

Atena
Editora
Ano 2022

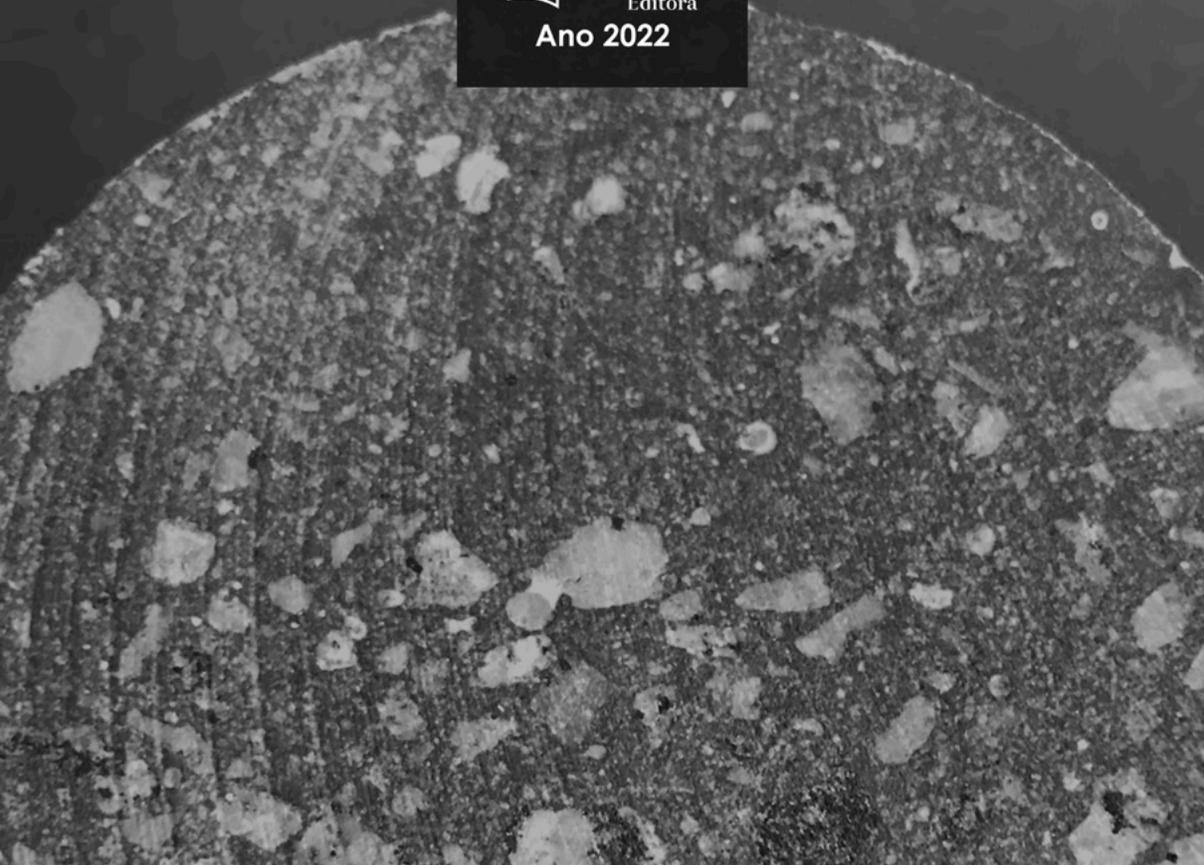


CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO:

Composição, produção e propriedades

Celiane Mendes da Silva
Gedson Lima dos Santos Junior
Iara Kelly da Silva
Jonas Rafael Duarte Cavalcante

Atena
Editora
Ano 2022



CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO:

Composição, produção e propriedades

Celiane Mendes da Silva
Gedson Lima dos Santos Junior
Iara Kelly da Silva
Jonas Rafael Duarte Cavalcante

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Gabriel Motomu Teshima

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

Celiane Mendes da Silva

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Concreto de alto desempenho: composição, produção e propriedades

Diagramação: Natália Sandrini de Azevedo
Correção: Bruno Oliveira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Autores: Celiane Mendes da Silva
Gedson Lima dos Santos Junior
Iara Kelly da Silva
Jonas Rafael Duarte Cavalcante

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C744 Concreto de alto desempenho: composição, produção e propriedades / Celiane Mendes da Silva, Gedson Lima dos Santos Junior, Iara Kelly da Silva, et al. - Ponta Grossa - PR, 2022.

Outro autor
Jonas Rafael Duarte Cavalcante

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-5983-826-4
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.264221101>

1. Concreto. 2. Concretos especiais. 3. Concreto de alto desempenho. 4. Sustentabilidade. I. Silva, Celiane Mendes da. II. Santos Junior, Gedson Lima dos. III. Silva, Iara Kelly da. IV. Título.

CDD 620.1

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br



Atena
Editora
Ano 2022

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que o texto publicado está completamente isento de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



AGRADECIMENTOS

"A Deus, que esteve presente e cuidou de cada detalhe da nossa trajetória.

À família, por fornecer um subsídio além das expectativas, para a concretização desta célebre fase em nossa vida.

Aos amigos, pela força e encorajamento a cada obstáculo encontrado."

“Dificuldades preparam pessoas comuns para destinos extraordinários” (C. S. Lewis)

APRESENTAÇÃO

Desde sua difusão global o concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, principalmente na sociedade urbana moderna, visto que a construção civil é responsável pela elaboração de estruturas de fundamental importância como: residências, edifícios, pontes, viadutos etc.

Sua vasta utilização promoveu a busca por um concreto cada vez mais aperfeiçoado, proporcionando um equilíbrio entre o custo/benefício desse material ao longo de sua vida útil, gerando construções mais seguras, sustentáveis e duradouras.

O concreto de alto desempenho (CAD) é um dos resultados dessa busca por um concreto com propriedades que diferem do convencional, de forma a atender a evolução da construção civil e as respectivas tecnologias construtivas.

O conhecimento quanto aos materiais constituintes, propriedades, etapas de produção e o custo do CAD é de grande relevância e vem apresentando uma influência direta na atuação do profissional do ramo da construção civil quando da sua utilização.

Em vista disso, o presente livro objetiva propagar o conhecimento sobre esse material de forma clara e objetiva. Logo, para aqueles que buscam uma literatura base que contenha um apanhado geral dos escritos e descobertas existentes acerca do CAD e seu uso na construção civil, encontrará no presente escrito o seu objetivo.

Esperamos que a leitura do texto seja fluida e sistemática, sanando as principais demandas de conhecimento acerca do CAD e trazendo respostas a possíveis questionamentos, mesmo se tratando de um material cuja complexidade é superior à do concreto convencional.

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS	1
LISTA DE ABREVIATURAS	2
LISTA DE SÍMBOLOS	3
RESUMO	4
ABSTRACT	5
INTRODUÇÃO	6
CONTEXTO E PROBLEMA	9
CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	11
DEFINIÇÃO.....	11
DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO.....	12
APLICAÇÕES	13
ESTRUTURA	14
Fase pasta de cimento hidratada.....	15
Fase esqueleto granular.....	17
Zona de transição (ZT).....	18
COMPOSIÇÃO	19
Cimento	19
Agregados	20
Agregado miúdo	21
Agregado graúdo.....	21
Aditivos químicos.....	22
Aditivos incorporadores de ar (Tipo IAR).....	22
Aditivos retardadores de pega (Tipo R).....	22
Aditivos aceleradores de pega (Tipo A).....	23
Aditivos redutores de água – Plastificantes (Tipo P).....	23
Aditivos superplastificantes (Tipo SP).....	24
Adições minerais	24
Cinza Volante	24

Escória de Alto Forno.....	25
Pó de Pedra.....	26
Sílica Ativa (Microsílica).....	26
Água de amassamento	27
PRODUÇÃO	28
Métodos de dosagem.....	28
Métodos de dosagem convencionais	28
Métodos baseados no critério do volume absoluto	30
Métodos baseados na otimização do esqueleto granular.....	35
Procedimentos de mistura.....	40
Procedimentos de cura	40
PROPRIEDADES	41
Estado fresco.....	41
Trabalhabilidade	41
Tempo de pega.....	42
Exsudação.....	42
Retração autógena.....	42
Estado endurecido.....	42
Resistência à compressão.....	43
Resistência à tração.....	43
Módulo de deformação longitudinal.....	44
Coeficiente de Poisson	45
Resistência a cargas de longa duração.....	45
Ganho de resistência com a idade.....	46
Durabilidade.....	47
Ductilidade	47
Retração térmica.....	48
VIABILIDADE ECONÔMICA	48
CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS	51
SOBRE OS AUTORES	55

LISTA DE SIGLAS

a/mc –	Relação água materiais cimentícios
Al ₂ O ₃ -	Óxido de alumínio
C3A -	Aluminato tricálcio
C3S -	Silicato tricálcico
CaO -	Óxido de cálcio
CO ₂ –	Dióxido de carbono
C-S-H –	Silicato de Cálcio Hidratado
C-H –	Hidróxido de cálcio
Fe ₂ O ₃ -	Óxido de ferro
SiO –	Óxido de silício
SiO ₂ -	Dióxido de silício

LISTA DE ABREVIATURAS

ACI –	American Concrete Institute
ABNT –	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD –	Concreto de alto desempenho
CAR –	Concreto de alta resistência
CC –	Concreto(s) comum(ns)
CP –	Corpo de prova
DMC –	Dimensão máxima característica
MCS –	Material Cimentício Suplementar
NBR –	Norma Brasileira
SP –	Superplastificante
ZT –	Zona de transição

LISTA DE SÍMBOLOS

°C –	Graus Celsius
± –	Mais ou menos
cm –	Centímetro
$D_{\text{máx.}}$	Diâmetro máximo
Fck –	Resistência do concreto à compressão
kg –	Quilograma
L –	Litros
m ² –	Metro quadrado
m ³ –	Metro cúbico
mm -	Milímetro
MPa –	Mega pascal

RESUMO

O concreto é considerado o segundo material mais utilizado pelo homem. Ao longo dos anos, percebe-se que os avanços das técnicas de cálculo estrutural aliados aos conhecimentos específicos acerca das propriedades do concreto e do aço tem corroborado para o desenvolvimento de estruturas cada vez mais desafiadoras em concreto armado e protendido. Nesse sentido, os concretos convencionais muitas vezes não têm atendido satisfatoriamente aos requisitos das estruturas desafiadoras que vem sendo projetadas, tanto no âmbito técnico quanto econômico. Diante disso, surgiu a necessidade de se desenvolver novas misturas com capacidade e propriedades superiores, visando suprir as demandas do avanço da construção civil, cumprindo os novos desafios construtivos de forma eficiente. Isto levou a indústria do concreto ao desenvolvimento de estudos relacionados a novos tipos, dentre eles, o Concreto de Alto Desempenho (CAD). O CAD tem se destacado no âmbito das pesquisas relacionadas aos concretos especiais, pois suas elevadas resistências demandam um menor consumo de concreto e aço, além de o seu emprego proporcionar um melhor aproveitamento dos recursos naturais, devido à maior durabilidade das estruturas e a minimização do consumo de matérias primas nobres. Em vista disso, o presente trabalho objetiva a apresentação do CAD, bem como seus materiais constituintes, além de um estudo mais aprofundado acerca das fases de sua microestrutura. Em seguida, realiza-se um apanhado dos métodos de dosagem mais relevantes existentes na literatura e das fases relativas ao processo produtivo do CAD. Por fim, tem-se um estudo acerca das propriedades físicas e mecânicas do CAD e uma breve análise de sua viabilidade econômica.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade. Concretos Especiais. Concreto de alto desempenho.

ABSTRACT

Concrete is considered the second most used material by man. Over the years, it is clear that advances in structural calculation techniques combined with specific knowledge about the properties of concrete and steel have contributed to the development of increasingly challenging structures in reinforced and prestressed concrete. In this sense, conventional concretes have often not satisfactorily met the requirements of the challenging structures that have been designed, both in technical and economic terms. Therefore, the need arose to develop new mixtures with superior capacity and properties, aiming to meet the demands of the advancement of civil construction, efficiently meeting the new construction challenges. This led the concrete industry to develop studies related to new types, including High Performance Concrete (CAD). CAD has stood out in the scope of research related to special concretes, as its high strengths demand a lower consumption of concrete and steel, in addition to its use providing a better use of natural resources, due to the greater durability of the structures and the minimization of consumption of noble raw materials. In view of this, the present work aims to present the CAD, as well as its constituent materials, in addition to a deeper study about the phases of its microstructure. Then, there is an overview of the most relevant dosage methods existing in the literature and the phases related to the CAD production process. Finally, there is a study about the physical and mechanical properties of CAD and a brief analysis of its economic viability.

KEYWORDS: Sustainability. Special concretes. High performance concrete.

INTRODUÇÃO

Os avanços das técnicas de cálculo estrutural, especialmente com o auxílio das ferramentas computacionais, quando aliado aos conhecimentos específicos acerca das propriedades do concreto e do aço corroboram para o desenvolvimento de estruturas cada vez mais desafiadoras em concreto armado e protendido.

Nesse contexto, os concretos convencionais por muitas vezes não atendem satisfatoriamente aos requisitos de projeto, tanto no âmbito técnico quanto econômico. Diante disso, surgiu a necessidade de se desenvolver novas misturas com capacidade e propriedades superiores a fim de suprir as demandas do avanço na indústria da construção civil, cumprindo os novos desafios construtivos de forma eficiente.

O concreto, precedido da água, é o segundo material mais utilizado no mundo. No entanto, torna-se o primeiro, tomando como base da indústria da construção. Com características como versatilidade, resistência, durabilidade e economia, o concreto vem sendo estudado desde meados do século XIX de forma a gerar novas possibilidades de materiais e até mesmo a melhoria da qualidade dos já existentes.

Ao longo do tempo, o concreto ganhou cada vez mais enfoque em pesquisas, pois, com a superlotação dos centros urbanos e a crescente evolução dos projetos arquitetônicos, passaram a ser necessárias construções mais esbeltas e leves, levando a indústria do concreto ao desenvolvimento de estudos relacionados a novos tipos, dentre eles o Concreto de Alto Desempenho (CAD).

De acordo com Tomé (2014), o CAD foi desenvolvido na Noruega na década de 1950, onde ocorreu a adição de novos materiais que fizeram com que o concreto ultrapassasse a barreira dos 50 MPa de resistência à compressão.

Para Tutikian, Isaia e Helene (2011), o CAD não é um material revolucionário, mas simplesmente uma evolução dos concretos convencionais, pois utilizam praticamente as mesmas matérias-primas, com os mesmos princípios básicos de resistência, de trabalhabilidade e de durabilidade. A única diferença ocorre na utilização de procedimentos especiais denominados de alto desempenho.

Mendes (2002) afirma que as principais aplicações do CAD na construção civil ocorrem em edifícios de grande altura, pontes, viadutos pavimentos de rodovias, plataformas submarinas e pisos industriais, de forma a diminuir o peso próprio da estrutura e conseqüentemente na carga das fundações. Além disso, quando utilizado na construção de edifícios altos, há uma redução significativa nas seções dos pilares e o aumento da área útil dos pavimentos.

Na década de 1970 os concretos de alta resistência alcançaram a barreira dos 60 MPa e, apenas durante a década de 1980 com a utilização da sílica ativa e dos superplastificantes, esta barreira foi ultrapassada, com o desenvolvimento de concretos

cuja resistência à compressão atingiu a faixa dos 100 MPa.

