

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

DANIELA KATAYAMA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO AGREGADO  
GRAÚDO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ALTO  
DESEMPENHO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2016

DANIELA KATAYAMA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO AGREGADO  
GRAÚDO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ALTO  
DESEMPENHO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Fabiana Goia Rosa de Oliveira

CAMPO MOURÃO

2016



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Campo Mourão  
Diretoria de Graduação e Educação  
Profissional  
Departamento Acadêmico de Construção  
Civil  
Coordenação de Engenharia Civil



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

### ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO AGREGADO GRAÚDO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

por

**Daniela Katayama**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 19h do dia 23 de novembro de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Dr. Adalberto L. R. de Oliveira**  
(UTFPR)

**Prof. Esp. Sérgio R. O. Q. Braga**  
(UTFPR)

**Prof. Dr. Fabiana Goia Rosa de Oliveira**  
(UTFPR)  
*Orientadora*

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

**Prof. Dr. Ronaldo Rigobello**

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.*

*Aos meus pais, Rosemeire e Edson,  
e ao meu namorado, Giovane.*

## AGRADECIMENTOS

À minha família, Rosemeire, Edson e Victor, por todo amor, apoio e esforço dedicado a mim e à minha formação; sem vocês nada disso seria possível.

Ao meu namorado, Giovane, por toda a ajuda na realização deste trabalho, por todos os momentos compartilhados e por todo amor dedicado a nós.

À minha avó, Maria de Lourdes, por sempre ser um exemplo a ser seguido e por toda dedicação.

A todos os professores que, de alguma maneira, contribuíram para a minha formação acadêmica.

À minha orientadora, professora Fabiana, por toda a ajuda no desenvolvimento deste trabalho e por todo conhecimento compartilhado.

Aos técnicos dos laboratórios de Engenharia Civil, Fábio e Maiko, pelo auxílio na execução dos ensaios realizados.

À Eng.<sup>a</sup>. Maria Goreti, da MC-Bauchemie Brasil, pelo fornecimento do superplastificante utilizado no concreto.

Por fim, agradeço aos meus amigos, pelo companheirismo e por todo incentivo.

## RESUMO

KATAYAMA, Daniela. **Estudo da influência da granulometria do agregado graúdo nas propriedades do concreto de alto desempenho.** 2016. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

Este trabalho teve como objetivo analisar a influência da granulometria do agregado graúdo nas propriedades mecânicas e reológicas do concreto de alto desempenho, com adição de sílica ativa e superplastificante. Os agregados foram caracterizados através do ensaio para determinação da composição granulométrica e a sua curva granulométrica. Sendo assim, foram analisados três tipos de concreto, cada um com uma proporção granulométrica distinta do agregado graúdo, através dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, segundo a ABNT NBR 8522 (2008) e a trabalhabilidade pelo ensaio do abatimento do tronco de cone, segundo a ABNT NBR NM 67 (1998). O ensaio de resistência à compressão demonstrou que para a brita basáltica, concretos de alto desempenho produzidos com britas com dimensões máximas características menores que 9,5 mm apresentaram resistências à compressão mais elevadas, enquanto que no módulo de elasticidade, essa variação nas proporções granulométricas não produz um efeito significativo. Já o ensaio da determinação da trabalhabilidade resultou em abatimentos maiores que 220 mm e também no espalhamento do concreto, o que aponta que o ensaio utilizado não é indicado para este tipo de concreto.

**Palavras-chave:** Concreto de alto desempenho. Granulometria do agregado graúdo. Propriedades mecânicas e reológicas.

## ABSTRACT

KATAYAMA, Daniela. **Study about the influence of coarse aggregate particles size distribution in high performance concrete.** 2016. 68 p. - Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

This work aimed to analyse the influence of coarse aggregates particles size in mechanical and rheological properties of high performance concrete with silica fume and superplasticizer. The aggregates were classified using sieve analysis and grading curves. Therefore, three types of concrete were analysed, which one with a different mix of coarse aggregate gradation, through compressive strength and modulus of elasticity test according to ABNT NBR 8522 (2008) and the workability of concrete, based on the slump test according to ABNT NBR 67 (1998). The compressive strength test evidences that high performance concrete with basaltic crushed stone with nominal size smaller than 9,5 mm has presented higher compression strength. On the other hand, the elasticity modules were not affected by the variation of particles size proportion. Also, slump higher than 220 mm were achieved, however the concrete spreading indicates that this type of test was not recommended for this specimen of concrete.

**Key words:** High performance concrete. Particles sizes of coarse aggregate. Mechanical and rheological properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de edifícios construídos em 1960s e 1970s na área de Chicago .....	18
Figura 2 - Vista em microscópio de sílica ativa .....	24
Figura 3 - Efeito microfíler da sílica ativa no.....	26
Figura 4 - Repulsão eletrostática entre partículas de cimento .....	27
Figura 5 - Amostra de cada tipo de agregado graúdo lavado e seco em estufa.....	35
Figura 6 - Agitador mecânico .....	36
Figura 7 - Ensaio para determinação de massa específica real do agregado graúdo.....	41
Figura 8 - Frasco de Chapman na determinação da massa específica real do agregado miúdo .....	45
Figura 9 - Corpos-de-prova armazenados em solução saturada de hidróxido de cálcio .....	49
Figura 10 - Medição do diâmetro dos corpos-de-prova com paquímetro .....	51
Figura 11 - Corpo-de-prova com extensômetro .....	52
Figura 12 - Materiais utilizados para o ensaio do abatimento do tronco de cone .....	53
Figura 13 - Resultado do ensaio do abatimento do tronco de cone.....	57



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Proporção de óxidos nos cimentos Portland.....	20
Tabela 2 - Principais constituintes do cimento Portland .....	20
Tabela 3 - Efeito do modo de adição dos superplastificantes SMF, SNF e CAE no slump de misturas de concreto de cimento Portland.....	28
Tabela 4 - Resistência à compressão do concreto de alto desempenho em função da relação água/aglomerante.....	30
Tabela 5 - Especificações técnicas do cimento utilizado .....	35
Tabela 6 - Composição granulométrica do agregado graúdo - amostra 1 .....	37
Tabela 7- Características físicas do agregado graúdo - amostra 1 .....	38
Tabela 8 - Composição granulométrica do agregado graúdo - amostra 2.....	38
Tabela 9 - Características físicas do agregado graúdo - amostra 2 .....	39
Tabela 10 - Composição granulométrica do agregado graúdo - amostra 3.....	40
Tabela 11 - Características físicas do agregado graúdo - amostra 3 .....	41
Tabela 12 - Massa específica aparente e real do agregado graúdo.....	42
Tabela 13 - Composição granulométrica do agregado miúdo.....	42
Tabela 14 - Características físicas do agregado miúdo .....	44
Tabela 15 - Massa específica aparente e real do agregado miúdo.....	45
Tabela 16 - Propriedades físicas e químicas da sílica ativa utilizada.....	46
Tabela 17 - Propriedades do superplastificante MC-Powerflow 3100.....	47
Tabela 18 - Traço unitário em massa adotado para a produção do concreto de alto desempenho .....	47
Tabela 19 - Quantidades de materiais utilizados .....	48
Tabela 20 - Nomeação dos corpos-de-prova .....	49
Tabela 21 - Resumo dos ensaios realizados e métodos que foram empregados .....	50
Tabela 22 - Ruptura média prevista para ensaio do módulo de elasticidade.....	51
Tabela 23 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão.....	54
Tabela 24 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade .....	55
Tabela 25 - Resultados do slump test.....	56

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica do agregado graúdo - amostra 1 .....	37
Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado graúdo - amostra 2 .....	39
Gráfico 3 - Curva granulométrica do agregado graúdo - amostra 3 .....	40
Gráfico 4 - Curva granulométrica do agregado miúdo com limites da zona ótima .....	43
Gráfico 5 - Curva granulométrica do agregado miúdo com limites da zona utilizável.....	44

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

CAD	Concreto de alto desempenho
CAR	Concreto de alta resistência
$f_{ck}$	Resistência característica à compressão do concreto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma MERCOSUL
CP	Corpo-de-prova
CPV-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
ACI	American Concrete Institute
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
CaO	Óxido de cálcio
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de silício
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcio
C <sub>2</sub> S	Silicato dicálcio
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcio
C <sub>4</sub> AF	Ferro aluminato tetracálcio
Ca	Cálcio
Si	Sílicio
Al	Alumínio
Fe	Ferro
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
D.M.C.	Dimensão máxima característica
SMF	Policondensado de formaldeído e melanina sulfonada
SNF	Policondensado de formaldeído e naftaleno sulfonado
MLS	Lignossulfonatos modificado

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS .....	14
1.1.1 Objetivo Geral .....	14
1.1.2 Objetivos Específicos .....	14
1.2 JUSTIFICATIVA .....	14
1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	15
1.4 APRESENTAÇÃO .....	16
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
2.1 DEFINIÇÃO DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO .....	17
2.2 CONTEXTO HISTÓRICO .....	18
2.3 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO .....	19
2.3.1 Cimento Portland .....	19
2.3.2 Água de Amassamento .....	22
2.3.3 Agregados .....	22
2.3.3.1 Agregados graúdos .....	22
2.3.3.2 Agregados miúdos .....	24
2.3.4 Sílica Ativa .....	24
2.3.5 Aditivos Superplastificantes .....	26
2.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO .....	28
2.4.1 Resistência à Compressão .....	29
2.4.2 Módulo de Elasticidade .....	30
2.4.3 Durabilidade .....	32
2.4.4 Trabalhabilidade .....	32
<b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>34</b>
3.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	34
3.1.1 Cimento Portland .....	34

3.1.2 Agregado graúdo .....	35
3.1.3 Agregado miúdo .....	42
3.1.4 Água .....	45
3.1.5 Sílica ativa .....	45
3.1.6 Superplastificante .....	46
3.2 PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS .....	47
3.2.1 Produção dos corpos-de-prova .....	47
3.3 PROPRIEDADES ESTUDADAS.....	50
3.3.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade.....	50
3.3.2 Trabalhabilidade .....	53
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>54</b>
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	54
4.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	55
4.3 TRABALHABILIDADE .....	56
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>58</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>59</b>
<b>APÊNDICE A – RESULTADOS LABORATORIAIS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES .....</b>	<b>62</b>
<b>APÊNDICE B – RESULTADOS LABORATORIAIS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE.....</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas foram obtidos grandes avanços na tecnologia do concreto devido a estudos de sua estrutura interna e a incorporação de novos materiais na sua composição, como as adições minerais, principalmente a sílica ativa, e também os superplastificantes. Essa melhoria obtida pelo concreto era necessária, pois como afirmou Helene (1997, apud Mendes, 2002), no futuro próximo seriam antieconômicos projetos estruturais de concreto especificados com  $f_{ck} < 50MPa$  para construção de edifícios altos, pontes e viadutos com grandes vãos. Portando o uso de um concreto com melhores propriedades mecânicas e também reológicas era fundamental. Criou-se então o chamado Concreto de Alto Desempenho (CAD).

A utilização do concreto de alto desempenho se concentra principalmente em grandes obras, tal como edifícios de grande altura, pontes, viadutos, pisos industriais e plataformas submarinas. Quando esse concreto é utilizado é possível a diminuição das seções dos pilares e do peso da estrutura, conseqüentemente a diminuição das cargas de fundações, como também um aumento da área útil da construção.

