo. Na década seguinte, o *Rascacielos* (Arranha-céu) Kavanagh em Buenos Aires supera impressionantes 120m de altura em 1935 e passa a ser o edifício em concreto, mais alto do mundo.



Figura 9 - Palácio Salvo em Montevideú, Uruguai, primeiro arranha-céu em concreto armado do mundo, inaugurado em 1925. Projeto do arquiteto Mario Palanti.

¹⁸ HELENE, Paulo & TERZIAN, Paulo. **Manual de Dosagem e Controle dos Concretos de Cimento Portland**. São Paulo, PINI, 1993. 350 p. ISBN 85-7266-007-0.

29.1.5 Os 4 grandes marcos da evolução das estruturas

O concreto armado foi para Brasil, Argentina, Uruguai e outros países, nos quais não existia indústria siderúrgica capaz de produzir perfis estruturais, o mais importante material estrutural de construção civil da primeira metade do século XX, e continua assim até hoje.

No fim da década de 20, ainda na França, em 1928, Eugène Freyssinet¹⁹ insere seu nome na história, patenteando o concreto protendido que deu enorme impulso ao uso das estruturas de concreto, não somente para edifícios viabilizando as lajes planas, mas também para pontes, viabilizando processos construtivos tão ousados quanto os balanços sucessivos para vencer grandes vãos sem necessidade de escoramentos.

Naquelas poucas décadas, o projeto das estruturas havia mudado radicalmente. Não eram mais necessários arcos e abóbadas para vencer vãos, nem escoramentos tradicionais, nem vários materiais sobrepostos, nem paredes estruturais para suportar cargas, bastavam pilares, vigas e lajes de concreto.

Cabe registrar que data desta época o projeto e construção, da magnífica estátua do Cristo Redentor no Rio de Janeiro, eleita uma das 7 maravilhas do mundo moderno (Figura 10).



Figura 10. Cristo Redentor do Rio de Janeiro, 1931. Estátua de concreto armado revestido com pedra sabão, 39,6m de altura, sobre o Corcovado, aproximadamente 750 m de altura sobre o nível do mar. (<http://es.wikipedia.org/wiki/Imagem:Cistr.jpg>)

O projeto estrutural foi do engenheiro brasileiro Heitor da Silva Costa com a colaboração preciosa de Albert Caquot, reconhecido projetista estrutural francês. Para o desenho artístico, ele contou com a colaboração do artista plástico brasileiro Carlos Oswald e do polonês Maximillien Paul Landowski, que era reconhecido escultor na França .

A estrutura em concreto armado, foi toda construída “in loco” no alto da encosta, fazendo uso de poucas partes pré-fabricadas. Sacos de cimento, areia, armaduras, fôrmas, além da água e do revestimento final em pedra-sabão, subiram morro acima pelos trilhos do trenzinho do Corcovado, construído sob Dom Pedro II. Inaugurado em 12 de outubro de 1931, o Cristo Redentor é considerado patrimônio histórico da humanidade desde 1937 e Santuário Católico desde 2006.

Hoje com 76 anos de idade, a estrutura dessa estátua, requereu apenas duas intervenções para manutenção realizadas nas décadas de 80 e 90, o que a caracteriza como de exemplar vida útil.

¹⁹ Eugène Freyssinet (1879-1962) Engenheiro civil francês, especializado em Engenharia Estrutural, pioneiro do concreto protendido, do qual obteve patente em 1928. (English version em www.wikipedia.org)

²⁰ www.en.wikipedia.org/wiki/Christ_the_Redeemer_statue (English version)

Por outro lado a construção civil de edificações nos países desenvolvidos fazia uso intensivo do aço estrutural. Era notável o enorme desenvolvimento da Engenharia de estrutura metálica que, na mesma época, em 1931, inaugurava o *Empire State Building* em Nova York com 383m de altura, surpreendendo a engenharia mundial e colocando-se como o grande marco do poder e do desenvolvimento da civilização americana. Durante os primeiros 90 anos do século XX, as estruturas metálicas para edifícios altos prevaleceram sobre as de concreto, havendo alteração somente no fim da década de 90, conforme mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 - Síntese das quatro grandes revoluções na arte de projetar e construir estruturas.

Grandes mudanças	Período	Obra emblemática	Projetista	Comentários
1ª revolução	2800 a.C. a 2500 a.C.	Pirâmide escalonada de Djoser - Egito.	Arquiteto, alquimista, político Imhotep - Egito.	A Engenharia e a Arquitetura de estruturas podiam construir obras duráveis, majestosas e de grandes proporções.
2ª revolução	1779	Iron Bridge em Coalbrookdale - Inglaterra.	Arquiteto T. M. Pritchard com aço produzido por Abraham Darby III - Inglaterra.	A Engenharia estrutural e a Arquitetura podiam projetar obras antes inimagináveis, com muito mais velocidade, segurança para vencer grandes vãos e podia construir em altura como nunca dantes.
3ª revolução	1901	Edifício Hennebique. Rue Danton n.1, Paris - França.	Construtor François Hennebique - França.	A Engenharia e a Arquitetura estrutural podiam ousar muito mais, pois descobriram como combinar dois materiais fantásticos. O concreto tinha a durabilidade da rocha, era compatível com o aço e ainda o protegia "eternamente".
4ª revolução	1997	Edifício Petronas Tower, Kuala Lumpur - Malásia.	Arquiteto Cesar Pelli - Argentina. Projeto estrutural de Thornton Tomasetti - Estados Unidos.	A Engenharia estrutural e a Arquitetura descobrem as vantagens de rigidez do concreto de alto desempenho assim como seus benefícios para a sustentabilidade da construção civil.

29.1.6 A supremacia do concreto

Em 1976, a Engenharia canadense impressiona o mundo com a construção em tempo recorde da *CN Tower*, hoje pertencente à “CLC Real Estate Canada Lands Company”, em concreto protendido com 555m de altura, considerada até hoje a mais alta estrutura construída pelo homem, graças à ousadia do arquiteto John Andrews e dos engenheiros projetistas da NCK Engineering.

Outro marco da engenharia de concreto atual é o edifício que introduziu o moderno estilo “high-tec” de construção inaugurado pelos franceses em 1990, denominado “*La Grande Arche*” em La Defense, nas cercanias de Paris, construído com concreto de alto desempenho. Foi projetado utilizando em grande parte o concreto protendido, pelos arquitetos Johann Otto von Spreckelsen e Paul Andreu.

Em 1997, a Malásia, na cidade de Kuala Lumpur, deu um passo enorme em direção à 4ª revolução na arte de projetar e construir estruturas, com a construção das torres gêmeas Petronas, em concreto de alto desempenho e com 452m de altura, superando a estrutura metálica da Torre Sears, na época a mais alta estrutura de edifício do mundo, situada em Chicago. Com projeto arquitetônico do consagrado arquiteto argentino Cesar Pelli e projeto estrutural do reconhecido escritório americano Thornton Tomasetti, essa obra emblemática pode ser considerada um divisor de águas, pois a partir desse período o mundo das estruturas de edifícios altos adota definitivamente o concreto de alto desempenho como seu principal protagonista (Figura 11).



Figura 11 - Petronas Tower, em Kuala Lumpur, Malásia, primeiro edifício em concreto de alto desempenho que superou em altura os edifícios metálicos, 1997. (<http://www.diritto-internazionale.com/guide/Petronastower2.jpg>)

De acordo com os levantamentos do “CTBUH - Council on Tall Buildings and Urban Habitat”, relatados por Gilberto do Valle no 48º Congresso Brasileiro do Concreto ocorrido no Rio de Janeiro em 2006, hoje já existem cinco novos edifícios com altura superior a 450m, entre eles: o edifício *Taipei 101* “Shangai World Financial Centre” em Taiwan, inaugurado em 2004 com 509m de altura, construído com estrutura mista aço/concreto de alto desempenho.

Ainda segundo Valle, nos últimos dez anos, a partir da construção da Petronas Tower (1997), 36 novos edifícios com altura superior a 300m, considerado o novo patamar para ser considerado arranha-céu, foram construídos ou estão em construção no mundo. Desse total, 13 edifícios são em estrutura de concreto, inclusive o mais alto do mundo, atualmente em construção nos Emirados Árabes, denominado Burg (torre) Dubai, com prováveis 750m, a ser inaugurado em 2008

(Figura 12). Dos 36 citados, outros 19 são em estrutura mista concreto/aço, e somente 4 são em estrutura inteiramente de aço.