A sílica ativa (ou microssílica) é classificada atualmente como um Material Cimentício Suplementar (MCS), que são aqueles encontrados em forma de resíduos de diversas indústrias como termoeletricas a carvão, produção de papel, beneficiamento do arroz etc.

Como material proveniente da queima de silício metálico ou ferro-silício, as partículas da sílica ativa chegam a ser cerca de 50 a 100 vezes menores que as partículas de cimento com porcentagens de até 80% de SiO_2 , o que lhe proporciona uma característica pozolânica. Segundo Silva (2018), devido a finura deste material ser extremamente maior que a do cimento, sua adição ao concreto é altamente eficaz, não só em razão do seu tamanho que lhe permite o preenchimento dos vazios entre os materiais, aumentando assim a densidade de compactação, mas também graças a sua grande área de superfície que a torna altamente reativa.

Grande número de pesquisas e práticas experimentais apontam que ao misturar um pouco de sílica ativa ao concreto ocorre uma melhora nas propriedades mecânicas, dinâmicas e físicas de forma eficaz (CARDOSO et al. (2017); MARTIN (2018); SILVA (2018); SILVA (2016); TOMÉ (2014)).

Quando as estruturas de concreto são expostas à ambientes com agentes agressivos como ambientes marinhos e locais com elevado nível de acidez, seu desempenho torna-se inferior, causando danos a estrutura, para evitar acidentes por mau desempenho estrutural a demanda de materiais para construções especiais que necessitam de concretos mais resistentes capazes de resistir em ambientes de alto ataque químico-físico está em alta.

Em consequência disso, tem-se que o quão impermeável for a mistura de concreto, mais durável será o mesmo, pois, é de conhecimento geral que a água é o principal agente de patologias nas estruturas de concreto. Sendo assim, quanto menor for o índice de vazios deste material, tendo assim uma estrutura cada vez mais compacta, menores serão as probabilidades de percolação da água do meio externo, promovendo uma proteção aos ataques decorrentes das intempéries.

No que tange ao preenchimento dos vazios no concreto, tem-se que ao se aumentar o seu esqueleto inerte com a adição de materiais finos capazes de provocar o “efeito filer”, ocorrerá o refinamento das dimensões, fragmentando os poros e capilares da microestrutura interna.

Nesse contexto tem-se que o pó de pedra, caracterizado pelo material passante na peneira #200 (0,075 mm) que é estocado ao ar livre. Menose (2004) já afirmava que a utilização do pó de pedra como substituição parcial do agregado miúdo no concreto vinha sendo analisada, gerando grande interesse.

No CAD, o pó de pedra, devido ao seu alto teor de material pulverulento, atua como um filer não reagindo quimicamente, mas contribuindo nas características físicas

do concreto. Com o seu uso, principalmente na função de agregado miúdo, obtém-se uma maior compacidade na mistura aperfeiçoando sua trabalhabilidade e durabilidade, além de reduzir a permeabilidade e o calor liberado durante a hidratação, que diminui a incidência de fissuração, entre outros.

CONTEXTO E PROBLEMA

Com o crescimento populacional e a demanda pela construção, a procura por matérias primas só aumentou, ocasionando impactos naturais de mesma proporção. Devido a isto, são necessários estudos para a busca de materiais alternativos que possam ser reaproveitados, destinando-os para um descarte fielmente ecológico.

Bianchini (2010) afirma que uma possibilidade de minimizar os efeitos deletérios ao meio ambiente do uso de cimento na construção civil é pela diminuição do consumo de cimento por unidade de resistência, que leva à redução das emissões de CO².

Nesse sentido, tem-se o CAD como um aliado pois as elevadas resistências demandam um menor consumo de concreto e aço, além de o seu emprego proporcionar um melhor aproveitamento dos recursos naturais, devido à maior durabilidade das estruturas e a minimização do consumo de matérias primas nobres.

Acerca disso, com a utilização da sílica ativa como adição mineral no CAD aliada ao uso de aditivos superplastificantes, o cimento deixou de ser o fator limitante para a obtenção de maiores resistências, que passam a depender mais diretamente das propriedades dos agregados, que variam de região para região, em função da grande variabilidade das rochas existentes (VANDERLEI, 1999).

Segundo Martins (2018, p. 21), as adições minerais, atualmente conhecidas como Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), podem ser de origem natural, sendo eles originados de erupções vulcânicas ou argila calcinada, como também de origem artificial, como resíduos de outras indústrias que inicialmente seriam descartados.

Com relação a isso, o que atrai o interesse em um MCS é a elevada presença de sílica vítrea, capaz de reagir com os produtos da hidratação do cimento, mais precisamente com o CH, formando C-S-H muito semelhantes ao produzido durante a reação do cimento (NEVILLE, 1997; HOPPE FILHO, 2008; CINCOTTO, 2011).

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011, p. 5), um dos princípios básicos do CAD é a durabilidade e, para atingi-la, há uma série de ações que precisam ser desenvolvidas a fim de se obter uma microestrutura com poros de menor tamanho (refinamento das dimensões), diminuição da interconexão entre os poros (bloqueio dos canais), maior oposição à passagem de fluidos e, por fim, maior fixação de agentes dissolvidos pelo aumento das forças de superfície (potencial zeta).

Diante disso, a presença de agregado miúdo é fundamental para a diminuição dos vazios do esqueleto granular do concreto, dar coesão e travamento, visando manter a integridade da massa. A partir dos novos superplastificantes é possível melhorar e facilitar o uso de materiais mais finos, garantindo o fechamento granular (MARTINS, 2018 p. 24).

A mineração nacional de areia e brita, no ano de 2013, foi de 150 milhões de toneladas, a qual se compara ao da produção de minério de ferro. No estado do Paraná,

a produção anual total de bens minerais para uso como agregado pode atingir cerca de 1.500.000 m³ de areia e 2.300.000 m³ de pedra britada, representando a capacidade produtiva instalada (MINEROPAR, 2013).

A substituição da areia natural pela artificial apresenta vantagens ambientais e econômicas. A primeira, pela redução dos impactos ambientais ocasionados pelo processo convencional de extração de areia. A segunda, devido à sua produção ser realizada no canteiro das pedreiras localizadas próximas aos grandes centros urbanos, o que reduz o custo da matéria-prima para o seu maior mercado consumidor, a indústria da construção civil (ALMEIDA e SILVA, 2005).

Assim sendo, em função do exposto, vê-se que há uma necessidade de se encontrar alternativas ao uso tanto do cimento Portland quanto da areia natural, de forma a inibi-los parcial ou totalmente na composição do concreto.

Nesse contexto, tem-se, especialmente, a sílica ativa como material substituinte ao cimento apresentando-se como uma opção ao uso deste material reduzindo os impactos ambientais decorrentes de sua produção em larga escala. E, em segundo lugar, o pó de pedra em substituição do agregado miúdo natural, promovendo a minimização das más consequências dos setores de mineração e da poluição gerada pela má disposição do pó de pedra na natureza.

CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

DEFINIÇÃO

O termo concreto de alto desempenho – CAD, refere-se a um conjunto de propriedades resultantes, obtidas através do uso de materiais convencionais que utiliza de um alto padrão e controle tecnológico na produção desse concreto, desde a seleção de suas matérias-primas até boas práticas construtivas. Para Tutikian, Isaia e Helene (2011), entende-se por desempenho não apenas a resistência mecânica, mas também a trabalhabilidade, a estética, o acabamento, a integridade, e, principalmente, a durabilidade.

Para Cordeiro (2001, p. 4) o concreto de alto desempenho é uma evolução dos concretos produzidos ao longo dos anos. Um maior controle na escolha dos materiais e nas etapas de dosagem, mistura, adensamento, transporte e cura, aliado ao uso preciso de aditivos químicos e minerais, permite a confecção de concreto com propriedades melhoradas.

Atualmente quando se fala em propriedades, a resistência não é a única levada em consideração para denominar um concreto de alto desempenho, outros requisitos, principalmente os que caracterizam a durabilidade desse material, tais como facilidade de lançamento, altas resistências mecânicas, resistência à penetração de agentes agressivos, carbonatação, lixiviação, perda de massa, estabilidade volumétrica etc., se fazem necessários (SILVA, 2000).

A definição do concreto de alto desempenho variou ao longo do tempo, e até hoje não possui uma conceituação única, podendo ainda ser confundida com termo CAR, que se refere ao concreto de alta resistência, sendo essa a primeira denominação dada ao CAD nos anos 70, que como o próprio nome diz atrela sua definição à resistência mecânica (TUTIKIAN, ISAIA, HELENE, 2011).

Como no início das criações o bom desempenho do concreto estava sempre associado a resistência, adotou-se o nome de CAR. Entretanto, Nascimento (1997, p. 8) ressalta que hoje sabe-se que a resistência à compressão alcançada no CAD é apenas uma entre as várias características notáveis deste novo material.

Segundo a definição do U.S. Federal Highway Administration (2019), o CAD é o concreto desenvolvido para ser mais durável e, se necessário, mais resistente do que o concreto convencional. Quando se trata de materiais, a mistura é essencialmente a mesma que compõe um concreto convencional, no entanto, a diferença situa-se nas proporções de cada material para assim, fornecer as propriedades necessárias projetadas e atender aos requisitos estruturais esperados.

Quanto a relação água/ material cimentício (a/mc), o valor sugerido para efeitos práticos, deve ser menor que 0,4, sendo esse o parâmetro limite entre o CAD e o CC, visto que quando essa relação ultrapassa a fronteira definida, as características desse

concreto se tornam bem diferentes, principalmente no que se refere a resistência à compressão e retração. E para proporcionar trabalhabilidade ao concreto a utilização de aditivos superplastificantes se torna essencial (AÏTCIN, 2000). O autor afirma ainda que a combinação do uso de superplastificantes com a adições como de sílica ativa foi o que permitiu a produção de concretos de alto desempenho.

Posto isto, um CAD deve apresentar, simultaneamente, alta trabalhabilidade, alta resistência e alta durabilidade, e esse termo 'alta' é subjetivo, tendo em vista que pode ser entendido como acima do normal para determinadas aplicações.

No Brasil, embora não exista uma definição única que caracterize o CAD, os concretos convencionais possuem resistência a compressão entre 20 e 40 MPa, logo concretos de resistência acima de 45 MPa já são considerados concretos especiais ou concreto de elevado desempenho (SILVA, 2000).

DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO

Para Nascimento (1997, p. 9), existem referências na literatura de que desde o início da introdução do cimento na produção de concretos, a procura por resistências mais altas, principalmente a curto prazo, tornou-se cada vez maior. Os vários fatores que poderiam influenciar na resistência do concreto, tornam-se cada vez mais conhecidos.

O conceito de alto desempenho variou em igual proporção ao seu desenvolvimento que como dito anteriormente era chamado de concreto de alta resistência; exemplos como na década de 50 onde concretos com resistências à compressão próximas de 35 MPa eram considerados como materiais de extraordinária resistência mecânica (NASCIMENTO, 1997).

Uma década mais tarde, já se produzia concretos com resistência entre 41 e 52 MPa e, no início da década de 1970, produziu-se um concreto com 62 MPa, ao mesmo tempo em que se iniciava a demanda da utilização do CAR em edifícios altos (KEHL, 2017). Hoje a resistência de 60 MPa para os concretos aos 28 dias, pode ser obtida com facilidade.

Tutikian, Isaia, Helene (2011) retrata que entre a década de 1960 e 1980, nos EUA e Canadá, houve uma grande corrida de prédios altos executados em CAD, tendo em vista suas vantagens em relação às estruturas de aço, até então predominantes nesse tipo de edificações altas. Foi uma corrida contra o céu em busca de recordes de alturas cada vez maiores.

Silva (2000, p. 18) relata que em 1982, no edifício Chicago Mercantile, em Chicago, foi inicialmente especificada uma resistência de 100 MPa, e posteriormente após retirado um testemunho de um pilar para ensaio, a resistência alcançada foi de 117 MPa, uma resistência extraordinária para época.

O aparecimento do concreto conhecido como de alto desempenho ocorreu por

volta do ano de 1990, sendo o concreto desenvolvido pelos pesquisadores Mehta e Aitcin. (CHRIST, 2014) apud (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

No Brasil, essa foi a época em foram iniciadas a maior parte das pesquisas desenvolvidas sobre o assunto, e os resultados obtidos não viabilizavam plenamente a aplicação ordinária na construção civil (Nascimento, 1997).

Alves (2000, p. 6) justifica que esse grande avanço na tecnologia do concreto ao longo das décadas, assim como o desenvolvimento de novos materiais e componentes surgiu junto com o aumento das necessidades de desempenho e resistência, que já não estavam sendo satisfeitas.

APLICAÇÕES

Os concretos com resistências características acima de 42MPa, pôde ser aplicado em poucas localidades, durante muito tempo desde seu início, e mais recentemente a aplicação do CAD vem aumentando, sendo empregados em quase todos os países do mundo, principalmente visando os aspectos de durabilidade. (SILVA, 2000). No entanto o volume deste concreto ainda é pequeno, se comparado com as aplicações do concreto comum (CC).

Segundo Nascimento (1997, p. 3), o concreto de alto desempenho já faz parte de nossa realidade, sua viabilidade técnico-econômica está tão evidenciada que a maioria dos países desenvolvidos unem esforços com o objetivo de adaptar suas normas para este novo material. O autor destaca ainda, que as primeiras estruturas de concreto a fazerem uso do CAD foram os edifícios altos.

Um estudo realizado por Dal Molin e Wolf (1990) apud Cordeiro (2001, p. 6), indica uma redução de cerca de 12% do custo de um edifício de 15 andares, ao se empregar concreto de alta resistência ($f_{ck} = 60$ MPa) no lugar de um concreto convencional ($f_{ck} = 21$ MPa). Foram considerados os consumos de concreto, armaduras e formas, além de gastos com a mão de obra. Outros fatores como desformas mais rápidas, ganho de área útil em virtude das menores seções das peças estruturais e possibilidade de confecção de elementos mais leves e esbeltos, podem elevar este valor de economia, justificando ainda mais seu emprego.

Tutikian, Isaia e Helene (2011) comentam que as cidades brasileiras que mais se destacam nessa tecnologia são: São Paulo, Goiás, Curitiba e Salvador, mas encontram-se aplicações isoladas em outras regiões do país. O autor descreve também que as construções pioneiras em CAD, foram os edifícios habitacionais e comerciais, devido a maior capacidade de concentrar a sua tecnologia avançada.

Outro campo onde o concreto de alto desempenho é muito empregado são os pré-

moldados, que tem sido muito utilizado, principalmente para construções especiais do tipo pontes. Alves (2000) cita que a redução do peso próprio e possibilidade de execução de vãos maiores são vantagens de adoção desse concreto em pontes.

Para Nascimento (1997, p. 24) a grande importância da aplicação de concretos de alto desempenho em peças estruturais pré-fabricadas está no fato de se poder atingir grandes resistências em pouca idade. É possível atingir num prazo de 24 horas resistências que os concretos usualmente empregados só atingem aos 3, 7 ou até 28 dias de idade. Evidentemente, propiciará a reutilização mais rápida das fôrmas, moldes e mesas de moldagem.

As obras de infraestrutura são as que contém maior potencial de se adequar ao uso do CAD, tendo em vista um melhor desempenho e uma maior vida útil (TUTIKIAN, ISAIA E HELENE, 2011).

Tutikian, Isaia e Helene (2011) citam como exemplo a construção da Ponte Stichtse, próxima a Amsterdam, Holanda, com vão principal de 160m, projetada inicialmente para concreto da classe C45 (concreto leve) após para C65 (concreto normal) e, finalmente, recalculada para CAD C85 resistência em cubos, obtendo-se uma redução de 30% do volume de concreto.

