

unesp  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CLEITON JOÃO MENDES

**CONCRETO AUTOADENSÁVEL UTILIZANDO CINZA DE CASCA DE
ARROZ: ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**

Ilha Solteira
2015

CLEITON JOÃO MENDES

**CONCRETO AUTOADENSÁVEL UTILIZANDO CINZA DE CASCA DE
ARROZ: ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia- UNESP- Campus de Ilha Solteira,
para obtenção do título de Mestre em Engenharia
Civil. Área de Conhecimento: Estruturas

Prof. Dr. Marco Antonio de Moraes Alcântara
Orientador
Prof. Dr. José Luiz Pinheiro Melges
Co-orientador

Ilha Solteira
2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Mendes, Cleiton João.

M538c Concreto autoadensável utilizando cinza de casca de arroz: estudo das propriedades mecânicas / Cleiton João Mendes. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2015
93 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2015

Orientador: Marco Antonio de Morais Alcântara

Co-orientador: José Luiz Pinheiro Melges

Inclui bibliografia

1. Concreto autoadensável. 2. Resíduos agroindustriais. 3. Cinzas de casca de arroz.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Concreto autoadensável utilizando cinzas de casca de arroz como finos: Estudo das propriedades mecânicas

AUTOR: CLEITON JOÃO MENDES

ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCO ANTONIO MORAIS ALCANTARA

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE LUIZ PINHEIRO MELGES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, Área: ESTRUTURAS, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCO ANTONIO MORAIS ALCANTARA
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. ANTONIO ANDERSON S. SEGANTINI
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Profa. Dra. ADRIANA GUERRA GUMIERI
Departamento de Engenharia de Materiais e Construção / Universidade Federal de Minas Gerais

Data da realização: 04 de março de 2015.

*Dedico este trabalho aos meus pais
Julio e Nora, pelo amor, apoio e
incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me conduzir a mais esta conquista.

Aos meus pais, pelo amor, compreensão, auxílio e incentivo.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Marco Antonio de Moraes Alcântara e ao meu Co-orientador Prof. Dr. José Luiz Pinheiro Melges por toda a amizade, auxílio e conhecimento compartilhado.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual Paulista, pela amizade e auxílio na realização das atividades e ensaios de laboratório.

À Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior - CAPES, pelo apoio financeiro por meio de bolsa de estudo.

*“Quando se quer algo verdadeiramente e
com suficiente força, acaba-se por consegui-
lo sempre.”*

- Hermann Hesse

RESUMO

A pesquisa representa um estudo sobre o uso de cinza de casca de arroz (CCA) como finos para a produção de concretos autoadensáveis (CAA). Para tanto, utilizou-se de cinza de casca de arroz produzida em escala industrial, cimento Portland CP II-Z-32, agregado miúdo de origem sedimentar e agregado graúdo do tipo britado, além de superplastificante de ação estérica e eletrostática. Foram avaliadas as propriedades do material no estado fresco por meio dos ensaios de espalhamento *Slump-flow*, de escoamento confinado *V-funnel*, da Caixa em "L", de massa específica aparente e de segregação por peneiramento. No estado endurecido foram avaliadas as propriedades de resistência mecânica à compressão axial, à compressão diametral e o módulo de elasticidade aos 7 e 28 dias de cura, e ainda o ensaio de absorção d'água por imersão aos 28 dias de cura. A avaliação dos CAA's com cinza de casca de arroz foi tomada de modo comparativo com algumas composições de concreto vibrado em mesa vibratória produzidos com os mesmos materiais básicos. Observou-se que os CAA's produzidos com CCA se apresentaram parcialmente satisfatórios frente aos ensaios no estado fresco. Grande eficácia da cinza no sentido de formação de pasta endurecida mais resistente com valores mais elevados das propriedades mecânicas mesmo com maior relação água/cimento, assim como valores de resistência mecânica mais elevados comparados com os mesmos níveis de absorção. Encontrou-se, também, valores com relação ao módulo de elasticidade de modo a que correlacionados com os valores de resistência à compressão simples dessem o indicativo de maior ductilidade para os casos dos CAA's.

Palavras-chave: Concreto autoadensável. Resíduos agroindustriais. Cinzas de casca de arroz. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The research represents a study about the use of rice husk ash (RHA) as the final product for the production of self-compacting concrete (SCC). Therefore, was used rice husk ash produced on an industrial scale, Portland cement CP II-Z-32, tiny aggregate from sedimentary origin and larger aggregate from crushed type, beside super plasticizer steric and electrostatic action. The material properties were evaluated in fresh through the Slump-flow spreading assays, flow confined V-funnel, from Case "L" in bulk density and segregation by sieving. In the hardened state were evaluated the mechanical properties compressive strength, per meter compressive and tensile modulus at 7 and 28 days of curing, and also the water absorption test by immersion after 28 days of curing. The evaluation of the SCC's with rice husk ash was making comparatively with some concrete compositions vibrated in vibrating table produced with the same basic materials. It was observed that SCC's produced with RHA presented partially satisfactory compared to the tests in the fresh state. Great effectiveness of ash in meaning of tougher pulping hardened with higher values of mechanical properties even at higher water / cement relation, as well higher mechanical strength values compared to the same levels of absorption. It was found also values in relation to elastic modulus so that correlated to the compressive strength values give an indication of the greater ductility for the cases of SCC's.

Keywords: Self-compacting concrete. Industry Agronomy waste. Rice husk ash. Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama tensão-deformação para o concreto, agregados e pasta	17
Figura 2 - Faixas granulométricas consideradas na literatura, para o agregado miúdo	26
Figura 3 - Faixas granulométricas consideradas na literatura, para o agregado graúdo	27
Figura 4 - Micrografia de partículas de cimento em uma solução de água e cimento (a) - sem aditivo superplastificante (b) - com aditivo superplastificante	28
Figura 5 - Ação dos aditivos superplastificantes- repulsão estérica	29
Figura 6 - Ensaio de espalhamento <i>Slump-flow test</i>	33
Figura 7 - Funil em forma de “V”	34
Figura 8 - Caixa em forma de “L”	35
Figura 9 - Diagrama tensão-deformação e módulos de elasticidade para o concreto	40
Figura 10 - Deformação em função do tempo para concretos submetidos à carregamento	42
Figura 11 - Curva granulométrica para o agregado miúdo	46
Figura 12 - Curva granulométrica para o agregado graúdo	47
Figura 13 - Acondicionamento dos corpos de prova em câmara úmida.....	53
Figura 14 - Ensaio de espalhamento Slump-Flow para o concreto autoadensável...	56
Figura 15 - Ensaio da caixa em L.....	56
Figura 16 - Relação entre o fator a/c e a resistência à compressão axial para 7 e 28 dias para o concreto vibrado	65
Figura 17 - Relação entre o fator a/c e o módulo de elasticidade para 7 e 28 dias para o concreto vibrado.....	65
Figura 18 - Relação entre a porcentagem de agregados e a resistência à compressão axial para 7 e 28 dias para o concreto vibrado	67

Figura 19 - Relação entre a porcentagem de agregados e o módulo de elasticidade para 7 e 28 dias para o concreto vibrado	67
Figura 20 - Relação entre argamassa/agregado graúdo e a resistência à compressão axial para 7 e 28 dias para o concreto vibrado.....	68
Figura 21 - Relação entre o fator a/c e a resistência à compressão axial para 7 dias para o concreto autoadensável	69
Figura 22 - Relação entre o fator a/c e a resistência à compressão axial para 28 dias para o concreto autoadensável	69
Figura 23 - Comparação da relação entre o fator a/c e a resistência à compressão axial para 7 e 28 dias para o concreto autoadensável	70
Figura 24 - Relação entre a massa específica aparente e a resistência à compressão axial para 7 dias para o concreto autoadensável	71
Figura 25 - Relação entre a resistência à compressão axial e a resistência à tração por compressão diametral para 7 dias para o concreto autoadensável	71
Figura 26 - Relação entre a resistência à compressão axial e a resistência à tração por compressão diametral para 28 dias para o concreto autoadensável	72
Figura 27 - Variação da resistência à compressão axial com o módulo de elasticidade para 7 dias para o concreto autoadensável.....	73
Figura 28 - Variação da resistência à compressão axial com o módulo de elasticidade para 28 dias para o concreto autoadensável.....	73
Figura 29 - Relação entre resistência à compressão axial/módulo de elasticidade e fator a/c para 7 e 28 dias para o concreto autoadensável.....	74
Figura 30 - Relação entre a variável k e a resistência à compressão axial para 28 dias para o concreto autoadensável.....	75
Figura 31 - Influência da relação água/cimento para 28 dias para o concreto autoadensável e para o vibrado	76
Figura 32 - Influência da relação agregado/cimento para 28 dias para o concreto autoadensável e para o vibrado	77
Figura 33 - Influência da relação argamassa/agregado graúdo para 28 dias para o concreto autoadensável e para o vibrado	78

Figura 34 - Relação entre resistência à compressão axial e módulo de elasticidade para 28 dias para o concreto autoadensável e para o vibrado.....	79
Figura 35 - Relação resistência à compressão axial/módulo de elasticidade para 7 e 28 dias para o concreto autoadensável e para o vibrado.....	80
Figura 36 - Relação entre resistência à compressão axial e absorção para a mesma porcentagem de agregados em mistura.....	81
Figura 37 - Relação entre a massa específica aparente e a absorção para o concreto autoadensável.....	82
Figura 38 - Relação entre o fator a/c e a absorção para os concretos autoadensáveis e vibrados.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização do cimento CP II Z 32.....	45
Tabela 2 - Caracterização dos agregados miúdos	46
Tabela 3 - Caracterização dos agregados graúdos.....	47
Tabela 4 - Caracterização física e química das cinzas de casca de arroz	47
Tabela 5 - Composição em kg por m ³ de concreto para o concreto vibrado	49
Tabela 6 - Composição em l por m ³ de concreto para o concreto vibrado	49
Tabela 7 - Parâmetros de dosagem em massa para o concreto vibrado	50
Tabela 8 - Parâmetros de dosagem em volume para o concreto vibrado	50
Tabela 9 - Composição em kg por m ³ de concreto para o concreto autoadensável..	50
Tabela 10 - Composição em l por m ³ de concreto para o concreto autoadensável...	50
Tabela 11 - Parâmetros de dosagem em massa para o concreto autoadensável	51
Tabela 12 - Parâmetros de dosagem em volume para o concreto autoadensável....	51
Tabela 13 - Valores de abatimento e de massa específica aparente para o concreto vibrado	54
Tabela 14 - Valores do ensaio de espalhamento slump-flow para o concreto autoadensável.....	54
Tabela 15 - Valores do ensaio de escoamento confinado V-funnel para o concreto autoadensável.....	55
Tabela 16 - Valores de massa específica aparente para o concreto autoadensável	55
Tabela 17 - Valores do ensaio da caixa em L para o concreto autoadensável	55
Tabela 18 - Valores do ensaio de segregação para o concreto autoadensável	55
Tabela 19 - Valores de resistência à compressão axial para 7 dias para o concreto vibrado	57
Tabela 20 - Valores de resistência à compressão axial para 28 dias para o concreto vibrado	57
Tabela 21 - Valores de resistência à tração por compressão diametral para 7 dias para o concreto vibrado.....	58
Tabela 22 - Valores de resistência à tração por compressão diametral para 28 dias para o concreto vibrado.....	58
Tabela 23 - Valores de módulo de elasticidade para 7 dias para o concreto vibrado	58
Tabela 24 - Valores de módulo de elasticidade para 28 dias para o concreto vibrado	59

Tabela 25 - Valores de resistência à compressão axial para 7 dias para o concreto autoadensável.....	59
Tabela 26 - Valores de resistência à compressão axial para 28 dias para o concreto autoadensável.....	59
Tabela 27 - Valores de resistência à tração por compressão diametral para 7 dias para o concreto autoadensável	60
Tabela 28 - Valores de resistência à tração por compressão diametral para 28 dias para o concreto autoadensável	60
Tabela 29 - Valores de módulo de elasticidade para 7 dias para o concreto autoadensável.....	60
Tabela 30 - Valores de módulo de elasticidade para 28 dias para o concreto autoadensável.....	61
Tabela 31 - Valores de absorção para 28 dias para o concreto vibrado	61
Tabela 32 - Valores de absorção para 28 dias para o concreto autoadensável.....	62
Tabela 33 - Parâmetros de composição e variável k.....	74
Tabela 34 - Valores de resistência à compressão axial e da variável k	74
Tabela 35 - Influência do tipo de agregado graúdo e da consistência do concreto sobre o módulo de elasticidade.....	79