Figura - 12. Torre (burg) Dubai, nos Emirados Árabes. Estrutura mais alta do mundo com cerca de 750m de altura, em concreto. Está em construção e tem previsão para inaugurar em 2008.
(<http://www.costruzioni.net/articoli/dubai/image010.jpg>)

29.1.7 Perspectivas futuras

Em 100 anos, o concreto, *vital construction material*, segundo o ACBM, superou todos os limites e fronteiras do conhecimento em Engenharia de projeto e de construção. Trata-se do mais novo material de construção estrutural descoberto pela Engenharia, o qual ainda se encontra em franca evolução, não sendo possível prever seu futuro e nem definir seus limites.

A história recente tem demonstrado que ainda vale a pena pesquisar, projetar, dosar, construir, sempre buscando tirar mais proveito desse versátil material de construção, explorando seu elevado desempenho e usando-o corretamente sob o ponto de vista da proteção ambiental e da sustentabilidade.

Na última década, muitas empresas e projetistas no mundo, às vezes até sem ter plena consciência, têm tirado proveito das novas tecnologias desenvolvidas pelos grandes centros de pesquisa e desenvolvimento em concreto, como o ACBM e FHWA nos Estados Unidos, o Béton Canadá, no Canadá, e muitos outros na Europa, Ásia e Austrália. Só no Brasil há cerca de 130 Centros de P&D em concreto registrados no sistema de ciência e tecnologia do país²⁰.

As pesquisas, estudos e experimentações nesses centros trazem tranquilidade e segurança a projetistas, construtores e usuários que, a cada dia mais, vêm preferindo essa revolucionária opção de construção de

estruturas, encontrando farto material de consulta e suporte para seus projetos e alternativas construtivas. Pesquisa, conhecimento, confiança e permanente transferência de tecnologia, são os pilares de sustentação do crescente e pujante mercado das estruturas de concreto no Brasil e no mundo atual.

29.2. Conceitos Fundamentais da Tecnologia do Concreto

Na mistura do concreto, o Cimento Portland, juntamente com a água, forma uma pasta mais ou menos fluida, dependendo do percentual de água adicionado. Essa pasta envolve as partículas de agregados com diversas dimensões para produzir um material, que, nas primeiras horas, apresenta-se em um estado capaz de ser moldado em fôrmas das mais variadas formas geométricas. Com o tempo, a mistura endurece pela reação irreversível da água com o cimento, adquirindo resistência mecânica capaz de torná-lo um material de excelente desempenho estrutural, sob os mais diversos ambientes de exposição.

O concreto de Cimento Portland deve conter cimento, água e agregados, além da possibilidade de contar com aditivos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições minerais, cujos empregos tornam-se cada vez mais frequentes nos concretos atuais. A proporção entre os diversos constituintes é buscada pela tecnologia do concreto, para atender simultaneamente as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade requeridas para o concreto, além das características de trabalhabilidade necessárias para o transporte, lançamento e adensamento, condições estas que variam caso a caso.

A fluidez da pasta, constituída de cimento e água, dependerá, essencialmente, da distribuição granulométrica do cimento e da quantidade de água adicionada, que é expressa pela relação água/cimento. Quanto maior essa relação, mais fluída é a pasta, como mostrado na Figura 13, em que, podem ser visualizadas pastas com quatro relações água/cimento distintas de 0,60; 0,50; 0,40 e 0,30, obtidas com um mesmo cimento.

²⁰ HANAI, João Bento de. Diagnóstico dos Centros de P&D na Área de Concreto. São Paulo, **Revista Concreto**, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, n. 40, ano XXXIII, Set.Out.Nov., 2005. p. 36-44 ISSN 1806-9673



Figura 13 - Pasta do mesmo cimento Portland com diferentes relações água/cimento: da esquerda para direita e de cima para baixo: 0,60, 0,50, 0,40 e 0,30.

As quatro pastas, mostradas na Figura 13, possuem desempenho bem distintos quando endurecidas, sendo crescente com a redução da relação água/cimento. A pasta de 0,30 de relação água/cimento possui uma resistência mecânica muito superior à pasta de 0,60.

Treval Powers²¹ (1966), pesquisador renomado na área de concreto, desenvolveu um modelo físico e uma expressão matemática, para parametrizar a resistência à compressão como função da relação entre o grau de hidratação do cimento e a sua relação água/cimento, que é muito útil para o entendimento do comportamento do concreto, a saber:

$$f_c = k \left[\frac{0,68 * \alpha}{0,32 * \alpha + a/c} \right]^n \quad \text{(Equação 1)}$$

onde:

- f_c : resistência à compressão numa certa idade, em MPa;
- k : constante que depende dos materiais utilizados
- n : constante que depende dos materiais utilizados
- a/c : relação água/cimento ou água/aglomerantes, em massa
- α : grau de hidratação do cimento em porcentagem

Com essa expressão e utilizando o modelo físico proposto por Powers (1966), é possível mostrar no exemplo do Quadro 2, as proporções relativas dos compostos hidratados, na estrutura interna do concreto endurecido, utilizando 1kg de cimento anidro misturado com 0,5kg de água, resultando em um volume

²¹ POWERS, T. C. **The Nature of Concrete**. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, STP n. 169-A, 61-72 (1966), ASTM American Society for Testing and Materials.

total de pasta de, aproximadamente, $0,853\text{dm}^3$, o qual corresponde à soma de $0,32\text{dm}^3$ de cimento, $0,50\text{dm}^3$ de água, com $0,033\text{dm}^3$ de ar (admitido da ordem de 4%).

Quadro 2 - Percentual das fases em uma mesma pasta de cimento Portland.

FASES DA PASTA DE CIMENTO 1kg DE CIMENTO : 0,5kg DE ÁGUA			GRAU DE HIDRATAÇÃO					
			67% (28 dias)			100% (100 anos)		
			dm ³	%	%	dm ³	%	%
Fases resistentes (dm ³)	Volume de gel hidratado	Prod. sólidos	0,246	28,8	58,2	0,491	57,6	78,9
		Poros do gel	0,091	10,7		0,182	21,3	
	Vol. de cimento anidro		0,160	18,7	0,000	0,0		
Fases não resistentes (dm ³)	Vol. total de ar		0,033	3,9	41,8	0,033	3,9	21,1
	Vol. de poros vazios		0,029	3,4		0,059	6,9	
	Vol. de poros com água		0,294	34,5		0,088	10,3	
Volume total de pasta endurecida			0,853	100%		0,853	100%	

Imediatamente após a mistura, as pastas são constituídas de três fases: cimento anidro, água e ar. Com a hidratação progressiva do cimento, novas fases se formarão e, ocorrerá também a variação dos volumes de cada uma das fases. Apesar de ocorrer variação de volume entre as fases, o volume total da pasta permanece constante, desde que não ocorra a evaporação da água capilar, a qual induziria retração de secagem.

O Quadro 2 mostra as diversas fases formadas com grau de hidratação de 67% (valor razoável para 28 dias a 23°C) e de 100% (valor razoável para 100 anos em câmara úmida ou sob água a 23 °C). Na realidade, o tempo necessário para atingir esses graus de hidratação é bastante variável, pois depende da composição e finura do cimento, da relação água/cimento da pasta, da eventual presença de aditivos, e das condições de cura e de sazonalidade do concreto.

Como era de se esperar, observa-se no Quadro 2, que, com o aumento do grau de hidratação, existe um aumento do volume das fases que contribuem para o desempenho mecânico da pasta e um decréscimo das fases que prejudicam o seu desempenho mecânico.

Entretanto, mesmo com a completa hidratação do cimento, a pasta com a relação água/cimento de 0,50, por empregar uma quantidade de água além da necessária para hidratação total do cimento, ainda conterà um volume apreciável de poros com água. Esses poros, juntamente com os poros provenientes da contração do gel hidratado e com o volume inicial de ar aprisionado e/ou incorporado à mistura, podem chegar a mais de 21% de fases denominadas não resistentes.

Por outro lado, o Quadro 3 mostra a influência da relação água/cimento na porosidade capilar, admitindo que todas as pastas tenham alcançado 100% de

hidratação. As fases não resistentes (de poros), obtidas nas pastas com relações água/cimento de 0,60; 0,50; 0,40 e 0,30 foram, respectivamente, de 30%, 21%, 11,5% e 10,5%. Para as pastas com relação água/cimento de 0,40 e 0,30, a água não seria suficiente para hidratar todo o cimento, apresentando ainda, mesmo após 100% de hidratação, um volume de cimento anidro de 1,1% e 13,2% respectivamente.

Quadro 3 - Percentual das fases em pastas com 0,60, 0,40 e 0,30.