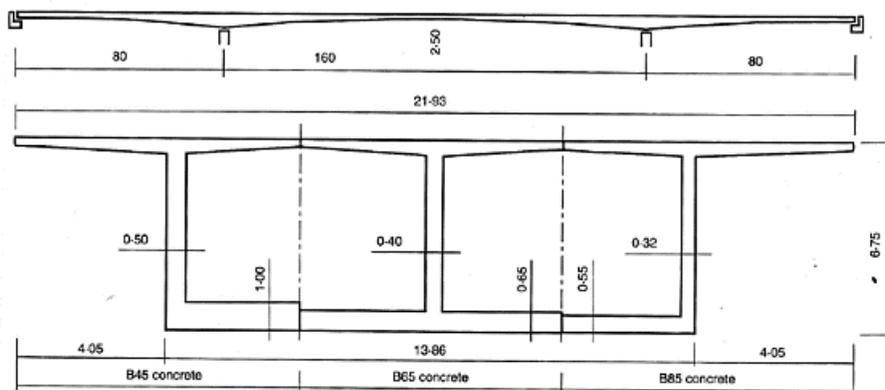


Figura 1 – Alternativa de projeto da ponte Stichtse, Holanda

Fonte: Tutikian, Isaia e Helene (2011)

ESTRUTURA

A microestrutura densa, homogênea e pouco cristalina, decorrente da melhoria de uma fase chamada zona de transição é a principal diferença do CAD em relação ao concreto convencional (SILVA, 2006).

O concreto possui uma estrutura heterogênea e de alta complexidade e por isso é necessário conhecer os elementos essenciais que constituem a microestrutura desse material antes de discutir as propriedades importantes como a resistência e durabilidade. Posto que, sua composição seja formada basicamente por água, cimento e agregados, a microestrutura do concreto apresenta três fases diferentes, a saber: a pasta de cimento hidratada, esqueleto granular e zona de transição. Dessas, duas podem ser facilmente notadas ao analisar-se a seção transversal de um corpo de prova de concreto, que são as partículas de agregado com tamanhos múltiplos e o meio ligante formado pela massa de pasta de cimento (METHA E MONTEIRO, 2008).

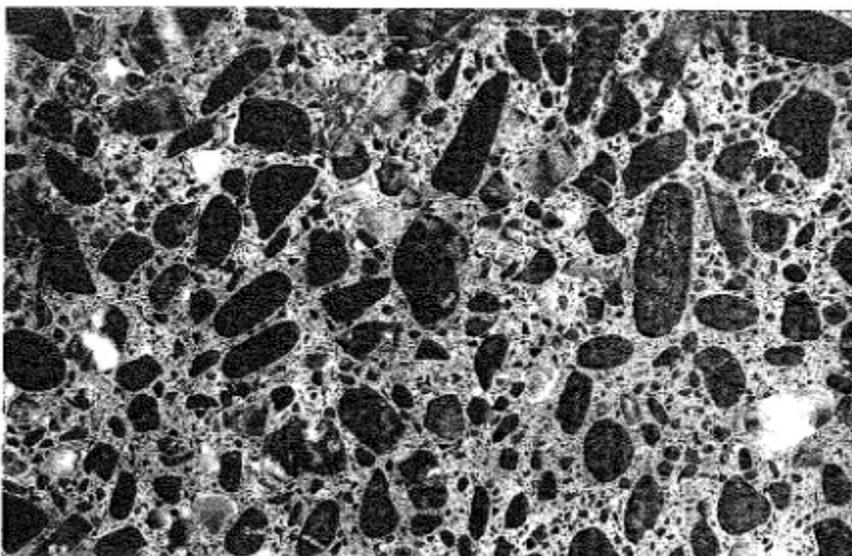


Figura 2 - Seção polida de um corpo de prova de concreto

Fonte: Metha e Monteiro (2008, p. 22)

Para transformar um CC em CAD se faz necessário além da incorporação de aditivos químicos, adições de minerais e agregados de melhor qualidade, um estudo das três fases acima citadas, de forma separada (apesar de a mistura ser um todo, mas para fins didáticos essa condição é desconsiderada) tendo em vista que ocorre interação entre elas (TUTIKIAN, ISAIA E HELENE, 2011). A seguir, apresenta-se cada uma das fases que compõem a microestrutura do concreto.

Fase pasta de cimento hidratada

O processo de amassamento do concreto dá início a reação química encarregada da hidratação do cimento quando entra em contato com a água, e produz uma mistura aglomerante denominada pasta de cimento (NASCIMENTO, 1997).

Metha e Monteiro (2008, p. 27) detalham que quando o cimento é disposto em água, o sulfato de cálcio e os compostos de cálcio formados em alta temperatura começam a entrar em solução, e a fase líquida se torna rapidamente saturada com várias espécies de íons. Como resultado da interação entre cálcio, sulfato e aluminato começam a aparecer cristais aciculares de trissulfato de cálcio hidratado conhecido como etringita. Poucas horas mais tarde, grandes cristais prismáticos começam a preencher os espaços vazios antes ocupados por água e partículas de cimento em dissolução, tornando a pasta cada vez mais compacta.

Os vazios possuem grande influência nas características da pasta endurecida, uma vez que, quanto maiores suas quantidades, maior será a porosidade e permeabilidade, fatores estes que reduzem a resistência química e mecânica da pasta aumentando também a retração e influência (FREITAS, 2005). Para Tutikian, Isaia e Helene (2011) os poros considerados grandes, com diâmetro maior que 50 ηm , são os mais prejudiciais à obtenção de concretos compactos e resistentes, principalmente quando estão concentrados na interface agregado/pasta. O autor relata ainda que para diminuir a porosidade na pasta é necessário reduzir a água e o ar aprisionado na mistura.

A relação a/c domina a porosidade, a compactidade e o grau de maturidade da pasta, isto é, a quantidade de compostos hidratados no tempo que é papel da idade e do histórico da temperatura ambiente (TUTIKIAN, ISAIA E HELENE, 2011).

A dependência das características da pasta de cimento para Tutikian, Isaia e Helene (2011) associasse as adições minerais, geralmente pozolânicas como a sílica ativa, cinza volante e outras. Para o autor seus efeitos potenciais são:

- a) melhorar as propriedades reológicas da pasta, como coesão, fluidez, viscosidade plástica e resistência à segregação, em vista da alta finura que em geral apresentam;
- b) diminuir a exsudação pela segmentação dos canais de fluxo d'água;
- c) proporcionar o refinamento dos vazios devido à presença de C-S-H secundário que segmentam os poros entre as partículas;
- d) proporcionar o refinamento das dimensões dos cristais de hidróxido de cálcio remanescente das reações pozolânicas.

Como resultado de tais efeitos encontra-se o aumento da compactidade e resistência mecânica em intensidade correspondente a diminuição da relação a/c e elevação do consumo de cimento.

Não existe dúvida sobre a interferência do cimento na resistência final da pasta, e quanto maior sua dosagem, menor a quantidade de vazios gerando uma mistura mais homogênea, pois menos espaços para a formação de cristais maléficos são produzidos. É importante ressaltar que fica limitado o emprego de quantidades de cimento, por vários

fatores (NASCIMENTO, 1997). Dentre esses fatores o autor cita elevação de temperatura do concreto e elevação da quantidade de água de amassamento.

Fase esqueleto granular

Por ocupar cerca de 60 a 70% do total do volume do concreto, a fase esqueleto granular ou fase agregado é a porção de grande influência sobre as propriedades do concreto, suas características influenciam na resistência a compressão, devido sua resistência mecânica e aderência a pasta (FREITAS, 2005).

Metha e Monteiro (2008, p. 26) declaram que a dimensão e a forma do agregado graúdo podem afetar a resistência do concreto de forma indireta. Os autores explicam que quanto maior o tamanho do agregado no concreto e quanto maior a proporção de partículas alongadas e achatadas, maior será a tendência de acúmulo de água junto à superfície do agregado, enfraquecendo a zona de transição na interface pasta-agregado, e esse fenômeno é chamado exsudação, como mostra a ilustração na figura 2, a seguir:

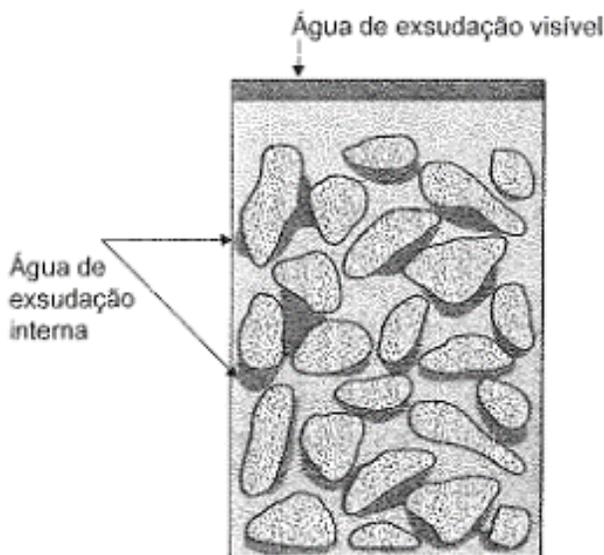


Figura 3 - Representação da exsudação no concreto fresco recém-lançado

Fonte: Metha e Monteiro (2008, p. 26)

Segundo os autores a água da exsudação tende a acumular-se em torno de partículas de agregados alongados, achatados e grandes.

Em concretos com relações a/mc baixas e resistências à compressão elevada (contrário do que acontece nos CC), as fases da pasta de cimento e da zona de transição se

convertem tão resistentes que a fase dos agregados pode-se tornar a mais fraca (AÏTCIN, 2000).

Zona de transição (ZT)

A zona de transição (ZT) é a camada situada entre a pasta de cimento e o esqueleto granular. E segundo Freitas (2005, p. 35) sua composição química e características mecânicas são diferentes da pasta matriz. Ressaltando ainda que a resistência mecânica desta região é de extrema importância para a resistência a compressão do concreto.

Tutikian, Isaia e Helene (2011) explicam que como a ZT depende do tamanho e da forma do agregado, certamente é mais pronunciada em agregados de maior dimensão e com forma angular. A Figura 4 mostra uma representação esquemática da ZT nos concretos.

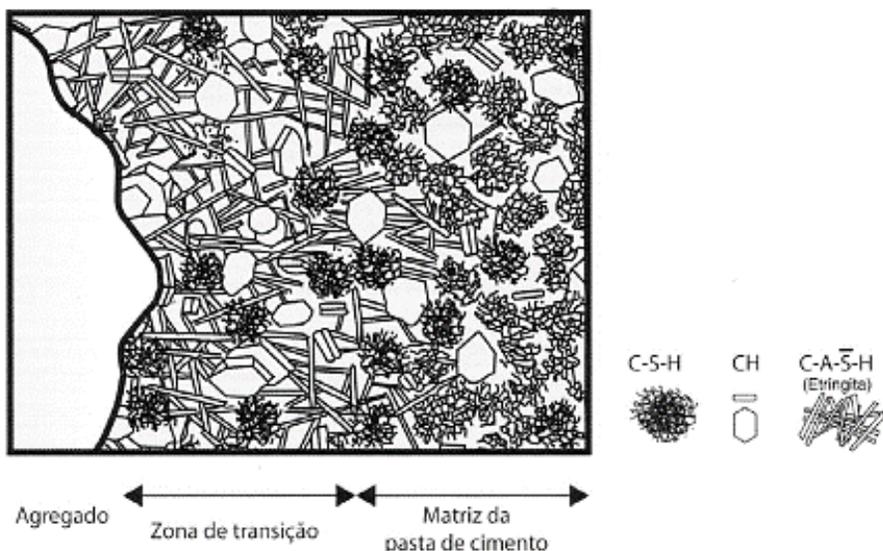


Figura 4 - Representação esquemática da zona de transição nos concretos

Fonte: Metha e Monteiro (2008, p.43)

Sobre a influência da ZT nas propriedades do concreto, Meta e Monteiro (2008, p. 44) explicam que por ser geralmente o elo mais fraco da corrente, ela é considerada como a fase limitante da resistência do concreto. É por causa da presença da ZT que se dá a ruptura do concreto em nível de tensão consideravelmente mais baixo do que a resistência de qualquer um dos outros dois componentes principais.

Se faz necessário que a resistência da ZT tenha a mesma ordem de grandeza do esqueleto granular, pois a resistência da pasta pode ser controlada pela relação a/c, para que o concreto atue como um material composto homogêneo (TUTIKIAN, ISAIA

E HELENE, 2011). A atenção nesta ligação deve ser maior, visto que nela acontece o surgimento das primeiras microfissuras do concreto, e em decorrência da intensidade que essas microfissuras são apresentadas, pode ocorrer uma influência negativa na resistência do material como um todo (NASCIMENTO, 1997).

O entendimento quanto as características microestruturais desta zona, pode ser entendido segundo Metha e Monteiro (2008, p. 42) de acordo com a sequência de desenvolvimento a seguir, partindo do momento em que o concreto é lançado.

- Inicialmente, filmes de água se formam em torno das grandes partículas de agregados, isso contribui para uma maior relação a/c na região próxima ao maior agregado;
- Na sequência, devido à elevada relação a/c, os produtos cristalinos (formados por íons de cálcio, sulfato, hidroxila e aluminato), nas proximidades do agregado gráudo formam uma estrutura mais porosa do que na matriz da pasta de cimento.
- Finalmente, com o desenvolvimento da hidratação, o C-S-H e uma segunda geração de cristais menores de etringita e hidróxido de cálcio, começam a preencher o espaço vazio que existe entre a estrutura criada pelos grandes cristais de etringita e de hidróxido de cálcio. Isso ajuda a melhorar a densidade e, conseqüentemente, a resistência da ZT na interface.

COMPOSIÇÃO

A produção do concreto de alta resistência exige uma rigorosa seleção dos materiais para garantir boa trabalhabilidade e elevada resistência, consistindo na mistura de cimento, agregados, aditivos minerais, aditivos químicos e água, empregando um baixo fator água/cimento.

Em seguida serão descritas as principais propriedades dos constituintes normalmente utilizados na produção do concreto de alto desempenho.

Cimento

Cordeiro (2001, p. 7) define o cimento Portland como um material pulverulento, aglomerante hidráulico, e seus componentes quando misturadas à água se hidratam e, depois de endurecidos, mesmo que sejam submetidos novamente à ação da água não se decompõem mais.

Quanto a composição do cimento, as matérias-primas empregadas são essencialmente materiais calcáreos, como rocha calcárea, alumina, sílica, e o óxido de ferro. O processo de fabricação do cimento Portland é definido pela moagem da matéria-

prima, continuando com a mistura nas proporções compatíveis e avançando com a queima dessa mistura em um forno rotativo até uma temperatura de cerca de 1450 °C, onde o material sofre uma fusão formando esferas, denominada clínquer. Por sua vez, o clínquer é resfriado e recebe adição de um pouco de sulfato de cálcio, e é levado a um moinho até se tornar um pó bem fino, o resultando então é o cimento Portland largamente utilizado em todo mundo (NEVILLE, 2016).

Alguns autores declaram que quanto mais fino o cimento maior será o teor de reatividade com a água, fator esse que provoca maior desenvolvimento da resistência do concreto nas primeiras idades (NASCIMENTO, 1997). O autor considera ainda a existência de três aspectos importantes que devem ser considerados na escolha ideal do cimento para produção do CAD, são eles:

A) Natureza: a natureza desse material é extremamente importante com relação à principal propriedade que se deseja obter na confecção do concreto, um exemplo é a influência da natureza de um cimento na quantidade de água necessária para obtenção de uma determinada trabalhabilidade da mistura.