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFGC- Association Française de Génie Civil
a/c- água/cimento
agr- agregado
agrgr- agregado graúdo
agrm- agregado miúdo
agrtot- agregado total
arg- argamassa
CAA- Concreto Autoadensável
CCA- Cinza de Casca de Arroz
cim- cimento
CP- Cimento Portland
CP's- Corpos de Prova
cv- coeficiente de variação
EFNARC- Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete
material pulv- material pulverulento
NBR- Norma Brasileira Registrada
Sup- superplastificante
UNESP- Universidade Estadual Paulista
 Φ - diâmetro
 σ - desvio padrão
 ρ - massa específica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Considerações iniciais	16
1.2 Objetivo	16
1.3 Justificativa	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Introdução ao concreto	18
2.1.1 O Concreto como material compósito	18
2.1.2 Microestrutura da pasta de cimento	20
2.1.3 Interface pasta-agregado	20
2.1.4 Resistência mecânica do concreto	21
2.2 Concreto autoadensável	24
2.2.1 Materiais constituintes do CAA.....	25
2.2.2 Propriedades do CAA no estado fresco	32
2.2.2.1 <i>O papel que os componentes do CAA desempenham na reologia do estado fresco</i>	34
2.2.2.2 <i>Avaliações para o concreto autoadensável no estado fresco</i>	35
2.2.3 Propriedades do CAA no estado endurecido	39
2.2.3.1 <i>Resistência à compressão</i>	40
2.2.3.2 <i>Resistência à tração</i>	41
2.2.3.3 <i>Módulo de elasticidade</i>	42
2.2.3.4 <i>Retração e Fluência</i>	44
2.3 Cinza de casca de arroz	44
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	46
3.1 Materiais	49
3.2 Método	52
3.2.1 Ensaio realizados	53
3.2.1.1 <i>Ensaio no estado fresco para o concreto vibrado</i>	53
3.2.1.2 <i>Ensaio no estado fresco para o CAA</i>	55
4 RESULTADOS	56
4.1 Resultados para o concreto no estado fresco	56

4.1.1 Concreto vibrado	56
4.1.2 Concreto autoadensável.....	56
4.2 Resultados para o concreto no estado endurecido	59
4.2.1 Concreto vibrado	59
4.2.2 Concreto autoadensável.....	61
4.3 Análise dos resultados	64
4.3.1 Concreto no estado fresco	64
4.3.1.1 CAA.....	64
4.3.2 Concreto no estado endurecido	65
4.3.2.1 <i>Concreto vibrado</i>	65
4.3.2.2 <i>Concreto autoadensável</i>	69
4.3.3 Comparação entre os concretos autoadensáveis e vibrados	76
5 CONCLUSÕES	85
REFERÊNCIAS.....	86

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A construção civil é um dos setores tecnológicos que mais consomem matérias-primas naturais. Atualmente, grande parte dos processos com atividade econômica são fontes geradoras de resíduos, causando grande degradação ambiental e desconsiderando, muitas vezes, o desenvolvimento sustentável do ambiente construído.

Com isso, a indústria da Construção Civil busca, de maneira constante e insistente, materiais alternativos oriundos de subprodutos que venham a atender os requisitos para um desenvolvimento sustentável. Deste modo, o desafio atual trata do aproveitamento racional dos resíduos provenientes dos processos industriais.

O emprego de materiais residuais na produção de concreto é uma prática que está sendo empregada em todo o mundo. Nos últimos anos, a utilização de resíduos sólidos derivados da agricultura na fabricação de argamassas e concretos tem sido o foco de novas pesquisas (PÁDUA, 2011).

Ao comentar as perspectivas do concreto para o ano 2000, Neville (1992) destaca que o cimento é um material muito caro, e que, portanto, no futuro, devem ser empregados, cada vez mais, materiais alternativos adicionados ao cimento, como a escória, a cinza volante, a cinza de casca de arroz (CCA) e a sílica ativa, bem como as suas combinações, que podem produzir concretos mais econômicos e com melhor desempenho.

Neste contexto, este trabalho propõe um estudo comparativo entre concretos convencionais e concretos autoadensáveis (CAA), com a utilização da cinza de casca de arroz como adição mineral, buscando, assim, analisar o desempenho desta na produção de CAA.

1.2 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho da cinza de casca de arroz (CCA) como adição mineral para a produção de concreto autoadensável (CAA), e conhecer o padrão de comportamento dos concretos com ela produzidos quando no estado endurecido, por meio da avaliação de propriedades mecânicas, e

da absorção d'água. Também, objetiva-se avaliar as propriedades no estado fresco, verificando-se a validade do caráter autoadensável.

1.3 Justificativa

O setor da construção civil é um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais, causando, desta forma, grande degradação ambiental e desconsiderando, muitas vezes, o desenvolvimento sustentável. Sendo assim, o desafio atual trata do aproveitamento racional dos resíduos provenientes dos processos industriais.

Atualmente existem poucas iniciativas quanto à utilização de resíduos para a produção de CAA, quando comparadas com os casos dos demais concretos ou argamassas (ALCANTARA & SANTOS, 2012). Assim, a falta de métodos experimentais de dosagem que permitem a determinação da proporção exata dos materiais de forma econômica e racional (TUTIKIAN, 2004) tem motivado diversos pesquisadores a buscarem por técnicas e métodos de dosagens mais precisos.

Deste modo, o desenvolvimento de métodos relacionados com a produção de CAA tem despertado o interesse de muitos pesquisadores, uma vez que este representa uma evolução na tecnologia do concreto, podendo ser utilizado em vários tipos diferentes de estrutura, e com capacidade de apresentar benefícios econômicos (aumento da produtividade e redução de custos), tecnológicos (permitem estruturas com formas complexas e/ou altas taxas de armaduras) e ambientais (melhora do ambiente de trabalho e contribuição para diminuição do impacto ambiental) para a tecnologia sustentável do concreto.

Neste contexto, este trabalho, assim como tantos outros, vem sendo realizado buscando por técnicas e métodos de dosagem que contribuam para o desenvolvimento tecnológico sustentável do concreto através da utilização de um resíduo industrial: a cinza de casca de arroz (CCA).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução ao concreto

Conforme Monteiro (2007), os materiais de construção foram considerados como materiais homogêneos durante muito tempo, todavia, ao se trabalhar em uma escala microscópica, pode-se perceber que estes são bastante complexos e heterogêneos. Atualmente são usadas as mais modernas tecnologias para obter informações sobre a microestrutura dos materiais.

Em resumo, o concreto pode ser estudado como um material constituído de partículas de agregado, englobadas por uma matriz porosa de pasta de cimento, com uma zona de transição entre pasta e agregado constituída de características próprias.

Segundo Paulon (1991), nos estudos de microestrutura do concreto, a interface pasta-agregado torna-se essencial por distinguir a aderência de natureza química relativa às ligações cristalinas entre a pasta e o agregado e a aderência mecânica devida à rugosidade superficial dos agregados.

Para Paulon (1991), a ligação entre a pasta de cimento e o agregado resulta de um entrelaçamento mecânico dos produtos de hidratação do cimento com o agregado, e da reação química entre este e a pasta de cimento.

Vários estudos da microestrutura do concreto foram realizados com o objetivo de conhecer o grau de influencia da zona de transição na resistência do concreto. Caso a resistência na região de contato entre a pasta de cimento e agregado seja menor do que a resistência do agregado, esta região será uma zona crítica no desenvolvimento da resistência do concreto.

2.1.1 O Concreto como material compósito

O concreto endurecido pode ser considerado como uma rocha artificial, e constituído por uma associação de agregados graúdos e grãos de areia, englobados por uma pasta de cimento. As propriedades desse material heterogêneo, tais como: características mecânicas, elásticas, físicas e químicas, as quais determinam o seu emprego, dependem de um grande numero de fatores relativos à pasta, aos

agregados utilizados e, à ligação entre esses dois elementos (PAULON & KIRCHHEIM, 2011).

O agregado é um material granular, como areia, pedregulho, pedrisco, rocha britada, escória de alto-forno ou ainda resíduos de construção civil. Utilizado em conjunto com um aglomerante obtendo-se um meio cimentício para produzir argamassas e concretos.

O aglomerante utilizado para a produção de argamassas e concretos geralmente é o cimento Portland, que é obtido por meio da moagem do clínquer manufaturado e da adição de sulfatos de cálcio (5 a 10%), na forma de dihidrato (gipsita) ou anidrita, utilizados para moderar e retardar o início da pega (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

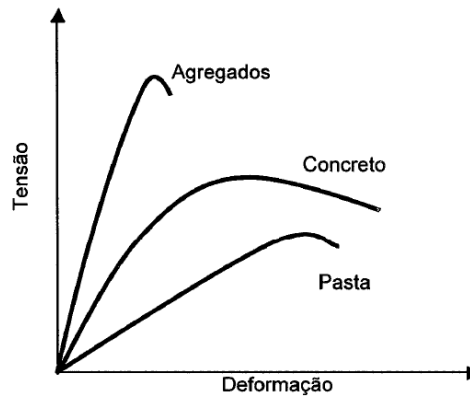
Maringolo (2001) diz que a produção do clínquer Portland pode ser entendida como um tipo de metamorfismo térmico agindo sobre um pacote de rochas calcárias com argila, confinados em um sistema fechado, o forno rotativo, no interior do qual são submetidos a um gradiente térmico que atinge 1450°C, em ambiente oxidante.

Conforme Paulon e Kirchheim (2011), dentro desse sistema, uma série de reações químicas em estado sólido, na presença de uma fase líquida enriquecida em alumínio e ferro, originará a composição mineralógica básica do clínquer, composta de quatro minerais principais: o silicato tricálcico (alita, C_3S ou $3CaO.SiO_2$), o silicato dicálcico (belita, C_2S ou $2CaO.SiO_2$), o aluminato tricálcico (C_3A ou $3CaO.Al_2O_3$) e o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF ou $CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$).

A Figura 1 apresenta o diagrama tensão-deformação para o concreto, agregados e pasta. Do ponto vista das partes que constituem o concreto, tanto a pasta endurecida como os agregados apresentam variação linear de deformação com relação ao valor da tensão, com o concreto apresentando um valor de módulo tangente inicial intermediário e um comportamento não linear.

Conforme Neville (1997), a razão da curvatura no material concreto é atribuída às microfissuras que surgem nas interfaces dos agregados com a pasta, diminuindo a área efetiva que resiste às cargas.

Figura 1 – Diagrama tensão-deformação para o concreto, agregados e pasta



Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

2.1.2 Microestrutura da pasta de cimento

A pasta de cimento hidratado é uma reunião relativamente heterogênea de partículas, filmes, microcristais e elementos sólidos, ligados por uma massa porosa contendo espaços com soluções e alguns vazios.

Conforme Paulon (1991), a pasta de cimento varia com a relação água/cimento utilizada, e sua importância pode ser estabelecida em termos tanto de microestrutura, como dos efeitos produzidos sobre as propriedades do concreto, tais como: resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade.

Quanto à idade, as particularidades da microestrutura desenvolvem-se rapidamente desde o contato do cimento com a água. Nas primeiras horas, as mudanças são bastante rápidas, tornando-se mais lentas após a primeira semana. Contudo, o processo de hidratação continua durante meses e anos (PAULON, 1991).

2.1.3 Interface pasta-agregado

No concreto, a pasta de cimento encontra-se envolvendo e separando agregados miúdos e graúdos. As características da microestrutura da pasta na zona de transição pasta-agregado dependem de vários fatores, tais como: o tipo de agregado, a água de amassamento, o efeito de aditivos e de adições, a natureza e a quantidade de componentes menores do material cimentício, entre outros.

A resistência às ações mecânicas de um material qualquer é diretamente proporcional à sua porosidade. Conseqüentemente, a zona de transição, por ser mais porosa, torna-se mais fraca do que a matriz de cimento hidratado (PAULON & KIRCHHEIM, 2011).

Além disso, quanto maiores forem as proporções de partículas chatas e alongadas dos agregados, maior será a tendência da água se acumular em filmes próximos às partículas, provocando, assim, o enfraquecimento da pasta de cimento na região da interface. Esse fenômeno, também chamado de “exsudação interna”, é responsável pela microfissuração da pasta na região junto ao agregado (PAULON & KIRCHHEIM, 2011).

2.1.4 Resistência mecânica do concreto

Em relação ao concreto, define-se a resistência mecânica como sendo a capacidade do material de suportar as cargas aplicadas sobre ele, sem que o mesmo entre em ruína. De forma prática, considera-se a resistência do concreto como a carga máxima aplicada sobre um corpo de prova (ANDRADE & TUTIKIAN, 2011).

O concreto endurecido é constituído por pasta de cimento hidratado e pelos agregados. Tanto os agregados quanto a pasta de cimento apresentam um comportamento tensão-deformação diferenciado quando comparados ao concreto, conforme ilustrado na Figura 1, a qual apresenta o comportamento de concretos com níveis convencionais de resistência. No caso de concretos de elevado desempenho, o comportamento é diferenciado, pois a pasta tende a apresentar resistência elevada, inclusive maior do que muitos agregados naturais.

Além disso, deve-se considerar a presença da zona de transição ou interface agregado-pasta do material, a qual apresenta uma grande quantidade de vazios.

Vários fatores podem exercer influência sobre a resistência mecânica do concreto, tais como (NEVILLE, 1997; METHA & MONTEIRO, 2008):

- propriedades dos componentes (cimento, agregados, aditivos e adições minerais);
- proporção dos componentes (relação água/cimento e relação agregado/cimento);
- condições de cura e idade dos corpos de prova.