FASES DAS PASTAS DE CIMENTO			PASTAS COM 100% DE HIDRATAÇÃO								
			1 : 0,60			1 : 0,40			1 : 0,30		
			dm ³	%	%	dm ³	%	%	dm ³	%	%
Fases resistentes (dm ³)	Vol. de gel hidratada	Produto sólido	0,491	51,2	70,2	0,479	55,6	88,5	0,359	55,6	89,4
		Poros do gel	0,182	19,0		0,177	20,6		0,133	20,6	
	Vol. de cimento anidro	0,000	0,0	0,008		13,2	0,085		13,2		
Fases não resistentes (dm ³)	Vol. total de ar		0,037	3,9	29,8	0,029	3,9	11,5	0,025	3,9	10,6
	Vol. de poros vazios		0,059	6,1		0,057	7,6		0,043	6,7	
	Vol. de poros com água		0,190	19,8		0,000	0,0		0,000	0,0	
Volume total de pasta endurecida			0,959	100%		0,750	100%		0,645	100%	

Portanto, para um mesmo grau de hidratação, a melhoria das características mecânicas da pasta e a redução de sua porosidade estão diretamente relacionadas à redução da relação água/cimento.

É interessante notar-se que o cimento não hidratado, existente nas pastas de cimento de baixas relações água/cimento, não interfere negativamente na resistência, podendo até ajudar no aumento dessa resistência, conforme demonstrado por ISAIA et. al.²² (2003). Esse conceito é verificado nos concretos de alta resistência. Hoje já é usual, no mundo e no Brasil, concretos de resistência à compressão de 60MPa, 70MPa, chegando, em certas obras, até a 120MPa e 150MPa, com técnicas usuais de produção em caminhões betoneiras.

Esses concretos, para atingirem esses níveis de resistência à compressão, utilizam relações água/cimento extremamente baixas, de 0,20 ou menos, que são bem inferiores às relações teóricas mínimas para a hidratação do cimento, apresentando um volume de cimento não hidratado bem superior aos simulados para a pasta com relação água/cimento de 0,30, mostrada no Quadro 3.

A forte correlação entre a resistência à compressão e a relação água/cimento foi descoberta experimentalmente por René Féret na França ainda no século XIX e, principalmente, por Abrams²³ (1918), nos Estados Unidos. Ainda hoje, a chamada “Lei de Abrams” é o principal parâmetro para a definição da resistência e

²² ISAIA, G. C.; GASTALDINI, Antonio Luiz Guerra & MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, Barking, Essex, England, v. 25, n. 1, p. 65-72, 2003.

²³ ABRAMS, Duff Andrew. **Design of Concrete Mixtures**. Chicago, Structural Materials Research Laboratory, 1918. (Lewis Institute Bulletin, 1).

durabilidade dos concretos, a saber:

$$f_c = \frac{A}{B^{a/c}} \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

- f_c : resistência à compressão numa certa idade, em MPa;
- A : constante que depende dos materiais utilizados e da idade
- B : constante que depende dos materiais utilizados e da idade
- a/c : relação água/cimento ou água/aglomerantes, em massa

Em concretos de alta resistência, essa relação pode não ser automaticamente representativa, devido a que os agregados, bem como, a interface de aderência entre a pasta e os agregados serem mais solicitados, aumentando a influência das características dos agregados (resistência, forma e textura) na resistência final do concreto, que passa a não mais ser explicada somente pela relação a/c . Portanto, para concretos de elevada resistência, a escolha dos agregados pode passar a ser um fator fundamental para seja alcançada as especificações requeridas.

Observe-se que, fixando uma relação água/cimento para a pasta, isto é, com uma determinada fluidez, podem ser obtidos concretos com abatimentos (ou trabalhabilidade) bastante distintos, a partir da variação do volume de pasta utilizada na mistura. A Figura 14 mostra dois concretos, utilizando os mesmo materiais, com abatimentos totalmente distintos, cuja relação água/cimento das duas pastas é a mesma, de 0,60. No concreto mais plástico, foi utilizado um volume maior de pasta por metro cúbico, entretanto, as pastas dos dois concretos possuem a mesma fluidez.



Figura 14. Dois concretos produzidos com o mesmo cimento e agregados e com 0,60 de relação água/cimento, dosados para terem abatimentos distintos (60mm e 140mm).

Portanto, como conceito básico, para concretos produzidos com o mesmo cimento e agregados, fixando a relação água/cimento, quanto maior o abatimento (mais fluído), maior será o consumo de cimento do concreto.

Por outro lado, mantendo fixo o abatimento, quanto menor a relação

água/cimento do concreto, maior será o seu desempenho mecânico e de durabilidade, e maior também será seu consumo de cimento por m^3 do concreto.

Essa premissa é válida para uma ampla faixa de relações água/cimento, entretanto, quanto menor essa relação, mais difícil será obter concretos plásticos, mesmo com o aumento sensível do volume de pasta no concreto. Este raciocínio, pode ser entendido facilmente, observando-se as pastas com relação 0,40 e 0,30, da Figura 13. Nestas pastas, por maior volume de pasta que tenha a mistura, seria impossível, fisicamente, obter concretos plásticos.

A dificuldade para obtenção de concretos plásticos, à medida que era reduzida a relação água/cimento, limitou, por muitos anos, a utilização de concretos de maior resistência e maior durabilidade. Esta limitação começou a mudar significativamente a partir da década de 50, quando começou a surgir uma nova linha de aditivos plastificantes, de muito mais eficiência do que os anteriores, sendo denominados de superplastificantes. Esses aditivos, que já estão na 3ª geração, introduzida em meados da década de 90, são empregados, principalmente, em concretos de alta resistência e/ou concretos auto-compactáveis, onde o efeito conjugado de baixa relação água/cimento e do elevado abatimento são impossíveis de serem obtidos sem o uso desses aditivos.

Como exemplo do efeito dispersante extraordinário dos aditivos superplastificantes, são mostradas na Figura 15, duas pastas obtidas a partir de um mesmo cimento e mesma relação água/cimento, no caso, de 0,30. Essa pasta possui um potencial de obter concretos com resistência à compressão igual ou superior a 60MPa, aos 28 dias, dependendo do tipo de cimento e agregados empregados. A única diferença em termos de composição é que, na pasta da direita, foi adicionado apenas 1% de aditivo superplastificante, em relação à massa de cimento. As duas pastas mostradas na Figura 15, quando endurecidas, possuirão estruturas similares, com resistências equivalentes.



(a)

(b)

Figura 15 - Pastas de cimento com 0,30 de relação água/cimento sem (a) e com 1% de aditivo superplastificante (b)

Esses aditivos superplastificantes ainda vieram possibilitar o pleno emprego de pozolanas de alta reatividade, para a produção de concretos de alto desempenho

sob a ótica da durabilidade. Estas pozolanas, como o metacaulim e a sílica ativa, têm como objetivo melhorar o desempenho mecânico e reduzir a porosidade das pastas, em igualdade de relação água/cimento.

No tocante às funções técnicas dos agregados no concreto, apesar da sua pequena influência no desempenho mecânico dos concretos de baixa e média resistência, os mesmos têm papel importante no controle da estabilidade volumétrica do concreto endurecido e de sua tendência à fissuração, justamente em função de ocupar um volume elevado de aproximadamente de 65% a 70% no concreto.

Dentre os dois componentes principais do concreto, pasta e agregados, a pasta é muito mais instável, retraindo-se durante o processo de hidratação e secagem e expandindo-se quando umedecida. O cimento ainda pode liberar calor durante a sua hidratação e induzir problemas de fissuração em peças de grande volume de concreto. Além do mais, o fenômeno de fluência, isto é, o efeito de deformação lenta que sofre o concreto, é proveniente, das propriedades viscoelásticas da pasta, que são muito mais sensíveis a esse fenômeno do que os agregados.

29.3. Princípios para Especificação e Proporcionalamento de Concreto

O concreto é um dos poucos materiais de construção em que os engenheiros civis e arquitetos ainda têm acesso direto a sua produção, quer seja no canteiro de obras ou em usinas de concreto, podendo interferir diretamente nas especificações e produção do material.

Para que o profissional de engenharia possa intervir tecnicamente no processo, é imprescindível que conheça os princípios básicos que norteiam a especificação do concreto e o proporcionalamento dos diversos constituintes, a partir da necessidade de desempenho mecânico, da durabilidade e das condições de aplicação do material.

Os engenheiros devem ter o conhecimento de que a durabilidade, a resistência à compressão, a relação água/cimento, o consumo de cimento e o abatimento do concreto têm uma interdependência entre si, ou seja, um parâmetro não pode estar totalmente dissociado do outro. Muitas vezes, engenheiros de produção se deparam com especificações pré-estabelecidas e incoerentes em cadernos de encargos, tanto de obras públicas quanto privadas como, por exemplo, especificações que fixam relação a/c e resistência à compressão ao mesmo tempo sendo incompatíveis entre si.

O uso de aditivos plastificantes e/ou superplastificantes, que acarreta numa mudança da reologia da pasta, tornando-a mais fluída, possibilita a redução do volume de pasta no concreto, mantendo o mesmo abatimento. O emprego de agregados com formas de partículas, granulometria e textura que possam levar a um menor atrito interno da mistura, também permite reduzir o volume de pasta do concreto, mantendo o mesmo abatimento, sem alterar significativamente as propriedades do concreto endurecido.