B) Uniformidade: as características de uniformidade de um cimento para a confecção de CAD (ACI 363R, 1992) podem ser classificadas como:

- Composição química - o teor de silicato tricálcico (C3S) não deve variar em mais de 4 %;
- A perda ao fogo não deve variar em mais de 0,5%;
- Finura - a superfície específica não deve variar em mais de 375 cm²/g;
- Resistência à compressão - principalmente se tratando de CAD, é fundamental que não haja grandes variações de resistência à compressão da argamassa normal de cimento aos 7, 28, 56 e 91 dias.

C) Dosagem: Almeida (1990) apud Nascimento (1997, p. 59) cita uma consideração com relação à dosagem ideal de cimento para a produção de CAD. Segundo o autor, é preciso identificar a partir de ensaios de laboratório a combinação ótima em termos de quantidade com os restantes materiais, de forma que seja obtida a resistência desejada com o menor custo.

Agregados

A qualidade dos agregados tem grande importância no volume total do concreto, tendo em vista que representa em média ¾ da mistura, e suas propriedades afetam consideravelmente a durabilidade e o desempenho do concreto (NEVILLE, 2016).

Nascimento (1997, p. 59) ressalta que além das exigências mínimas solicitadas

para a produção de qualquer concreto, vários outros aspectos sobre as propriedades deste material devem ser considerados para que o CAD desejado seja alcançado da melhor forma e com o menor custo.

Agregado miúdo

São classificados agregados miúdos, os agregados com diâmetros máximos até 4,8 mm, e são exemplos as areias naturais ou artificiais (SILVA, 1995).

Os agregados miúdos mais recomendado para a produção de CAD, são aqueles com partículas arredondadas e lisas pois demandam menor quantidade de água para que a mistura alcance boa trabalhabilidade (ACI 363R, 1992). Ainda sobre as características Neville (2016, p. 706) explica que os agregados miúdos devem ser arredondados e uniformemente graduados, porém mais grossos, devido ao elevado teor de partículas finas das misturas ricas utilizadas no CAD, e são recomendados, em algumas situações, módulos de finura entre 2,8 e 3,2.

Blinck (1973) apud Silva (1995, p. 10) declarou que uma areia com módulo de finura inferior a 2,5 proporcionou ao concreto uma consistência viscosa, tornando-o difícil de compactar. Já a areia com um módulo de finura em torno de 3,0 deu uma melhor trabalhabilidade e maior resistência à compressão.

Agregado graúdo

As partículas de agregados maiores que 4,8 mm, são nomeadas graúdas, e são responsáveis por cerca de 60% do volume na mistura do concreto. Esse volume de ocupação gera uma atenção maior para este componente, devido aos efeitos que ele pode causar ao concreto (CORDEIRO, 2001), quanto a escolha desse agregado o autor explica que é mais complexa que a do agregado miúdo, devido a interferência que suas propriedades provocam na resistência e durabilidade do concreto.

Em seu trabalho Silva (1995, p. 11) ressalta que dimensões menores de agregados também produzem concretos com maiores resistências, por causa de menores concentrações de tensões ao redor das partículas, que são causadas por diferenças entre o módulo de deformação da pasta e do agregado.

As propriedades mecânicas dos agregados graúdos influenciam diretamente nas propriedades do CAD, portanto torna-se imprescindível a observação de fatores como origem mineralógica da rocha-mãe tendo em vista que algumas rochas apresentam desempenho superior como granito ou inferior como o gnaiss, tamanho máximo do agregado pois esse fator influencia diretamente na trabalhabilidade do concreto fresco, forma, modulo de deformação e outros (GUIMARÃES, 2002).

Silva (2000, p. 61) explica que devido ao entrelaçamento mecânico, a textura

superficial do agregado graúdo é parcialmente responsável pela ligação entre a matriz pasta e o agregado. Portanto, o agregado proveniente de rocha britada produz aderência superior ao comparado com o pedregulho ou seixo. Silva (1995, p. 11) explica ainda, que a maior razão provável para isto é a maior aderência mecânica que pode se desenvolver com partículas angulosas. Todavia, a angulosidade acentuada deve ser evitada, por causa da alta necessidade de água e da redução na trabalhabilidade.

Aditivos químicos

A principal função dos aditivos químicos é a redução do consumo de água na produção do CAD, e além desta, outras características como acelerar o ganho de resistência, estender o tempo de pega do concreto, controlar a taxa de endurecimento, são essenciais para melhorar a trabalhabilidade e durabilidade do concreto de alto desempenho (MOMIN E KHADIRNAIKAR, 2018).

Segundo o Manual Técnico da MC (2016/17, p. 15) a efetividade de cada aditivo pode variar dependendo de sua concentração no concreto, tipo de material cimentício, temperatura ambiente e dos materiais constituintes do concreto, energia de mistura, tempo de adição e variação dos constituintes dos mesmos. Além do efeito principal, os aditivos podem apresentar algum efeito secundário, modificando certas propriedades no concreto.

Aditivos incorporadores de ar (Tipo IAR)

O uso dos aditivos incorporadores de ar é recomendado devido a sua capacidade de aumentar a durabilidade das misturas de concretos sujeitos a congelamento e descongelamento, esse aditivo possui ainda a vantagem principal de proporcionar melhor trabalhabilidade ao CAD, tendo em vista seu fator água/cimento reduzido. Ocorre também uma redução na segregação e exsudação, efeito esse que proporciona a mistura lubrificação e coesão. (SILVA, 1995)

Silva (1995, p. 12) afirma que o ar incorporado reduz a resistência do concreto, particularmente nas misturas de alta resistência. Por este motivo, o uso deste aditivo é recomendado exclusivamente em casos que o principal interesse seja melhor durabilidade e resistência às intempéries, mesmo provocando queda de resistência mecânica.

As normas NBR 11768-1 e 11768-2 (ABNT, 2019) o definem como aditivo que permite incorporação, durante o amassamento do concreto, uma quantidade controlada de pequenas bolhas de ar, uniformemente distribuídas, que permanecem no material no estado endurecido.

Aditivos retardadores de pega (Tipo R)

As NBR's 11768-1 e 11768-2 (ABNT, 2019) o descrevem como aditivo que aumenta

o tempo de transição do concreto do estado plástico para o estado endurecido.

Geralmente essa substância será utilizada com objetivo de aumentar o tempo de pega do cimento, gerando um controle no início da hidratação desse material, para que o concreto possa ser transportado, lançado e adensado, principalmente nas concretagens onde a temperatura ambiente é alta/quente (NEVILLE, 2016).

Aditivos aceleradores de pega (Tipo A)

O intuito dos aceleradores é provocar um endurecimento mais rápido na mistura em estado fresco, acelerando o tempo de pega, e dessa maneira influenciar de forma positiva na resistência inicial do concreto (SIMÕES, 1997).

Esses aditivos possuem utilidades quando misturados ao concreto para lançamentos em baixas temperaturas de 2 a 4 °C, em produções que necessitem de desforma rápida, e em reparos de caráter urgente, permitem também a antecipação de acabamentos e a produção de serviços com prazos reduzidos (NEVILLE, 2016).

Em 1997, Simões afirmou que este aditivo não é mais usado com frequência, pois existem cimentos que apresentam pega acelerada (cimento ARI) e além disso os concretos de alta resistência possuem resistência inicial alta o suficiente para efetuar remoções prematuras das formas por exemplo.

Neville (2016, p. 263) destaca que, a demanda por aceleradores diminuiu, especialmente na produção de concreto pré-moldado, visto que há outras formas de se obter uma resistência inicial elevada, como pelo uso de relações água/cimento muito baixas em conjunto com superplastificantes. No entanto, o uso de aceleradores em lançamentos realizados em baixas temperaturas ainda continua.

Os aceleradores são definidos pelas normas NBR 11768-1 e 11768-2 (ABNT, 2019), como o aditivo que reduz o tempo de transição do concreto do estado plástico para o estado endurecido.

Aditivos redutores de água – Plastificantes (Tipo P)

O papel dos aditivos redutores consiste na diminuição do teor de água na mistura, com frequência usual de 5 a 10%, e para concretos com trabalhabilidades elevadas pode chegar em até 15% (NEVILLE, 2016). Utilizados com intuito de aprimorar a consistência do concreto e manter uma boa trabalhabilidade evitando a elevação da temperatura (SILVA, 1995).

Considerando que agregados de má granulometria evidente não deveriam ser utilizados, os aditivos redutores de água melhoram as propriedades do concreto fresco produzido com esses agregados, ou seja, com uma mistura áspera. O concreto que

contém um aditivo redutor de água, em geral, apresenta baixa segregação e boa “fluidez” (NEVILLE, 2016).

Aditivos superplastificantes (Tipo SP)

O aditivo superplastificante também é um redutor de água, entretanto possui maior ação que os aditivos considerados no item prévio. De natureza bem distinta, proporciona produções de concretos diferentes dos produzidos com redutores de água de outro tipo, tanto em estado fresco quanto endurecido, e essa característica se dá devido redução da relação água/cimento que um SP consegue propor a mistura. Graças a essa redução significativa ele também é utilizado na produção de concretos com trabalhabilidades normais que precisam atingir uma resistência extremamente elevada. (NEVILLE, 2016).

A velocidade no processo de hidratação do cimento em misturas de concretos contendo SP, apresentam constantemente, resistência aos 1, 3 e 7 dias em níveis superiores aos concretos de referência contendo a mesma relação a/mc. Aos 28 dias os efeitos retardadores relacionados a esse aditivo, ainda podem ser observados devido ao desenvolvimento que ocorre na microestrutura consequentes de altas dosagens (SILVA, 2000).

Não existe ainda total explicação de como atuam os superplastificantes na mistura do concreto, o que se sabe é que sua interação com o aluminato tricálcico (C3A), responsável pela liberação de calor nas primeiras horas, (fator que promove uma pega instantânea e o endurecimento prematuro), provoca retardo na hidratação. Fisicamente são formados pequenos cristais de entringita de formas cúbicas, no lugar de formas de agulhas, e essa forma cúbica melhora a mobilidade da pasta de cimento (NEVILLE, 2016).

De acordo com Silva (2016) apud Grace (2015) os aditivos superplastificantes possuem o mesmo funcionamento dos aditivos plastificantes. No entanto, pode-se distingui-los quanto à intensidade da ação, pois enquanto o plastificante consegue reduzir até 6% de água, o SP consegue chegar à marca de 12%.

Adições minerais

A adição de minerais a produção de concreto de alto desempenho, segundo Momin e Khadirnaikar (2018), reduz a porosidade da matriz e da zona de transição, aumentando assim as características de resistência e durabilidade. Os autores ressaltam ainda que esses aditivos minerais possuem área superficial superior em relação ao cimento e atuam como micro-cargas e materiais cimentícios complementares.

Cinza Volante

Definidas por Momin e Khadirnaikar (2018, p. 212) como subprodutos das usinas

de geração de energia, produzidas a partir da queima de carvão durante a produção dessa energia. As composições químicas formadoras de cinzas volantes serão diferentes a depender do tipo de carvão, podendo ser classificadas em duas, cujas denominações são Classe-C e Classe-F. A principal diferença entre as duas classes é o conteúdo total de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . A Classe-F tem conteúdo total superior a 70%, enquanto a Classe C tem um conteúdo total entre 50 - 70% e o conteúdo restante é CaO . Juntas essas classes representam respectivamente o alto e o baixo teor de cálcio (MOMIN E KHADIRNAIKAR, 2018).

Neville (2016) explica que a influência primordial da cinza volante nas propriedades do concreto está na demanda de água e na trabalhabilidade. Para uma trabalhabilidade constante, a redução na demanda de água devido à cinza volante normalmente se situa entre 5 e 15%, quando comparada a um concreto produzido somente com cimento Portland e com o mesmo aproveitamento de material cimentício.

A maior parte das partículas das cinzas volantes são esferas sólidas que conferem redução na demanda de água e influencias apreciáveis nas propriedades do concreto. Portanto o fato de não se tratar de um produto fabricado pois são “resíduos” como dito anteriormente, e não podem ser controlados por exigências de uma norma, é de extrema importância que estas sejam devidamente testadas e que tenham sua uniformidade assegurada antes do seu uso (NEVILLE, 2016; FREITAS, 2005).

Freitas, (2005, p. 44) completa que o grau de reatividade da cinza volante, que tem como efeito à velocidade no ganho da resistência mecânica, trabalhabilidade do concreto, além da sua composição química, também depende da sua granulometria, características da superfície e morfologia dos grãos.

Do ponto de vista do aspecto sanitário, a utilização deste material no concreto sem dúvidas ajuda no cuidado ao meio ambiente, pois as cinzas volantes são materiais muito poluentes da natureza. Sua atuação no concreto se assemelha à da sílica ativa, tanto na pasta de cimento quanto na interface pasta agregado (NASCIMENTO, 1997).

Escória de Alto Forno

Resíduo da produção de ferro gusa, a escória é uma mistura de óxido de cálcio, sílica e alumina, os mesmos óxidos que constituem o cimento Portland, diferindo nas proporções. Sua composição e estrutura física possuem grande variação a depender da técnica utilizada e método aplicado de resfriamento. Sua massa específica é cerca de 2,90 g/cm^3 um pouco menor do que a do cimento Portland de 3,15 g/cm^3 (NEVILLE, 2016)

A produção com escória pode ocorrer de várias maneiras, com utilizações economicamente interessantes, como matéria prima, conjunta com calcário, no processo seco de produção de cimento, e na produção de cimento de alto-forno juntamente com o

clínquer (NEVILLE, 2016).

Para Silva (1995, p. 15) a escória apropriada para o concreto é um produto não metálico, que é obtido em condição liquefeita, simultaneamente com ferro em alto forno. Ela sofre um resfriamento rápido em água e se solidifica, adquirindo uma textura vítrea e granular, tornando-se um material hidráulico ativo, que atuará no concreto como substituição parcial do cimento.

Pó de Pedra

Produzido como resultado da lavagem da areia artificial, o pó de pedra possui composição de uma polpa bastante diluída em água acomodada em bacias de decantação ou lagoas de captação. Seu efeito filler proporciona uma redução no consumo de cimento sem alterar a resistência desejada (CAMPOS, 2015).

O pó de pedra representa cerca de 15 a 20% da produção de uma exploração de britagem, e sua aplicação na produção de concretos melhora características como trabalhabilidade e resistência a compressão, devido ao formato que os grãos desse material possuem (BARBOSA et al, 2019). Barbosa et al (2019) apud Silva e Silva (2012) salientam que a aplicação desse material no concreto propicia qualidade e maior segurança nas construções, fatores fundamentais no setor da engenharia civil.

Campos (2015, p. 16) explica que o agregado miúdo de britagem é considerado todo material resultante da fragmentação de rochas passante na peneira 4,75 mm. Dentro desta classificação, areia artificial é o material passante na peneira de malha de 4,75 mm e o pó de pedra é caracterizado por apresentar material de granulometria com percentual abaixo de 0,075 mm, em suspensão na água.

O pó de pedra estocado nas pedreiras causa alteração da paisagem, obstrução de canais de drenagem em virtude da sua deposição e geração de poeira nas operações de britagem causando danos ambientais, seu aproveitamento na produção de concretos, além de proporcionar lucratividade às empresas que usufrui desse material, proporciona benefícios ao meio ambiente (CAMPOS, 2015).