- **Relação água/cimento (a/c)**

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), Abrams verificou que existe uma relação inversa e exponencial entre a resistência mecânica do concreto e a sua relação a/c. Ao se analisar a lei de Abrams, poder-se-ia dizer que a resistência mecânica do concreto aumenta com a diminuição da relação a/c.

Tal fato é verificado até certo ponto, pois existem fatores que devem ser levados em consideração. O primeiro deles diz respeito à quantidade de água mínima necessária para que ocorram as reações de hidratação do cimento. Conforme Neville (1997), para relações a/c menores do que 0,38, a hidratação máxima possível é menor do que 100%, considerando os concretos convencionais.

O segundo fator está relacionado com as condições de adensamento do concreto, pois misturas com relações a/c muito baixas tendem a apresentar uma dificuldade em expulsar os vazios internos, podendo acarretar em uma minimização da resistência do concreto. Deste modo, deve-se considerar a validade da lei de Abrams apenas para concretos plásticos que estão plenamente adensados.

- **Idade**

O ganho de resistência com a idade está relacionado com o grau de hidratação dos compostos do cimento. Cimentos mais finos e com teores maiores de silicatos de cálcio (C_3S e C_2S), como o CP V ARI, tendem a apresentar uma resistência maior a idades menores do que cimentos com adições minerais, tais como: o CP III AF e o CP IV (ANDRADE & TUTIKIAN, 2011).

- **Agregados**

Sendo o concreto um material compósito, sua resistência final no estado endurecido dependerá das características do agregado graúdo, tais como: composição mineralógica, distribuição granulométrica, forma e textura superficial das partículas; e da zona de transição entre o agregado e a pasta.

À medida que se aumenta o diâmetro máximo do agregado graúdo verifica-se, geralmente, a diminuição da água necessária para o amassamento, resultando aumento da resistência final. Todavia, agregados maiores tendem a apresentar zonas de transição mais fracas, com uma maior probabilidade de ocorrência de microfissuras (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Com relação à forma e a textura superficial das partículas, os agregados naturais, como o seixo rolado, apresentam uma forma mais arredondada e uma textura superficial mais lisa, diferentemente dos agregados britados, que possuem uma forma irregular e textura superficial rugosa. Deste modo, agregados britados proporcionam uma maior resistência aos concretos produzidos, devido a maior ligação física existente entre o agregado e a pasta de cimento endurecida.

- **Tipo de cimento**

Existem várias propriedades, tanto físicas (finura, superfície específica) quanto químicas (teores de aluminatos e silicatos de cálcio), características de cada cimento que influenciam na resistência do concreto para uma determinada idade.

Conforme Andrade e Tutikian (2011), o processo de hidratação, que acarreta o ganho de resistência nos concretos, inicia-se pela superfície das partículas, com uma redução progressiva do tamanho da partícula de cimento, formando-se produtos hidratados. Assim, quanto mais fino for o cimento, maior será a velocidade de reação com conseqüente ganho de resistência a menores idades.

Outro fator que influencia na resistência do concreto é a presença de adições minerais que são incorporadas ao cimento no processo de fabricação.

- **Presença de adições minerais e aditivos químicos**

Adições minerais

O emprego de adições minerais na produção de concretos tem influencia significativa em muitas das propriedades do material, tais como: melhoria da reologia do concreto fresco; minimização da porosidade capilar do concreto (responsável pela troca de umidade, íons e gases com o meio); redução da fissuração gerada pelas ações térmicas em concreto massa; aumento da durabilidade principalmente a ataques químicos (águas ácidas, sulfatos e reação álcali-agregado), em função da diminuição do teor de hidróxido de cálcio na pasta; e o aumento da resistência mecânica do concreto endurecido (DAL MOLIN, 2005).

As principais adições minerais empregadas na fabricação do cimento Portland ou incorporadas na fabricação do concreto são: a cinza volante, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz, a escória granulada de alto forno e o metacaulim.

Aditivos químicos

A influência do aditivo na resistência do material ocorre principalmente da seguinte forma: considerando-se a Lei de Abrams, quanto menor a relação a/c , maior a resistência mecânica. Por outro lado, essa diminuição da relação a/c vai de encontro com alguns problemas de ordem executiva, pois misturas muito secas não são trabalháveis e podem causar uma série de problemas inclusive no concreto endurecido, como a formação de ninhos de concretagem e cobrimento inadequado das armaduras.

Desse modo, conforme Neville (1997), com o emprego de aditivos, principalmente os plastificantes e superplastificantes, pode-se aumentar a trabalhabilidade da mistura, aumentando-se também a resistência, devido ao uso de relações a/c mais baixas.

2.2 Concreto autoadensável

O concreto autoadensável (CAA) é um caso particular de concretos de nova geração, o qual procura tirar partido dos fatores tecnológicos, como por exemplo, a ausência de vibração durante as fases de lançamento e de adensamento nas formas. Surgiu no início dos anos 80, devido às pesquisas pioneiras realizadas no Japão, Itália e Alemanha (ISAIA et al., 2005).

Como requisitos de desempenho para o CAA tem-se que este deve se apresentar fluido, sem que se manifestem a segregação, a exsudação, ou bloqueios, em casos de peças armadas.

Repetto (2005) afirma que, em relação ao concreto convencional, o CAA é diferenciado por suas características no estado fresco, apresentando, desta forma, elevada fluidez e estabilidade da mistura, que lhe conferem três características fundamentais: fluidez ou habilidade de preenchimento dos espaços, habilidade de passar por restrições e capacidade de resistir à segregação. Características alcançadas pela grande quantidade de finos presentes em sua composição (LISBOA, 2004).

O CAA apresenta algumas vantagens e pode ser destacado por: excelência no acabamento (a facilidade no nivelamento de lajes é um exemplo); redução do custo da mão de obra, pois há significativa redução nas atividades de espalhamento

e de vibração; aumento da qualidade, devido à redução de defeitos de concretagem, entre outros.

2.2.1 Materiais constituintes do CAA

O CAA é constituído pelos mesmos materiais utilizados na produção de concretos convencionais: aglomerante, agregados e água; com exceção dos aditivos químicos e adições minerais.

A seguir são apresentadas algumas características e propriedades acerca dos materiais comumente utilizados na produção do CAA.

▪ **Cimento Portland**

O cimento Portland, utilizado na produção de concretos e argamassas, é um aglomerante hidráulico cujo endurecimento ocorre por meio de reações químicas quando ocorre o contato com a água (hidratação), resultando na formação de um produto final estável em meio aquoso (NEVILLE, 1997).

A hidratação do cimento é influenciada pelas características físico-químicas do material, de modo que, existem no mercado, diversos tipos de cimento Portland, com características apropriadas para cada aplicação, possibilitando, desta forma, a produção de concretos com características específicas.

Para a produção de CAA, faz-se necessário a presença de um elevado teor de finos, para que o concreto apresente viscosidade adequada. O aumento no consumo de cimento, todavia, pode gerar efeitos indesejáveis no concreto fresco e também endurecido, como aumento da liberação de calor de hidratação e aumento da retração plástica.

Deste modo, a incorporação de adições minerais ao concreto pode ser uma solução para se evitar, ou minimizar, os efeitos negativos causados ao concreto pelo excesso de cimento. Além disso, as adições minerais são, em geral, subprodutos industriais, o que faz com que o seu custo seja reduzido quando comparado ao custo do cimento.

A velocidade de liberação de calor de hidratação pelo concreto sofre influências da composição química do cimento, sendo os compostos C_3S e C_3A os que se hidratam mais rapidamente, liberando maior quantidade de calor. Por outro lado, o composto C_2S sofre hidratação mais lenta, de modo que os cimentos que

apresentam concentração elevada deste composto apresentam baixa liberação de calor (NEVILLE, 1997).

A finura do cimento é uma característica de grande importância para o CAA. Pois é sabido que quanto maior for a área específica do cimento livre para hidratação, maior será a viscosidade da mistura (NEVILLE, 1997).

Outro aspecto de grande importância para o CAA é a adsorção do aditivo superplastificante pelo cimento. A adsorção do aditivo superplastificante pelas partículas do cimento ocorre principalmente nos aluminatos (Aluminato tricálcico – C_3A e Ferroaluminato tetracálcico – C_4AF). Todavia, a quantidade destes compostos deve ser moderada, para que ocorra uma adsorção mais uniforme. Segundo Mehta e Monteiro (1994), o limite máximo de C_3A (Aluminatos tricálcicos), em geral, é de 8 %.

Conforme trabalhos técnicos verificados na literatura, para a obtenção do CAA, é observado um consumo mínimo de cimento de 350 kg/m^3 e um máximo de 550 kg/m^3 (LISBOA, 2004).

▪ **Adições minerais**

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), as adições minerais são definidas como materiais silicosos empregados em substituição ao cimento na produção de concreto, cujos teores usuais de substituição encontrados na literatura para o CAA são da ordem de 30%, com a finalidade de reduzir os custos, melhorar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, podendo, em determinados casos, melhorar a sua resistência à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado e ao ataque por sulfatos.

Segundo Dal Molin (2005), as adições minerais de acordo com sua ação físico-química, podem ser classificadas em três grupos:

- material pozolânico (cinza volante, pozolana natural, sílica ativa, cinza de casca de arroz, metacaulim);
- material cimentante;
- fíler (calcário, pó de quartzo, pó de pedra).

Conforme EFNARC (2002), todos os tipos de adições podem ser utilizados para a produção do CAA.

▪ Agregados

Para o CAA, existe a necessidade de uma minimização na porcentagem do agregado graúdo utilizado, dando espaço ao uso de partículas finas, necessárias para se alcançar uma viscosidade adequada. O volume total de agregados, assim como a proporção entre os agregados graúdo e miúdo exercem grande influência nas propriedades reológicas do concreto (MELO, 2005).

Quanto ao teor de agregado miúdo a ser empregado, deve-se optar por volumes baixos, de modo a se evitar o contato direto entre as partículas, o qual pode ocasionar redução na deformabilidade do CAA, mesmo que se garanta uma viscosidade adequada da pasta. Dentre os trabalhos sobre CAA encontrados na literatura, verifica-se que o volume de agregado miúdo é fixado em 40% do volume de argamassa. Já para o agregado graúdo, a quantidade utilizada deve ser de 50% do volume de sólidos (OKAMURA, 1997 *apud* GOMES, 2002).

Para se evitar o bloqueio das partículas do agregado graúdo na passagem do concreto por regiões estreitas, é necessário que o seu teor e tamanho seja reduzido. Geralmente são utilizados agregados graúdos com dimensão máxima entre 16mm e 20mm. Para o agregado miúdo, todas as areias podem ser utilizadas, desde que, isentas de agentes nocivos e impurezas (EFNARC, 2002; AFGC, 2000).

A seguir, são apresentados alguns aspectos relevantes nas características destes materiais que podem promover efeitos significativos sobre algumas propriedades da mistura.

Forma e textura

Partículas de textura áspera e forma angulosa ou alongada requerem uma maior quantidade de pasta para se produzir misturas com trabalhabilidade adequada, aumentando, deste modo, o custo do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Granulometria

De acordo com Neville (1997), os principais fatores afetados pela granulometria são: a área superficial dos agregados, o volume relativo ocupado pelas partículas, a trabalhabilidade da mistura e a tendência à segregação. Agregados com granulometria descontínua levam a uma maior tendência à segregação, sendo, desta forma, não recomendados para o uso em CAA.

Área superficial

A área superficial do agregado determina a quantidade de água necessária para umedecer os sólidos. Quanto menor o seu valor, menores as quantidades de pasta e água necessárias para se atingir uma determinada fluidez (NEVILLE, 1997).

Massa específica

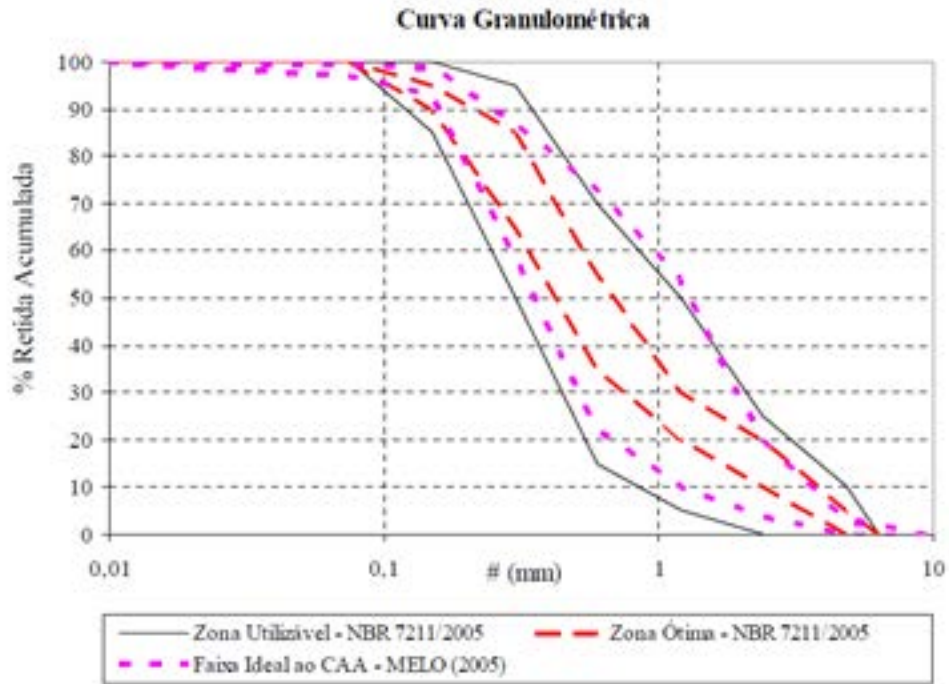
Conforme Neville (1997), a massa específica de um agregado comum é de aproximadamente $2,6\text{g/cm}^3$. Agregados com massa específica inferior podem ser classificados como leves, enquanto que aqueles com massas específicas bem mais altas, geralmente acima de $4,0\text{g/cm}^3$, são considerados como pesados.