O processo para determinação da proporção dos diversos constituintes é

denominado “dosagem experimental do concreto”, com muitos métodos disponíveis na literatura sendo bastante utilizado no Brasil o método “IBRACON” de dosagem²⁴.

Vale salientar, que, na grande maioria dos concretos, o volume de pasta utilizada é bem superior aos vazios existentes entre as partículas dos agregados miúdos e graúdos. Portanto, a redução ou o aumento do volume de pasta, com objetivo de variar o abatimento do concreto não implica na falta de pasta para envolver os agregados. Uma exceção são os concretos rolados, que utilizam baixíssimos consumos de cimento, no entanto, estes concretos não fazem parte da abordagem deste livro.

Em qualquer que seja o método de dosagem experimental utilizado, o resultado final é a proporção em massa dos diversos constituintes em relação à massa de cimento. Esta proporção é denominada de traço unitário em massa TUM:

$$1 : \text{adição} : a : b : a/c : \text{adt}_{1\%} \quad (\text{Equação 3})$$

onde:

- 1: unidade de cimento, em massa, por exemplo 1kg;
- adição: quantidade em massa de adição pozolânica tipo escória granulada e moída de AF, metacaulim, sílica ativa, cinza de casca de arroz, etc.
- a: quantidade em massa de agregado miúdo (areia) em relação à massa de cimento;
- b: quantidade em massa de agregado graúdo (brita) em relação à massa de cimento;
- a/c: relação entre água e cimento, ou entre água e aglomerantes, em massa;
- adt_{1%}: relação entre massa de aditivo e a massa de cimento, em percentual

Com o TUM de um determinado concreto, pode-se obter qualquer quantidade deste concreto, com as mesmas propriedades, tanto no estado fresco, quanto no endurecido, desde que se mantenham as proporções relativas entre os seus diversos constituintes.

Com o TUM, também é possível obter os principais parâmetros de dosagem tais como: o consumo de cimento, a relação água/materiais secos e o teor de argamassa seca. Estes parâmetros são de extrema importância para o Engenheiro e o Arquiteto terem melhor entendimento dos princípios que norteiam a tecnologia do concreto.

29.4. Normalização

Existem diversas normas brasileiras referentes a estruturas de concreto armado e seus constituintes, que devem sempre ser consultadas por profissionais de engenharia e arquitetura que trabalhem direta ou indiretamente com este material de construção.

A norma NBR 6118 (ABNT, 2007) determina os procedimentos básicos para dimensionamento de estruturas de concreto simples, armado e protendido, não só referente às cargas atuantes, mas também no que diz respeito à durabilidade das estruturas de concreto, orientando especificações do concreto, em função das

²⁴ HELENE, Paulo. **Dosagem do Concreto de Cimento Portland**. In: ISAIA, G. C. (ed.). CONCRETO. Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON. 2005, p. 439-472.

condições de agressividade em que a estrutura esteja inserida. A norma NBR 9062 (ABNT, 2006) estabelece procedimentos específicos para projeto, execução e controle de estruturas de concreto pré-fabricado. A NBR 8953 (ABNT, 2009) classifica os concretos para fins estruturais por grupos de resistência à compressão.

A NBR 12654 (ABNT, 1992) estabelece procedimentos para realização do controle tecnológico dos materiais empregados na produção do concreto. Segundo essa norma, deve-se elaborar um programa de controle tecnológico, levando em consideração o grau de responsabilidade da estrutura, as condições de agressividade existentes no local da obra e o conhecimento prévio das características dos materiais disponíveis para a execução, além de outras condições estabelecidas pelos tecnologistas.

Outra norma brasileira de grande importância é a NBR 12655 (ABNT, 2006), que trata do preparo, controle e recebimento do concreto. Essa norma estabelece responsabilidades para a produção do concreto e critérios gerais para recebimento, estocagem e produção do concreto. Define também cálculo da resistência de dosagem e resistência característica à compressão máxima a ser adotada no projeto, em função das condições de preparo do concreto. Estabelece especificações para o concreto que está exposto a ambientes sulfatados, e percentuais máximos de contaminação com cloretos, a partir da contaminação individual dos seus componentes e em função do tipo de concreto (armado ou protendido), bem como da agressividade do meio. Essa norma ainda determina critérios para aceitação do concreto, definindo parâmetros para amostragem e análise estatística para aprovação dos lotes.

A NBR 14931 (ABNT, 2004) estabelece procedimentos para execução de estruturas de concreto armado, envolvendo não só o material concreto, mas o aço e as fôrmas. É uma norma ampla, que atribui responsabilidades aos profissionais envolvidos na execução, no que diz respeito ao controle de documentos, organização do canteiro de obras para recebimento e estocagem dos componentes. Especificamente quanto ao concreto, essa norma estabelece a necessidade da elaboração de planos de concretagem; define critérios para lançamento e adensamento do concreto; juntas de concretagem; cura; desfôrma; entre outras recomendações importantes.

A NBR 7212 (ABNT, 1984) recomenda procedimentos para produção de concreto dosado em central, incluindo as operações de armazenamento dos materiais, dosagem, mistura, transporte, recebimento, controle de qualidade, inspeção, aceitação e rejeição do concreto do ponto de vista do produtor de concreto em empresas de serviços de concretagem.

A NBR 15900 (ABNT, 2010) estabelece as características da água de amassamento para serem adequadas ao uso nos concretos estruturais.

29.5. Consistência do Concreto Fresco

O material concreto possui duas fases distintas, sendo que a primeira fase, denominada de concreto fresco, compreende um período de tempo muito curto, em

geral da ordem de 1h a 5h. Essa fase refere-se ao intervalo de tempo necessário para que o concreto possa ser misturado, transportado, lançado e adensado. A segunda fase, denominada de concreto endurecido, inicia-se com a hidratação do cimento e conseqüente endurecimento do concreto, estendendo-se por toda a vida da estrutura.

A trabalhabilidade do concreto é influenciada por fatores intrínsecos ao concreto, como a sua relação água/materiais secos, tipo e consumo de cimento; traço (1 : m)²⁵; teor de argamassa, tamanho, textura e forma dos agregados. Além dos fatores intrínsecos, existem os fatores externos de influência, como as condições de transporte, lançamento, características da fôrma, esbelteza dos elementos estruturais, densidade e distribuição das armaduras, dentre outros fatores.

Uma das principais características do concreto que determina a sua aptidão para ser manuseado é a sua consistência, que, na tecnologia do concreto, pode ser definida como a maior ou menor capacidade do concreto de se deformar sob a ação do sua própria massa.

A NBR NM 67 (ABNT, 1996) é o método de ensaio definido pela normalização brasileira para determinação da consistência do concreto fresco através do abatimento do tronco de cone, mostrado na Figura 16, com tolerâncias especificadas no Quadro 4. Nos concretos especiais como, por exemplo, os bombeados, as características para a bombeabilidade (trabalhabilidade) dependerão não só do abatimento, mas também do diâmetro máximo do agregado graúdo, do consumo de cimento e do teor de argamassa.



Figura 16 - Ensaio de abatimento pelo método do abatimento do tronco de cone, para medida da consistência do concreto fresco. NBR NM 67 (ABNT, 1996)

Quadro 4. Tolerâncias admissíveis no abatimento definidas pela NBR NM 67 (ABNT,1996)

Abatimento (mm)	Tolerância (mm)
de 10 a 90	± 10
de 100 a 150	± 20
acima de 160	± 30

²⁵ m é o agregado total, miúdo e graúdo (m = a + b).

Outro ensaio, menos comum de ser realizado, com o intuito também de medir a consistência do concreto fresco, é o ensaio de espalhamento na mesa de Graff, sendo o método de ensaio definido pela NBR NM 68 (ABNT, 1996). Esse ensaio é mais comumente utilizado para medir concretos fluidos. O princípio do ensaio é o mesmo do abatimento, entretanto, o valor da consistência é o diâmetro obtido da amostra, após a retirada do molde metálico.

29.6. Propriedades do Concreto Endurecido

29.6.1 Resistência à compressão

Para se projetar estruturas de concreto armado, o engenheiro projetista / calculista estipula uma resistência característica à compressão, que é definida como valor de referência e adotada como base de cálculo, a qual está associada a um nível de confiança de 95%.

Para que a estrutura de concreto armado atenda aos requisitos de segurança, do ponto de vista estrutural, esta resistência deve ser atingida pelo concreto da estrutura, devendo ser sistematicamente avaliada, demonstrada e registrada ao longo do processo de produção.