Porém, a melhoria das propriedades mecânicas não é o único fator preponderante na escolha de tal material, o aumento da durabilidade do concreto também o é. Tal característica é resultante da diminuição da relação água/aglomerante, esta influenciando na diminuição da porosidade do concreto, e conseqüentemente a sua permeabilidade, levando a uma maior durabilidade da construção e um menor custo de manutenção.

Um fator importante para a produção do concreto de alto desempenho é o agregado graúdo adotado. Para a obtenção do concreto de alto desempenho é necessário a verificação dos agregados disponíveis na região de sua produção, pois a resistência à compressão do concreto não é necessariamente em função da resistência da pasta matriz, como comumente é com o concreto convencional. A escolha do agregado graúdo interfere diretamente nas propriedades do concreto tanto no estado fresco como no estado endurecido. O agregado graúdo influencia na trabalhabilidade do concreto, assim como na estabilidade volumétrica e resistência mecânica e também no custo final (MENDES, 2002). Ou seja, o agregado graúdo presente no CAD é um limitante de suas propriedades.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a influência da granulometria do agregado graúdo nas propriedades mecânicas e reológicas no Concreto de Alto Desempenho.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Levantar dados bibliográficos relacionados ao Concreto de Alto Desempenho, apresentando os seus componentes, assim como a influência que cada um exerce no desempenho do concreto;
- Determinar a resistência à compressão de corpos-de-prova, com diferentes granulometrias de agregado graúdo, segundo a ABNT NBR 5739, de 2007; o módulo de elasticidade, segundo a ABNT NBR 8522, de 2008; e a trabalhabilidade, segundo a ABNT NBR NM 67, de 1998.
- Analisar os resultados dos ensaios, e definir a influência da granulometria do agregado graúdo no Concreto de Alto Desempenho.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A construção civil está em constante movimento, com materiais novos sendo incorporados e os convencionais sendo revitalizados - com a ajuda de novas pesquisas e de novas descobertas de produtos. Um importante impasse a ser resolvido na construção civil é a utilização de produtos com baixa resistência mecânica, sendo necessária a produção de elementos estruturais cada vez maiores, diminuindo a área útil dos projetos e também elevando o custo total da obra.

Foi neste compasso que na década de 80 o uso da sílica ativa e dos superplastificantes foram introduzidos na produção do concreto na cidade de Chicago, tornando-o mais resistente mecanicamente e mais duradouro. Com a criação do concreto de alto desempenho seria possível a construção de estruturas mais altas e esbeltas, com maiores vãos, e também localizados em ambientes agressivos.

Neste contexto, este Trabalho de Conclusão de Curso visa contribuir para a otimização dos elementos estruturais feitos de concreto, aperfeiçoando a produção do concreto de alto desempenho, através da escolha do melhor material para a sua produção. O componente escolhido para o estudo foi o agregado graúdo, especificamente a granulometria ideal para a produção do CAD. O agregado graúdo interfere diretamente nas propriedades apresentadas pelo concreto, tanto em seu estado fresco como no seu estado endurecido.

Portanto, a definição de uma distribuição granulométrica ótima pra a produção do CAD é pertinente na construção moderna, a qual necessita cada vez mais de materiais aperfeiçoados a fim de se obter um produto com maior resistência mecânica e maior duração, para a construção de edifícios, pontes, viadutos e pisos industriais cada vez mais otimizados.

### 1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho foca no estudo da variação granulométrica do agregado graúdo nas propriedades do CAD, porém o agregado graúdo utilizado para a produção do concreto é apenas de origem basáltica, encontrado na cidade de Campo Mourão.

Foi necessária a limitação quanto à quantidade de corpo-de-prova e tipos/tamanhos de britas por questões de disponibilidade laboratoriais, investimento financeiro e tempo necessário para o ensaio de uma maior variação de CPs e tamanhos de agregados.

Os tipos de ensaios no concreto de alto desempenho também foram limitados a apenas resistência à compressão, módulo de elasticidade e trabalhabilidade, sendo sugeridos outros tipos de ensaios para novos trabalhos. Quanto à durabilidade, por se tratar de um concreto com o uso de uma menor relação água/aglomerante, já é garantido uma maior duração deste concreto, pois é menos poroso e permeável.

Quanto ao uso de superplastificante e cimento, não foram realizados testes de compatibilidade entre os dois produtos devido à escassez de materiais necessários para o



ensaio, sendo utilizado então o ensaio do abatimento do tronco de cone para a determinação da trabalhabilidade.

Por fim, os corpos-de-prova produzidos com cimento CPV-ARI (alta resistência inicial) foram ensaiados apenas com sete dias, uma vez que devido a problemas de disponibilidade da máquina de ensaios universal não houve tempo suficiente para analisar os CPs em outras idades.

#### 1.4 APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos que serão apresentados a seguir:

O primeiro capítulo é dedicado a uma breve introdução ao trabalho, os objetivos geral e específicos, justificativa, limitações encontradas no desenvolvimento do trabalho e a estrutura geral.

O segundo capítulo é composto pelo referencial teórico, iniciando-se pela definição de concreto de alto desempenho, um breve contexto histórico, componentes do concreto de alto desempenho e as suas propriedades.

No terceiro capítulo é descrito o procedimento experimental realizado neste trabalho, composto pela seleção e caracterização dos materiais, assim como o proporcionamento dos materiais adotados e também a descrição dos ensaios realizados para cada propriedade estudada.

Já no quarto capítulo são apresentados os resultados e discussões dos ensaios para determinação da resistência à compressão, módulo de elasticidade e trabalhabilidade.

O quinto e último capítulo traz as considerações finais.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 DEFINIÇÃO DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

A criação do concreto de alta resistência (CAR) ocorreu anteriormente ao concreto de alto desempenho, sendo este último, um produto resultante da melhoria do primeiro. Portanto, primeiramente é necessária a definição de concreto de alta resistência, pois grande parte das referências bibliográficas no assunto compara as suas definições.

Para a ACI 363-R10 (2010), são considerados concretos de alta resistência aqueles em que a resistência a compressão é igual ou maior que 55 MPa.

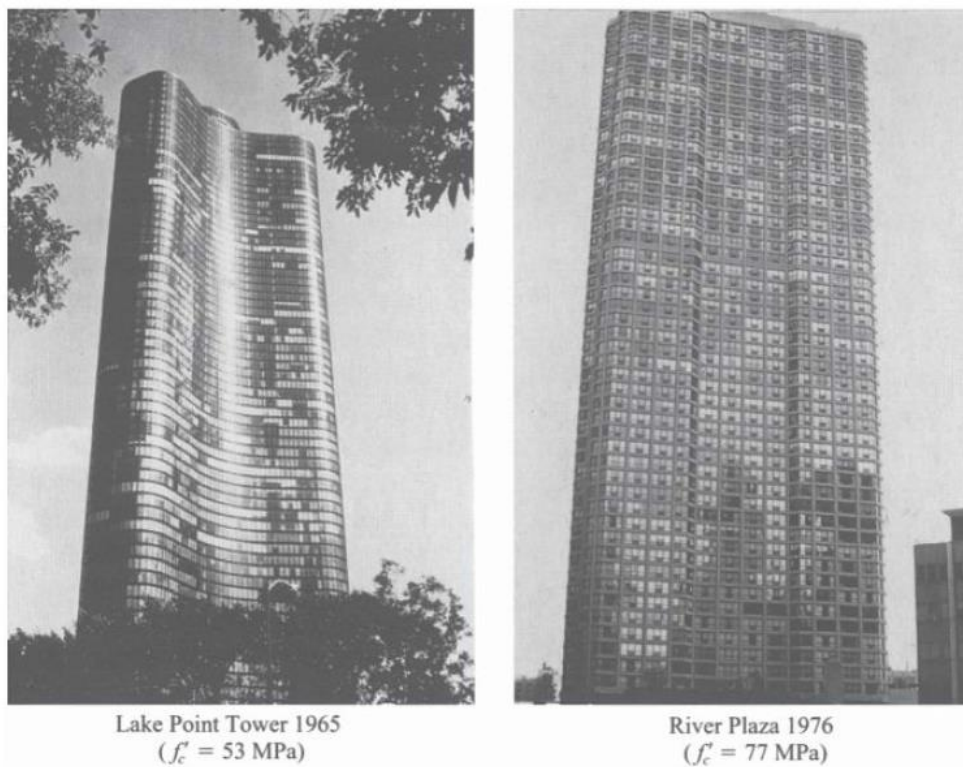
Já a ABNT NBR 8953 (2015) divide o concreto em duas classes, I e II, a classe I compreendendo os concretos de 20 a 50 MPa e, a classe II, os concretos de 55 a 100 MPa de resistência característica a compressão ( $f_{ck}$ ), podendo-se então assumir que os concretos da classe II ( $f_{ck} > 50 \text{ MPa}$ ) são concretos não convencionais, ou seja, concretos de alto desempenho.

Porém, para Aïtcin (1998), a relação água/aglomerante é a responsável por separar os concretos comuns dos não convencionais, sendo a relação 0,40 a limitante para tal definição. Quando a relação água/aglomerante se afasta muito de 0,40, os tipos de concretos se diferenciam quanto à resistência mecânica, assim como em relação à microestrutura. Segundo Mendes (2002), os concretos denominados concretos de alto desempenho, além de assumirem o comportamento do concreto de alta resistência, somam as suas propriedades uma maior durabilidade, através da melhoria da permeabilidade, resistência à abrasão e resistência a ataque de agentes agressivos.

É importante salientar a diferença do concreto de alto desempenho e do concreto de alta resistência. Como constata Ibracon (2011), nem todo CAD é um CAR, pois pode-se realizar um concreto com a relação água/aglomerante de 0,40, e a sua resistência à compressão ser de 35 MPa, podendo esse concreto ser enquadrado como de alto desempenho, pois possui alta trabalhabilidade; porém, também é verdadeiro assumir que nem todo CAR é CAD, pois pode-se realizar um concreto de 80 MPa de resistência à compressão, e obter 20mm no ensaio do abatimento do tronco de cone, seguindo as normas da ABNT, ou seja, resultando em um concreto com baixa trabalhabilidade.

## 2.2 CONTEXTO HISTÓRICO

O concreto de alto desempenho, mais precisamente o concreto de alta resistência, começou a ser utilizado nos anos 60, em Chicago, EUA. De início, o CAR foi utilizado apenas em poucos elementos estruturais de uma edificação, ou seja, apenas um ou dois elementos estruturais não principais eram feitos utilizando o concreto de alta resistência existente na época. Tinham um acréscimo inicial de resistência à compressão de 10 a 15 MPa, passando progressivamente para resistências a compressão de 45 a 60 MPa; esta progressão com duração de 10 anos. Porém, quando o CAR atingiu a resistência a compressão de 60 MPa, encontrou-se uma barreira técnica que não poderia ser superada com os materiais disponíveis na época. No início dos anos 70, era impossível superar a resistência à compressão de 60 MPa, pois produtos responsáveis pela redução de água no concreto disponíveis na época não eram capazes de reduzir ainda mais a razão de água/aglomerante (AİTCIN, 1998).



**Figura 1 - Exemplos de edifícios construídos em 1960s e 1970s na área de Chicago**  
Fonte: Aİtcin (1998)

Segundo Aïtcin (1998), nos anos 60, os superplastificantes também foram introduzidos ao mercado do concreto, porém, estes eram usados com a finalidade de fluidificantes, e não como redutores de água. Foi apenas nos anos 80 em que os superplastificantes passaram a ser utilizados para tal finalidade. Cada vez maiores doses de superplastificantes passaram a ser utilizadas para que os concretos passassem a ter uma menor razão de água/aglomerantes; usando uma grande quantidade de superplastificantes foi possível a descoberta de que a razão água/aglomerante poderia ser menor que 0,30 e ainda sim obter-se slump de 200mm. Com a adição de superplastificantes, descobriu-se que além do aumento da resistência a compressão ser possível, o concreto também adquiria outras características melhoradas, daí surgiu o nome Concreto de Alto Desempenho - CAD.