Observa-se que concretos com elevada fluidez que empregam agregados leves podem apresentar segregação devido à flutuação das partículas maiores. Estes agregados apresentam uma elevada e rápida absorção, fazendo com que parte da água adicionada não contribua para a fluidez da mistura, podendo gerar ainda uma perda acentuada de consistência (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Melo (2005) apresenta faixas granulométricas ideais para agregados a serem utilizados em CAA. Essas faixas foram definidas a partir de observações, na literatura existente, de curvas de agregados usualmente empregados neste tipo de concreto por diversos autores.

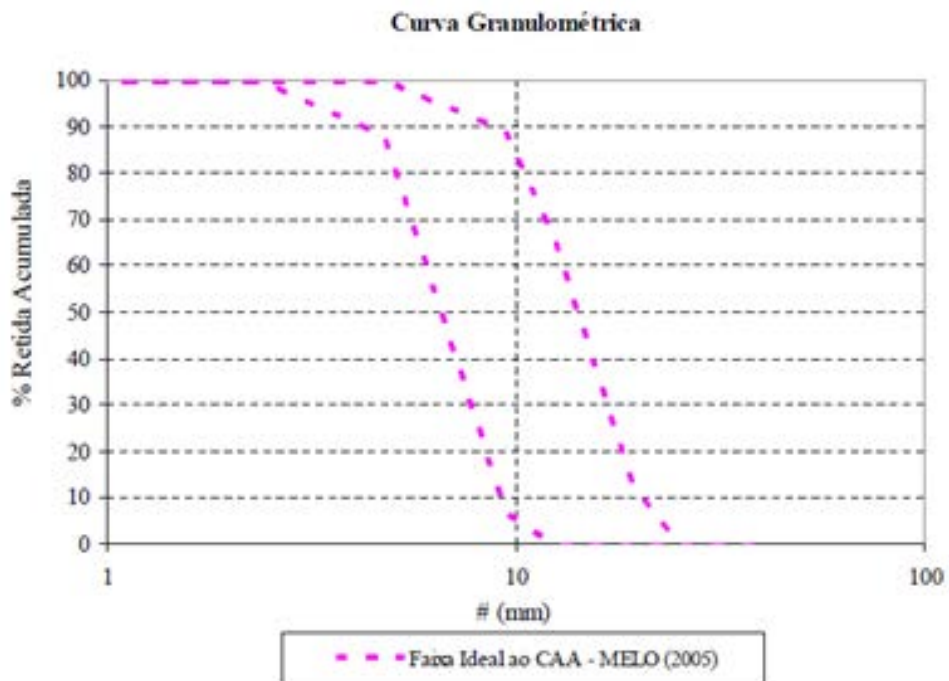
As Figuras 2 e 3 apresentam as faixas granulométricas, ótima e utilizável, dadas pela NBR 7211/2005, juntamente com as faixas ideais ao CAA, propostas no método de dosagem Repette-Melo (MELO, 2005).

Figura 2 – Faixas granulométricas consideradas na literatura, para o agregado miúdo



Fonte: Melo (2005)

Figura 3 – Faixas granulométricas consideradas na literatura, para o agregado graúdo



Fonte: Melo (2005)

- **Água**

A presença de impurezas na água de amassamento pode ser responsável por efeitos negativos na resistência mecânica do concreto. Deste modo, a qualidade da água de amassamento utilizada é de fundamental importância para a produção de concretos de adequado desempenho.

Em geral, diz-se que a água de amassamento deve ser boa para beber. Todavia, algumas águas não adequadas para beber podem apresentar-se de maneira satisfatória para a confecção de concretos, desde que não sejam salobras e possuam pH entre 6,0 e 8,0 (NEVILLE, 1997).

Quanto maior a quantidade de água no concreto, menor é a tensão de escoamento e a viscosidade da mistura. Contudo, elevados teores de água podem comprometer a sua resistência mecânica.

A relação água/finos para o CAA pode apresentar valores diferenciados, de acordo com o método de dosagem adotado. De acordo com Lisboa (2004), a relação água/cimento para CAA's pode apresentar valores em torno de 0,3 a 0,5.

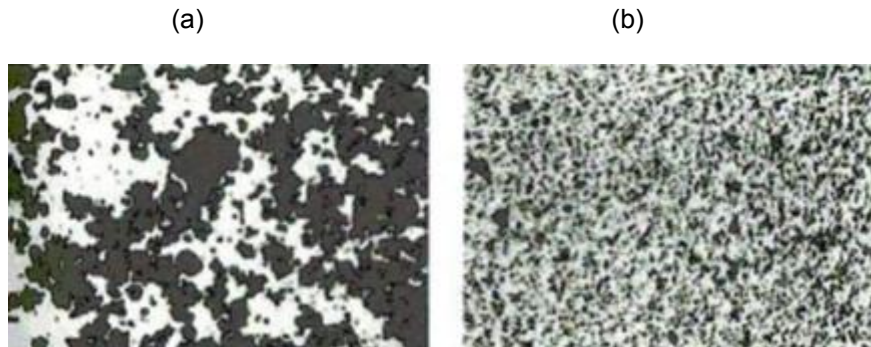
- **Aditivos químicos superplastificantes**

Os aditivos superplastificantes são conhecidos como redutores de água de alta eficiência, por serem capazes de reduzir o teor de água necessário à mistura. Conforme Mehta e Monteiro (1994), os superplastificantes são tensoativos de cadeia longa, massa molecular elevada e um grande número de grupos polares na cadeia do hidrocarboneto.

Estes aditivos permitem a redução da quantidade de água de amassamento necessária ao concreto sem alterar a consistência do material no estado fresco ou, elevar a fluidez do concreto fresco sem a necessidade de aumentar a quantidade de água presente na mistura (NEVILLE, 1997).

O superplastificante promove a dispersão das partículas de cimento na água, acelerando o processo de hidratação e, conseqüentemente, a pega e o endurecimento do concreto. A Figura 4 apresenta a micrografia de partículas de cimento de duas soluções de água e cimento, sem e com aditivo superplastificante, respectivamente.

Figura 4 – Micrografia de partículas de cimento em uma solução de água e cimento (a) – sem aditivo superplastificante (b) – com aditivo superplastificante



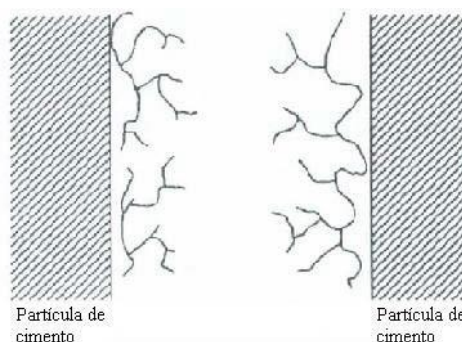
Fonte: Mehta e Monteiro (1994)

Conforme Mehta e Monteiro (1994), os aditivos superplastificantes podem ser de dois tipos: os de 2ª geração, constituídos de polímeros sintéticos sulfonados, e os de 3ª geração, que são os policarboxilatos, capazes de promover um efeito bastante eficiente na repulsão dos grãos de cimento.

De acordo com Nunes (2001), para a produção do CAA, os superplastificantes mais recomendados são os de 3ª geração, os policarboxilatos, por permitirem uma maior redução de água, maiores resistências iniciais e manutenção de fluidez por um tempo prolongado, quando comparados aos aditivos superplastificantes de 2ª geração.

Os policarboxilatos agem por meio de repulsão estérica, não tendo influência na diminuição da viscosidade da pasta. A repulsão estérica é decorrente do arranjo dos átomos, entre duas moléculas de superplastificante adsorvidas em dois grãos de cimento adjacentes (AİTCIN, 2000). Conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Ação dos aditivos superplastificantes- repulsão estérica



Fonte: Aİtcin (2000)

2.2.2 Propriedades do CAA no estado fresco

São as características do CAA no estado fresco que o diferenciam dos concretos convencionais. Estas, de acordo com Banfill (1994), são influenciadas pelos tipos e quantidades dos materiais utilizados na produção do concreto. Conforme Gomes (2002), as propriedades exigidas para o concreto autoadensável no estado fresco são:

- habilidade de preenchimento (preencher a fôrma onde é aplicado e se autocompactar, sem vibração, mantendo-se homogêneo);
- habilidade de passagem (passar através de obstáculos sem apresentar bloqueio de partículas de agregados);
- resistência à segregação ou estabilidade (manter-se homogêneo durante a mistura, o transporte e a aplicação).

- **Trabalhabilidade, Viscosidade e Mobilidade**

Dentre os aspectos e propriedades do concreto no estado fresco distinguem-se a trabalhabilidade, a viscosidade e a mobilidade.

Conforme Neville (1997), a trabalhabilidade das misturas pode ser definida como a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma massa com uma perda mínima de homogeneidade, estando, geralmente, associada às propriedades intrínsecas do material e às ações do processo de produção.

Como patologias conhecidas para o concreto no estado fresco, e relacionadas com a trabalhabilidade, indicando um concreto não trabalhável, têm-se a segregação e a exsudação, podendo-se falar, também, nos bloqueios e na formação de ninhos ou vazios na estrutura, decorrentes de um mau preenchimento.

Quanto à viscosidade, segundo Gomes (1995), ela é a resistência que um fluido apresenta no escoamento, influenciando na variação de sua deformabilidade mediante um esforço aplicado, e a reologia permite que se estabeleçam regimes de comportamento para a variação dessa com o tempo e da variação do esforço aplicado.

Já a mobilidade é apresentada como a resistência à deformação, relacionada à consistência. Para o caso de concretos e argamassas, Neville (1997) considera a influencia das partículas finas contribuindo para o aumento da coesão interna por

formação de pasta, em face da elevada superfície específica e da atividade físico-química, e que as partículas grossas atuam como agentes de oposição em face dos fatores de atrito e de inércia apresentados.

- **Segregação**

De acordo com Neville (1997), a segregação pode ser observada na superfície de uma mistura quando a pasta de cimento tende a apresentar mais de uma fase e, embora seja visível em concretos, não é fácil de ser mensurada, podendo-se utilizar o ensaio de fluidez para sua observação, uma vez que os golpes durante o ensaio provocam a segregação. Deste modo, se a mistura não estiver coesa, as partículas separam-se e a água desloca-se para a borda do círculo, formando as chamadas franjas.

- **Exsudação**

Conforme Neville (1997), o fenômeno da exsudação ocorre quando a água da mistura sobra da hidratação com o cimento e sobe à superfície, em função de ser o material mais leve da composição. Deste modo, a exsudação pode ser considerada como uma forma especial de segregação, em que parte da água da mistura se separa da massa.

2.2.2.1 O papel que os componentes do CAA desempenham na reologia do estado fresco

Segundo AFGC (2000), o superplastificante tem a finalidade de promover as boas condições de desfloculação do cimento, permitindo, desta forma, o melhor contato da água com as partículas de cimento. Por outro lado, o seu teor crescente induz à diminuição da viscosidade do concreto, e, assim, ao favorecimento dos riscos de exsudação e de segregação.

De acordo com Alcantara et al. (2004), os finos adicionados ao concreto também são importantes para que se alcancem as condições reológicas desejadas para o concreto no estado fresco. As partículas podem ter efeito sobre as condições de fluidez tanto pela ação lubrificante como pela ação de superfície, absorvendo parte da água de amassamento, inibindo, assim, o escoamento.

Os agregados miúdos também podem influenciar no escoamento do concreto no estado fresco, tanto pela ação decorrente de sua superfície de exposição como pelo atrito, conforme a natureza de sua superfície. Já os agregados graúdos, segundo Bauer (1994), pelo efeito de massa e de inércia, maximizam as forças de atrito atuantes na mistura.