Sílica Ativa (Microsílica)

Para Neville (2016, p. 89), a sílica ativa é relativamente nova entre os materiais cimentícios, tendo sido introduzida inicialmente como pozolana. Ela é um resíduo da produção de silício ou de ligas de ferrossilício, obtido a partir de quartzo de alto grau de pureza e de carvão em forno elétrico a arco submerso.

O diâmetro médio da partícula de sílica ativa é de 0,10 a 0,15 μm , que é aproximadamente 100 vezes menor do que o tamanho médio da partícula de cimento, sendo correspondente às partículas sólidas de fumaça de um cigarro (AÏTCIN, 2000). O

autor afirma ainda que a área específica da sílica possui ordem de 20.000 m²/kg.

Segundo Neville (2016, p. 90), sendo um material tão fino, a sílica ativa tem uma massa unitária muito baixa, entre 200 e 300 kg/m³, e como sua manipulação é difícil, ela é disponibilizada densificada na forma de micropéletes, que são aglomerados de partículas individuais (produzidos por aeração), com a massa unitária entre 500 e 700 kg/m³. Momin e Khadirnaikar (2018) destacam que o conteúdo total de sílica na microssílica varia entre 85 - 97% em comparação com 21,9% no cimento Portland.

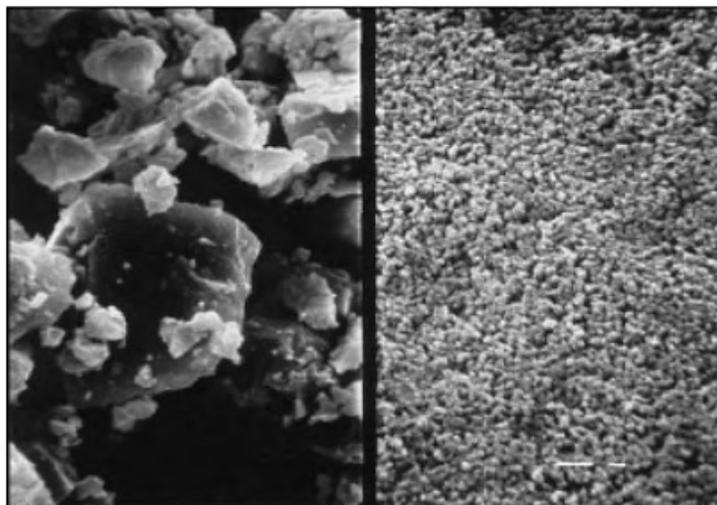


Figura 5 – Micrografia em mesma escala de grãos de cimento Portland (esquerda) e sílica ativa (direita)

Fonte: Silva (2016, p. 26)

As diminutas partículas que compõem a sílica ativa, quando em contato com o hidróxido de cálcio gerados por efeito da hidratação do cimento, aceleram a reação, devido a alta capacidade reativa da sílica. Essas pequenas partículas entram facilmente entre os espaços deixado pelas partículas de cimento, provocando como consequência uma melhora no empacotamento (NEVILLE, 2016).

Por oportuno, microssílica possui grande eficácia devido a sua área de superfície extrema e alto teor de sílica em comparação com qualquer outro mineral, sua utilização possibilita a produção de concretos de altíssima resistência, se tornando um material necessário na produção de CAD com resistência superior a 70 MPa (MOMIN E KHADIRNAIKAR, 2018).

Água de amassamento

Componente primordial na produção do concreto e representante de cerca de

20% de seu volume, é a responsável por provocar as reações de endurecimento. Suas especificações para o CAD não são mais exigentes que para o CC. No geral a água de amassamento deve ser isenta de matérias orgânicas e substâncias nocivas, seguindo o preconizando pela norma NBR NM 15900-1/2009: Água para amassamento do concreto, para evitar influências indesejáveis no comportamento do concreto (SILVA, 2016).

PRODUÇÃO

Segundo Freitas (2005) A produção e as propriedades dos CAR não são significativamente diferentes dos concretos convencionais, contudo, para a produção de CAR é de fundamental importância uma seleção criteriosa de materiais e o controle preciso da relação a/mc, isto implica em um alto controle da umidade dos agregados e até a consideração da água que acompanha os aditivos.

Métodos de dosagem

Os concretos de alta resistência devem suas características à incorporação de minerais e de superplastificantes aos componentes tradicionais do concreto (ROHDEN, 2015), com isso alguns métodos ou procedimentos de dosagem para concreto de alta resistência foram desenvolvidos, contudo, ainda carecem de códigos e normas que estabeleçam critérios e regras a serem seguidos, padronizando a produção do concreto de alta resistência (ALVES, 2000).

Segundo Alves (2000) o objetivo de qualquer método de dosagem é determinar uma proporção adequada e econômica dos materiais constituintes do concreto de forma a atender as propriedades desejadas com o menor custo possível.

Contudo, devido às variações regionais dos materiais, faixas de resistência e a presença de diferentes aditivos, é impossível determinar um único método que atenda a todas estas combinações para otimizar custos, especialmente para os concretos de alta resistência, onde há a necessidade de se adaptar métodos próprios por causa da presença de adições (BHARATKUMAR *et. al.*, 2001, apud. FREITAS, 2005).

Métodos de dosagem convencionais

Dentre os diversos métodos os que mais são utilizados no Brasil e merecem destaque nesta pesquisa são os métodos ACI/ABCP e IPT/EPUSP.

- **Método ACI/ABCP**

O método ABCP é uma adaptação feita pela Associação Brasileira de Cimento Portland do método americano proposto pela ACI 211.1-81 (Standart Practice for Selecting Proportion for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete - 1985), essa adaptação tem

como intuito trazer esse método para a realidade brasileira, para assim permitir a utilização dos agregados que se enquadram nos limites propostos pela NBR 7211/2019, norma responsável pelos Agregados para Concreto, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

O desenvolvimento do método, segundo Rodrigues (1998) obedece às seguintes etapas:

- Fixação da relação água/material cimentício (a/mc)
- Estimativa do Consumo de Água do Concreto (C_{ag})
- Estimativa do Consumo de Cimento (C)
- Estimativa do Consumo de Agregado Graúdo
- Estimativa do Consumo de Agregado Miúdo

Requisitos necessários:

- Dimensão máxima característica (DMC) dos agregados;
- Consistência desejada do concreto fresco, medida pelo abatimento do tronco de cone;
- Condições de exposição ou finalidade da obra;
- Resistência desejada do concreto aos 28 dias.

Ensaio preliminares necessários:

- Tipo, massa específica e resistência aos 28 dias do cimento a ser utilizado;
- Análise granulométrica e massa específica dos agregados disponíveis;
- Massa unitária compactada do agregado graúdo.

• **Método IPT/EPUSP**

Este método de dosagem foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/Instituto de Pesquisas Tecnológicas (EPUSP), por isso o método é conhecido como método IPT/EPUSP, por ser um método de fácil execução tem sido bastante utilizado nacionalmente.

Os conceitos fundamentais para esse método, segundo Helene e Terzian (1992), são:

- A relação a/mc é o parâmetro mais importante do concreto estrutural;

- Definida a relação a/mc e definidos certos materiais, a resistência e a durabilidade do concreto passam a ser únicas;
- O concreto é mais econômico quanto maior a DMC do agregado graúdo e menor o abatimento do tronco de cone;
- As Leis de Abrams, Lyse e Molinari são aceitas como “leis de comportamento”;
- É possível construir-se um diagrama de dosagem para analisar comportamento do concreto, nesse diagrama observam-se os parâmetros resistência à compressão, relação agregados secos/cimento, relação a/mc e o consumo de cimento por metro cúbico de concreto;
- Custo do concreto/m³

Requisitos necessários:

- Resistência característica do concreto a 28 dias
- Determinação do espaçamento entre barras de aço
- Determinação da dimensão máxima característica do agregado graúdo
- Definição dos elementos estruturais a serem concretados com este traço
- Determinação da consistência desejada do concreto fresco, medida pelo abatimento do tronco de cone;
- Definição da relação a/mc máxima, para atender os critérios de durabilidade;
- Uso de aditivo se necessitar de condições especiais.

Ensaio preliminares necessários:

- Tipo, classe e nível de resistência aos 28 dias do cimento a ser utilizado;
- Massa unitária e coeficiente de inchamento do agregado miúdo;
- Massa unitária e DMC do agregado graúdo.

Métodos baseados no critério do volume absoluto

Alguns métodos específicos para concreto de alta resistência fundamentam-se no critério do volume absoluto para quantificar os materiais utilizados.

A seguir são apresentados alguns deles.

- **Método Aitcin**

O Método de Aitcin utiliza resultados combinados empíricos com cálculos matemáticos derivados da experiência e no critério do volume absoluto, o tornando praticamente simples, mesmo não havendo a garantia de uma exatidão em seus resultados. (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Esse método é utilizado para produção de concretos na faixa de 40 a 160 MPa de resistência à compressão, a água fornecida pelo superplastificante é considerada como parte da água de mistura e a forma do agregado considerada durante o cálculo do proporcionamento dos materiais.

Na Figura 6, tem-se um fluxograma para aplicação desse método.

O procedimento para a dosagem do CAD é iniciado pela seleção de cinco diferentes características ou proporções de materiais, na seguinte sequência:

- Relação água/material cimentício;
- Consumo de água;
- Dosagem do superplastificante;
- Quantidade de agregado graúdo;
- Teor de ar aprisionado (valor adotado).

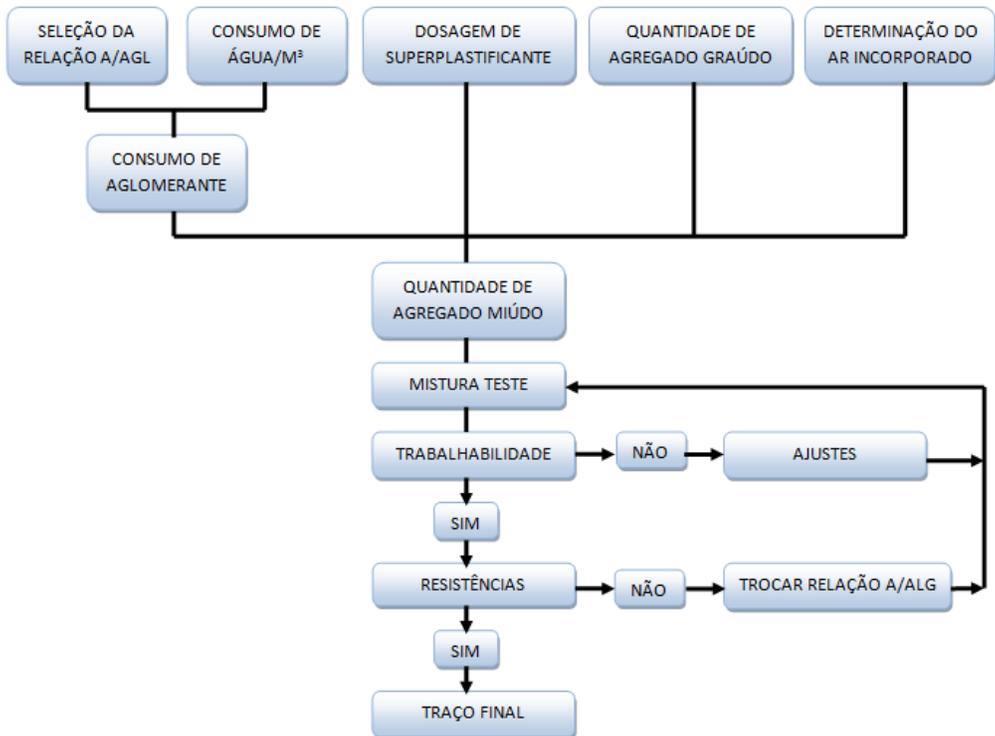


Figura 6 – Fluxograma do método de Aïtcin

Fonte: Adaptado de Aïtcin (2000, p. 234)

Neste fluxograma podem-se observar os passos necessários para a elaboração do concreto segundo esse método, contudo por ser baseado em experiências anteriores, o método serve apenas como guia. Ajustes na primeira tentativa devem ser feitos. (Alves, 2000).

Segundo Aïtcin (2000) é difícil determinar a quantidade de água a ser usada para alcançar um concreto de alto desempenho, isso ocorre pois pode-se dosar o concreto com uma baixa quantidade de água e uma alta de superplastificante ou com uma maior dosagem de água e uma menor de superplastificante.

De forma a determinar a quantidade de água/aglomerante necessária na mistura para alcançar a resistência desejada o autor fornece uma curva teórica para estimar a relação a/mc, mostrada na Figura 7. Nessa curva é correlacionado a relação a/mc com a resistência à compressão aos 28 dias, baseada em uma série de resultados obtidos em pesquisas.

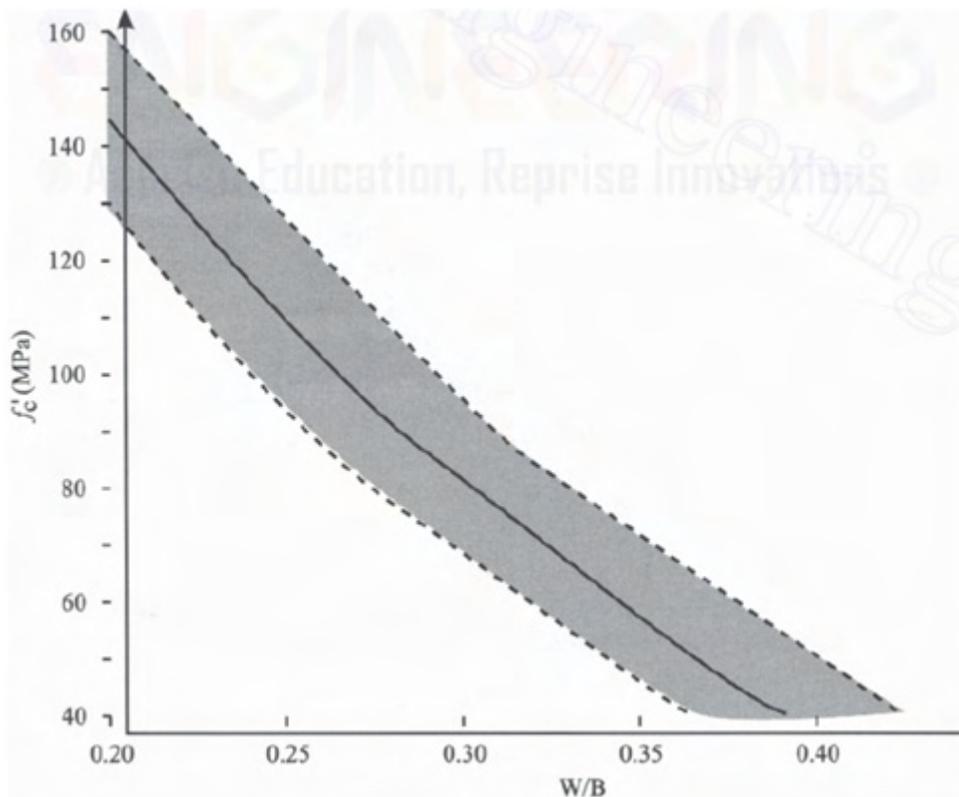


Figura 7 - Relação entre a relação a/mc e a resistência à compressão aos 28 dias.

Fonte: Adaptado de Aïtcin (2000)

Depois de obtido a relação a/mc necessária na mistura é essencial determinar a quantidade de água e de aglomerante. Para isso pode-se utilizar o Quadro 1 fornecido pelo autor que correlaciona a dosagem de água com o ponto de saturação do aditivo superplastificante.