Godfrey (1987 apud Aïtcin, 1998, p.27) relatou que com uma seleção cuidadosa dos elementos componentes do CAD (cimento e superplastificantes) foi possível a diminuição da razão cimento/aglomerantes de 0,30, para 0,27, então para 0,25 e finalmente, foi possível obter 0,23 para uma resistência à compressão de 130 MPa.

Atualmente, o concreto de alto desempenho é largamente estudado e analisado, facilitando o aumento de sua produção e uso, porém, ainda sim, o CAD representa uma pequena porcentagem do mercado do concreto.

## 2.3 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

O concreto de alto desempenho não se compõe apenas dos materiais básicos do concreto convencional, como cimento, água, areia e agregado graúdo. Também leva em sua composição sílica ativa ou fílers com o objetivo de atingir a desejada resistência à compressão e propriedades reológicas (CHOPIN; LARRARD; CAZACLIU, 2004, p. 2237).

### 2.3.1 Cimento Portland

De acordo com a ABNT NBR 5732 (1991), o cimento Portland é um aglomerante hidráulico presente na composição do concreto, que pode ser obtido submetendo uma mistura em proporções adequadas de calcário e argila a temperaturas elevadas, dando origem ao

clínquer. Este clínquer passa então por um processo de moagem, e a este composto é adicionado um teor mínimo de sulfato de cálcio, com o intuito de retardar o tempo de pega, ou seja, o tempo necessário para que as reações entre o aglomerante e a água ocorram.

A matéria prima que dá origem ao clínquer é basicamente composta por alguns óxidos. Na Tabela 1 são apresentados os teores de óxidos básicos (CaO) e óxidos ácidos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) obtidos por Taylor (1997).

**Tabela 1 - Proporção de óxidos nos cimentos Portland**

Óxido	Teor (%)
CaO	67
$\text{SiO}_2$	22
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3
Outros componentes	3

Fonte: adaptado de Taylor (1997)

Estes óxidos apresentados na Tabela 1 reagem quimicamente entre si resultando em quatro dos principais compostos do cimento, como mostrado na Tabela 2.

**Tabela 2 - Principais constituintes do cimento Portland**

Composto	Constituição	Símbolo
Silicato tricálcio	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcio	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcio	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferro aluminato tetracálcio	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Fonte: Silva (2006)

Os dois primeiros compõem a fase silicato, enquanto que o aluminato tricálcio e o ferro aluminato tetracálcio compõem a fase intersticial. A cristalização destes compostos é uma função que depende da composição e da finura da mistura crua (calcário e argila), do

tratamento térmico para obtenção do clínquer (temperatura, características do forno, processo de resfriamento), e as reações de difusão que ocorrem durante as fases líquida, sólida e meio gasosa (REGOURD, 1983 apud SILVA, 2000). Já para Callister (1993 apud Silva, 2000), a estrutura cristalina que prevalece de cada fase depende tanto da temperatura quanto da pressão externa.

A cristalização dos compostos da fase silicato ( $C_3S$  e  $C_2S$ ) ocorre a partir da mistura fundida, a qual contém diversos elementos, podendo destacar Ca, Si, Al, Fe entre outros elementos contribuintes (SILVA, 2000). Já a fase intersticial, formada por aluminato tricálcio e ferro aluminato tricálcio, é líquida durante o processo de aquecimento para obtenção do clínquer, se formando entre cristais de  $C_3S$  e  $C_2S$  durante o resfriamento (TIMASHEV, 1980 apud SILVA, 2000).

Antigamente a única forma de sulfato de cálcio adicionada no processo de produção do cimento era a gipsita, porém outras fases do sulfato de cálcio vêm sendo utilizadas nos cimentos modernos, como a anidrita natural cristalizada, sulfato de cálcio sintético, gesso desidratado ou anidrita solúvel e hemidrato (AÏTCIN, 1998).

Entretanto, o grau de solubilidade de cada sulfato é diferente, podendo ainda ser seriamente alterado com a adição de um superplastificante, resultando em uma possível alteração no equilíbrio entre o grau de solubilidade da fase de  $C_3A$  do cimento e a do sulfato de cálcio. Esta modificação no equilíbrio pode trazer algumas consequências, como a pega instantânea e a falsa pega, ainda que as proporções entre os compostos estejam adequadas (SILVA, 2006).

Sendo assim, a escolha do tipo de cimento depende de todas as variáveis envolvidas desde a sua produção, até a sua finalidade. Em outras palavras, o cimento a ser escolhido não deve depender somente da disponibilidade de mercado, mas também das futuras propriedades que se deseja que o concreto adquira.

De acordo com Aïtcin e Neville (1993) o tipo de cimento mais adequado para a produção do concreto de alto desempenho seria um cimento não muito fino, com baixa proporção de aluminato tricálcio ( $C_3A$ ) e com a reatividade facilmente controlada por íons sulfatos presente no cimento na fase intersticial. Para Silva (2000), este argumento pode ser explicado devido ao fato de que no CAD, o problema da compatibilidade entre o cimento e o aditivo é muito mais relevante do que no concreto comum. Logo, a quantidade de aluminato tricálcio ( $C_3A$ ), ferro aluminato tetracálcio ( $C_4AF$ ) e sulfato de cálcio presente no cimento poderão interferir nas propriedades do cimento e também inibir o efeito dos aditivos.

Atualmente é comum a adição de uma quantidade limitada de outros tipos de materiais, como por exemplo: material pozolânico, escórias de alto forno e/ou material carbonático a mistura de clínquer e sulfato de cálcio, dando origem aos cimentos compostos (CASTRO, 2007).

### 2.3.2 Água de Amassamento

A água é responsável por exercer duas funções no concreto. A primeira, química, na qual é responsável por produzir as reações de hidratação; a segunda, física, na qual é responsável por conferir trabalhabilidade ao concreto. Ou seja, o concreto deve possuir água o suficiente para desenvolver a resistência máxima e também, para desenvolver as propriedades necessárias para o lançamento do concreto.

Segundo a ACI 363R-10 (2010), a qual normatiza concretos de alta resistência, a qualidade da água de amassamento para este tipo de concreto especial não é mais rigorosa do que para o concreto convencional. Água potável é permitida para ser usada no concreto como água de amassamento sem a necessidade de testá-la.

### 2.3.3 Agregados

No Brasil, a escolha do agregado para a produção de concreto de alto desempenho não é normatizado, porém, existe a ABNT NBR 7211 (2005) que especifica os agregados para concretos comuns. Os agregados são divididos em duas classes, graúdo e miúdo. Segundo a ABNT NBR 7211 (2005), o agregado graúdo é o agregado o qual seus grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75mm e ficam retidos na peneira de abertura de 4,75mm, ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248. Já o agregado miúdo é o agregado o qual seus grãos passam pela peneira com abertura de 4,75mm e fica retido na peneira com abertura de malha de 150  $\mu$ m.

### 2.3.3.1 Agregados graúdos

Para a preparação do concreto de alto desempenho é de extrema importância escolher adequadamente os agregados a serem utilizados, pois no estado fresco ele é um grande responsável pelo custo e pela trabalhabilidade, já no estado endurecido, ele pode contribuir para a resistência, a estabilidade dimensional e também para a durabilidade do concreto. Para tal escolha, é necessário que a forma macroscópica do agregado seja conhecida, a fim de aperfeiçoar a aderência entre o agregado e a pasta de cimento, e ainda obter a resistência mecânica desejada (SILVA, 2000).

Mehta (1994) alega que as características físicas dos agregados (volume, tamanho e distribuição de poros) são mais importantes para o CAD do que as características químicas. Portanto, os agregados devem possuir forma e textura que favoreçam a aderência agregado-pasta, boa resistência mecânica, propriedades térmicas adequadas, propriedades químicas compatíveis com os aglomerantes e isentos de substâncias deletérias.

A ACI 363R-10 recomenda, além das características já citadas, que os agregados apresentem módulo de elasticidade maior ou igual ao da pasta de cimento, seja 100% britado e com o mínimo de partículas alongadas e achatadas, granulometria adequada para um menor consumo de água, propriedades químicas compatíveis com as do cimento para a não ocorrência de deterioração ou ataques externos, além de que devem ser limpos.

A lavagem dos agregados graúdos pode ser realizada com o intuito de diminuir a quantidade de pó e substâncias deletérias nos agregados, assim aumentando a ligação do agregado-pasta de cimento. Tal prática pode levar a ganhos de resistência à compressão de até 8% (ALMEIDA 1994 apud MENDES, 2002, p. 20).

Para concretos com fator água/aglomerante entre 0,50 e 0,70 a resistência intrínseca do agregado graúdo não é de grande importância, porém, essa afirmação não é verdadeira para concretos com relação água/aglomerante entre 0,20 e 0,30, pois para tal situação, o agregado pode compor a parte mais frágil do sistema, pois o concreto de alto desempenho tem o comportamento semelhante a de um compósito, então a tensão é compartilhada entre o agregado e a pasta de cimento (SARKAR; AÏTCIN, 1987 apud SILVA 2000, p. 60).

Muitos pesquisadores recomendam que a dimensão máxima do agregado seja de 12,5mm e que dimensões maiores influenciam na resistência mecânica. Porém, concretos de alto desempenho com resistência à compressão acima de 100 MPa e agregados com dimensão máxima característica de 25mm já foram obtidos em laboratório (CASTRO, 2007).



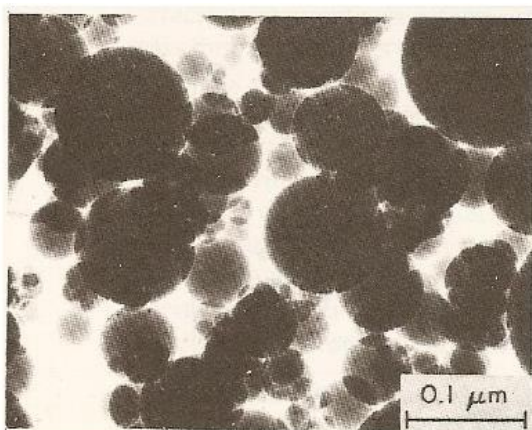
### 2.3.3.2 Agregados miúdos

Segundo a ACI 363R-10 o agregado miúdo é escolhido levando em consideração a demanda de água e o seu empacotamento físico, sendo preferíveis partículas arredondadas e lisas, pois essas necessitam de menor quantidade de água de amassamento. E o melhor módulo de finura indicado para o concreto de alto desempenho é de aproximadamente 3,0.

Porém, segundo Aïtcin (1998), a areia natural deve conter uma parte do total de partículas maiores do que 4,8mm, devido à resistência à compressão do agregado miúdo não ser muito forte e poder se tornar o “elo fraco” no concreto.

### 2.3.4 Sílica Ativa

A sílica ativa começou a ser utilizada como material suplementar do concreto no início dos anos 80 na Escandinávia e na América do Norte e apenas em 1989 ela passou a ser produzida no Brasil. Segundo Téchné (2002 apud Silva, 2010, p. 22), a adição da sílica ativa ao cimento resulta em um concreto com um melhor desempenho. A dimensão das partículas deste material é em média cem vezes menor que a do cimento. Ela possui diâmetros, em média, de 1 micrômetro (Figura 2) resultando em grande superfície específica (MEHTA, 1994).