Sendo assim, enquanto a relação volumétrica dos agregados com relação ao volume total de concreto se situa em torno de 0,68 para os concretos convencionais, para o CAA este valor pode variar entre 0,58 e 0,62 (ALCANTARA et al., 2004). E, ainda conforme Alcantara (2004) e Okamura, 1997 *apud* Gomes (2002), o volume de agregado miúdo com relação ao volume total da fração argamassa, para o CAA, situa-se em torno de 40%.

Deste modo, a dosagem e a determinação dos parâmetros reológicos constituem importante papel na caracterização do concreto autoadensável. A seguir são apresentados os ensaios utilizados neste trabalho para a determinação das propriedades reológicas permitindo, deste modo, a validação do CAA no estado fresco.

2.2.2.2 *Avaliações para o concreto autoadensável no estado fresco*

Para a validação do CAA no estado fresco, neste trabalho, foram utilizados os seguintes ensaios:

- ***Slump-flow test***

O ensaio de espalhamento (*Slump-flow test*) é utilizado para medir a capacidade do concreto autoadensável fluir livremente sem segregar, permitindo, também, a observação visual de possível segregação. Foi padronizado primeiramente no Japão, para ser usado em concretos submersos (TUTIKIAN, 2004).

Por ser um ensaio de pouca complexidade, o *Slump-flow test* pode ser realizado em laboratórios e também em canteiros de obras, podendo ser executado apenas por uma pessoa.

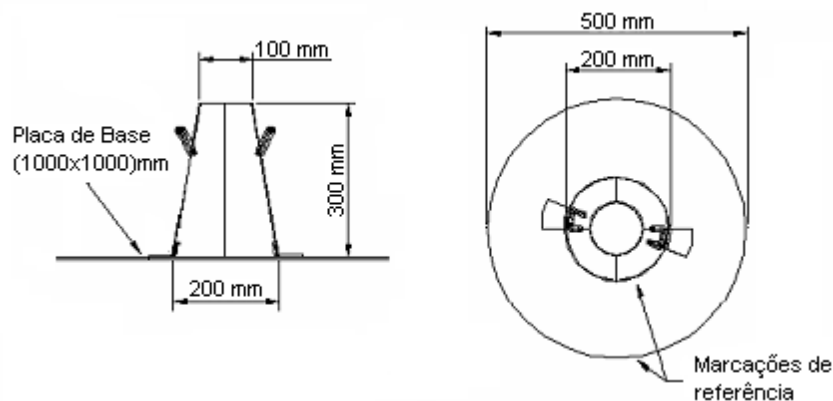
Para sua execução, faz-se necessário a utilização dos seguintes equipamentos:

- base de 100x100 cm, de material que não absorva água e nem provoque atrito com o concreto;
- tronco de cone com material de mesma característica da base, com diâmetro superior a 10cm e inferior a 20cm e altura de 30cm;
- colher do tipo concha;
- espátula;
- trena graduada.

Para a execução do ensaio, primeiramente deve-se umedecer o tronco de cone e a placa para que estes não absorvam água do concreto. São necessários aproximadamente seis litros de concreto para a realização do ensaio e esta amostra deve ser coletada de acordo com a NBR NM 33 (ABNT, 1998^a). O adensamento deve ocorrer exclusivamente pelo peso próprio do concreto, não devendo ser realizado nenhum tipo de compactação. Após a retirada do cone, mede-se o diâmetro do espalhamento do concreto em duas direções perpendiculares. A média destas medidas é o valor do *Slump-flow*. Mede-se também o tempo que o concreto leva para atingir a marca de 50 cm de diâmetro (T_{50}).

Para a validação do CAA, segundo AFGC (2000), o diâmetro mínimo a ser obtido no ensaio é de 60 cm. Durante o ensaio é importante à observação da ocorrência ou não de segregação. A Figura 6 apresenta o equipamento utilizado para a realização do ensaio.

Figura 6 – Ensaio de espalhamento *Slump-flow test*



Fonte: Furnas (2004^a)

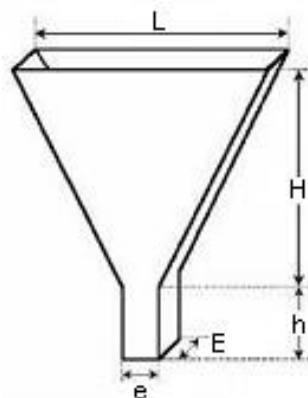
- **V-funnel test**

Este ensaio, assim como o *Slump-flow test*, mede a fluidez do concreto produzido com agregados graúdos de diâmetro máximo de 20 mm.

Para a realização deste ensaio são necessários: um funil em forma de “V”, uma espátula, uma colher tipo concha e um cronômetro. O equipamento deve ser fixado e nivelado, de forma a permanecer fixo durante a execução do ensaio. No início, deve-se umedecer todo o equipamento, de modo que a água do concreto não seja absorvida por este. Enche-se o funil com concreto amostrado de acordo com a NBR NM 33 (ABNT, 1998^a), com adensamento efetuado exclusivamente pela ação do peso próprio. Em seguida, abre-se a porta inferior do funil, permitindo que o concreto escoe livremente. O tempo que o concreto leva para esvaziar completamente o funil é o resultado deste ensaio.

A Figura 7 apresenta o equipamento utilizado para a realização do ensaio.

Figura 7 – Funil em forma de “V”



Fonte: Furnas (2004b)

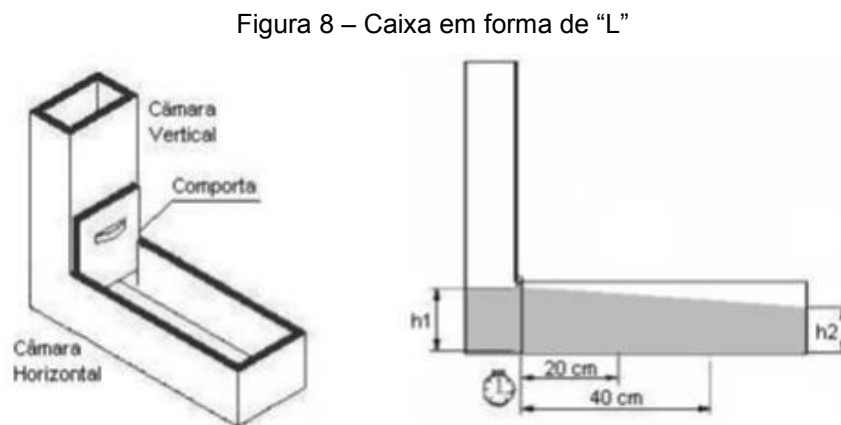
- **L-box test**

O *L-box test* ou ensaio da caixa em “L” mede a fluidez do concreto e, simultaneamente, a sua habilidade de passar por obstáculos permanecendo-se coeso. O equipamento é constituído por uma caixa em forma de “L”, contendo barras de aço que simulam as armaduras presentes em estruturas de concreto armado, criando um obstáculo à passagem do concreto.

Para a execução deste ensaio são necessários: uma caixa em forma de “L” feita com material não absorvente e sem atrito, uma colher do tipo concha, um cronômetro e uma trena graduada. Para preencher a câmara vertical da caixa são

necessários aproximadamente 12 litros de concreto, devendo este, ser amostrado conforme NBR NM 33 (ABNT, 1998^a). A princípio, devem-se umedecer as paredes do equipamento. Depois de preencher a câmara vertical da caixa com concreto, levanta-se a comporta e mede-se o tempo necessário para o concreto alcançar as marcas de 20 e 40 cm. Finalmente, mede-se a altura inicial (h_1) e final (h_2), onde h_2/h_1 é o valor procurado e deve ter valor entre 0,8 e 1,0 (AFGC, 2000).

Observa-se que, quanto mais fluido estiver o concreto, mais rápido chegará às marcas de 20 e 40 cm e mais próximo de 1 estará a relação h_2/h_1 . A Figura 8 apresenta o equipamento utilizado para a realização do ensaio.



Fonte: Furnas (2004c)

▪ Ensaio de segregação por peneiramento

Existem alguns métodos que podem ser utilizados para se estimar a segregação potencial do CAA. Dentre estes, foi utilizado, neste trabalho, o ensaio de peneiramento devido à sua simplicidade de execução. De acordo com AFGC (2000), em resumo, deve-se verificar a quantidade de material que passa pela peneira de abertura de 4,76mm, quando se lança o concreto de uma altura aproximada de 50 cm. A amostra utilizada deve ter estado em repouso por aproximadamente 15 minutos após a sua retirada da betoneira, e deve pesar aproximadamente 5 +/- 0,2 kg.

Uma vez vertido o material na peneira, o tempo de espera para a passagem do material é de 2 minutos, obtendo-se, em seguida, por meio da Equação 2.1, o valor do potencial para segregação (π). Segundo os critérios adotados para o método, se o valor de π (%) estiver limitado em até 15%, o concreto é considerado “estável”, e, entre 15 e 30%, o concreto é considerado como de “estabilidade crítica”, e, por fim, se o valor de π (%) exceder a 30%, o concreto é considerado como “instável”.

$$\pi(\%) = \frac{Mp}{Mt} \cdot 100 \quad [\text{Eq. 2.1}]$$

onde:

π : potencial para segregação;

Mp : massa passante;

Mt : massa total.

2.2.3 Propriedades do CAA no estado endurecido

Desde a inclusão do CAA na indústria da construção civil, suas propriedades no estado fresco são estudadas por pesquisadores em todo o mundo. Todavia, quando o objetivo é a utilização estrutural do concreto, são as propriedades do material no estado endurecido que ganham maior destaque, devendo, portanto, serem analisadas de maneira cuidadosa, assegurando, desta forma, a sua utilização na construção civil (DOMONE, 2006).

Conforme Klug e Holchmacher (2003), a composição da mistura e as propriedades do CAA são bastante diferenciadas dos concretos convencionais, justificando, deste modo, a importância do estudo de suas propriedades no estado endurecido.

Ainda segundo Klug e Holchmacher (2003), os principais motivos para as possíveis diferenças entre as propriedades do CAA e de concretos convencionais no estado endurecido são:

- modificações na composição da mistura, pois a maior quantidade de finos e a menor granulometria dos agregados provocam alterações na composição do

esqueleto granular, podendo, por conseguinte, influenciar nos valores de f_c , f_t e E_c ;

- modificações na microestrutura do concreto, pois a maior quantidade de finos no concreto (cimento e adições) conduz a um menor índice de vazios, proporcionando uma maior densidade. Deste modo, o concreto torna-se mais estável, com maior fluidez e menor porosidade na zona de transição dos agregados;
- modificações no procedimento de moldagem, pois o processo de moldagem dos corpos de prova (maneira de preenchimento das formas e adensamento do concreto) é diferenciado para o caso do CAA;
- modificações na quantidade de pasta de cimento. As cargas dos eventuais carregamentos são transferidas para a matriz de cimento ou para a zona de transição agregados-pasta de cimento, que se apresenta, normalmente, em maiores proporções nos CAA's, causando, assim, um aumento da resistência à tração do concreto (f_t).

Algumas propriedades importantes do concreto no estado endurecido são bastante analisadas e utilizadas como referência de qualidade do concreto, tais como: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade, apresentadas de forma detalhada a seguir.

2.2.3.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma das principais e mais significativas propriedades do concreto, a ponto de servir de referência para sua classificação.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a resistência à compressão é a propriedade mais relevante do concreto no estado endurecido, sendo aceita universalmente, na idade de 28 dias, como um índice geral da resistência do concreto.

Conforme Klug e Holchmacher (2003), a composição da mistura, as relações água/cimento, os aditivos utilizados, o tipo de cimento, dentre outros, são parâmetros que influenciam na resistência à compressão do concreto. Sendo que, a relação água/cimento de um concreto é a principal responsável pela porosidade da matriz de cimento e da zona de transição entre matriz e agregado graúdo, que, por

sua vez, exerce influência direta na resistência mecânica do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Klug e Holchmacher (2003) afirmam que para um mesmo consumo de cimento e relação água/cimento, os valores encontrados de resistência à compressão são significativamente maiores para o CAA (cerca de 40% maiores), quando comparados ao concreto convencional.

O Ensaio para a determinação da resistência à compressão do concreto é prescrito pela NBR 5739 (ABNT, 2007). Os corpos de prova cilíndricos de concreto (10 x 20 cm ou 15 x 30 cm), depois da moldagem e desforma, devem ser submetidos ao processo de cura em câmara úmida até a idade de rompimento. Após o capeamento ou devida regularização os corpos de prova são submetidos ao ensaio. A resistência à compressão axial é obtida utilizando-se a Equação 2.2.

$$f_c = \frac{F}{A} \quad [\text{Eq. 2.2}]$$

onde:

f_c – resistência à compressão axial (MPa);

F – força máxima obtida no ensaio (N);

A – área da seção transversal do corpo de prova (mm²).

2.2.3.2 Resistência à tração

Para Leite (2007), o comportamento observado em CAA's, em termos da relação entre resistência à tração e resistência à compressão, pode ser comparado com o comportamento apresentado por concretos convencionais vibrados. Porém, de acordo com Holschemacher e Klug (2002), a relação entre resistência à tração e resistência à compressão apresenta-se com maiores valores para o CAA, devido à microestrutura mais homogênea e menor porosidade na interface entre matriz e agregado graúdo.