Considerando que o concreto é uma rocha artificial, é possível produzir concretos com propriedades similares às das rochas de origem dos agregados. No Quadro 5, são apresentados os resultados de resistência à compressão de alguns cimentos nacionais, a 28 dias de idade, no ensaio padronizado que utiliza uma argamassa padrão de traço 1:3, com uma relação água/cimento fixa de 0,48. Pode ser observado que é permitida uma diferença máxima de resistência, entre cimentos de uma mesma classe 32, no caso, de 7,2MPa. Esta diferença é limitada em virtude de que, as especificações dos cimentos permitem intervalos entre a resistência mínima e a máxima para assegurar certa uniformidade de produto. Por exemplo, na classe 25, a resistência à compressão pode variar de 32MPa a 49MPa. Já os cimentos de classe 40 não possuem limite superior para a resistência.

Quadro 5. Resistência à compressão de alguns Cimentos Portland do Brasil.

Idade	Resistência à Compressão (28 dias) MPa					
	CP VARI	CP II F 32	CP II Z 32	CP II Z 32	CP IV 32	CP III 40
1 dia	21,1	-	-	-	-	-
3 dias	33,6	28,8	25,8	22,6	20,6	21,0
7 dias	40,0	35,0	32,0	28,0	29,8	30,2
28 dias	50,1	43,6	42,3	35,0	42,8	50,2

A normalização brasileira orienta diversas etapas necessárias para determinar-se corretamente a resistência à compressão dos concretos. A norma NBR NM 33 (ABNT, 1994) determina os procedimentos para a coleta das amostras, definindo volumes de concreto a serem coletados em betoneiras estacionárias ou em

caminhões betoneiras, para a realização das moldagens dos corpos-de-prova.

A NBR 5738 (ABNT, 2007) determina os procedimentos para a moldagem e cura dos corpos-de-prova, que podem ser realizados por imersão em água ou em câmara úmida, com condição de temperatura e umidade relativa do ar controlada. Os corpos-de-prova devem ser cilíndricos, sendo mais comumente utilizados no Brasil, os de 10cm de diâmetro por 20cm de altura e os de 15cm de diâmetro por 30cm de altura.

O ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos deve seguir os procedimentos da 5739 (ABNT, 2007), que define os tratamentos que podem ser empregados no topo dos corpos-de-prova, a velocidade de carregamento, a umidade dos corpos-de-prova, dentre outras condições de ensaio que possam influenciar nos resultados.

A qualidade potencial do concreto depende da relação água/cimento e do grau de hidratação. São esses os dois principais parâmetros que regem as propriedades de absorção capilar da água, de permeabilidade por gradiente de pressão de água ou de gases, de difusividade da água ou dos gases, de migração elétrica de íons, assim como, todas as propriedades mecânicas, tais como: módulo de elasticidade, resistência à compressão, à tração, fluência, relaxação, abrasão e outras.

A qualidade efetiva do concreto na obra deve ser assegurada por um correto procedimento de mistura, transporte, lançamento, adensamento, cura e desmoldagem. Na maioria dos casos, um concreto de resistência mais alta é, em principio e sob certas circunstâncias, potencialmente mais durável do que um concreto de resistência mais baixa, obtido com os mesmos materiais. Porém, nem sempre a resistência à compressão é, por si só, uma medida suficiente da durabilidade do concreto, pois esta depende das camadas superficiais do concreto da estrutura. Nessas camadas, a moldagem, o adensamento, a cura e a desmoldagem têm efeito muito importante nas propriedades de difusividade, permeabilidade e absorção capilar de água e gases. O Quadro 6 dá uma idéia de como varia a resistência do concreto com a mudança do tipo de cimento.

Quadro 6. Resistência média do concreto em MPa em função da relação a/c para vários tipos de cimentos brasileiros.

Tipo e classe ²⁶ de cimento	Relação a/c				
	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
CP I 32	28	32	37	41	47
CP II 32	24	28	31	35	39
CP II 40	28	32	36	41	46
CP III 32	23	27	31	36	41
CP III 40	27	32	37	42	49
CP IV 32	24	28	32	36	41
CP V ARI.RS	30	33	38	42	46
CP V ARI	33	38	42	47	53

Notas:
 1 Agregados de origem granítica 2 Diâmetro máximo dos agregados de 25mm
 3 Abatimento entre 50mm e 70mm 4 Concretos com aditivo plastificante normal

²⁶ Informações sobre os tipos de cimentos brasileiros e suas respectivas normas consultar: KIAHARA, Y., CENTURIONE, S.L. **O cimento Portland**. In: ISAIA G. C. (ed). Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto, 2005, v.1, p. 295-322. Ver também Capítulo 24 deste livro.

Quando não for indicada a idade, as resistências referem-se à idade de 28 dias. A estimativa da resistência à compressão média, f_{cmj} , correspondente a uma resistência f_{ckj} especificada, deve ser calculada conforme indicado na NBR 12655 (ABNT, 2006).

A evolução da resistência à compressão com a idade deve ser obtida através de ensaios laboratoriais especialmente executados para tal. Na ausência desses resultados experimentais podem-se adotar, em caráter orientativo, os valores indicados no Quadro 7.

Quadro 7. Relações f_{cj}/f_c , admitindo cura úmida em temperatura de 21°C a 30°C.

Cimento Portland	idade, em dias									
	3	7	14	28	63	91	120	240	360	720
CP III CP IV	0,46	0,68	0,85	1	1,13	1,18	1,21	1,28	1,31	1,36
CP I CP II	0,59	0,78	0,9	1	1,08	1,12	1,14	1,18	1,20	1,22
CP V	0,66	0,82	0,92	1	1,07	1,09	1,11	1,14	1,16	1,17

No caso específico da resistência de cálculo do concreto (f_{cd}), a NBR 6118 (ABNT, 2007) propõe adotar:

a) Quando a verificação se faz em data j igual ou superior a 28 dias, adotar a expressão:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (\text{Equação 4})$$

Nesse caso, o controle da resistência à compressão do concreto deve ser feita aos 28 dias, de forma a confirmar o valor de f_{ck} adotado no projeto, ou

b) Quando a verificação se faz em data j inferior a 28 dias, adotar a expressão:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck,j}}{\gamma_c} \cong \beta_1 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (\text{Equação 5})$$

onde β_1 é a relação $f_{ck,j}/f_{ck}$ dada pela expressão:

$$\beta_1 = \exp\{s[1 - (28/j)^{1/2}]\} \quad (\text{Equação 6})$$

com s igual a:

- 0,38 para concreto de cimento CIII e IV, ou
- 0,25 para concreto de cimento CPI e II, ou
- 0,20 para concreto de cimento CPV.
- j é a idade efetiva do concreto

29.6.2 Classes

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007) os concretos estruturais devem atender às classes do grupo I, indicadas na NBR 8953 (ABNT, 2009), a saber: C15, C20, C25, C30, C35, C40, C45 e C50. Os números indicadores da classe representam a resistência característica à compressão especificada para a idade de 28 dias, em MPa.

O valor mínimo da resistência à compressão deve ser de 20MPa para concretos apenas com armadura passiva (armado) e 25MPa para concretos com armadura ativa (protendido). O valor de 15MPa pode ser usado apenas em concreto magro e em obras provisórias. É possível e recomendável que esses limites subam a novos patamares em breve, nas próximas revisões da NBR 6118 (ABNT, 2007).

29.6.3 Massa específica

Os concretos estruturais previstos na NBR 6118 (ABNT, 2007) devem ter massa específica normal, ou seja, depois de secos em estufa, devem ter massa específica compreendida entre 2000kg/m^3 e 2800kg/m^3 . Em não se conhecendo a massa específica real, para efeito de cálculo, pode-se adotar para o concreto simples o valor 2400kg/m^3 e para o concreto armado e protendido 2500kg/m^3 .

Quando se conhecer a massa específica do concreto utilizado, pode-se considerar para valor da massa específica do concreto armado ou protendido, aquela do concreto simples acrescida de 100kg/m^3 a 150kg/m^3 . Concretos leves com argila expandida também podem ser utilizados desde que atendam os limites mínimos de resistência.

29.6.4 Coeficiente de dilatação térmica

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007), para efeito de análise estrutural, o coeficiente de dilatação térmica pode ser admitido como sendo $\alpha = 10^{-5}/^\circ\text{C}$ e depende da natureza e teor de agregados. O coeficiente de dilatação térmica efetivo é maior nas pastas, da ordem de $1,2 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C}$.