**Figura 2 - Vista em microscópio de sílica ativa**  
**Fonte: Mehta (1994)**

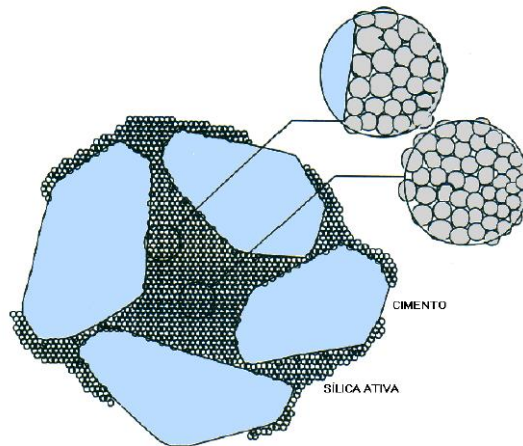
A adição de sílica ativa no concreto atua de duas formas, devido as suas propriedades químicas e físicas. As características físico-químicas da sílica ativa faz com que ela seja a mais empregada em relação às outras adições minerais, como o metacaulim e a cinza de casca de arroz, para a produção de concreto de alto desempenho. As propriedades da sílica ativa são responsáveis pela alta reatividade com os responsáveis pela hidratação do cimento Portland e também proporcionam um maior empacotamento das partículas de cimento.

Price (2003 apud Silva, 2010, p. 23) afirma que a eficiência cimentícia da sílica ativa é aproximadamente o triplo do cimento Portland, facilitando assim o ganho de uma maior resistência sem ser necessário o uso de quantidade excessiva de cimento. Porém, sempre deve ser utilizada em conjunto de um superplastificante. É comumente utilizada numa proporção de 5 a 10% da massa do cimento. Segundo Neville (1997), quantidades abaixo de 5% não contribuem para a resistência do concreto, pois tais quantidades não são suficientes para fortalecer a interface agregado-pasta.

Existem duas maneiras de adicionar a sílica ativa no concreto. A primeira opção, e mais utilizada, consiste na substituição do cimento por uma parte da adição mineral; na qual é possível a redução do consumo de cimento. A segunda maneira consiste na adição de uma certa quantidade de sílica ativa à uma massa de cimento; na qual é possível resultar em considerável ganho de resistência à compressão entre o 3º e o 28º dias quando comparado ao concreto comum (MALHOTRA; CARETTE, 1983 apud MENDES, 2002, p.25).

O efeito químico ocorre por meio da rápida combinação da sílica ativa com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento, resultando o silicato de cálcio hidratado, o qual é o maior responsável pela resistência mecânica da pasta de cimento (DAL MOLIN, 1995 apud, MENDES, 2002, p. 25).

Já o efeito físico (ou microfíler – Figura 3) ocorre devido à dimensão da sílica ativa, as quais se introduzem nos interstícios da pasta, reduzindo os espaços disponíveis para a água. A sílica ativa também atua como ponto de nucleação para os produtos da hidratação, resultando em um refinamento da estrutura de poros (VIEIRA et al., 2004).



**Figura 3 - Efeito microfilador da sílica ativa no concreto**

**Fonte: Bache, 1981 apud Aïtcin, 1998**

Segundo Malhotra (1993, apud Vieira et al., 2004), o refinamento da estrutura porosa resultante da adição de sílica ativa, confere uma diminuição e interrupção dos poros. O uso da sílica ativa no concreto pode diminuir a quantidade de vazios por volume, diminuindo assim a porosidade e, portanto, a penetração de agentes agressivos. Ou seja, os concretos com adição de sílica ativa possuem um melhor desempenho em relação a ataques agressivos devido a sua menor permeabilidade.

### 2.3.5 Aditivos Superplastificantes

O concreto de alto desempenho só foi possível de ser criado com a descoberta dos superplastificantes, também conhecidos como superfluidificantes ou aditivos redutores de água de alta eficiência. O qual tem a função de conferir uma maior trabalhabilidade – fundamental para o CAD - ao concreto mesmo com baixas relações de água/materiais secos. A ABNT NBR 11768 (2011) é responsável por regulamentar a adição de superplastificantes ao concreto no Brasil.

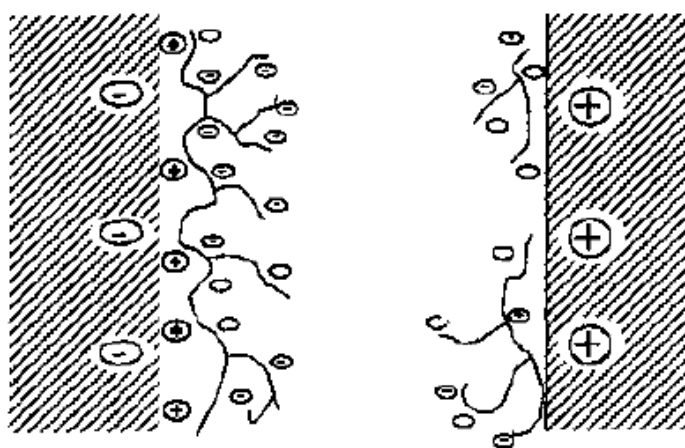
No mercado são divididos em quatro categorias: policondensado de formaldeído e melanina sulfonada (SMF) ou simplesmente melanina sulfonada; policondensado de formaldeído e naftaleno sulfonado (SNF), ou simplesmente naftaleno sulfonado;

lignossulfonatos modificados (MLS); e copolímeros, como os poliacrilatos e poliestireno sulfonado (MENDES, 2002).

Superplastificantes são aditivos utilizados como redutores de água de alta eficiência, sendo eles capazes de uma redução no teor de água de 3 a 4 vezes no concreto quando comparados com aditivos redutores de água normais (MEHTA, 1994). Segundo Neville (1997), a dosagem ótima para o superplastificante com a função de diminuir a relação água/aglomerante é de 5 a 20l/m<sup>3</sup> de concreto.

Os propósitos dos superplastificantes podem ser conferir maior trabalhabilidade ao concreto; assim como a redução da quantidade de água utilizada para uma mesma trabalhabilidade, aumentando a resistência e a durabilidade; e também reduzir ambas as quantidades, de água e de cimento, para evitar fissuras, retrações e tensões térmicas advindas da hidratação do cimento (COLLEPARDI et al., 1999 apud SILVA, 2010, p. 19).

Na Figura 4 representa-se a repulsão eletrostática entre duas partículas de cimento, uma carregada positivamente e outra negativamente, que em outras condições (sem a adição de superplastificantes) seriam atraídas entre si. E com a adição do superplastificantes elas se “repelem”, tornando as moléculas mais dispersas e, portanto, a mistura mais fluida.



**Figura 4 - Repulsão eletrostática entre partículas de cimento**  
Fonte: Jolicoeur et al. (1994) apud Aïtcin (1998)

A eficiência do superplastificante no concreto depende do tipo escolhido, pois não são todos os superplastificantes que reagem da mesma maneira em contato com um tipo de cimento. Mesmo que os dois produtos estejam de acordo com a norma, eles podem ter problemas de compatibilidade (AÏTCIN, 1998).

Quando adicionado à mistura após algum tempo do contato entre a água de amassamento e o cimento, o superplastificante se torna mais eficiente, melhorando a consistência da massa. A adição do superplastificante após um minuto do contato do cimento com a água de amassamento conduz a um resultado de abatimento 100% maior ao da mistura cuja adição foi feita ao mesmo momento, como demonstrado na Tabela 3. Ou seja, o superplastificante deve ser escolhido em função do seu desempenho, compatibilidade com o cimento e a sua dosagem (COLLEPARDI et al, 1999 apud SILVA, 2010).

**Tabela 3 - Efeito do modo de adição dos superplastificantes SMF, SNF e CAE no slump de misturas de concreto de cimento Portland**

Tipo de aditivo	Aditivos		Concretos	
	Dosagem (% teor de sólidos)	Modo de adição	Relação A/C	Slump (mm)
SMF	0,50	Imediata	0,41	100
SMF	0,50	Retardada	0,41	215
SNF	0,48	Imediata	0,40	100
SNF	0,48	Retardada	0,40	230
CAE	0,30	Imediata	0,39	230
CAE	0,30	Retardada	0,39	235

Fonte: Collepari (1999) apud Silva 2010

## 2.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

É errado dizer que o concreto de alto desempenho apenas é mais forte que o concreto comum. O concreto de alto desempenho pode ter apenas o comportamento de um concreto mais forte, porém nem sempre isso é verdadeiro. O diferente comportamento dos dois concretos é devido às diferenças na microestrutura de cada um (AÏTCIN, 1998). Sendo a microestrutura do concreto de alto desempenho densa, homogênea e pouco cristalina, essa decorrente da zona de transição da pasta de cimento-agregado (SILVA, 2006).

### 2.4.1 Resistência à Compressão

A resistência à compressão é a propriedade de maior destaque do concreto para os engenheiros, pois além dela ser especificada nos projetos estruturais, ela também é utilizada como referência para a classificação do concreto. Dentre todas as propriedades, esta é o de ensaio mais comum realizado. No Brasil, o ensaio para obter a resistência à compressão é regido pela NBR 5739 (2007), na qual é prescrito o método para os corpos-de-prova cilíndricos serem ensaiados.

Price (2003, apud Silva, 2010, p. 30) atesta que o concreto de alto desempenho é caracterizado por ter a resistência à compressão elevada, e essa resistência após os 28 dias pouco aumenta, sendo dependente da dosagem dos materiais cimentícios utilizados no concreto.

Os superplastificantes retardam o início da reação de hidratação do cimento, fazendo com que a resistência inicial do concreto de alto desempenho demore mais a se desenvolver, quando comparado aos concretos convencionais.

Assim como no concreto convencional, a resistência à compressão do CAD aumenta quando a relação água/aglomerante diminui. Porém, isso só é válido até o agregado graúdo se tornar o elo mais fraco do concreto; quando o agregado graúdo não é mais forte o bastante em comparação a pasta de cimento hidratada, a resistência à compressão não aumenta significativamente na medida em que a relação água/aglomerante diminui. Só sendo possível assim aumentar a resistência à compressão mudando o tipo de agregado graúdo. Quando o agregado graúdo é resistente o suficiente, ainda sim, não é possível obter uma relação geral entre a relação água/aglomerante e a resistência à compressão do CAD, pois estas variáveis são dependentes de outros fatores. Porém, Aïtcin (1998), através de sua experiência obteve a tabela 4, com a finalidade de predizer as máximas resistências à compressão para diferentes relações de água/aglomerante:

**Tabela 4 - Resistência à compressão do concreto de alto desempenho em função da relação água/aglomerante**

Água/Aglomerante	Máximo alcance da resistência à compressão (MPa)
0,40-0,35	50-75
0,35-0,30	75-100
0,30-0,25	100-125
0,25-0,20	>125

Fonte: adaptada de Aïtcin (1998)

Segundo Mehta (1994), a quantidade de ar incorporado ao CAD também influencia na resistência à compressão, geralmente a quantidade de ar incorporado é em torno de 0,5 a 2,5%. De uma experiência anterior, Aïtcin (1998) constatou que a diferença de 1% de ar incorporado no CAD resultou na redução de 4 a 5% da resistência à compressão. Além da quantidade do ar incorporado, o tipo de cimento, a água de amassamento, os aditivos e os agregados influenciam nessa propriedade.