Os parâmetros que influenciam nas características da microestrutura da matriz de cimento e da zona de transição dos agregados com a pasta de cimento, são fatores decisivos no valor da resistência à tração do concreto. Para o CAA de alta resistência, de acordo com Gomes (2002), a resistência à tração situa-se em torno de 7 a 10 % da resistência à compressão. Já para concretos convencionais,

mesmo se considerando uma maior heterogeneidade de sua estrutura, a resistência à tração equivale a aproximadamente de 10 a 15% da resistência à compressão (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

O ensaio para a determinação da resistência à tração por compressão diametral do concreto é normatizado pela NBR 7222 (ABNT, 2011) e é um método indireto de obtenção da resistência à tração. Os corpos de prova são moldados e rompidos no sentido longitudinal. A Resistência à Tração por Compressão Diametral é obtida utilizando-se a Equação 2.3.

$$f_{t,D} = \frac{2F}{\pi dL} \quad [\text{Eq. 2.3}]$$

onde:

$f_{t,D}$ – resistência à tração por compressão diametral em MPa;

F – força máxima obtida no ensaio (N);

d – diâmetro do corpo de prova (mm);

L – altura do corpo de prova (mm).

2.2.3.3 *Módulo de elasticidade*

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o módulo de elasticidade (E_c) é definido como a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea apresentada pelo concreto, no estado endurecido, sendo regido pelas características dos materiais constituintes e pela dosagem da mistura.

De acordo com Proske e Graubner (2005), quanto maior a quantidade de agregado de alta rigidez presente no concreto, maior será o módulo de elasticidade apresentado por este. Da mesma forma, a diminuição do volume de agregado, e consequente aumento do volume de pasta da mistura, proporcionam uma diminuição no valor do módulo de elasticidade apresentado.

Dessa forma, tem-se que o CAA, normalmente, apresenta menor módulo de elasticidade quando comparado a concretos convencionais, pois apresenta, em geral, maior quantidade de pasta, necessária à fluidez.

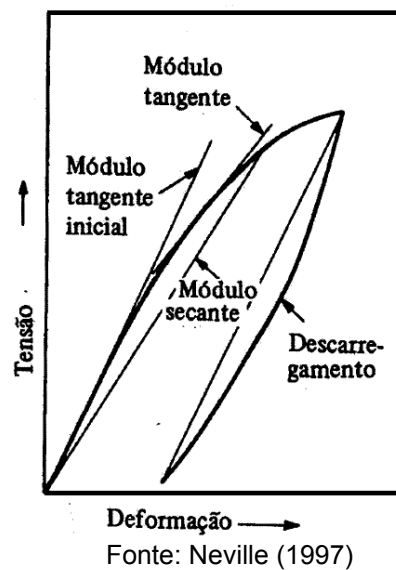
O módulo de elasticidade pode ser determinado de maneira estática ou dinâmica, sendo, no primeiro caso, a declividade da curva σ (tensão) x ϵ (deformação) obtida para um concreto submetido a carregamento uniaxial estático.

Já o módulo de elasticidade dinâmico é obtido através da aplicação de carregamentos dinâmicos que resultam em deformações instantâneas muito pequenas, fornecendo resultados mais precisos e maiores do que os obtidos pelo método estático (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Tendo em vista que tal curva é não linear, existem três métodos para o cálculo de E_c , a saber: módulo tangente (declividade de uma reta tangente à curva em qualquer ponto da mesma); módulo secante (declividade de uma reta traçada da origem a um ponto da curva correspondendo a 40 % da tensão da carga de ruptura) e módulo cordal (declividade de uma reta traçada entre dois pontos da curva $\sigma \times \epsilon$).

A Figura 9 apresenta o diagrama tensão-deformação e os respectivos módulos de elasticidade para o concreto.

Figura 9 – Diagrama tensão-deformação e módulos de elasticidade para o concreto



O ensaio para a determinação do módulo de elasticidade de concretos é prescrito pela NBR 8522 (ABNT, 2008), sendo considerado, nesta norma, o módulo de deformação tangente inicial cordal a 30% de f_{ck} , ou outra tensão especificada em projeto. Seu valor é obtido através da Equação 2.4.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\epsilon_b - \epsilon_a} \times 10^6 \quad [\text{Eq. 2.4}]$$

onde:

E_{ci} – módulo de elasticidade (Gpa);

σ_b – tensão maior, $0,3 f_c$ (MPa);

σ_a – tensão básica, 0,5 MPa;

ε_b – deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob tensão maior;

ε_a – deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob tensão básica.

2.2.3.4 *Retração e fluência*

- **Retração**

A retração está associada a deformações da pasta de cimento (principalmente, devido à perda de água), argamassas e concretos, sem que haja qualquer tipo de carregamento, reações químicas deletérias e expansivas ou variações térmicas.

Conforme Diniz et al. (2011), essas deformações são provenientes da ação conjunta das retrações plástica, autógena, hidráulica ou por secagem e por carbonatação.

A retração plástica deve-se à perda de água na superfície do concreto ainda no estado plástico (NEVILLE, 1997). Caso não haja uma cura adequada e a velocidade de evaporação da água da área exposta do concreto for maior do que a taxa de água que sobe à superfície por efeito de exsudação, ocorrerá a fissuração do concreto.

A retração devido à contração química ou deformação autógena ocorre em função da reação química entre o cimento e a água que se dá com redução de volume, sendo um fenômeno difícil de ser controlado (NEVILLE, 1997).

A retração por secagem ou hidráulica está associada à perda de umidade para o meio ambiente, o que a torna uma das principais causas de fissuração. Sua ocorrência pode afetar a durabilidade do concreto.

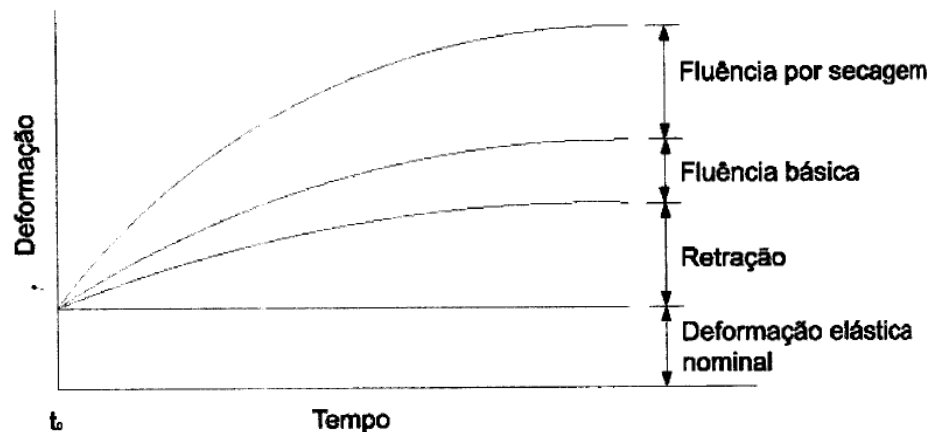
Por fim, segundo Neville (1997), a retração por carbonatação é produto de uma reação química entre o CO_2 da atmosfera e os compostos hidratados do cimento, principalmente o Ca(OH)_2 . A reação de carbonatação gera água que ao evaporar-se aumenta a retração de secagem.

▪ Fluência

Neville (1997) define fluência (básica + por secagem) como o aumento de deformação sob tensão constante ou, caso a deformação for mantida constante, a fluência se dá por uma redução progressiva de tensão com o tempo, nesse caso, denominada relaxação.

Um material apresenta fluência se, sob tensão constante, sua deformação aumenta em função do tempo, conforme apresentado na Figura 10 a seguir.

Figura 10 – Deformação em função do tempo para concretos submetidos à carregamento constante



Fonte: Diniz et al (2011)

2.3 Cinza de casca de arroz

Dentre os materiais pozolânicos, a cinza de casca de arroz (CCA) vem sendo cada vez mais estudada nos últimos anos. Sua utilização como finos na produção de concreto de elevado desempenho tem sido o objeto de pesquisas com resultados promissores, como confirmam os trabalhos de Alcantara e Santos (2012), Barbosa (2007), Silva (2004) e Silva (2009). A CCA é obtida por meio do processo de queima e moagem da casca de arroz.

A casca de arroz é uma capa lenhosa do grão de arroz, dura, com alto teor de sílica, composta de aproximadamente 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra (MEHTA, 1992).

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2010) o Brasil produziu cerca de 11,2 milhões de toneladas de arroz em casca no ano de 2006, o que equivale a cerca de 2,2 milhões de toneladas de casca de arroz, considerando-se que cascas de arroz representam cerca de 20% do peso do grão.

Esta quantidade disponível de material vai ao encontro com o caráter promissor do material na utilização para a produção de concretos.

De acordo com Cincotto e Kaupatez (1984), a cinza de casca de arroz é um material dotado de atividade pozolânica. Silva (2004), afirma que a cinza da casca de arroz possui um elevado teor de sílica, entre 74% e 97%, e que a morfologia desta está relacionada ao tipo de queima. De acordo com Cook (1986), a temperatura alcançada na queima da casca de arroz pode determinar o aparecimento da sílica no estado amorfo (mais reativa) ou cristalino. A casca de arroz que é queimada sem controle e em alta temperatura resulta na cinza cristalina, já do processo de queima controlado, obtém-se a cinza de casca de arroz amorfa (SILVA, 2004).

Com relação à utilização de CCA como finos na fabricação de CAA, podem-se citar os estudos apresentados em Alcântara e Watanabe (2008), e em Alcântara e Lima (2009). Para os dois casos os valores no estado fresco foram atendidos, avaliando-se os casos de espalhamento (*Slump-flow test*) e do potencial de segregação. Os resultados dos ensaios mecânicos se apresentaram muito promissores, em especial para 28 dias de cura, onde estes alcançaram valores da ordem de 35 MPa.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Materiais

Neste trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

- **Cimento Portland**

O cimento adotado na pesquisa foi o cimento do tipo Portland Comum CP II-Z-32. A escolha se deu em decorrência deste ser bastante difundido no mercado na região Noroeste do estado de São Paulo.

O CP II-Z-32 é composto parcialmente por pozolana e possui diversas possibilidades de aplicação, sendo este, um dos mais utilizados no Brasil. Sua caracterização físico-química é apresentada na Tabela 1, atendendo os requisitos especificados pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT):

- Determinação da finura pelo Método de Blaine- NBR NM 76 (ABNT, 1998).
- Determinação do tempo de pega- NBR NM 65 (ABNT, 2003).
- Massa específica- NBR NM 23 (ABNT, 2001).
- Resistência à compressão do cimento- NBR 7215 (ABNT, 1997).
- Análise química- NBR 11578 (ABNT, 1997).

Tabela 1 – Caracterização do cimento CP II Z 32

CP II-Z-32	Especificações ABNT	Especificações ABNT
ENSAIOS FÍSICOS		
Blaine (cm ² /g)	≥2600	NBR NM 76
Tempo de início de pega (h:min)	≥1	NBR NM 65
Tempo de fim de pega (h:min)	≤10	NBR NM 65
Finura na peneira # 200 (%)	≤12,0	NBR 11579
Finura na peneira # 325 (%)	-	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	≤5,0	NBR 11582
Consistência normal (%)	-	NBR NM 43
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	-	NBR 7215
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	≥10,0	NBR 7215
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	≥20,0	NBR 7215
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	≥32,0	NBR 7215
ENSAIOS QUÍMICOS		
Perda ao fogo (%)	≤6,5	NBR 5743
Resíduo insolúvel (%)	≤16,0	NBR 5744
Trióxido de enxofre - SO ₃ (%)	≤4,0	NBR 5745
Óxido de cálcio livre - CaO Livre (%)	-	NBR 7227
Óxido de magnésio - MgO (%)	≤6,5	NBR 9203
Óxido de alumínio - Al ₂ O ₃ (%)	-	NBR 9203
Óxido de silício - SiO ₂ (%)	-	NBR 9203
Óxido de ferro - Fe ₂ O ₃ (%)	-	NBR 9203
Óxido de cálcio - CaO (%)	-	NBR 9203
Equivalente alcalino (%)	-	-

Fonte: ABCP (2002)