Ponto de saturação do aditivo (%)	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
Água (Kg/m ³)	120 a 125	125 a 135	135 a 145	145 a 155	155 a 165

Figura 8 - Determinação da dosagem mínima de água.

Fonte: Aïtcin (2000)

Sabe-se que quanto maior a quantidade de água utilizada, menor a resistência à compressão do concreto. O método informa que em toda mistura experimental o teor de

saturação do aditivo deve-se iniciar com 1% e realizar os ajustes se o resultado não for satisfatório, além disso quando não se conhece o ponto de saturação do aditivo, pode-se realizar uma mistura experimental partindo de 1% de aditivo, com 145 kg/m³ de água, o que torna a mistura bastante incerta.

Para o desenvolvimento do método, segundo Alves (2000, p.41), são necessários alguns dados, como:

Requisitos de projeto:

- Abatimento;
- Resistência que se deseja alcançar;
- DMC.

Ensaio preliminares:

- Ponto de saturação do aditivo;
- Massa específica e quantidade de sólidos do aditivo;
- Massa específica do cimento, areia e brita;
- Forma do agregado graúdo;
- Teor de ar incorporado;
- Absorção dos agregados.

• **Método Nawy**

O método de Nawy apresenta uma metodologia de dosagem de concretos de alto desempenho de alta resistência baseada na aplicação de algumas equações empíricas e tabelas. (ARAÚJO, 2019). Esse é um método onde o volume de agregado miúdo é determinado pela subtração dos volumes de todos os outros materiais do volume total de concreto, assim obtendo-se o volume de areia necessária para o traço.

Para o desenvolvimento do método, segundo Alves (2000, p.39) são necessários alguns dados, como:

Requisitos de projeto:

- DMC;
- Abatimento;
- Resistência à compressão que se deseja alcançar;
- Utilização ou não de superplastificante.

Ensaio preliminares necessários:

- Verificação do tipo e classe do cimento;
- Módulo de finura da areia;
- Teor de umidade dos agregados;
- Massa unitária compactada dos agregados;
- Massa específica dos agregados.

Métodos baseados na otimização do esqueleto granular

Nestes métodos o principal fundamento é a otimização de um esqueleto granular que apresente um menor índice de vazios. (ROHDEN, 2015), pois quanto menor o volume de vazios menor será o volume de pasta para preencher e para que isso ocorra é necessária uma busca das combinações dos agregados que resultem na menor quantidade de vazios. Alguns métodos que seguem este fundamento básico são descritos a seguir.

• **Método Toralles Carbonari**

A dosagem proposta é baseada em um exaustivo estudo de escolha de materiais e proporções dos mesmos. (OLIVEIRA, 2012). A ideia principal deste método é que concretos de alta resistência pode ser produzidos através da otimização da pasta e do esqueleto granular, de forma que o esqueleto granular tenha um baixo índice de vazios e que a pasta tenha excesso o suficiente para suprir todos esses vazios, fazendo assim a composição ótima da mistura dos dois.

Para o desenvolvimento do método, segundo Alves (2000, p. 50) são necessários alguns dados, como:

Requisitos de projeto:

- Abatimento;
- Resistência à compressão que se deseja alcançar;
- Tipo e dosagem de adição.

Ensaio preliminares necessários:

- Ensaio de consistência normal;
- Ensaio do Cone de Marsh;
- Massa específica das pastas de cimento;

- Ensaio de compactação dos agregados secos;
- Análise granulométrica dos agregados;
- Absorção e massa específica dos agregados.

- **Método Mehta e Aitcin**

Segundo os autores, através deste método é possível produzir-se concreto de alta resistência na faixa entre 60 e 120 MPa, arbitrariamente divididos em cinco graus de resistências: A, B, C, D e E que equivalem a resistências médias de 65, 75, 90, 105 e 120 MPa, respectivamente, isso ocorre porque concretos com resistência acima de 60 MPa tem baixa permeabilidade, já o limite superior a 120 MPa se deve a produção de concretos com agregados naturais que, dificilmente atingem resistências acima dessa (FOCHS, 2011). Nesse método o consumo de água depende da dimensão máxima característica dos agregados e do abatimento desejado, sua influência afeta diretamente na resistência. Na figura 8 observa-se o passo a passo do método.

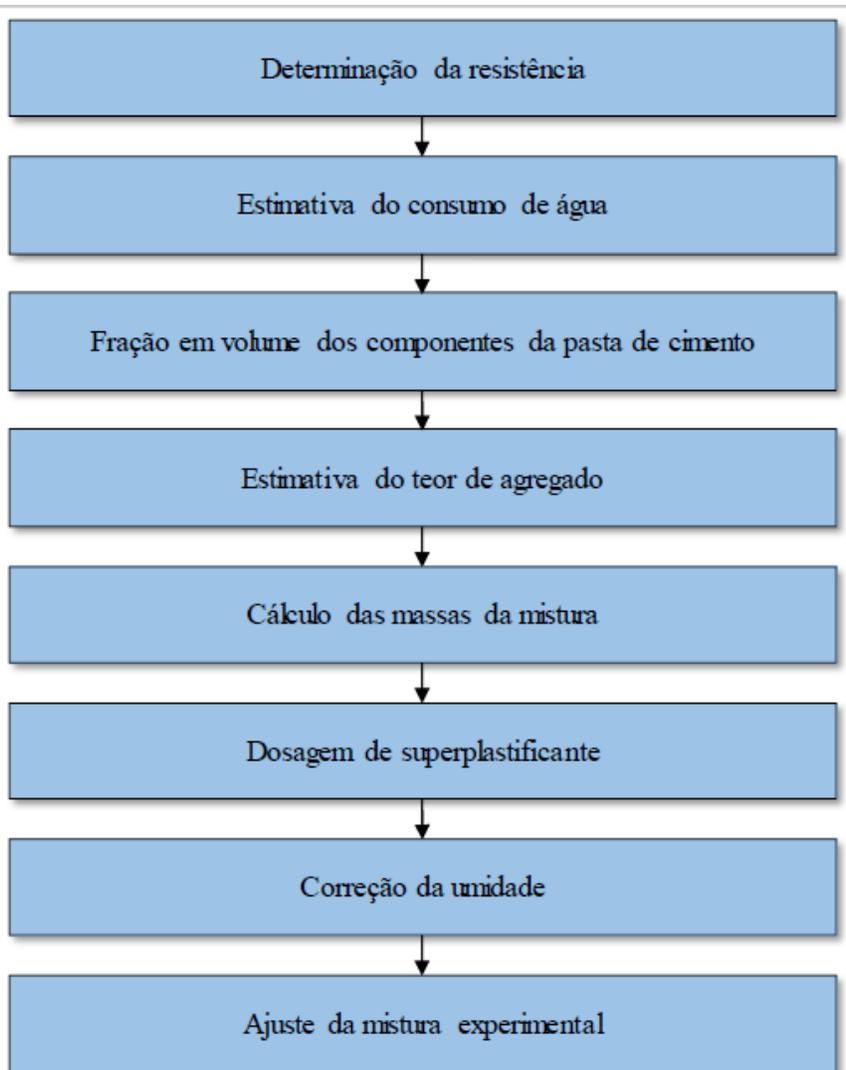


Figura 9 - Passo-a-passo do método Mehta-Aïtcin

Fonte: Araújo (2019)

Para o desenvolvimento do método, segundo Alves (2000, p. 43) são necessários alguns dados, como:

Requisitos de projeto:

- Resistência à compressão que se deseja alcançar;
- Abatimento;
- DMC.

Ensaio preliminares necessários:

- Massa específica do cimento, agregados e adições.

Segundo Alves (2000) para o método a quantidade de superplastificante incorporada varia entre 0,8 e 2% de sólidos sobre a massa do material cimentante. Para a primeira tentativa, 1% é recomendado, além disso alguns ajustes na água podem ser necessários, principalmente se o volume de água do aditivo não foi descontado da água de mistura.

• **Método O'Reilly Díaz**

Segundo Dafico (1997), o método de dosagem de concreto de elevado desempenho de Díaz tem como fundamentos básicos:

- A resistência do concreto depende da resistência do cimento, da forma do agregado graúdo, da consistência e da relação a/mc ;
- A consistência do concreto depende do volume de água disponível nos vazios deixados pelos espaços entre os agregados graúdos que, por sua vez, dependem da forma do agregado;
- O teor de argamassa ideal é aquele que resulta na menor porcentagem de vazios da mistura entre brita e areia.

Requisitos de projeto:

- Resistência característica a compressão do concreto;
- Relação a/mc máxima em função da agressividade do meio;
- Abatimento;
- Dimensão máxima característica do agregado.

Para o desenvolvimento do método, segundo Alves (2000, p. 52) os ensaios preliminares necessários:

- Granulometria dos agregados;
- Massa unitária compactada da mistura dos agregados;
- Massa específica absoluta dos agregados e da mistura dos agregados.

- **Método Domone e Soutsos**

Esse método tem como princípio que os agregados devem ocupar o maior volume possível de concreto, e que os vazios devem ser preenchidos com a pasta de material cimentante. (ALVES, 2000), além de procurar utilizar o menor consumo possível de cimento, para evitar problemas de calor, hidratação, fissuração e retração. Como o consumo de cimento é essencialmente baixo é fundamental a utilização de aditivos para garantir a baixa relação a/mc na mistura, de modo que o concreto alcance a resistência necessária com o mínimo de cimento.

Para o desenvolvimento do método, segundo Alves (2000, p.48-49) são necessários alguns dados, como:

Requisitos de projeto:

- DMC;
- Abatimento;
- Resistência à compressão que se deseja alcançar.

Ensaio preliminares necessários:

- Determinação do índice de vazios das várias misturas de agregado miúdo e graúdo;
- Secagem dos agregados em estufa.

- Método de De Larrard

Segundo Tutikian e Helene (2011) esse método em principio trata-se para a composição de qualquer tipo de concreto, seja ele: convencional, de alto desempenho, com pós-reativos, jateado, autoadensável, compactado a rolo e de diferentes densidades, contudo esse não é um método de fácil aplicação, pois depende de programas computacionais e ensaios de viscosidade com viscosímetros e reômetros de difícil obtenção.

Para o desenvolvimento do método, segundo Alves (2000, p.46) são necessários alguns dados, como:

Requisitos de projeto:

- DMC;
- Abatimento;
- Resistência à compressão que se deseja alcançar.

Ensaio preliminares necessários:

- Granulometria dos agregados;
- Execução de um concreto convencional, para a estimativa do consumo de água;
- Ensaio de tempo de fluxo (Cone de Marsh).

Procedimentos de mistura

Os concretos de alto desempenho são produzidos da mesma forma que os concretos usuais, utilizando os mesmos equipamentos de produção, contudo o tempo de mistura é geralmente mais longo para concretos de alto desempenho do que para concretos comuns. (AITCIN, 2000), isso ocorre devido ao comportamento tixotrópico deste concreto que demanda uma maior energia de amassamento, implicando misturar o concreto por mais tempo (MENDES, 2002, p.91). Contudo é difícil dar regras específicas para as misturas, além disso o tempo de mistura deve ser ajustado caso a caso.

Segundo Mendes (2002) é necessário seguir a seguinte ordem de mistura: 100% da brita mais 25% da água, 100% do cimento e 100% da sílica (previamente misturados), 75% restantes da água (mistura por um minuto), 80% do aditivo (mistura por um minuto), 100% da areia (mistura por dois minutos; parada por dois minutos), 20% do aditivo (permitindo ajustes finais no traço) e mistura por dois minutos, assim totalizando oito (8) minutos para o processo de mistura.

De acordo com Tutikian e Helene (2011) é indicada a seguinte ordem preferencial para colocação dos materiais na betoneira: 80% da água; 100% do agregado graúdo; 100% do cimento; 100% das adições minerais; 100% do aditivo plastificante e 100% do agregado miúdo, depois de colocar todos os materiais na betoneira têm que misturar por cinco (5) minutos, após isso se necessário adicionar o resto da água aos poucos, observando e controlando até obter o abatimento requerido.

Procedimentos de cura

Segundo a ABNT NBR 9479:2006:

Existem dois tipos de cura: a cura inicial ao ar e a cura final. A cura inicial se dá após a moldagem dos corpos de provas onde os mesmos devem ser cobertos com material não reativo e não absorvente, de forma a evitar a perda de água do concreto e protegê-lo das intempéries, já a cura final ocorre após a desforma onde os corpos de prova devem ser conservados submersos em água saturada de cal, permanecer em câmara úmida que apresente, no mínimo, 95% de umidade relativa do ar, atingindo toda a sua superfície livre, ou ficar enterrados em areia completamente saturada de água. Em qualquer dos casos, a temperatura deve ser de $(23^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C})$.

O procedimento de cura é um processo necessário, pois é responsável por manter a umidade necessária para hidratação do cimento durante o endurecimento do concreto, esse

processo é ainda mais imprescindível quando se trata do CAD, visto que uma perda muito rápida desta água, que já é pouca devido à baixa relação a/mc, pode afetar a resistência mecânica e causar retração (AİTCIN, 2000).

PROPRIEDADES

As propriedades do concreto podem ser divididas em duas: Estado Fresco e Estado Endurecido, ambas dizem muito sobre o concreto, pois através de ensaios específicos é possível determinar características únicas de cada traço, assim observando se o mesmo está de acordo com o planejado e se enquadra-se nas normas regulamentadoras.

De acordo com Simões (1997) mesmo que os concretos convencionais e de alta resistência pertençam à mesma família, possuem características distintas quando submetidos a carregamentos externos, assim é incorreto pensar que as propriedades do CAD são extensões das dos concretos usuais.

Estado fresco

O controle das propriedades do concreto fresco é importante devido aos requerimentos de lançamento e adensamento. Aİtcin (2000) refere que um concreto cujas características no estado fresco são bem controladas, provavelmente, se apresentará bem depois de endurecido.

Para determinar as propriedades do CAD no estado fresco são utilizados os mesmos equipamentos e procedimentos empregados para o concreto convencional, os ensaios mais corriqueiros são: massa específica, abatimento do tronco de cone e teor de ar. (MARTINS, 2005)

Trabalhabilidade

A trabalhabilidade de um concreto serve para identificar a menor ou maior aptidão deste material para ser utilizado sem perda de homogeneidade (PETRUCCI, 1971, apud. FREITAS, 2005).

A trabalhabilidade do concreto é caracterizada pela sua fluidez, onde, quanto mais fluido mais fácil são os processos de lançamento, adensamento e mobilidade do concreto fresco e quanto mais coeso maior é a resistência a segregação ou à exsudação. Segundo Guimarães (2002) o CAD apresenta uma melhor trabalhabilidade que o concreto convencional, devido à utilização de aditivos superplastificantes e aditivos minerais.

No Brasil o ensaio responsável pela trabalhabilidade do concreto é a Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (mais conhecido como *slump test*) apresentada pela ABNT NBR NBR 16889:2020.

Tempo de pega

Pega se refere à mudança do estado fluido para o rígido, segundo Neville (2016) no concreto pega é o enrijecimento da pasta de cimentícia causada pela hidratação seletiva dos compostos do cimento.

De acordo com Metha; Monteiro, (1994) (apud, FERREIRA, 2017) o início de pega é quando o concreto fresco tem um aumento brusco da viscosidade e não pode ser misturado, lançado e compactado, já fim de pega é quando se inicia o desenvolvimento da resistência onde o concreto se torna rígido não sendo mais deformável para cargas pequenas.

Exsudação

A exsudação nada mais é que uma forma de segregação do concreto, onde parte da água de amassamento, como elemento menos denso da mistura, sobe para a superfície de um concreto recém aplicado. Esse processo começa em velocidade constante, ao qual vai diminuindo regularmente até que a pasta de cimento tenha enrijecimento suficiente para parar a sedimentação (NEVILLE, 2016).