Uma boa aderência entre o agregado graúdo e a matriz é dependente das partículas serem praticamente de mesmo tamanho, da limpeza do agregado graúdo, da ausência de pó e da uniformidade do agregado; o agregado miúdo deve ser um pouco grosso, arredondado e ter granulometria uniforme (NEVILLE, 1997).

Outro fator de grande importância é a cura do concreto. Entende-se por cura o processo de hidratação do cimento, com tempo, temperatura e condições de humidade controlados, logo após o lançamento do concreto. Para Aïtcin (1998), os engenheiros da área devem ficar atentos ao fato que 2 ou 3 horas a mais de cura a uma temperatura de 20°C pode fazer uma grande diferença na resistência à compressão inicial do CAD, pois a reação de hidratação pode ser atrasada significativamente por causa do uso de altas doses de superplastificantes e retardadores, mas quando a hidratação se inicia, ela se desenvolve rapidamente.

#### 2.4.2 Módulo de Elasticidade

Para projetistas, as deformações presentes nos elementos estruturais de concreto tem tanta importância como a resistência à compressão. Através da tensão aplicada e a

deformação resultante no corpo de prova, sob compressão axial, obtém-se o módulo de elasticidade. No Brasil, o ensaio para a determinação do módulo de elasticidade é regido pela ABNT NBR 8522 (2008).

A ABNT NBR 6118 (2014) afirma que o módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ), quando não obtido segundo a norma ABNT NBR 8522 (2008) aos 28 dias, pode ser estimado pelas expressões dadas a seguir, porém estas expressões não contemplam concretos com resistência à compressão maior do que 90 Mpa:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \text{ para } f_{ck} \text{ de 20 MPa a 50 MPa;} \quad (1)$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{\frac{1}{3}} \text{ para } f_{ck} \text{ de 55 MPa a 90 MPa.} \quad (2)$$

Sendo

$\alpha_E = 1,2$  para basalto e diabásio

$\alpha_E = 1,0$  para granito e gnaisse

$\alpha_E = 0,9$  para calcário

$\alpha_E = 0,7$  para arenito

Onde:

$E_{ci}$  e  $f_{ck}$  são dados em megapascal (MPa)

Porém, Dal Molin e Monteiro (1996, apud Mendes, 2002, p. 52) afirmam que para concreto de alto desempenho com resistências a compressão maior do que 40 MPa não é recomendado a utilização das equações empíricas, pois os resultados podem diferenciar razoavelmente dos reais. Além do que, segundo Pompeu, Oliveira e Ramos (2011), o módulo de elasticidade do concreto de alto desempenho pode ser significativamente influenciado pelas diferentes características, propriedades e proporções dos agregados graúdos.

Geralmente, concretos com maiores resistências à compressão possuem um maior módulo de elasticidade, pois estes se deformam menos que os concretos com menor resistência. Porém, embora os módulos de elasticidade sejam maiores no CAD, não crescem



nas mesmas proporções em que a resistência à compressão (GOMES ET AL., 1996 apud MENDES, 2006, p. 52).

O módulo de elasticidade é dependente das características dos concretos, assim como dos materiais componentes, como o tipo de agregado, da pasta de cimento e a zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados.

#### 2.4.3 Durabilidade

Para Mehta (1994), durabilidade é a propriedade em que o concreto possui de resistir a ações de intemperismo, como ataque químico e físico e a outros processos de deterioração, ao longo de toda a sua vida útil, de maneira a necessitar do mínimo de manutenção. Condições adversas, tais como ataque por sulfato, gelo, corrosão do aço, envolvem o movimento de água, que transporta, através da estrutura porosa do concreto, agentes agressivos. Assim sendo, a durabilidade é afetada pela porosidade e pela permeabilidade do concreto.

Portanto, a durabilidade do concreto é afetada pela relação água/aglomerante, cura, adições minerais e aditivos; sendo necessária a produção de concreto de boa qualidade com aditivos para obter um concreto durável (SILVA, 2000).

#### 2.4.4 Trabalhabilidade

As propriedades do concreto em estado fresco, antes que se inicie a pega e o seu endurecimento, são referentes à sua trabalhabilidade. Segundo Mehta (1994), a trabalhabilidade é composta pela fluidez, a qual consiste na facilidade em que o concreto fresco é movido, e a coesão, a qual consiste na resistência à exsudação ou a segregação.

Para o concreto de alto desempenho, geralmente, é utilizado o ensaio de abatimento de tronco de cone para determinar a sua trabalhabilidade. Este ensaio é normatizado pela ABNT NBR NM 67 (1998). Porém, vários métodos de ensaios para a determinação da trabalhabilidade são descritos nas referências bibliográficas sobre o assunto, e os seus

resultados avaliam a propriedade com escalas diferentes, portanto, não sendo possível a comparação entre resultados de diferentes testes.

Com o uso de superplastificantes, o concreto de alto desempenho possui uma maior trabalhabilidade quando comparado ao concreto comum. Para o CAD, slump de 180 a 200mm deve ser adquirido, porém raramente maior do que 230mm; e é necessária maior prudência quando concretos com slump maior do que 200mm é requerido em projeto (Aïtcin, 1998).

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com o intuito de determinar a influência da granulometria do agregado graúdo nas propriedades do concreto de alto desempenho, foi realizada uma série de procedimentos experimentais nos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Para tanto, fez-se necessária a confecção de corpos-de-prova variando apenas as composições granulométricas do agregado graúdo, mantendo fixos todos os demais parâmetros, permitindo assim a comparação entre os resultados advindos da variação granulométrica no CAD.

Após isto, os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios laboratoriais que permitiram a determinação das seguintes propriedades mecânicas e reológicas do CAD:

- Trabalhabilidade;
- Resistência à compressão e;
- Módulo de elasticidade.

As etapas necessárias para a realização dos ensaios mencionados acima são descritas a seguir.

#### 3.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

##### 3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado neste trabalho foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial – CPV-ARI, sendo este comercializado em sacos de papel *kraft* de 40kg em Campo Mourão, Paraná. Este material tem as especificações técnicas descritas na tabela 5.

**Tabela 5 - Especificações técnicas do cimento utilizado**

	Valores	NBR 5733
Resistência à compressão em 24h (MPa)	27	≥14
Resistência à compressão em 3 dias (MPa)	37	≥24
Resistência à compressão em 7 dias (MPa)	42	≥34
Resistência à compressão em 28 dias (MPa)	48	-
Blaine (cm <sup>2</sup> /kg)	5330	≥3000
Início de pega (min)	160	≥60
Fim de pega (min)	265	≥600

Fonte: Ficha técnica do fabricante

### 3.1.2 Agregado graúdo

Como o objetivo fundamental deste trabalho foi analisar as variações das propriedades do CAD devido à utilização de diferentes composições granulométricas do agregado graúdo, foram utilizados os três tipos de britas comercialmente disponíveis em Campo Mourão, todas de origem basáltica, sendo popularmente conhecidas como brita 0, brita 1 e brita 2.

Os três tipos de agregados, na figura 5, foram lavados e secos em estufa.



**Figura 5 - Amostra de cada tipo de agregado graúdo lavado e seco em estufa**

Após a lavagem e secagem, foi realizado o mesmo ensaio de determinação da composição granulométrica para os três tipos de britas, segundo a ABNT NBR NM 248

(2003), que consistiu primeiramente da coleta representativa de uma amostra de 1 kg de cada agregado graúdo.

Em seguida, as peneiras foram empilhadas de maneira a formar uma série de peneiras com aberturas em ordem crescente, da base para o topo. As amostras, então, foram colocadas na peneira superior ao conjunto e agitada mecanicamente, como pode ser visto na figura 6.



**Figura 6 - Agitador mecânico**  
**Fonte: Autoria própria**

Após a agitação das amostras, foram realizadas as pesagens das parcelas das amostras retidas em cada peneira, tanto da série normal, como da série intermediária.

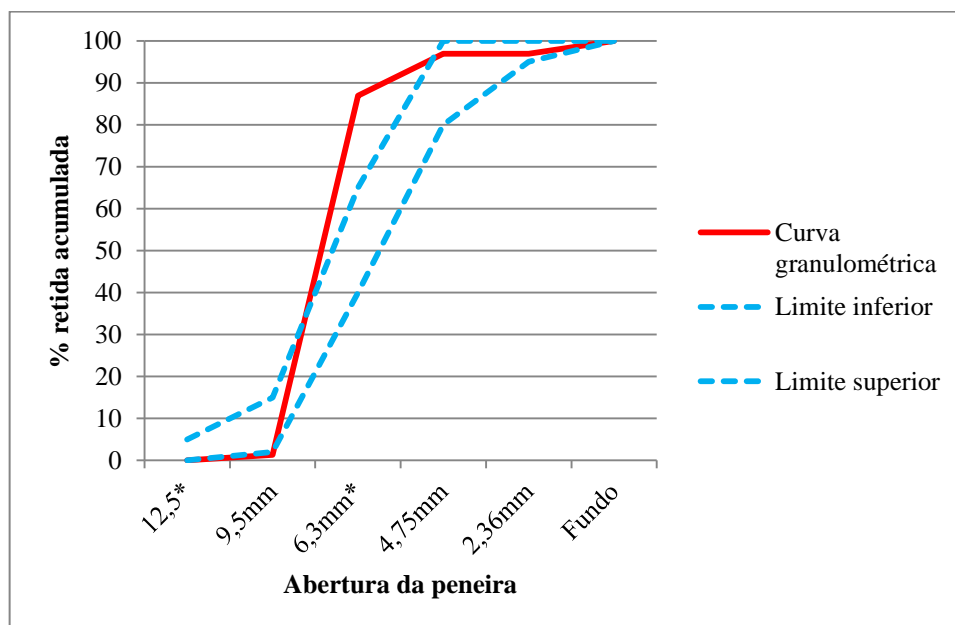
A composição granulométrica da amostra 1, comercializada em Campo Mourão como brita 0, é apresentada na tabela 6 e a curva granulométrica no gráfico 1.

Vale ressaltar que toda a curva granulométrica do agregado graúdo deve se encontrar dentro de limites inferiores e superiores estabelecidos pela ABNT NBR 7211 (2009).

**Tabela 6 - Composição granulométrica do agregado graúdo - amostra 1**

Abertura da peneira (mm)	Peso retido (g)	% retida	% retida acumulada
37,5mm	0,00	0,00	0,00
31,5mm*	0,00	0,00	0,00
25mm*	0,00	0,00	0,00
19,0mm	0,00	0,00	0,00
12,5mm*	0,00	0,00	0,00
9,5mm	13,00	1,30	1,30
6,3mm*	856,00	85,60	86,90
4,75mm	100,00	10,00	96,90
2,36mm	0,00	0,00	96,90
1,18mm	0,00	0,00	96,90
600µm	0,00	0,00	96,90
300µm	0,00	0,00	96,90
150µm	0,00	0,00	96,90
Fundo	31,00	3,10	100,00

Fonte: Autoria própria



**Gráfico 1 - Curva granulométrica do agregado graúdo - amostra 1**

Fonte: Autoria própria

Analisando a composição granulométrica da amostra 1 do agregado, foi possível determinar a dimensão máxima característica (D.M.C) e o módulo de finura, os quais são apresentados na tabela 7.