▪ Agregado miúdo

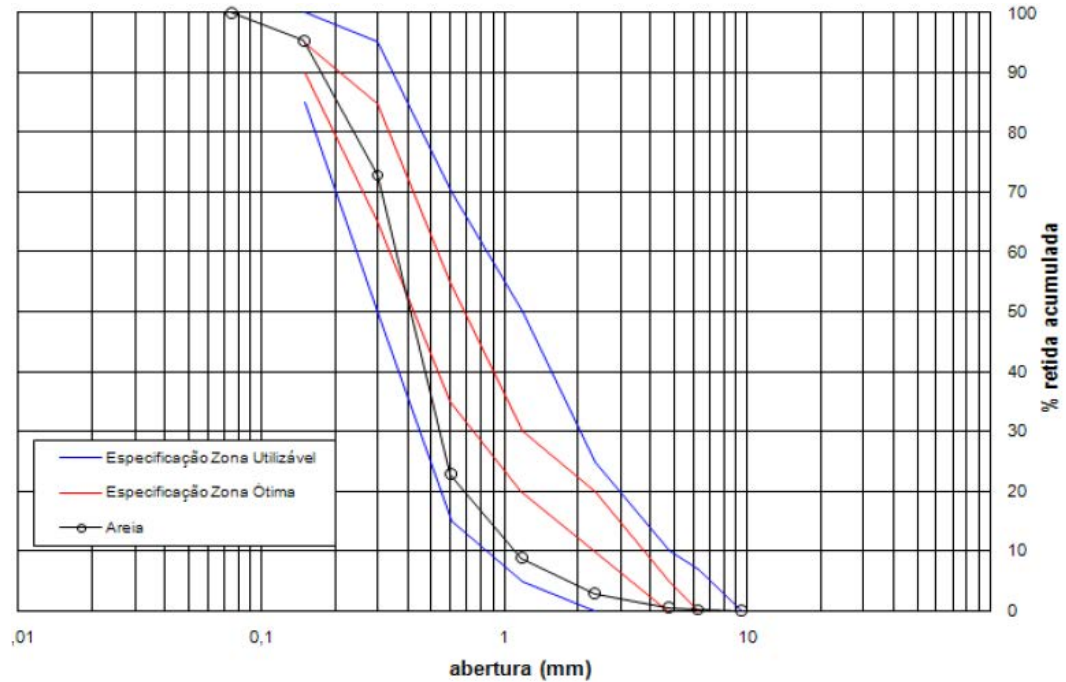
Como agregado miúdo, utilizou-se a areia natural de origem sedimentar. Sua caracterização ocorreu em conformidade com as especificações das respectivas normas vigentes: Agregados- Determinação da composição granulométrica- NBR NM 248 (ABNT, 2003); Determinação da absorção de água- NBR NM 30 (ABNT, 2001); Determinação da massa específica e massa específica aparente- NBR NM 52 (ABNT, 2009); Determinação do teor de material pulverulento- NBR NM 46 (ABNT, 2003).

A Tabela 2 apresenta a caracterização física do agregado miúdo em questão.

Tabela 2 – Caracterização dos agregados miúdos

Caracterização – Agregado miúdo					
ϕ máximo (mm)	módulo de finura	ρ (g/cm ³)	ρ absoluta (g/cm ³)	absorção (%)	material 48ulv. (%)
2,36	2,03	2,590	2,646	0,34	0,48

Figura 11 – Curva granulométrica para o agregado miúdo



Fonte: Próprio Autor

▪ Agregado graúdo

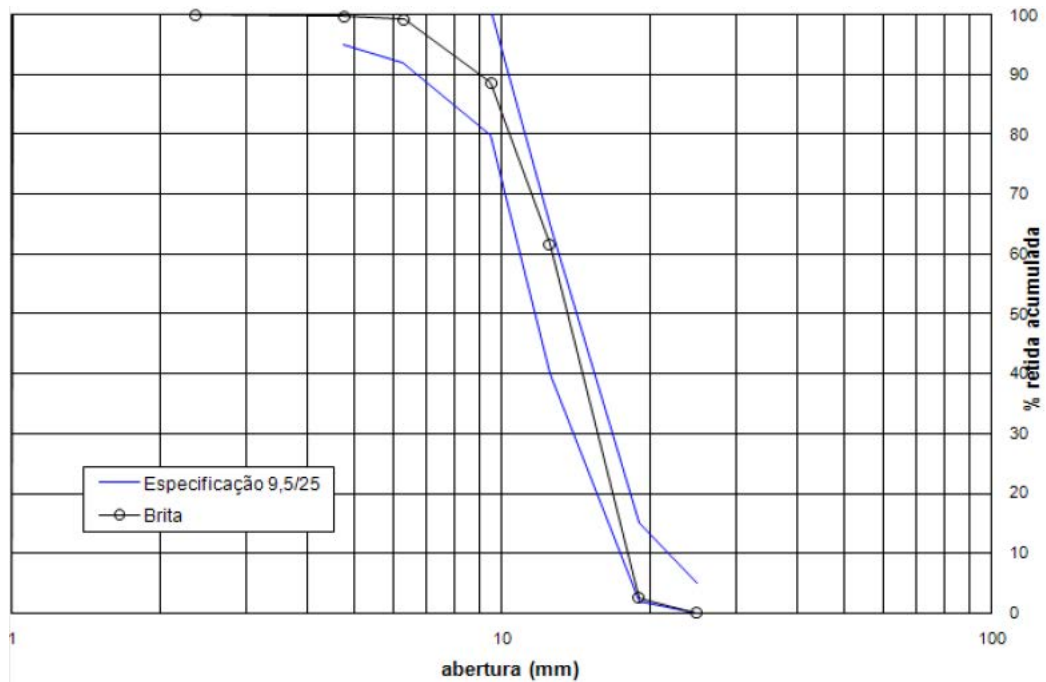
O agregado graúdo utilizado foi o material britado de origem basáltica, conhecido comercialmente como brita 1. Sua caracterização encontra-se em conformidade com as especificações das respectivas normas: Agregados- Determinação da composição granulométrica- NBR NM 248 (ABNT, 2003); Agregado graúdo- Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água- NBR NM 53 (ABNT, 2009); Determinação do teor de material pulverulento- NBR NM 46 (ABNT, 2003).

Suas características físicas estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização dos agregados graúdos

Caracterização - Agregado graúdo					
ϕ máximo (mm)	módulo de finura	ρ (g/cm ³)	ρ absoluta (g/cm ³)	absorção (%)	material pulv (%)
19	6,87	2,651	2,883	0,28	0,36

Figura 12 - Curva granulométrica para o agregado graúdo



Fonte: Próprio Autor

▪ Finos

Como finos, utilizou-se a cinza de casca de arroz moída industrial. Sua caracterização pode ser verificada na Tabela 4, conforme informações presentes nos catálogos do fabricante.

Tabela 4 - Caracterização física e química da cinza de casca de arroz

Caracterização - CCA	
Teor de sílica	>85%
Superfície específica	20.000 m ² /kg
Formato	Esférico
Massa específica	2.200 kg/m ³

▪ Aditivo químico

Utilizou-se aditivo superplastificante de ação estérica e eletrostática. A ação dispersante promovida por estes aditivos de origem orgânica elimina a necessidade de adicionar água para produzir suficiente trabalhabilidade e para desflocular as aglomerações de partículas de cimento (AİTCIN, 2000).

- **Água**

Foi utilizada água potável, proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Ilha Solteira-SP.

3.2 Método

Para a apreciação das propriedades mecânicas do CAA com adição de cinza de casca de arroz, tomaram-se como referência os valores alcançados para o caso do concreto vibrado fabricado com os mesmos materiais componentes, isto é, cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, excetuando-se as cinzas de casca de arroz e o superplastificante.

Como estratégia para a metodologia estabeleceu-se cinco composições de concreto vibrado, de modo que, destas, fosse possível a identificação de dois grupos:

- O primeiro, fixando-se o valor da relação água/cimento em massa e variando-se a proporção entre o agregado e o peso total do concreto. Desta maneira, as condições da pasta se mantêm constantes variando-se a microestrutura da mistura.
- E o segundo grupo, onde se manteve fixado o valor da relação agregado/peso total do concreto e variou-se a relação água/cimento. Desta forma, mantém-se a estrutura interna constante e varia-se a natureza da pasta.

Os objetivos de tais procedimentos foram de verificar a possível influência dos agregados e da pasta endurecida do concreto em termos de suas contrapartidas.

Estabeleceu-se três composições de CAA onde se variou a relação água/cimento e a proporção de agregado com relação ao peso do concreto, mantendo-se constante a relação cinza/cimento. Este valor foi fixado em 0,35, conforme orientações apresentadas em AFGC (2000) e em Alcantara e Lima (2009).

Cumprir observar que a proposta para as composições tomou em consideração os aspectos tecnológicos referentes ao concreto vibrado e ao concreto autoadensável, de modo a se estabelecer os parâmetros de dosagem. Neste sentido, para o caso das composições de CAA, a diminuição da relação água/cimento implicou na necessidade de diminuir a porcentagem total de agregados em mistura.

De maneira geral, buscou-se adequar as composições de modo que: a relação “volume total de agregados/volume de concreto” variasse entre 0,58 e 0,62; a relação “agregado miúdo/agregado graúdo”, em peso, se situasse próximo de 1; e ainda, que o volume de agregado miúdo com relação ao volume total da fração argamassa se encontrasse em torno de 40 %, de acordo com as recomendações de AFGC (2000).

As composições para os respectivos concretos são apresentadas a seguir juntamente com os seus parâmetros de dosagem.

Tabela 5 - Composição em kg/m³ de concreto para o concreto vibrado

Composição do Concreto Vibrado (kg/m ³)				
traços	cimento (kg)	agrm (kg)	agrgr (kg)	água (kg)
V1	436,62	785,91	978,02	218,31
V2	376,51	847,16	1054,24	188,26
V3	522,4	705,25	861,97	261,2
V4	466,49	828,81	1009,97	190,22
V5	407,25	765,63	952,97	244,35

Tabela 6 - Composição em l/m³ de concreto para o concreto vibrado

Composição do Concreto Vibrado (l/m ³)					
traços	cimento (l)	agrm (l)	agrgr (l)	água (l)	total (l)
V1	143,15	296,57	341,97	218,31	1000
V2	123,45	319,68	368,61	188,26	1000
V3	171,28	266,13	301,39	261,20	1000
V4	151,57	309,95	349,97	188,51	1000
V5	133,53	288,92	333,21	244,35	1000

Tabela 7 - Parâmetros de dosagem (em massa) para o concreto vibrado

Concreto Vibrado					
Parâmetros de dosagem - Relação em massa					
traços	pasta/total	arg/total	agrgr/total	a/c	agregado/cim
V1	0,27	0,6	0,4	0,5	4,04
V2	0,23	0,57	0,43	0,5	5,05
V3	0,33	0,7	0,37	0,5	3,0
V4	0,26	0,6	0,4	0,41	3,94
V5	0,27	0,6	0,4	0,6	4,22

Tabela 8 - Parâmetros de dosagem (em volume) para o concreto vibrado

Concreto Vibrado			
Parâmetros de dosagem - Relação em volume			
traços	pasta/total	arg/total	agrgr/total
V1	0,36	0,66	0,34
V2	0,31	0,63	0,37
V3	0,43	0,7	0,3
V4	0,33	0,65	0,35
V5	0,38	0,67	0,33

Tabela 9 - Composição em kg/m³ de concreto para o concreto autoadensável

Concreto Autoadensável						
Composição em kg/m ³ de concreto						
traços	cimento (kg)	CCA (kg)	agrm (kg)	agrgr (kg)	água (kg)	sup (kg)
CAA1	328,35	115,82	821,04	844,42	232,28	2,34
CAA2	358,09	125,19	816,9	844,55	219,87	2,25
CAA3	408,85	143,00	726,53	856,74	224,26	2,96

Tabela 10 - Composição em l/m³ de concreto para o concreto autoadensável

Concreto Autoadensável							
Composição em l/m ³ de concreto							
traços	cimento (l)	cca (l)	agrm (l)	agrgr (l)	água (l)	sup (l)	total (l)
CAA1	107,66	52,65	309,83	295,25	232,28	2,34	1000,00
CAA2	117,41	56,90	308,27	295,30	219,87	2,25	1000,00
CAA3	134,05	65,00	274,16	299,56	224,26	2,96	1000,00

Tabela 11 - Parâmetros de dosagem (em massa) para o concreto autoadensável

Concreto Autoadensável										
Parâmetros de dosagem - Relação em massa										
traços	pasta/total	arg/total	agrgr/total	a/c	a/cim+CCA	CCA/cim	sup/cim	agr/cim	agr/cim+CCA	arg/agrgr
CAA1	0,29	0,64	0,36	0,71	0,52	0,35	0,007	5,07	3,75	1,78
CAA2	0,30	0,64	0,36	0,61	0,45	0,35	0,006	4,64	3,44	1,80
CAA3	0,33	0,64	0,36	0,55	0,41	0,35	0,007	3,87	2,87	1,76

Tabela 12 - Parâmetros de dosagem (em volume) para o concreto autoadensável

Concreto Autoadensável			
Parâmetros de dosagem - Relação em volume			
traços	pasta/total	arg/total	agrgr/total
CAA1	0,39	0,70	0,30
CAA2	0,40	0,70	0,30
CAA3	0,41	0,68	0,30

3.2.1 Ensaios realizados

3.2.1.1 *Ensaios no estado fresco para o concreto vibrado*

Para o concreto vibrado no estado fresco, foram realizados os ensaios de abatimento de tronco de cone, conforme NBR 7223 (1992) e de avaliação de massa específica aparente.