Retração autógena

A retração autógena ocorre quando a água presente no interior do concreto é drenada através da rede de poros para o exterior ou para poros menores durante a hidratação.

Para que isso não ocorra é necessário haver a reposição através de cura com água externa, contudo se o concreto for muito compacto e seu consumo interno for mais rápido que a entrada de água ocorre o processo de autossecação que é o processo pelo qual a água dentro do concreto reage com cristais de cimento, gerando o dessecamento dos poros internos que provoca a retração autógena. (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Segundo Cifuentes (2017) essa retração se desenvolve internamente no volume total do concreto, além disso a retração autógena existe em todos os tipos de concreto, no entanto, nos concretos de alta resistência tem que se ter um cuidado muito maior em comparação com os concretos convencionais, isso ocorre, pois possui um consumo alto de cimento e baixa relação a/mc.

Estado endurecido

Segundo Nascimento (1977) mesmo o concreto de alto desempenho como material apresentando semelhanças com os concretos convencionais, quando submetidos a solicitações exteriores ambos tem comportamentos diferentes, de acordo com Aïtcin (2000), isso ocorre, pois os concretos usuais se comportam como materiais homogêneos e isotrópicos, onde o elo mais fraco é a pasta de cimento hidratado ou a zona de

transição, contudo os concretos de alto desempenho atuam como materiais compostos não isotrópicos, constituídos de pasta de cimento hidratado e agregados que podem ter propriedades mecânicas muito diferentes.

Resistência à compressão

A resistência à compressão é a característica mais significativa do concreto para a engenharia de estruturas. De acordo com Alves (2000) isso ocorre, pois, sua determinação fornece uma estimativa do desempenho do concreto tanto em termos mecânicos como, indiretamente, da sua durabilidade.

A resistência a compressão é feita em laboratório através do ensaio de corpos de prova cilíndricos ou cúbicos de diferentes tamanhos, no Brasil é mais utilizado o Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, esse ensaio é realizado de acordo com a ABNT NBR 5739:2018.

É padronizado o rompimento dos corpos de provas em idades de 7, 14, 21 e 28 dias, contudo segundo Freitas (2005, p. 53) o mais significativo são os resultados aos 28 dias, pois essa é considerada a idade mais importante para se obter a resistência característica do concreto (f_{ck}).

Segundo Guimarães (2002) devido à utilização de superplastificantes para o CAD seu tempo de início da reação de hidratação do cimento é mais demorada fazendo assim com que a resistência a compressão do mesmo possa demorar um pouco mais a desenvolver-se em relação aos concretos convencionais, contudo a partir do momento em que se inicia a hidratação do cimento, a reação desenvolve-se rapidamente.

A resistência à compressão do concreto de alta resistência é mais alta do que a do concreto convencional, conforme TUTIKIAN; ISAIA; HELENE. (2011) isso ocorre, pois quando se fixam relações água/materiais cimentícios baixas, melhora da zona de transição e seleciona agregados adequados, possivelmente a resistência à compressão será afetada positivamente.

Resistência à tração

Conforme Simões (1997) embora a resistência a tração do concreto seja extremamente baixa e por isso não seja levada em conta nos cálculos estruturais, esse é um ensaio extremamente importante, pois baseado nessa resistência, tem-se um melhor controle sobre comportamento do concreto no que se refere à fissuração, previsão de deformações e durabilidade do mesmo, além de ser um dos parâmetros necessários para a verificação da aderência entre o concreto e a armadura.

De acordo com Alves (2000) O crescimento da resistência à tração ocorre até os 14 dias de idade diferentemente da resistência à compressão, que mesmo após esse período

continua crescendo.

O valor da resistência a tração pode ser determinado através de três ensaios, são eles: resistência a tração direta, tração por compressão diametral e tração na flexão. Conforme Mendes (2002) dentre os três métodos de ensaio a tração por compressão diametral é a que apresenta maior vantagem, pois além de ser facilmente executado também permite o uso do mesmo tipo de corpo de prova.

O ensaio de tração por compressão diametral é conhecido internacionalmente como "*Brazilian Test*" esse método foi desenvolvido por um pesquisador brasileiro Lobo Carneiro em 1943. Segundo a ABNT NBR 7222:2011, o ensaio consiste posicionar o corpo de prova na horizontal aplicando cargas de compressão.

Módulo de deformação longitudinal

Segundo Silva (1995) o módulo de deformação longitudinal está profundamente relacionado tanto às propriedades da pasta do cimento, como a rigidez dos agregados selecionados e também ao método como é determinado.

Conforme Simões (1997) o módulo de deformação para concretos de alta resistência é maior do que os dos concretos convencionais, isso ocorre, pois o concreto de alta resistência tem uma maior rigidez tanto na pasta como na zona de transição, além de ter um retardamento da microfissuração interna.

Para Nascimento (1997, p.99-100) o módulo de deformação longitudinal é afetado por alguns fatores, como:

- Quanto maior o volume, a máxima dimensão e o módulo de deformação do agregado graúdo, maior o módulo de deformação longitudinal do concreto com ele fabricado.
- Quanto maior a porosidade e a relação água/material cimentício do concreto, menor o seu módulo de deformação;
- A aderência pasta-agregado exerce um papel importante na grandeza do módulo de deformação longitudinal dos concretos;
- O módulo de deformação longitudinal varia proporcionalmente com a resistência a compressão dos concretos.

De forma geral, o módulo de deformação longitudinal depende da rigidez das fases que compõem o CAD. Logo, o tal é função do módulo do agregado, da matriz cimentícia e da zona de transição. Nele, o comportamento do concreto se torna essencialmente mais frágil, com rupturas bruscas em menores deformações.

Coeficiente de Poisson

De acordo com Silva (1995) o coeficiente de Poisson é, na faixa elástica, a relação entre deformação transversal e a longitudinal quando uma peça está submetida à compressão axial.

Conforme Carrasquillo *et. al.* (1981) (apud. NASCIMENTO, 1997) os valores para o coeficiente de Poisson é em torno de 0,20, independente da resistência a compressão, idade e teor de umidade para concreto de alto desempenho com resistência até 73 MPa aos 28 dias, já para concretos de baixo desempenho esse valor normalmente varia entre 0,15 a 0,23, contudo para Nascimento (1997) embora haja controversa no meio técnico, para os concretos de alto desempenho os valores do coeficiente de Poisson são geralmente menores que os obtidos em concretos usuais.

Resistência a cargas de longa duração

O concreto quando submetido a cargas de longa duração tem sua resistência menor que a determinada sob as cargas de curta duração.

Segundo Simões (1997) estudos feitos na Universidade de Cornell mostraram que para os concretos de alto desempenho devido a uma menor microfissuração e uma menor fluência as cargas que causavam a ruptura provocava tensões maiores que 80% da resistência de curta duração após 60 dias, já para os concretos convencionais o mesmo efeito ocorria quando as tensões eram maiores que 75% da resistência de curta duração.

O efeito Rüsç nos concretos de alto desempenho tem grande impacto na segurança de estruturas com predominância de carregamento permanente (NASCIMENTO, 1997).

As figuras 9 e 10 representam as deformações iniciais e finais para os concretos convencionais e de alta resistência após 60 dias com carregamentos a diferentes frações da resistência de curta duração.

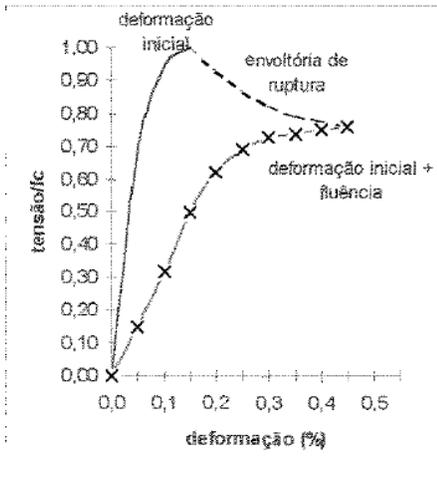


Figura 10 – Concreto convencional
 Fonte: Simões (1997, p.1.14)

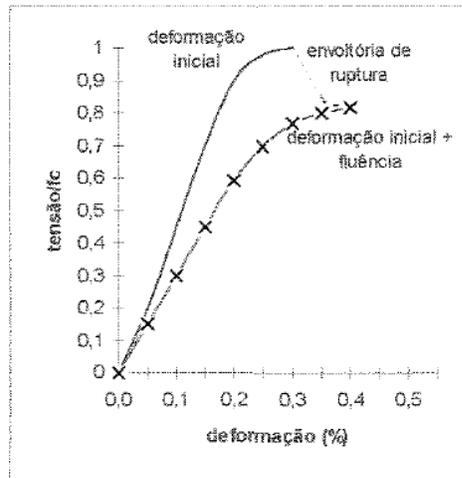


Figura 11 – Concreto de alta resistência
 Fonte: Simões (1997, p.1.14)

Ganho de resistência com a idade

De acordo com Simões (1997) diferentemente do concreto usual o de alta resistência tem um elevado ganho de resistência nos primeiros dias, isso fica claro ao observar que aos 7 dias de idade a resistência a compressão do concreto convencional tem uma variação de 60 a 65% daquela os 28 dias, em comparação os de alta resistência tem uma variação de 75 a 80% com as mesmas idades.

Ainda conforme Simões (1997), uma explicação para esse fenômeno é que devido ao alto teor de cimento na mistura ocorre em escala maior a liberação de calor proveniente da hidratação e com isso uma elevação de temperatura durante o processo de cura.

A figura 12 mostra ganho de resistência com a idade para concretos de alta resistência.

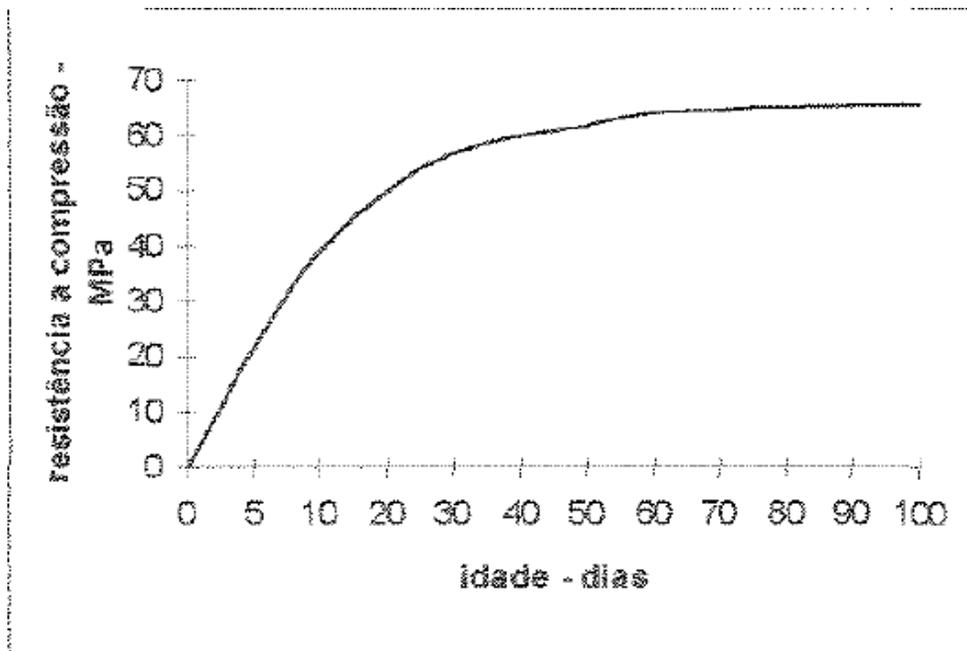


Figura 12 – Ganho de resistência com a idade

Fonte: Simões (1997, p.1.15)

Durabilidade

A durabilidade e a resistência mecânica do concreto são funções de sua composição e dos cuidados durante sua execução. Conforme Aïtcin (2000), a permeabilidade do concreto está diretamente ligada à sua durabilidade, devido a isso devido os concretos de alta resistência por possuírem baixa permeabilidade, tem excelente resistência a vários agentes físicos e químicos, que são responsáveis, normalmente, pela deterioração do concreto.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008, p. 121) os efeitos físicos que influenciam na durabilidade do concreto são: exposição a temperaturas extremas, fissuração devido à cristalização de sais nos poros e desgaste da superfície, já os efeitos químicos são: reações expansivas que envolvem ataques por sulfato, corrosão das armaduras no concreto e lixiviação da pasta de cimento devido a soluções ácidas.

Ductilidade

Conforme Cifuentes (2017) concretos de alto desempenho são mais frágeis que concretos normais, principalmente quando alta resistência à compressão é o fator de desempenho principal, isso acontece, pois devido à alta resistência do concreto ele não apresenta deformações plásticas antes de sua ruptura.

Retração térmica

A retração térmica também conhecida como “retração exotérmica”, é um processo no qual através de uma reação química o calor presente no interior de um objeto é transferido para o exterior. Durante o endurecimento do concreto ocorre esse processo no qual o calor liberado aumenta o volume para depois diminuir durante o processo de resfriamento (DOMOME, 2010, apud. MILAGRES, 2019).

VIABILIDADE ECONÔMICA

Para a produção de concretos de alta resistência e alto desempenho, o consumo de cimento é bem superior aos concretos convencionais, além disso ainda ocorre à incorporação de materiais de alta qualidade, aditivo superplastificante e adições de materiais quando necessário, como: sílica ativa, metacaulim, microsílica etc., fazendo assim com que o custo unitário deste material seja bem mais elevado que os concretos usuais.

Segundo Watanabe (2008) a resistência mecânica superior do CAD, faz com que os projetistas estruturais tenham a possibilidade de reduzir o consumo de concreto aplicado e mais significativamente reduzir a carga de aço necessária para os pilares. De forma a apontar as vantagens da utilização do concreto de alto desempenho em relação ao concreto comum, Watanabe (2008) cita sua pesquisa a análise de dois estudos comparativos.

O primeiro estudo foi realizado em 1990 e citado por Dal Molin *et. al.* (1997), para essa análise foi utilizado um edifício de 15 pavimentos em Porto Alegre-RS, onde foi comparado a viabilidade da utilização do concreto comum de 21 MPa em relação ao CAD de 60 MPa.

Nesse estudo foi considerando o concreto, a mão de obra, as formas e as armaduras, dessa forma foi observado que a aplicação do CAD em todas as peças estruturais gera uma economia de 12% e quando aplicado somente nos pilares a economia é de 11,5% em relação ao concreto convencional.

O segundo estudo foi realizado por Ferreira *et. al.* (2001) e para essa análise foi utilizado um edifício de 33 pavimentos situado em Belém-PA para a comparação entre o concreto convencional de 30 MPa em relação ao CAD de 45 MPa e 60 MPa.

Nesse estudo, considera-se o volume de concreto, o peso do aço, das formas e das cargas nas fundações, onde foi observado que ocorre uma economia de 6,7% quando o CAD é aplicado somente nos pilares e de 10,37% quando o CAD é aplicado nos elementos de lajes, vigas e pilares.

De acordo com Watanabe (2008) essa economia ocorre, pois mesmo o CAD sendo mais caro por m³ em relação ao concreto convencional existem outros fatores que interferem

nas comparações de custos das obras, são eles:

- Redução de solicitações nas fundações;
- Reduções nas áreas de formas;
- Reduções de custos de manutenção da estrutura, devido a maior durabilidade destas.