**Tabela 7- Características físicas do agregado graúdo - amostra 1**

<b>Característica física</b>	<b>Resultado</b>
Dimensão máxima característica	9,5mm
Módulo de finura	5,83

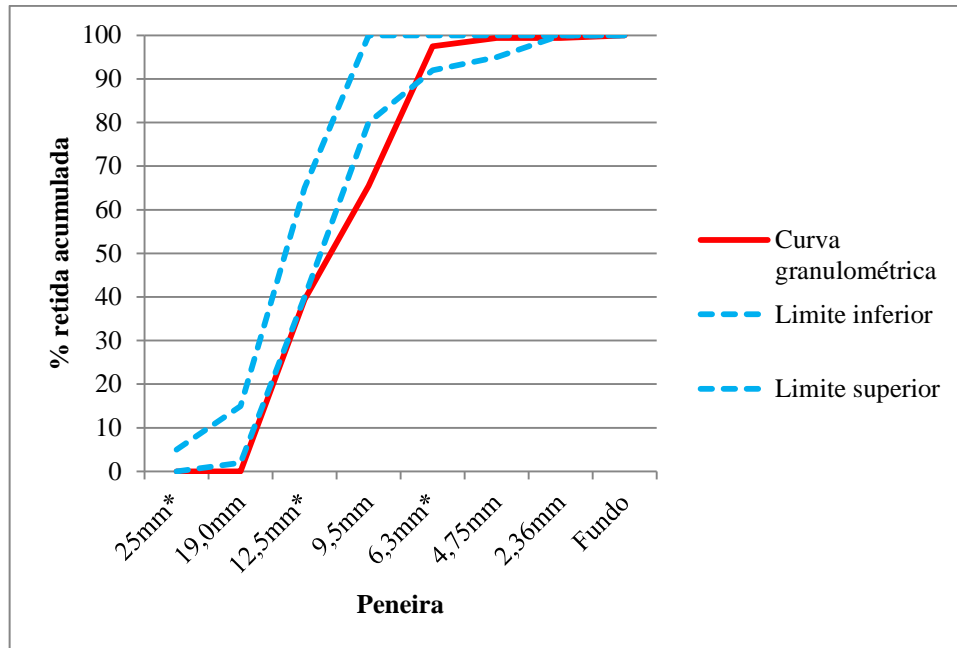
**Fonte: Autoria própria**

Já a composição granulométrica da amostra 2, comercializada em Campo Mourão como brita 1, é apresentada na tabela 8 e a curva granulométrica no gráfico 2.

**Tabela 8 - Composição granulométrica do agregado graúdo - amostra 2**

<b>Abertura da peneira (mm)</b>	<b>Peso retido (g)</b>	<b>% retida</b>	<b>% retida acumulada</b>
37,5mm	0,00	0,00	0,00
31,5mm*	0,00	0,00	0,00
25mm*	0,00	0,00	0,00
19,0mm	0,00	0,00	0,00
12,5mm*	394,00	39,40	39,40
9,5mm	261,00	26,10	65,50
6,3mm*	320,00	32,00	32,00
4,75mm	19,00	1,90	99,40
2,36mm	0,00	0,00	99,40
1,18mm	0,00	0,00	99,40
600µm	0,00	0,00	99,40
300µm	0,00	0,00	99,40
150µm	0,00	0,00	99,40
Fundo	6,00	0,60	100,00

**Fonte: Autoria própria**



**Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado graúdo - amostra 2**  
**Fonte: Autoria própria**

Analisando a composição granulométrica da amostra 2 do agregado, determinou-se a dimensão máxima característica (D.M.C) e o módulo de finura, os quais são apresentados na tabela 9.

**Tabela 9 - Características físicas do agregado graúdo - amostra 2**

Característica física	Resultado
Dimensão máxima característica	19mm
Módulo de finura	6,62

**Fonte: Autoria própria**

Por fim, a composição granulométrica da amostra 3, comercializada em Campo Mourão como brita 2, é apresentada na tabela 10 e a curva granulométrica no gráfico 3.



Tabela 10 - Composição granulométrica do agregado graúdo - amostra 3

Abertura da peneira (mm)	Peso retido (g)	% retida	% retida acumulada
37,5mm	0,00	0,00	0,00
31,5mm*	50,00	5,00	5,00
25mm*	200,00	20,00	25,00
19,0mm	557,00	55,70	80,70
12,5mm*	188,00	18,80	99,50
9,5mm	5,00	5,00	100,00
6,3mm*	0,00	0,00	100,00
4,75mm	0,00	0,00	100,00
2,36mm	0,00	0,00	100,00
1,18mm	0,00	0,00	100,00
600µm	0,00	0,00	100,00
300µm	0,00	0,00	100,00
150µm	0,00	0,00	100,00
Fundo	0,00	0,00	100,00

Fonte: Autoria própria

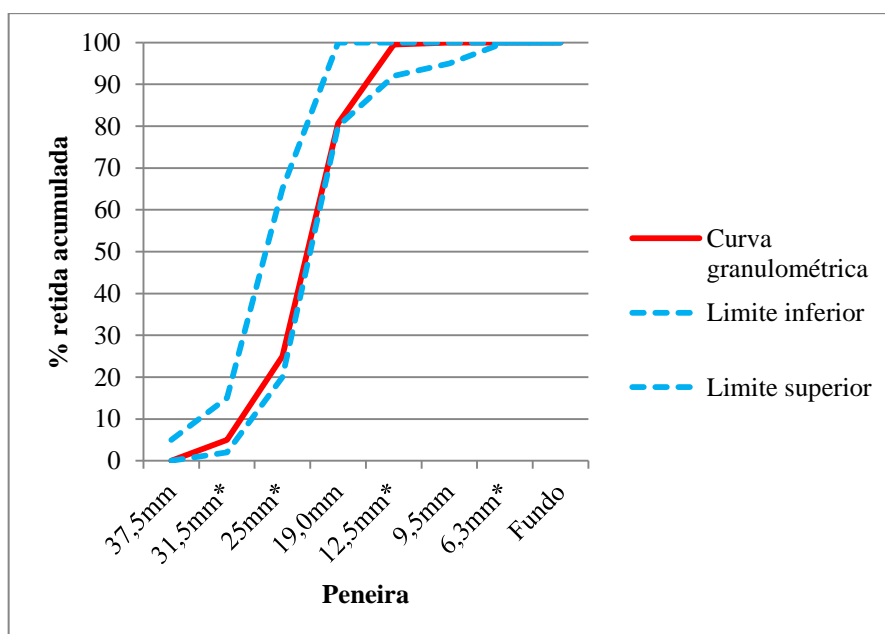


Gráfico 3 - Curva granulométrica do agregado graúdo - amostra 3

Fonte: Autoria própria

A dimensão máxima característica (D.M.C) e o módulo de finura da amostra 3 são descritos na tabela 11.

**Tabela 11 - Características físicas do agregado graúdo - amostra 3**

<b>Característica física</b>	<b>Resultado</b>
Dimensão máxima característica	31,5
Módulo de finura	7,81

**Fonte: Autoria própria**

Através da análise dos gráficos 1, 2 e 3, os quais demonstram a curva granulométrica dos três tipos de britas e os limites indicados pela ABNT NBR 7211 (2009), apenas a curva granulométrica da amostra 3 se mantém dentro dos limites indicados pela norma. As amostras 1 e 2 contêm um ponto, cada amostra, fora desta zona granulométrica.

Também foi realizado ensaio (figura 7) para determinação da massa específica real e aparente do agregado graúdo de acordo com a ABNT NBR NM 53 (2003), que consistiu na verificação da massa saturada de superfície seca de uma amostra que permaneceu imersa em água por um período de 24h, em seguida superficialmente limpa com um pano; assim como a determinação da massa submersa dessa mesma amostra em água, e por fim, a pesagem dessa amostra seca em estufa por um período suficientemente longo para que a massa não mais apresentasse variação. Com estes dados foi possível determinar a massa específica real e aparente do agregado graúdo, cujos resultados são apresentados na tabela 12.



**Figura 7 - Ensaio para determinação de massa específica real do agregado graúdo**  
**Fonte: Autoria própria**

**Tabela 12 - Massa específica aparente e real do agregado graúdo**

Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )			Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
1,48	1,45	1,43	2,93

**Fonte: Autoria própria**

### 3.1.3 Agregado miúdo

A composição granulométrica do agregado miúdo foi determinada utilizando o mesmo procedimento experimental realizado para o agregado graúdo, descrito no item anterior deste trabalho.

Diferentemente do estabelecido para agregados graúdos, segundo a ABNT NBR 7211 (2009) a curva granulométrica do agregado miúdo pode pertencer tanto a uma zona utilizável quanto a uma zona ótima.

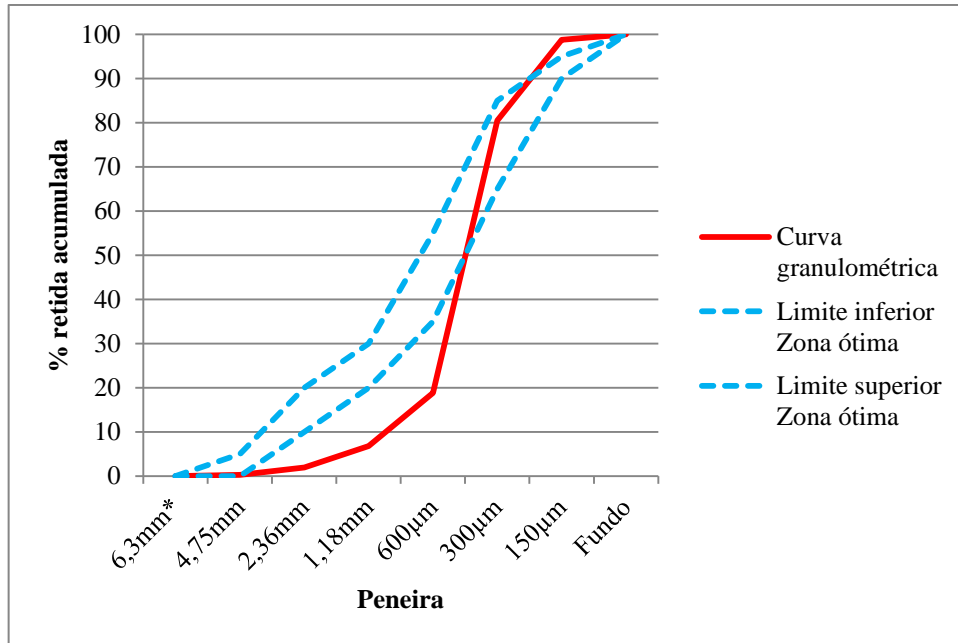
Os resultados obtidos no ensaio para determinação da composição granulométrica são encontrados na tabela 13.