29.6.5 Resistência à tração

Para obter a resistência à tração indireta, pelo método da compressão diametral ou método de Lobo Carneiro, $f_{ct,sp}$, e a resistência à tração na flexão, $f_{ct,f}$, devem ser empregados os métodos de ensaios descritos na NBR 7222 (ABNT, 1994) e na NBR NM 55 (ABNT, 1996), respectivamente.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007), a resistência à tração direta f_{ct} pode ser considerada igual a $0,9 f_{ct,sp}$ ou $0,7 f_{ct,f}$ ou, na falta de ensaios para obtenção de $f_{ct,sp}$ e $f_{ct,f}$, pode ser avaliada por meio das expressões:

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (\text{Equação 7})$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ctm} \quad (\text{Equação 8})$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ctm} \quad (\text{Equação 9})$$

onde: f_{ctm} e f_{ck} são expressos em MPa.

Sendo $f_{ck} \geq 7\text{MPa}$, estas expressões podem também ser usadas para idades diferentes de 28 dias.

29.6.6 Resistência no estado multiaxial de tensões

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2007), estando o concreto submetido às tensões principais $\sigma_3 \geq \sigma_2 \geq \sigma_1$, deve-se ter:

$$\sigma_1 \geq -f_{ctk} \quad \text{e} \quad \sigma_3 \geq f_{ck} + 4 \sigma_1 \quad (\text{Equação 10})$$

sendo as tensões de compressão consideradas positivas e as de tração negativas.

Essa expressão foi desenvolvida para o estado duplo, aplicando-se no caso multiaxial com grande margem de segurança. Em casos especiais, literatura específica pode ser usada para se obter valores mais realistas. Para consideração da tensão intermediária, o critério de ruptura indicado pelo Model Code 90 *fib* (ex-CEB-FIP) (COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, 1993) pode ser utilizado.

Como ordem de grandeza, para fins conservadores de projeto, observa-se que concretos confinados podem apresentar resistência à compressão efetiva de até 1,4 vezes superior ao f_{ck} obtido nos corpos-de-prova cilíndricos não confinados.

29.6.7 Módulo de elasticidade²⁷

O módulo de elasticidade tangente inicial E_{ci} , ou o secante a 0,4 de f_c , $E_{cs,0,4fc}$, ou a qualquer outra tensão, deve ser obtido segundo ensaio descrito na NBR 8522 (ABNT, 2008).

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007), quando não forem feitos ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto a ser usado na idade de 28 dias, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade inicial usando a expressão:

$$E_{ci} = E_{c,30\%fc} = E_c = 5600 f_{ck}^{1/2} \quad (\text{Equação 11})$$

onde E_c e f_{ck} são dados em MPa.

Apesar de que o módulo de elasticidade a baixas idades tem crescimento proporcional maior que o crescimento da resistência à compressão, o módulo de elasticidade inicial, em uma idade $j \geq 7$ dias, pode também ser avaliado, conservadoramente, através dessa expressão, substituindo-se f_{ck} por f_{ckj} . Esse

²⁷ Mais informações sobre o módulo de elasticidade do concreto podem sere obtidas em: SHEATA, L. D. **Deformações instantâneas do concreto**. In: ISAIÁ, G. C. (ed.) **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005, v.1, p. 633-654.

módulo de elasticidade pode também ser adotado para relacionar tensões e deformações de tração. Quando for o caso, é esse o módulo de elasticidade a ser especificado em projeto e controlado na obra.

O módulo de elasticidade secante (a $0,4f_{ck}$, ou $0,45f_{ck}$, ou qualquer outra tensão) a ser utilizado nas análises elásticas de projeto, especialmente para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço, pode ser calculado pela expressão:

$$E_{cs} = 0,85 E_c \quad (\text{Equação 12})$$

onde: E_{cs} e E_c são expressos em MPa.

Na avaliação do comportamento de uma peça ou seção transversal a NBR 6118 (ABNT, 2007) permite adotar um módulo único, à tração e compressão, igual ao módulo secante, E_{cs} . Na avaliação do comportamento global da estrutura e para o cálculo das perdas de protensão, ela permite utilizar em projeto o módulo inicial, E_{ci} ou E_c .

Em princípio, o módulo de elasticidade inicial ou o secante têm maior correspondência com o valor médio da resistência à compressão de certo concreto, f_{cm} . Considerando que f_{cm} raramente é conhecido na fase de projeto, e colocando-se do lado da prudência é preferível calcular E_c em função de f_{ck} , e, conseqüentemente, prever deformações um pouco maiores que as reais. Na verdade, na verificação de peças ou seções transversais, o valor da efetiva resistência do concreto pode ser da ordem de f_{ck} daí ser prudente usar as expressões em função de f_{ck} .

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007), a redução de 15% de E_c para E_{cs} é importante porque em regiões localizadas, as tensões podem ser da ordem de 40% a 50% de f_{ck} ou até mais, reduzindo o valor efetivo de E_{cs} . Na avaliação do comportamento global da estrutura, a NBR 6118 (ABNT, 2007) permite adotar o módulo E_c ao invés de E_{cs} , por três razões principais:

- para a estrutura toda, é adequado avaliar a rigidez a partir de f_{cm} ;
- existem significativas regiões da estrutura onde as tensões são baixas, abaixo de $0,3f_{ck}$;
- nessas análises, uma parte das ações é usualmente dinâmica de curta duração, como o vento, por exemplo, para as quais o concreto tem uma resposta mais rígida, própria do E_c .

Por outro lado, muitas são as variáveis que podem interferir no resultado do módulo de elasticidade do concreto. Dentre elas, pode-se citar:

- resistência à compressão do concreto
- consistência do concreto fresco
- volume de pasta por metro cúbico de concreto
- teor de umidade dos corpos de prova no momento do ensaio
- dimensão máxima característica do agregado graúdo
- dimensão dos corpos de prova
- temperatura de ensaio

- natureza da rocha do agregado graúdo

Por isso, é muito difícil estabelecer uma expressão única que dependa somente da resistência à compressão do concreto, pois esta é apenas uma das variáveis em jogo. Para exemplificar, apresenta-se abaixo uma proposta de faixas possíveis de variação do módulo de elasticidade inicial:

$$E_c = a_1 \cdot a_2 \cdot 5600 \cdot f_{ck}^{1/2} \quad (\text{Equação 13})$$

onde a_1 e a_2 podem ser obtidos do Quadro 8.

Quadro 8. Índices da expressão de previsão do módulo de elasticidade do concreto

Natureza do agregado graúdo	a_1	Consistência do concreto fresco	a_2
Basalto e diabásio	1,1	Fluida	0,9
Granito e gnaisse	1,0	Plástica	1,0
Calcário, arenito e metassedimento	0,9	Seca	1,1

Deve-se observar ainda que o módulo de elasticidade real nas estruturas depende da qualidade do adensamento do concreto, do teor de pasta e da qualidade e natureza dos agregados disponíveis. Em muitos casos é prudente adotar módulos de elasticidade E_c menores que $5600 \cdot f_{ck}^{1/2}$, sendo prudente e muito mais conveniente adotar valores da ordem de $E_c = 5000 \cdot f_{ck}^{1/2}$.

Finalmente há de recordar-se que as deformações e flechas obtidas a partir dessas expressões referem-se a valores imediatos, ou seja, verificáveis até 15 minutos após o carregamento. Para idades de permanência das cargas superiores a essa, tipo carga de longa duração, é necessário considerar os efeitos de fluência e as deformações finais podem chegar a ser da ordem de 3 a 5 vezes os valores iniciais previstos pelas expressões anteriores.

29.6.8 Coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade transversal

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2007), para tensões de compressão menores que $0,5f_c$ e tensões de tração menores que f_{ct} , o coeficiente de Poisson pode ser tomado como igual a 0,2 e o módulo de elasticidade transversal G_c igual a $0,4 E_{cs}$.

29.6.9 Diagrama tensão-deformação de compressão do concreto

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2007), para tensões de compressão menores que $0,5 f_c$ pode-se admitir uma relação linear entre tensões e deformações, adotando-se para módulo de elasticidade o valor secante, E_{cs} . Para análises no estado limite último, podem ser empregados o diagrama tensão-

deformação idealizado mostrado na Figura 17. Para análises não-lineares é importante a utilização de diagramas tensão-deformação mais realistas, como os previstos pelo Model Code 90 *fib* (ex-CEB/FIP).

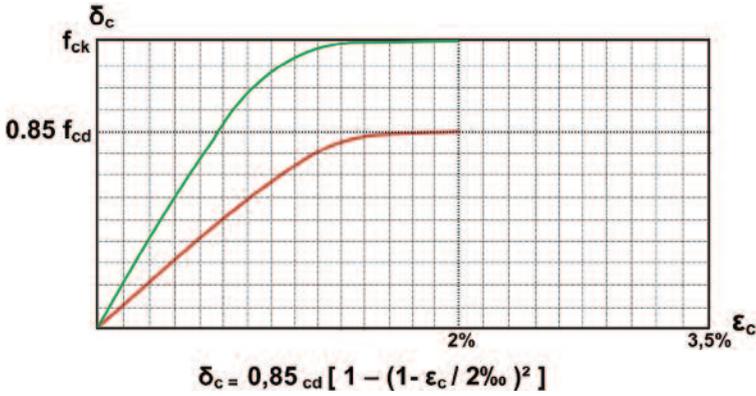


Figura 17 - Diagrama tensão - deformação idealizado.