CONCLUSÃO

O concreto de alto desempenho refere-se a um conjunto de propriedades obtidas do uso de materiais convencionais que utiliza de um alto padrão e controle tecnológico na produção desse concreto, desde a seleção de suas matérias-primas até boas práticas construtivas. Usualmente, tem se tratado o CAD como um concreto de apenas alta resistência, porém, como exposto neste trabalho, os concretos de alto desempenho além de uma resistência elevada possuem módulo de elasticidade, elevada compacidade, permeabilidade reduzida, resistência à agentes agressivos, resistência à abrasão dentre outros.

Além disso, viu-se também que os concretos de altos desempenho possuem características microestruturais diferentes dos concretos convencionais como a morfologia das fases e suas características, as características morfológicas e distribuição do sistema poroso, alta compacidade da matriz, quantidade reduzida de cristais de hidróxido de cálcio e aumento das fases resistentes.

Diante de tantos benefícios, tem-se várias aplicações deste material, a saber: pontes e obras de arte especiais, pilares de edificações, as peças estruturais pré-fabricadas, as recuperações estruturais, entre outras.

Em pontes, o uso do CAD proporciona projetos mais leves e esbeltos, com maiores vãos, menor sensibilidade às solicitações dinâmicas, de construção mais fácil e rápida, maior economia e de menor necessidade de manutenção.

Já nos pilares de edifícios, em que geralmente são obtidas reduções de áreas e volumes das peças estruturais, as quais proporcionam ampliação da área útil das edificações, maior liberdade arquitetônica, agilidade na construção em altura, maior reaproveitamento de fôrmas, redução da quantidade de fôrmas, armação e concreto, menor encurtamento axial etc.

O emprego do CAD em estruturas pré-fabricadas torna mais rápida a reutilização de fôrmas, moldes e mesas de moldagem, uma vez que esse material desenvolve rápida resistência.

Portanto, em função do exposto, tem-se que o estudo do CAD é de extrema importância a fim de se desenvolver formas para uma melhor utilização do seu comportamento e propriedades, visando o atendimento das necessidades provenientes dos avanços da construção civil e inovações no cenário arquitetônico, bem como vencer o paradigma da construção de estruturas mais funcionais, duráveis e econômicas.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: Pini, 2000. p. 667.

ALVES, M. F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000. 137p.

ALVES, W. R. **Estudo experimental de dosagem de concreto de alto desempenho com agregados disponíveis na região de Patrocínio/MG**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário do Cerrado Patrocínio - UNICERP, Patrocínio, 2018.

ARAÚJO JÚNIOR, N. T. **Concreto de alta resistência produzido com escória álcali-ativada**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

BARBOSA, M. S. *et al.* **Produção de concreto de alto desempenho (CAD) com adição de pó de pedra**. Revista INTERSCIENTIA, V. 7, N. 1, p. 200-217, jan-jun/2019.

BERNARDES, A. *et al.* **Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 65-76, jul./out. 2008.

BOY, G. C. **Elaboración de concreto de alta resistencia incorporando partículas residuales del chancado de piedra de la cantera talambo, Chépén**. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil Ambiental, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, 2018.

CAMPOS, H. F. **Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland: estudo experimental**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CARDOSO, A. S.; *et al.* **Análise da Influência da Adição de Sílica Ativa como Substituição Parcial do Cimento em Argamassas Contra Ação de CO₂ e Íons Cloreto**. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, Recife, v. 2, n. 3, p. 167-175, 28 ago. 2017.

CIFUENTES, G. A. **Análise da viabilidade econômica do uso de concreto de alto desempenho em pilares de edificações com uso do SCIA ENGINEER**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Joinville, 2017.

CORDEIRO, G. C. **Concreto de alto desempenho com metacaulinita**. Dissertação (Mestrado) - Ciências de Engenharia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2001.

CREMONINI, R. A. *et al.* **Desenvolvimento de um Método de Dosagem de Concretos de Alta Resistência com Baixo Consumo de Cimento**. Núcleo Orientado Para A Inovação na Edificação, Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 1-16, jan. 1998.

FERREIRA, L. R. B. **Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de látex para aplicação em pavimento**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2017.

FOCHS, R. G. **Estudo comparativo entre métodos de dosagem de concreto autoadensável**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS, Porto Alegre, 2011.

FREITAS JÚNIOR, J. A. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência com o uso de materiais disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Dissertação

(Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

GOSAVI, J. S.; AWARI, U. R. **A Review on High-Performance Concrete**. International Research Journal Of Engineering And Technology (Irrjet), Kialash Vihar Mandsaur, v. 5, n. 5, p. 1965-1968, maio 2018.

GUIMARÃES, J. P. Z. Estudo **Experimental das Propriedades do Concreto de Alto Desempenho**. 1. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro: PUC, 2002.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo – Editora Pini, 1992. 349p.

JUCÁ, T. P. *et al.* **Estudo da dosagem de concreto de alto desempenho: comparativo de custos**. 43º Congresso Brasileiro do Concreto, Foz do Iguaçu, v. 1, n. 43, p. 1-11, ago. 2001.

KEHL, L. K. **Avaliação dos custos de concretos de alta resistência (CAR) utilizando diferentes métodos de dosagem**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2017.

LASKAR, A. I. **Mix design of high-performance concrete**. *Materials Research*, [S.L.], v. 14, n. 4, p. 429-433, 21 nov. 2011.

LIMA, E. A.; DA SILVA, L. L. R. **Fundamentos para a produção e controle de concreto de alto desempenho em laboratório**. REGRASP, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 18-41, fev. 2017.

MARTIN, M. M. **Investigação da influência do uso de materiais cimentícios suplementares em substituição parcial ao cimento Portland**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2018.

MARTINS, I. R. F. **Concreto de Alto Desempenho com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2005.

MEHTA, P. K. **Advancements in Concrete Technology**. *Concrete International*, Farmington Hills, p. 69-76, jun. 1999.

MEHTA, P. K.; AÏTCIN, P-C. **Principles underlying production of high performance concrete**. *Cement, Concrete & Aggregates*. v.12, n.2, p. 70-78, 1990.

MEHTA P. K.; MONTEIRO P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MENDES, S. E. S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2002.

MILAGRES, E. A. **Retração e secagem do concreto: estudo da retração do concreto e o aparecimento de patologias**. Monografia (Especialização) - Curso de Produção e Gestão do Ambiente Construído, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

MOMIN, A. A.; KHADIRNAIKAR, R. B. **Mix proportioning of high performance concrete using fly ash and silica fume**. *International Journal Of Technical Innovation In Modern Engineering & Science (Ijtimes)*, Avani Vihar, v. 4, n. 11, p. 211-218, nov. 2018.

- MORAIS, I. S. **Filtro Sericítico como material cimentício suplementar**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- NASCIMENTO, F. T. F. **Concreto de alto desempenho e sua aplicação em vigas de edifícios**. 1997. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia das Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
- NASCIMENTO, P. N. *et al.* **Estudo experimental de concreto de alto desempenho (CAD), utilizando método de dosagem MEHTA-AITCIN, para os materiais disponíveis em uma concreiteira em Curitiba**. In: CBC - Congresso Brasileiro do Concreto, 60., 2018, Paraná: Ibracon, 2018. p. 1-14.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.
- OLIVEIRA, L. A. R. **Verificação do método de dosagem mais eficiente para o parâmetro e categoria analisados**. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- PELISSER, J. R. **Estudo do comportamento de concretos produzidos com a mistura ternária de cinza de casca de arroz, pó de pedra e borracha de pneu**. Trabalho de Iniciação Científica e Tecnológica (TICT) - Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI, Itajaí, 2017.
- RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. São Paulo: ABCP, 1984.
- ROHDEN, A. B. **Contribuição aos métodos de dosagem de concreto de alta resistência a partir do entendimento da influência dos agregados na mistura**. 2015. 177 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- SANTOS, D. D.; GODINHO, D. S. S. **Análise da evolução das propriedades mecânicas do concreto ao longo do tempo**. Revista do Curso de Engenharia Civil da Unesc, Florianópolis, p. 1-20, jan. 2017.
- SANTOS, J. S. *et al.* **Viabilidade técnico-econômica da utilização de concreto de alto desempenho em pilares de um edifício de trinta pavimentos: estudo de caso: estrutura aporticada com resistência à compressão fixa x variada ao longo dos pavimentos**. Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto, Bonito, v. 57, n. 1, p. 1-17, out. 2015.
- SEITENFUSS, A. B.; LIMA, M. S.; SILVA, A. W. **Estudo de dosagem de concreto de alto desempenho**. 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cuiabá, p. 1204-1211, nov. 2014.
- SILVA, I. J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. 2000. 279 f. Tese (Doutorado) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- SILVA, I. P. D.; PINTO, E. N. M. G. **Análise da substituição parcial do cimento Portland por micro sílica na produção de concreto**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA, Caraúbas, 2018.
- SILVA, I. S. **Concreto de alta resistência: composição, propriedades e dimensionamento**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

SILVA, J. H. **Influência da adição de sílica ativa sobre a resistência mecânica e a tenacidade à fratura de concretos de cimento Portland para utilização em pavimentos rígidos rodoviários.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

SILVA, P. H. A. *et al.* **Performance quanto a resistência, durabilidade, custo e sustentabilidade do concreto de alto desempenho.** Curso de Edificações, Instituição Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Cuiabá, 2014.

SIMOES, R. **Vigas de concreto de alta resistência com abertura na alma.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

SOUZA, B. C.; OTRE, M. A. C. **Análise comparativa com foco no custo/benefício entre concreto de alto desempenho (CAD) e concreto comum (CC).** Revista Científica de Ciências Aplicadas, Marília, v. 1, n. 1, p. 1-10, dez. 2015.

SOUZA, M. M.; KUNKEL, N. **Quantificação dos resíduos da construção civil (RCC), pneus e embalagens longa vida no município de Santa Maria- RS.** Disciplinarum Scientia, Série: Ciências Naturais e Tecnológicas, Santa Maria, v. 13, n. 1, p. 27-47, 2012.

TOMÉ, W. D. **Utilização de sílica ativa em concretos de alto desempenho.** TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de Formiga - UNIFOR - MG, Formiga, 2014.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland.** In ISAIA, Geraldo Cechella. *Concreto: Ciência e Tecnologia.* São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 12.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de alto e ultra-alto desempenho.** In ISAIA, Geraldo Cechella. *Concreto: Ciência e Tecnologia.* São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 36.

U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration. **Ultra-High Performance Concrete.** 2019. Disponível em: <<https://highways.dot.gov/research/structures/ultra-high-performance-concrete/ultra-high-performance-concrete>>. Acesso em 23 de abril de 2021.

WATANABE, P. S. **Concretos especiais – propriedades, materiais e aplicações.** Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Bauru, 2008. 192 p.

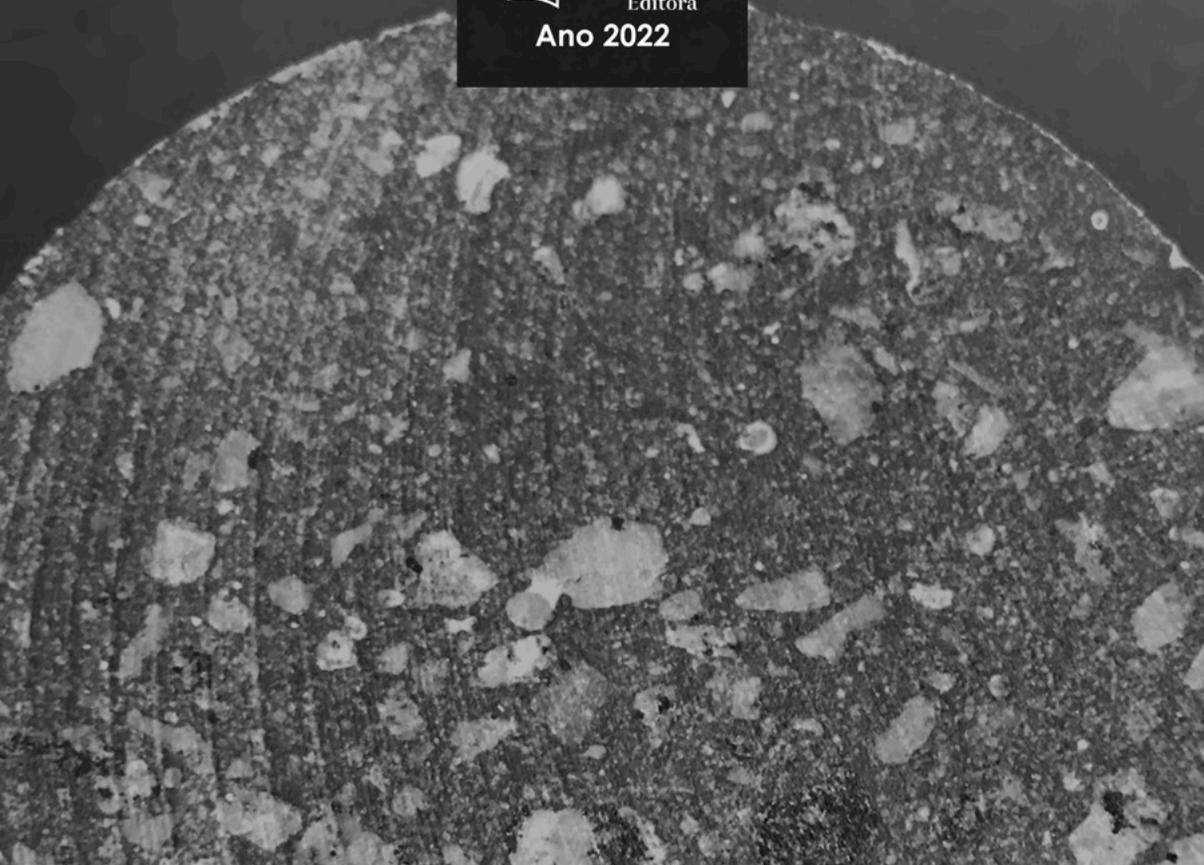
SOBRE OS AUTORES

CELIANE MENDES DA SILVA - Engenheira Civil pela UNIT-AL. Foi presidente da Liga Acadêmica de Engenharia Estrutural do Centro Universitário Tiradentes, membro fundador do Centro Acadêmico de Engenharia Civil e também exerceu o cargo de discente titular do colegiado do curso na referida instituição. No âmbito da construção civil, atua na execução de estruturas de concreto armado em edificações verticais.

GEDSON LIMA DOS SANTOS JUNIOR - Engenheiro Civil pela UNIT-AL. Possui experiência na manutenção de estruturas hospitalares e no levantamento de aço para projetos estruturais. Durante a graduação, foi diretor de extensão da Liga Acadêmica de Engenharia Estrutural na referida instituição.

IARA KELLY DA SILVA - Engenheira Civil pela UNIT-AL. Participou de relevantes projetos na área acadêmica além de atuar na organização e ministração de eventos e cursos na Liga Acadêmica de Engenharia Estrutural. Tem experiência na construção de obras residenciais e na fiscalização de obras públicas trabalhando junto a órgãos municipais.

JONAS RAFAEL DUARTE CAVALCANTE - Engenheiro Civil graduado pela Universidade Federal de Alagoas – UFAL, pós graduado em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Faculdade Figueiredo Costa - FIC, Mestre em Engenharia Civil, com foco em estruturas, pela UFAL e Doutorando em Engenharia Civil, com foco em estruturas, pela UFAL. Atua como docente do ensino superior e projetista estrutural.



CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO:

Composição, produção e propriedades

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

@atenaeditora 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 



CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO:

Composição, produção e propriedades

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 