**Tabela 13 - Composição granulométrica do agregado miúdo**

Abertura da peneira (mm)	Peso retido (g)	% retida	% retida acumulada
37,5mm	0,00	0,00	0,00
31,5mm*	0,00	0,00	0,00
25mm*	0,00	0,00	0,00
19,0mm	0,00	0,00	0,00
12,5mm*	0,00	0,00	0,00
9,5mm	0,00	0,00	0,00
6,3mm*	0,00	0,00	0,00
4,75mm	3,90	0,39	0,30
2,36mm	15,30	1,53	1,92
1,18mm	48,90	4,89	6,81
600µm	119,8	11,98	18,79
300µm	616,9	61,69	80,48
150µm	182,30	18,23	98,71
Fundo	12,90	1,29	100,00

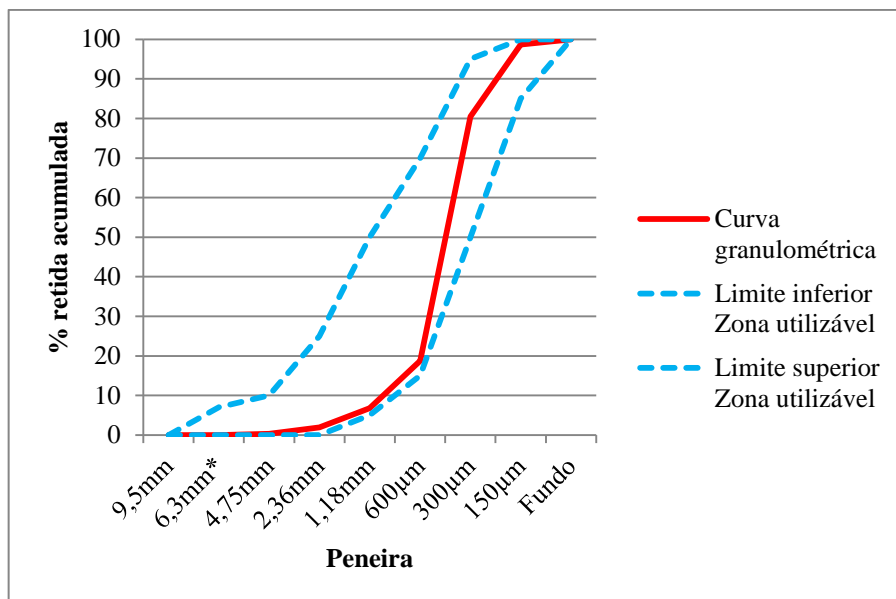
**Fonte: Autoria própria**

A partir destes dados, traçou-se a curva granulométrica do agregado miúdo, comparando-a com os limites pré-estabelecidos para a zona ótima (gráfico 4) e para a zona utilizável (gráfico 5).



**Gráfico 4 - Curva granulométrica do agregado miúdo com limites da zona ótima**  
**Fonte: Autoria própria**

Analisando a curva granulométrica do agregado miúdo, apresentada no gráfico 4, pode-se concluir que o agregado não se encontra na zona ótima prevista em norma.



**Gráfico 5 - Curva granulométrica do agregado miúdo com limites da zona utilizável**  
**Fonte: Autoria própria**

Como pode ser observado no gráfico 5, a amostra analisada encontra-se dentro dos limites estabelecidos pela norma como zona utilizável.

A dimensão máxima característica (D.M.C) e o módulo de finura do agregado miúdo determinado através da tabela 13 são descritos na tabela 14.

**Tabela 14 - Características físicas do agregado miúdo**

Característica física	Resultado
Dimensão máxima característica	2,36
Módulo de finura	2,07

**Fonte: Autoria própria**

Também foi realizado o ensaio de determinação da massa específica real e aparente do agregado miúdo de acordo com a ABNT NBR 9776 (1987). Inicialmente foi inserida uma quantidade de 200 cm<sup>3</sup> de água no frasco de Chapman, posteriormente colocado 500g de agregado miúdo previamente seco em estufa, como mostra a figura 8. Então o frasco foi agitado de modo a propiciar a saída de bolhas de ar. Os resultados são apresentados na tabela 15.

**Tabela 15 - Massa específica aparente e real do agregado miúdo**

Massa específica	Resultado (g/cm <sup>3</sup> )
Aparente	1,5200
Real	2,6042

Fonte: Autoria própria



**Figura 8 - Frasco de Chapman na determinação da massa específica real do agregado miúdo**  
Fonte: Autoria própria

### 3.1.4 Água

A água potável utilizada para a produção do CAD foi proveniente dos poços que fornecem água para a Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

### 3.1.5 Sílica ativa

As características da sílica ativa informadas pelo fabricante são apresentadas na tabela 16.

**Tabela 16 - Propriedades físicas e químicas da sílica ativa utilizada**

<b>Propriedades</b>	<b>Informações</b>
Estado físico (CNTTP)	Sólido
Diâmetro médio	0,40 $\mu$ m
Resíduo na peneira 45 $\mu$ m	$\leq 10\%$
Aparência	Pó de dimensões micrométricas
Cor	Cinza claro e cinza escuro dependendo do teor de sílica
Odor	Sem odor
pH	$\leq 10,0$
Ponto de fusão	1550 - 1570°C
Ponto de fulgor	Não aplicável
Perda ao fogo	$\leq 6\%$
Densidade aparente	150 – 700 kg/m <sup>3</sup>
Solubilidade	Insolúvel em água; solúvel em HF e KOH ou NaOH
Área específica B.E.T	$\geq 15.000$ e $\leq 30.000$ m <sup>2</sup> /kg
Limite de explosividade	Não aplicável

**Fonte: Ficha técnica do fabricante**

### 3.1.6 Superplastificante

O superplastificante utilizado para a produção do CAD foi o MC-Powerflow 3100, da MC-Bauchemie, fornecido pela empresa Diprotec, cujas características são apresentadas na tabela 17.

**Tabela 17 - Propriedades do superplastificante MC-Powerflow 3100**

<b>Característica</b>	<b>Informação</b>
Densidade	1,07g/cm <sup>3</sup>
Estado	Líquido
Cor	Marrom
Dosagem recomendada	0,2 – 5,0% sobre o peso do cimento

**Fonte: Ficha técnica do fabricante MC-Bauchemie**

### 3.2 PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS

Foi utilizada a dosagem realizada por Mendes (2002), cujo traço foi determinado através do método de dosagem desenvolvido por Aïtcin (1998). O traço adotado é apresentado na tabela 18.

**Tabela 18 - Traço unitário em massa adotado para a produção do concreto de alto desempenho**

<b>Componente</b>	<b>Quantidade</b>
Água/aglomerante	0,2785
Cimento	1,0000
Sílica ativa	0,086
Agregado miúdo	1,4856
Agregado graúdo	2,1646
Água	0,2824
Superplastificante	0,0200

**Fonte: adaptado de Mendes (2002)**

#### 3.2.1 Produção dos corpos-de-prova

Como descrito anteriormente, optou-se por realizar três tipos de corpo-de-prova utilizando a mesma dosagem, entretanto com composições granulométricas de agregado graúdo diferentes. Assim foram moldados os corpos-de-prova segundo a ABNT NBR 5738 (2015).



Para cada proporção diferente do agregado graúdo foram produzidos sete corpos-de-prova, a quantidade de material utilizado para cada betonada está descrita na tabela 19.

**Tabela 19 - Quantidades de materiais utilizados**

<b>Material</b>	<b>1ª betonada</b>	<b>2ª betonada</b>	<b>3ª betonada</b>
Cimento (kg)	10	10	10
Brita 0 (kg)	10,82	5,41	5,41
Brita 1 (kg)	5,41	10,82	5,41
Brita 2 (kg)	5,41	5,41	10,82
Agregado miúdo (kg)	14,86	14,86	14,86
Água (l)	2,82	2,82	2,82
Sílica ativa (kg)	0,86	0,86	0,86
Superplastificante (kg)	0,20	0,20	0,20

**Fonte: Autoria própria**

A ordem de mistura dos materiais foi realizada de maneira semelhante à descrita no trabalho de Mendes (2002), apresentada a seguir:

- 100% da brita + 25% da água + 100% do cimento + 100% da sílica;
- 75% da água;
- Mistura por 1 minuto;
- 80% do aditivo superplastificante;
- Mistura por 1 minuto;
- 100% da areia;
- Mistura por 2 minutos;
- Parada por 2 minutos;
- 20% do aditivo;
- Mistura por 2 minutos.

Após as misturas, foram realizados os ensaios do abatimento do tronco de cone, segundo a ABNT NBR NM 67, assim como também foram moldados sete corpos-de-prova em cada betonada com moldes cilíndricos metálicos de 100x200mm, adensados manualmente e realizado o rasamento com régua metálica na borda do molde, segundo a ABNT NBR 5738

(2015). Os corpos-de-prova permaneceram nas primeiras 24 horas no local da produção do concreto, logo após este período foram desmoldados e nomeados. Os corpos-de-prova resultantes das betonadas foram nomeados segundo a tabela 20.

**Tabela 20 - Nomeação dos corpos-de-prova**

1ª betonada		2ª betonada		3ª betonada	
Proporção das britas	Corpos-de-prova	Proporção das britas	Corpos-de-prova	Proporção das britas	Corpos-de-prova
	B01		B11		B21
	B02		B12		B22
50% brita 0 +	B03	25% brita 0 +	B13	25% brita 0 +	B23
25% brita 1 +	B04	50% brita 1 +	B14	25% brita 1 +	B24
25% brita 2	B05	25% brita 2	B15	50% brita 2	B25
	B06		B16		B26
	B07		B17		B27

**Fonte: Autoria própria**

Após as nomeações, foram armazenados em solução saturada de hidróxido de cálcio (figura 9) até o momento da realização dos ensaios.



**Figura 9 - Corpos-de-prova armazenados em solução saturada de hidróxido de cálcio**  
**Fonte: Autoria própria**

### 3.3 PROPRIEDADES ESTUDADAS

Um resumo dos ensaios realizados nos corpos-de-prova é apresentado na tabela 21, assim como a normatização seguida para a realização do ensaio.

**Tabela 21 - Resumo dos ensaios realizados e métodos que foram empregados**

<b>Ensaio</b>	<b>Número de CP ensaiado</b>	<b>Tamanho do CP (mm)</b>	<b>Normatização</b>
<b>Resistência à compressão</b>	5	100x200 mm	ABNT NBR 5739/2007
<b>Módulo de elasticidade</b>	5	100x200 mm	ABNT NBR 8522/2008
<b>Trabalhabilidade</b>	1	-	ABNT NBR NM 67/1998

**Fonte: Autoria própria**

#### 3.3.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade

Os corpos-de-prova produzidos foram mantidos em processo de cura em hidróxido de cálcio até o sétimo dia, quando foram retirados do armazenamento para realização dos ensaios. Foram retificados para tornar as suas superfícies planas e perpendiculares como indica a ABNT NBR 5738 (2015). Então, todos os corpos-de-prova tiveram seu diâmetro medido duas vezes através de um paquímetro com precisão de 0,01mm (figura 10).



**Figura 10 - Medição do diâmetro dos corpos-de-prova com paquímetro**  
**Fonte: Autoria própria**

Dois corpos-de-prova de cada betonada foram submetidos ao ensaio de compressão axial, de acordo com a ABNT NBR 5739 (2007), para determinação da ruptura prevista a ser utilizada no ensaio de determinação do módulo de elasticidade. Os resultados são apresentados na tabela 22 e os relatórios emitidos pela máquina de ensaio universal estão presentes no Apêndice A.

**Tabela 22 - Ruptura média prevista para ensaio do módulo de elasticidade**

Corpo-de-prova		Ruptura (kN)	Ruptura média prevista (kN)
1ª betonada	B01	415,73	385,6
	B02	355,49	
2ª betonada	B11	323,38	324,50
	B12	325,65	
3ª betonada	B21	320,38	320,90
	B22	321,42	

**Fonte: Laboratório de Estruturas – UTFPR-CM**

Com a determinação da ruptura média, foram realizados os ensaios para determinação dos módulos de elasticidade juntamente com as resistências à compressão, de acordo com a ABNT NBR 8522 (2008).

Os corpos-de-prova foram centralizados nos pratos da máquina de ensaio e devidamente instrumentados com um extensômetro, figura 11.