29.6.10 Diagrama Tensão-Deformação de Tração do Concreto

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007), para o concreto não fissurado, é possível utilizar o diagrama de tensão de tração-deformação bilinear, indicado na Figura 18.

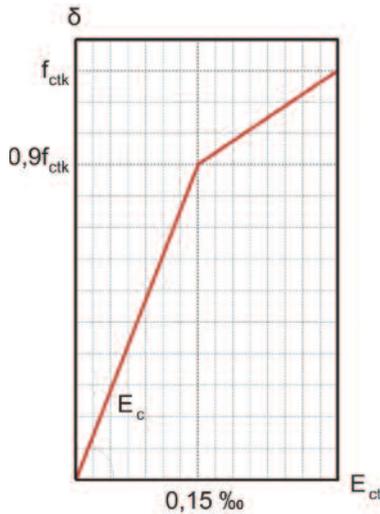


Figura 18 - Diagrama tensão-deformação bilinear na tração.

29.7. Deformações do Concreto no Tempo

29.7.1 Introdução

Baseado nas recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2007) e do Model Code *fib* (CEB-FIP) 90, quando não há impedimento à livre deformação do concreto e a ele é aplicada, no tempo t_0 , uma tensão constante no intervalo $t - t_0$ sua deformação total, no tempo t , vale:

$$\epsilon_c(t) = \epsilon_c(t_0) + \epsilon_{cc}(t) + \epsilon_{cs}(t) \quad (\text{Equação 14})$$

onde:

- $\epsilon_c(t_0) = \sigma_c(t_0) / E_c(t_0)$ é a deformação imediata, por ocasião do carregamento, com $E_c(t_0)$;
- $\epsilon_{cc}(t) = [\sigma_c(t_0) / E_{c28}] \varphi(t, t_0)$ é a deformação por fluência, no intervalo de tempo (t, t_0) , com E_{c28} calculado pela mesma expressão, para $j = 28$ dias
- $\epsilon_{cs}(t)$ é a deformação por retração, no intervalo de tempo (t, t_0)

29.7.2 Fluência do concreto

O aumento da deformação ou contração do concreto, no tempo, e sob carga de longa duração (acima de 15 minutos), sem variação térmica nem de UR, é chamada de fluência ou deformação lenta do concreto²⁸.

Na realidade o concreto sofre uma deformação inicial devida à deformação “elástica” por ação da aplicação da carga (chamada de deformação instantânea < 15 minutos), uma deformação devida à retração hidráulica e uma contração diferida no tempo devida às cargas de longa duração. Esses fenômenos são interativos e uns interferem nos outros.

A fluência do concreto envolve:

- A chamada fluência básica que ocorre quando não há mudanças na UR do ambiente nem na temperatura;
- A chamada fluência de secagem que ocorre quando há redução da UR do ambiente.

Existem vários ensaios que permitem medir a fluência dos concretos, a saber: NBR 8224 (ABNT, 1983), ASTM C 512 (2002) e outros. Como se tratam de ensaios trabalhosos e demorados é usual adotar, para fins de projeto, valores obtidos de expressões ou modelos desenvolvidos por vários autores ao longo dos últimos 30 anos.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007), a deformação por fluência do concreto ϵ_{cc} compõe-se de duas partes, uma rápida e outra lenta. A fluência rápida ((cca) é irreversível e ocorre durante as primeiras 24h após a aplicação da carga que a originou. A fluência lenta é por sua vez composta por duas outras parcelas: a deformação lenta irreversível ϵ_{ccf} e a deformação lenta reversível ((ccd).

²⁸ Para aprofundar no tema, recomenda-se consultar: HASPARYK, N. P.; LOPES, A. N.; ANDRADE M.; SANTOS S. B. **Deformações por Retração e Fluência** In: ISAIA, G. C. (ed.) Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005, v.1, p. 655-685.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{cca} + \epsilon_{ccf} + \epsilon_{ccd} \quad (\text{Equação 15})$$

$$\epsilon_{c,\text{total}} = \epsilon_c + \epsilon_{cc} = \epsilon_c (1 + \varphi) \quad (\text{Equação 16})$$

$$\varphi = \varphi_a + \varphi_f + \varphi_d \quad (\text{Equação 17})$$

onde:

- φ_a é o coeficiente de fluência rápida
- φ_f é o coeficiente de deformação lenta irreversível
- φ_d é o coeficiente de deformação lenta reversível

29.7.3 Retração do concreto

A retração do concreto é uma redução do volume do concreto ao longo do tempo, sem a ação de forças externas. Essa redução é devida à perda de água da pasta de cimento e a alterações físico-químicas internas²⁴.

No concreto fresco, a perda de água ocorre por exsudação, evaporação, percolação por juntas dos moldes, absorção de água pelos agregados, absorção de água pelas fôrmas ou por alguma superfície em contato com a peça concretada. Ela dá origem à chamada retração plástica. Essa perda de água pode ser controlada em parte por um correto estudo de dosagem experimental e em parte por procedimentos adequados de concretagem, adensamento e cura.

No concreto endurecido, a perda de água ocorre quando este é exposto em ambiente com umidade relativa inferior a 100%. Ocorre então a chamada retração por secagem ou retração hidráulica.

A perda de água capilar ou livre é considerada a principal causa da retração por secagem. A água de gel só é perdida em ambientes com umidade relativa menor ou igual a 11%. A água de hidratação, que reagiu quimicamente, só é perdida em ambientes com temperaturas acima de 100°C.

Portanto, do ponto de vista prático, a retração do concreto endurecido pode ocorrer devida a três mecanismos principais:

- a) A **retração hidráulica ou de secagem**: devida à evaporação da água livre ou capilar que gera tensões capilares importantes nos poros remanescentes do concreto (pasta) que ainda possuem água.
- b) A **retração por hidratação do cimento ou retração química ou retração autógena**: o volume total dos produtos hidratados é inferior à soma dos volumes de cimento anidro e de água. Este fenômeno também é chamado de contração Le Châtelier, em homenagem ao pesquisador¹³ que primeiro o identificou e explicou. Pode ser incrementada pela remoção da água capilar para hidratação do cimento anidro remanescente. Isso ocorre quando a água livre já foi consumida. Este processo também é chamado de auto-secagem ou auto-dessecamento. O resultado macroscópico final é a soma da retração por hidratação do cimento com o efeito físico da retração por depressão capilar.

- c) **A retração por carbonatação:** decorrente da reação do CO_2 presente na atmosfera com compostos hidratados do cimento. A portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, é o composto mais suscetível à carbonatação, e o resultado de sua reação com o CO_2 é a deposição de CaCO_3 (calcita) que tem volume molecular inferior ao hidróxido e à evaporação da água gerada nessa reação.

O estudo da retração do concreto é muito importante, pois, na prática, a retração das peças de concreto raramente é livre. As restrições induzem tensões de tração no material, e, dependendo da intensidade dessas tensões e do módulo de elasticidade em tração do concreto, pode ocorrer a temida fissuração.

As fissuras são indesejáveis, pois, além de prejudicarem a aparência da peça, terem um efeito psicológico negativo e aumentarem as deformações das peças, ainda podem reduzir significativamente sua durabilidade.

Portanto é importante compreender o fenômeno da retração para buscar materiais e meios que minimizem seus efeitos. Os principais fatores que afetam a retração por secagem dos concretos são:

- a) **Agregados:** a presença dos agregados no concreto promove restrições à deformação. O teor e o módulo de deformação do agregado são os principais fatores que influenciam a retração;
- b) **Relação água/cimento:** para um dado consumo de cimento, um aumento na relação a/c implica na diminuição na resistência do concreto, e, portanto, no seu módulo de elasticidade;
- c) **Água por m^3 :** é recomendável que os concretos contenham, no máximo, 175 litros de água por m^3 de concreto fresco com o objetivo de reduzir os riscos de evaporação;
- d) **Adições e aditivos:** adições como escória granulada e pozolanas, e aditivos redutores de água e retardadores de pega tendem a aumentar o volume de poros finos no produto da hidratação do cimento. Por outro lado certos aditivos podem reduzir a retração.
- e) **Tempo e umidade:** a retração é uma deformação que acontece ao longo do tempo. Além disso, a taxa relativa do fluxo de umidade do interior para as superfícies externas do concreto se torna mais lenta com o aumento da umidade atmosférica;
- f) **Geometria do elemento de concreto:** quanto maior é o caminho que a água interna ao concreto tem que percorrer para atingir a superfície do elemento, menor é a taxa de perda de água.