**Figura 11 - Corpo-de-prova com extensômetro**  
**Fonte: Autoria própria**

O ciclo de carregamento foi realizado na ordem a seguir:

- Carregamento correspondente a 30% da tensão de ruptura (demonstrada da tabela 21) e mantida por 60s;
- Descarregamento do corpo-de-prova;
- Carregamento com força correspondente à tensão de 0,5MPa e mantida por 60s nessa situação;
- Duas repetições das etapas já descritas;

- Aplicou-se novamente um carregamento correspondente a 30% da tensão de ruptura;
- Por fim, retirou-se o extensômetro do corpo-de-prova e aplicou-se um carregamento crescente até a ruptura, obtendo-se a resistência efetiva.

### 3.3.2 Trabalhabilidade

A determinação da trabalhabilidade foi realizada através do ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, descrito pela ABNT NBR NM 67 (1998), figura 12. Os ensaios foram realizados logo após a produção de cada betonada.



**Figura 12 - Materiais utilizados para o ensaio do abatimento do tronco de cone**  
**Fonte: Autoria própria**

O molde e a placa da base foram umedecidos, e em seguida o molde foi preenchido de concreto em três camadas, entre as quais foram realizadas compactações com vinte e cinco golpes com uma haste de socamento. Então, o cone foi retirado verticalmente e o abatimento do concreto medido.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios descritos anteriormente serão apresentados e discutidos a seguir.

### 4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados de resistência à compressão axial são apresentados na tabela 23.

**Tabela 23 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão**

1ª betonada		2ª betonada		3ª betonada	
CP	Resistência à compressão (MPa)	CP	Resistência à compressão (MPa)	CP	Resistência à compressão (MPa)
B03	42,60	B13	35,60	B23	43,05
B04	43,28	B14	45,33	B24	38,53
B05	51,69	B15	39,03	B25	41,37
B06	50,38	B16	46,53	B26	36,05
B07	44,29	B17	40,30	B27	44,58
Média	46,45	Média	41,36	Média	40,72
Desvio-padrão	4,26	Desvio-padrão	4,53	Desvio-padrão	3,44

Fonte: Laboratório de Estruturas, UTFPR-CM

Como indicado na tabela acima, as resistências média à compressão dos ensaios foram de 46,45MPa para 1ª betonada, 41,36MPa para a 2ª betonada e 40,72MPa para a 3ª betonada com rompimentos ao sétimo dia. Estes resultados indicam que a betonada com maior proporção de brita 0 obteve maior resistência, enquanto que a betonada com maior proporção de brita 2 obteve a menor resistência. Porém, a diferença das resistências da betonada 1 e 2 consistiu de apenas 1,55%, ao passo que a diferença entre a betonada 1 e a betonada 3 foi de 12,34%.

Este resultado já era esperado, pois como afirmou Aïtcin (1998), o agregado graúdo com partículas menores é, geralmente, mais resistente, pois o processo realizado para reduzir o tamanho do agregado elimina defeitos, tais como poros grandes, microfissuras e inclusões de minerais moles.

## 4.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade são encontrados na tabela 24.

**Tabela 24 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade**

1ª betonada		2ª betonada		3ª betonada	
CP	Módulo de elasticidade (GPa)	CP	Módulo de elasticidade (GPa)	CP	Módulo de elasticidade (GPa)
B03	50,7	B13	46,9	B23	45,4
B04	49,6	B14	46,4	B24	46,2
B05	46,6	B15	52,7	B25	46,3
B06	47,0	B16	45,3	B26	55,6
B07	53,7	B17	51,2	B27	53,2
Média	49,52	Média	48,5	Média	49,34
Desvio padrão	2,90	Desvio padrão	3,25	Desvio padrão	4,71

**Fonte: Laboratório de Estruturas, UTFPR-CM**

Como indicado na tabela 23, os módulos de elasticidade médios são de 49,52 GPa para a 1ª betonada, 48,5 GPa para a 2ª betonada e 49,34 GPa para a 3ª betonada. Percebe-se que os resultados obtidos diferem muito pouco entre si, sendo que a diferença entre o maior módulo (1ª betonada) e o menor (2ª betonada) é de apenas 2,06%.

Similarmente, Pompeu, Oliveira e Ramos (2011) estudaram a influência do tamanho e da origem mineralógica do agregado graúdo em concreto de alto desempenho. Utilizando britas basálticas, o primeiro tipo de corpo-de-prova com agregado de dimensão máxima característica de 19 mm adquiriu módulo de elasticidade médio de 45,71 GPa (ensaio no 163º dia), enquanto que o segundo tipo de corpo-de-prova com brita de dimensão máxima



característica de 9 mm alcançou 46,33GPa (ensaio no 143º dia), apresentando uma variação de 1,34%.

Os mesmo autores também ensaiaram britas de granito, nas mesmas condições (com dimensão máxima característica de 19 e 9 mm), obtendo os resultados de 38,93GPa (ensaio no 94º dia) para o concreto com brita de 19 mm e 33,88GPa (ensaio no 93º dia) para concreto com brita de 9 mm, resultando em uma diferença de 12,97%. Houve então, a conclusão de que em concretos de alto desempenho com agregado graúdo basáltico, a dimensão máxima característica da brita não apresenta muita influência no módulo de elasticidade, diferentemente do que ocorre com o agregado graúdo composto por granito.

#### 4.3 TRABALHABILIDADE

Os resultados do ensaio do método do abatimento do tronco de cone são apresentados a seguir, na tabela 25:

**Tabela 25 - Resultados do slump test**

<b>Betonada</b>	<b><i>Slump test</i> (mm)</b>
1 <sup>a</sup>	220
2 <sup>a</sup>	225
3 <sup>a</sup>	235

**Fonte: Autoria própria**

Através dos ensaios realizados é possível observar que o CAD produzido possui uma alta trabalhabilidade (figura 13) e que o concreto produzido na terceira betonada teve um maior abatimento.



**Figura 13 - Resultado do ensaio do abatimento do tronco de cone**  
**Fonte: Autoria própria**

Entretanto, de acordo com a ABNT NBR NM 67 (1998), quando se observa um deslizamento ou espalhamento da massa de concreto, o concreto analisado não é plástico ou coeso o suficiente para a aplicação deste método.

Ainda, Mendes (2002) utilizou o mesmo traço adotado neste trabalho, com agregado graúdo de origem mineralógica diferente (granito), porém adicionou o superplastificante em relação ao seu teor de sólidos diferentemente do método utilizado neste trabalho que consistiu na adição de superplastificante sobre a massa de aglomerante, onde obteve um abatimento de 130 mm.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como principal objetivo determinar a influência da variação granulométrica do agregado graúdo no concreto de alto desempenho e para alcançar este objetivo foi realizado uma série de ensaios e análises.

Primeiramente, foram realizados ensaios nos corpos-de-prova para determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade de acordo com a ABNT NBR 8522 (2008). As resistências à compressão obtidas foram de 46,45 MPa para o concreto produzido com maior proporção de brita 0, 41,36 MPa para o concreto produzido com maior proporção de brita 1 e 40,72 MPa para o concreto produzido com maior proporção de brita 2. Estes resultados indicam que concretos produzidos com uma maior proporção de britas menores do que 9,5 mm apresentam resistência à compressão mais elevada. Porém, a diferença da resistência em concretos produzidos com uma maior proporção de britas 1 ou 2 não é tão considerável.

Juntamente ao ensaio da determinação da resistência à compressão também foram determinados os módulos de elasticidade, que consistem em 49,52 GPa para a 1ª betonada, 48,5 GPa para a 2ª betonada e 49,34 GPa para a 3ª betonada. Como os módulos pouco diferem, é possível concluir que para concretos produzidos com agregado graúdo basáltico, a granulometria adotada pouco interfere nesta propriedade.

Ainda, de acordo com os resultados obtidos através do ensaio de abatimento do tronco de cone, segundo a ABNT NBR NM 67 (1998), o concreto analisado não é plástico ou coeso o suficiente para a aplicação deste método, uma vez que os resultados foram de 220 mm para a 1ª betonada, 225 mm para a 2ª betonada e 235 mm para a 3ª betonada.

Por fim, vale ressaltar a importância da seleção dos materiais que irão compor o CAD, como a granulometria do agregado graúdo, pois como foi observado no desenvolvimento deste trabalho, ela influencia as propriedades finais do concreto de alto desempenho.

## BIBLIOGRAFIA

AÏTCIN, Pierre C. **High-Performance Concrete**. Quebec: E&FN Spon, 1998.

AÏTCIN, Pierre C.; NEVILLE, Adam. High-performance concrete demystified. **Concrete International**, p. 21-26, 1993.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 363R-10**: Report on High-Strength Concrete. Farmington Hills, 2010.

ASSIS, Joaquim T. et al. **Estudo da porosidade em concretos de alto desempenho por técnicas de processamento de imagens**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, p. 315-319, Nova Friburgo, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**. Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 11786**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

CASTRO, Alessandra, L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho.** 2007. 302 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <[http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-04032008-082549/publico/Tese\\_AlessandraLCastro.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-04032008-082549/publico/Tese_AlessandraLCastro.pdf)>. Acesso em: 19 mar 2016.

CHOPIN, David, LARRARD, François, CAZACLIU, Bogdan. Why do HPC and SCC require longer mixing time?. **Cement and Concrete Research**, Bouguenais, v. 34, p. 2237-2243, 2004.

IBRACON. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 2011.

MEHTA, Povindar K. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 1994.

MENDES, Sandro, E. S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba.** 2002. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002. Disponível em: <<http://www.ppgcc.ufpr.br/dissertacoes/d0010.pdf>>. Acesso em: 19 mar 2016.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto.** 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.

POMPEU NETO, B. B., OLIVEIRA, D. R. C., RAMOS, D.. Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência. **Revista Matéria**, v. 16, p. 690-702, 2011.

SILVA, Fernanda G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos.** 2006, 220 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-26072006-135429/publico/tese>>

\_FernandaGianotti.pdf>. Acesso em: 19 mar 2016.

SILVA, Isac J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura.** 2000. 279 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Acesso em: [http://www.teses.usp.br/teses/dispo\\_niveis/88/88131/tde-20012011-100650/publico/IsacJosedaSilvaD.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/dispo_niveis/88/88131/tde-20012011-100650/publico/IsacJosedaSilvaD.pdf)>. Acesso em: 20 mar 2016.

SILVA, Renilton N. **Um estudo sobre o concreto de alto desempenho.** 2010. 57 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2010. Disponível em: < <http://civil.uefs.br/DOCUMENTOS/RENILTON%20DO%20NASCIMENTO%20SILVA.pdf> >. Acesso em: 19 mar 2016.

TAYLOR, Harold F. W. **Cement chemistry.** 2 ed. London: Thomas Telford Edition, 1997.

VIEIRA, Fernanda P. et al. **Durabilidade e resistência mecânica de concretos e argamassas com adição de sílica ativa.** 2004. Disponível em: < [http://www.silicon.ind.br/english/wp-content/themes/siliconenglish/estudos/Durabilidade\\_e\\_Resistencia\\_Mecanica\\_de\\_Concretos\\_e\\_Argamassa.pdf](http://www.silicon.ind.br/english/wp-content/themes/siliconenglish/estudos/Durabilidade_e_Resistencia_Mecanica_de_Concretos_e_Argamassa.pdf) >. Acesso em: 28 mar 2016.

**APÊNDICE A – RESULTADOS LABORATORIAIS DOS ENSAIOS DE  
COMPRESSÃO SIMPLES**









**APÊNDICE B – RESULTADOS LABORATORIAIS DE RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE**