Os ensaios de retração livre estão descritos na NBR 12650 (ABNT, 1992) e na NBR NM 131 (ABNT, 1998). Dentre os ensaios com restrições o mais utilizado é o chamado “anel de Coutinho”.

Na falta de resultados experimentais, os valores numéricos usuais podem ser obtidos de Quadros numéricos apresentados na própria NBR 6118 (ABNT, 2007).

29.7.4 Idade fictícia do concreto

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007) a idade a considerar nas expressões anteriores deve ser a idade fictícia $\alpha \cdot t_{ef}$ em dias, sempre o endurecimento se faz à temperatura ambiente de 20°C. Nos demais casos, quando não houver cura a vapor, a idade a considerar é a idade fictícia dada por:

$$t = \alpha \sum_i \frac{T_i + 10}{30} \cdot \Delta t_{ef, i} \tag{Equação 18}$$

onde:

- t é a idade fictícia, em dias;
- α é o coeficiente dependente da velocidade de endurecimento do cimento;
- T_i é a temperatura média diária do ambiente (°C);
- $\Delta t_{ef, i}$ é o período, em dias, durante o qual a temperatura média diária do ambiente, T_i , pode ser admitida constante.

Essa expressão não se aplica à cura a vapor. No Quadro 9 estão os valores estimativos de referência.

Quadro 9. Valores da fluência e da retração em função da velocidade de endurecimento do cimento

Cimento	Coeficiente α	
	Fluência	Retração
de endurecimento lento CP III e CP IV	1	1
de endurecimento normal CP I e CP II	2	
de endurecimento rápido CP V,ARI	3	

29.7.5 Espessura fictícia da peça

A espessura fictícia deve ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$h_{fic} = \gamma \frac{2A_c}{u_{ar}} \tag{Equação 19}$$

onde:

- γ é o coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente UR% sendo

$$= 1 + \exp(-7,8 + 0,1UR) \tag{Equação 20}$$

- A_c é a área da seção transversal da peça
- u_{ar} é a parte do perímetro externo da seção transversal da peça em contato com o ar

29.7.6 Deformação total do concreto

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007), quando há variação de tensão ao longo do intervalo, induzidas por ações externas ou agentes de diferentes propriedades reológicas (incluindo-se armadura, concretos de diferentes idades, etc.), a deformação total no concreto pode ser calculada por:

$$\varepsilon_c(t) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} + \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{c28}} \varphi(t, t_0) + \varepsilon_{cs}(t, t_0) + \int_{\tau=t_0}^t \frac{\partial \sigma_c}{\partial \tau} \left(\frac{1}{E_{cr}} + \frac{\varphi(\tau, t_0)}{E_{c28}} \right) d\tau \quad (\text{Equação 21})$$

em que os três primeiros termos representam a deformação não impedida e a integral, os efeitos da variação de tensões ocorridas no intervalo.

A NBR 6118 (ABNT, 2003) ainda permite substituir essa expressão por:

$$\varepsilon_c(t) = \sigma_c(t_0) \left[\frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c28}} \right] + \varepsilon_{cs}(t, t_0) + \Delta \sigma_c(t_0) \left[\frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\alpha \varphi(t, t_0)}{E_{c28}} \right] \quad (\text{Equação 22})$$

onde:

- $\Delta \sigma_c(t, t_0)$ é a variação total de tensão no concreto, no intervalo (t, t_0)
- α é o coeficiente característico que tem valor variável conforme o caso

29.7.7 Fluência e retração do concreto

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007), em casos onde não é necessária grande precisão, os valores finais do coeficiente de fluência $\varphi(t_\infty, t_0)$ e da deformação específica de retração $\varepsilon_{cs}(t_\infty, t_0)$ do concreto, submetido a tensões menores que $0,5 f_c$ após o primeiro carregamento, podem ser obtidos, por interpolação linear, a partir da Quadro 10.

Esse Quadro fornece o valor do coeficiente de fluência $\varphi(t_\infty, t_0)$ e da deformação específica de retração $\varepsilon_{cs}(t_\infty, t_0)$ em função da umidade ambiente e da espessura equivalente $2A_c/u$, onde A_c é a área da seção transversal e u é o perímetro desta seção em contato com a atmosfera. Os valores apresentados são relativos a temperaturas do concreto entre 10°C e 40°C . Esses valores são válidos para concretos plásticos e de cimento Portland comum (CP I, CP II e CP V).

Quadro 10. Valores característicos superiores da deformação específica de retração $\epsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$ e do coeficiente de fluência $\varphi(t_{\infty}, t_0)$

UR, umidade ambiente (%)			40%		55%		75%		90%	
Espessura equivalente $2A_c/u$ (cm)			20	60	20	60	20	60	20	60
$\varphi(t_{\infty}, t_0)$	fluência a t_0 (dias)	5	4,4	3,9	3,8	3,3	3,0	2,6	2,3	2,1
		30	3,0	2,9	2,6	2,5	2,0	2,0	1,6	1,6
		60	3,0	2,6	2,2	2,2	1,7	1,8	1,4	1,4
$\epsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$	retração a t_0 (dias) em %	5	-0,44		-0,37		-0,23		-0,10	
			-0,39		-0,33		-0,21		-0,09	
		30	-0,37		-0,31		-0,20		-0,09	
			-0,38		-0,31		-0,20		-0,09	
		60	-0,32		-0,27		-0,17		-0,08	
			-0,36		-0,30		-0,19		-0,09	

Referências Bibliográficas

- ABRAMS, Duff Andrew. **Design of Concrete Mixtures**. Chicago, Structural Materials Research Laboratory, 1918. (Lewis Institute Bulletin, 1).
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C157: Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete**. Conshohocken, ASTM, 2008.
- _____. **C 512: Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression**. Conshohocken, ASTM, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto e execução de obras de concreto armado**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- _____. **NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- _____. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência, massa específica e consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- _____. **NBR 12654: Controle tecnológico de materiais componentes do concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- _____. **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 7212: Execução de concreto dosado em central**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- _____. **NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- _____. **NBR NM 68: Concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- _____. **NBR NM 33: Concreto – Amostragem de concreto fresco**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- _____. **NBR 8224: Concreto endurecido. Determinação da fluência**. Rio de Janeiro, ABNT, 1983.
- _____. **NBR 12650: Materiais pozolânicos. Determinação da variação da retração por secagem devida à utilização de materiais pozolânicos**. Rio de Janeiro, ABNT, 1992.
- _____. **NBR NM 131: Concreto endurecido. Determinação da retração hidráulica**. Rio de Janeiro, ABNT, 1998.
- _____. **NBR 5738: Concreto – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- _____. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2007.
- _____. **NM 101: Concreto – Ensaio de resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- _____. **NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

- _____. **NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- _____. **NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão** Rio de Janeiro ABNT, 2008
- _____. **NBR 15900: Água para amassamento do concreto.** Rio de Janeiro, ABNT, 2010
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON (*fib*). **CEB-FIP Model Code 1990.** Lausanne, 1993. 437p (Design Code).
- HANAI, João Bento de. **Diagnóstico dos Centros de P&D na Área de Concreto.** São Paulo, Revista Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, n. 40, ano XXXIII, Set.Out.Nov., 2005. p. 36-44 ISSN 1806-9673
- HASPARYK, N. P.; LOPES, A. N.; ANDRADE M.; SANTOS S. B. **Deformações por Retração e Fluência** In: ISAIA, G. C. (ed.) **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005, v.1, p. 655-685.
- HELENE, Paulo & TERZIAN, Paulo. **Manual de Dosagem e Controle dos Concretos de Cimento Portland.** São Paulo, PINI, 1993. 350 p. ISBN 85-7266-007-0
- HELENE, Paulo. Dosagem do Concreto de Cimento Portland. Cap. 15. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **CONCRETO. Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, 2005.
- ISAIA, G. C.; GASTALDINI, Antonio Luiz Guerra & MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, Barking, Essex, England, v. 25, n. 1, p. 65-72, 2003.
- ISAIA, Geraldo C. (ed.) **CONCRETO. Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, 2005. ISBN 85-98576-03-4
- KIAHARA, Y., CENTURIONE, S.L. **O cimento Portland.** In: ISAIA G. C. (ed.) **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto, 2005, v.1, p. 295-322.
- LEPIK, Andres. **Sky Scrapers.** New York, Prestel publishing, 2004. ISBN 3-7913-3155-8
- POWERS, T. C. **The Nature of Concrete.** Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, STP n. 169-A, 61-72 (1966), ASTM American Society for Testing and Materials.
- SHEATA, L. D. **Deformações instantâneas do concreto.** In: ISAIA, G. C. (ed.) **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005, v.1, p. 633-654.