Após a realização de todos os ensaios no estado fresco, os concretos foram moldados em corpos de prova (10x20cm); desformados, após o período de secagem de 24 horas, e acondicionados em câmara úmida durante o período de cura. Vide Figura 13 a seguir.

Figura 13 - Acondicionamento dos corpos de prova em câmara úmida



Fonte: Próprio Autor

3.2.1.2 *Ensaios no estado fresco para o CAA*

Os ensaios no estado fresco, para a validação das propriedades do concreto autoadensável, foram executados nos primeiros 15 minutos após a mistura.

- ***Slump-flow test***

Como ensaio para a avaliação das condições do escoamento livre foi realizado, segundo as prescrições de AFGC (2000), o ensaio de espalhamento *slump flow test*.

Verificaram-se os diâmetros de espalhamento do concreto, e a diferença entre eles, conforme duas direções perpendiculares. Foi levado, também, em

consideração: a forma da superfície devido ao espalhamento do concreto, a homogeneidade e a presença de possíveis franjas de exsudação, sendo que, o diâmetro mínimo para o escoamento do concreto era de 60 cm, conforme AFGC (2000).

- ***L-box test***

Como escoamento confinado foi realizado o ensaio *L-box test*, também conforme AFGC (2000).

A princípio, as paredes da caixa em “L” foram umedecidas com água. Em seguida, o concreto foi vertido, fluindo da câmara superior (vertical) para a câmara inferior (horizontal) da caixa em “L”, medindo-se, neste instante, o tempo necessário para que o concreto atingisse a marca de 40 cm. Por fim, foi analisado o preenchimento do concreto na caixa, onde a relação h_2/h_1 não deveria ser inferior a 0,8 (AFGC, 2000).

- **Ensaio de segregação por peneiramento**

O ensaio de segregação foi efetuado conforme o ensaio de peneiramento, devido à simplicidade para sua execução. Este ensaio foi realizado de acordo com o que é proposto em AFGC (2000). Em resumo, verificou-se a quantidade de material passante pela peneira de abertura de 4,76 mm, tendo-se lançado o concreto de uma altura aproximada de 50 cm. A amostra utilizada permaneceu em repouso por aproximadamente 15 minutos após a sua retirada da betoneira, pesando aproximadamente 5 +/- 0,2 kg.

Uma vez vertido o material na peneira, o tempo de espera para a passagem do material foi de 2 minutos, obtendo-se, em seguida, o valor do potencial para segregação (π). Lembrando-se que, segundo os critérios adotados para o método, se o valor de $\pi(\%)$ estiver limitado em até 15%, o concreto é considerado “estável”, e, entre 15 e 30%, o concreto é considerado como de “estabilidade crítica”, e, por fim, se o valor de $\pi(\%)$ exceder a 30%, o concreto é considerado como “instável”.

- **Ensaio de massa específica aparente**

Com a finalidade de se verificar a constância das características das composições adotadas e da homogeneidade do concreto fresco, foi avaliada, também, a massa específica aparente.

O ensaio de Massa Específica Aparente foi realizado pesando-se o concreto vertido sobre um molde cilíndrico de PVC, com volume conhecido. O adensamento, do concreto no molde, ocorreu sob a ação exclusiva do seu peso próprio, sem qualquer tipo de vibração ou compactação.

3.2.1.3 *Ensaaios no estado endurecido*

Além dos ensaios realizados no estado fresco do concreto, objetivando a validação das propriedades do CAA, foram realizados ensaios no estado endurecido para 7 e 28 dias de cura.

Para avaliar os valores de resistência mecânica alcançados pelas dosagens, foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial e diametral, conforme NBR 5739 (2007) e NBR 7222 (2011), respectivamente, e de módulo de elasticidade, conforme NBR 8522 (2008), para as idades de 7 e 28 dias de cura.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados para o concreto no estado fresco

4.1.1 Concreto vibrado

A Tabela 13 apresenta os valores alcançados para os casos dos concretos vibrados com relação aos ensaios de abatimento de tronco de cone e de avaliação da massa específica aparente.

Tabela 13 - Valores de abatimento e de massa específica aparente para o concreto vibrado

Concreto Vibrado		
traços	abatimento (cm)	ρ aparente (g/cm ³)
V1	20	2,44
V2	3	2,43
V3	28,3	2,49
V4	4,7	2,53
V5	27,5	2,47

4.1.2 Concreto autoadensável

A Tabela 14 apresenta os valores alcançados para os casos dos concretos autoadensáveis com relação aos ensaios de espalhamento, *Slump-flow*.

Tabela 14 - Valores do ensaio de espalhamento slump-flow para o concreto autoadensável

Concreto Autoadensável - Slump-Flow			
traços	ϕ 1 (cm)	ϕ 2 (cm)	ϕ médio (cm)
CAA1	60	61	60,5
CAA2	73	71	72
CAA3	66	67	66,5

A Tabela 15 apresenta os valores alcançados para os casos dos concretos autoadensáveis com relação aos ensaios de escoamento confinado, *V-funnel*.

Tabela 15 - Valores do ensaio de escoamento confinado V-funnel para o concreto autoadensável

Concreto Autoadensável - V-Funnel			
traços	massa (kg)	tempo (s)	vazão (kg/s)
CAA1	20,3	4,85	4,19
CAA2	20,55	6,6	3,11
CAA3	20,06	7,03	2,85

A Tabela 16 apresenta os valores alcançados para os casos dos concretos autoadensáveis com relação ao ensaio de massa específica aparente.

Tabela 16 - Valores de massa específica aparente para o concreto autoadensável

Concreto Autoadensável - aparente			
traços	massa (kg)	volume (l)	$\rho_{\text{aparente}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$
CAA1	1,77	0,75	2,36
CAA2	1,72	0,75	2,29
CAA3	1,87	0,75	2,49

A Tabela 17 apresenta os valores alcançados para os casos dos concretos autoadensáveis com relação ao ensaio da caixa em L.

Tabela 17 - Valores do ensaio da caixa em L para o concreto autoadensável

Concreto Autoadensável - Caixa em L			
traços	h1 (cm)	h2 (cm)	h2/h1
CAA1	9	7	0,78
CAA2	9	7	0,78
CAA3	9	7	0,78

A Tabela 18 apresenta os valores alcançados para os casos dos concretos autoadensáveis com relação ao ensaio de segregação.

Tabela 18 - Valores do ensaio de segregação para o concreto autoadensável

Concreto Autoadensável - Segregação			
traços	massa total (kg)	massa passante (kg)	$\pi \text{ (%)}$
CAA1	5,00	0	0
CAA2	4,90	0	0
CAA3	5,05	0	0

- **Resultados qualitativos**

A Figura 14 apresenta a ilustração das condições da superfície de espalhamento observadas nos ensaios de espalhamento, *Slump-flow*.

Figura 14 - Ensaio de espalhamento Slump-Flow para o concreto autoadensável



Fonte: Próprio Autor

A Figura 15 procura apresentar as condições de escoamento confinado alcançadas através do ensaio da caixa em L.

Figura 15 - Ensaio da caixa em L



Fonte: Próprio Autor

4.2 Resultados para o concreto no estado endurecido

4.2.1 Concreto vibrado

A Tabela 19 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para os casos de concreto vibrado referentes aos 7 dias de idade.

Tabela 19 - Valores de resistência à compressão axial para 7 dias para o concreto vibrado

Concreto Vibrado - Resistência à compressão axial (7 dias)						
traços	fc (MPa)			média	σ	cv (%)
V1	18,27	23,03	23,32	21,54	2,83	13,16
V2	20,04	18,37	17,82	18,74	1,16	6,17
V3	21,58	23,25	23,15	22,66	0,94	4,13
V4	28,83	22,77	26,53	26,04	3,06	11,75
V5	16,39	17,38	16,55	16,77	0,53	3,17

A Tabela 20 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para os casos de concreto vibrado, referentes aos 28 dias de idade.

Tabela 20 - Valores de resistência à compressão axial para 28 dias para o concreto vibrado

Concreto Vibrado - Resistência à compressão (28 dias)						
traços	fc (MPa)			média	σ	cv (%)
V1	25,35	25,39	27,45	26,06	1,2	4,61
V2	18,94	27,38	22,68	23,00	4,23	18,39
V3	27,33	27,04	22,68	25,68	2,6	10,14
V4	28,79	28,18	29,03	28,67	0,44	1,53
V5	21,55	22,14	21,74	21,81	0,3	1,38

A Tabela 21 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral para os casos de concreto vibrado referentes aos 7 dias de idade.

Tabela 21 - Valores de resistência à tração por compressão diametral para 7 dias para o concreto vibrado

Concreto Vibrado - Resistência à tração (7 dias)					
traços	ft (MPa)		média	σ	cv (%)
V1	2,85	3,25	3,05	0,29	9,39
V2	3,18	2,78	2,98	0,29	9,61
V3	3,29	2,72	3,00	0,40	13,29
V4	2,95	3,08	3,01	0,09	3,17
V5	2,42	2,36	2,39	0,04	1,70

A Tabela 22 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral para os casos de concreto vibrado, referentes aos 28 dias de idade.

Tabela 22 - Valores de resistência à tração por compressão diametral para 28 dias para o concreto vibrado

Concreto Vibrado - Resistência à tração (28 dias)					
traços	ft (MPa)		média	σ	cv (%)
V1	4,17	3,72	3,94	0,31	7,98
V2	3,22	3,26	3,24	0,03	0,87
V3	3,71	3,47	3,59	0,17	4,77
V4	4,28	3,36	3,82	0,65	16,93
V5	3,21	2,91	3,06	0,21	6,82

A Tabela 23 apresenta os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade para os casos de concreto vibrado referentes aos 7 dias de idade.

Tabela 23 - Valores de módulo de elasticidade para 7 dias para o concreto vibrado

Concreto Vibrado - Módulo de Elasticidade (7 dias)						
traços	Ec (GPa)			média	σ	cv (%)
V1	32,496	28,446	28,673	29,872	2,275	7,617
V2	27,586	29,093	27,747	28,142	0,828	2,941
V3	30,688	28,561	29,947	29,732	1,080	3,632
V4	31,045	30,605	31,317	30,989	0,359	1,159
V5	24,580	26,298	25,290	25,389	0,863	3,401

A Tabela 24 apresenta os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade para os casos de concreto vibrado referentes aos 28 dias de idade.

Tabela 24 - Valores de módulo de elasticidade para 28 dias para o concreto vibrado

Concreto Vibrado - Módulo de Elasticidade (28 dias)						
traços	Ec (GPa)			média	σ	cv (%)
V1	28,381	28,821	34,344	30,515	3,323	10,890
V2	30,766	33,939	30,165	31,624	2,028	6,413
V3	32,140	27,188	31,120	30,150	2,615	8,672
V4	29,976	32,367	33,982	32,108	2,016	6,277
V5	31,114	30,822	33,792	31,909	1,637	5,130

4.2.2 Concreto autoadensável

A Tabela 25 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para os casos de concreto autoadensável referentes aos 7 dias de cura.

Tabela 25 - Valores de resistência à compressão axial para 7 dias para o concreto autoadensável

Concreto Autoadensável - Resistência à compressão axial (7 dias)						
traços	fc (MPa)			média	σ	cv (%)
CAA1	26,39	25,01	26,26	25,89	0,76	2,94
CAA2	26,52	22,75	23,36	24,21	2,02	8,36
CAA3	25,63	28,18	27,18	27,00	1,28	4,76

A Tabela 26 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para os casos de concreto autoadensável referentes aos 28 dias de cura.

Tabela 26 - Valores de resistência à compressão axial para 28 dias para o concreto autoadensável

Concreto Autoadensável - Resistência à compressão axial (28 dias)						
traços	fc (MPa)			média	σ	cv (%)
CAA1	35,06	29,95	34,66	33,22	2,84	8,55
CAA2	35,56	33,67	34,42	34,55	0,95	2,75
CAA3	33,67	36,67	36,74	35,70	1,75	4,91

A Tabela 27 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral para os casos de concreto autoadensável referentes aos 7 dias de cura.

Tabela 27 - Valores de resistência à tração por compressão diametral para 7 dias para o concreto autoadensável

Concreto Autoadensável - Resistência à tração (7 dias)					
traços	ft (MPa)		média	σ	cv (%)
CAA1	4,01	3,97	3,99	0,03	0,66
CAA2	3,90	4,03	3,97	0,09	2,41
CAA3	6,41	7,04	6,73	0,45	6,70

A Tabela 28 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral para os casos de concreto autoadensável referentes aos 28 dias de cura.

Tabela 28 - Valores de resistência à tração por compressão diametral para 28 dias para o concreto autoadensável

Concreto Autoadensável - Resistência à tração (28 dias)					
traços	ft (MPa)		média	σ	cv (%)
CAA1	4,75	3,61	4,18	0,80	19,26
CAA2	4,47	4,89	4,68	0,30	6,35
CAA3	6,05	5,69	5,87	0,25	4,24

A Tabela 29 apresenta os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade para os casos de concreto autoadensável referentes aos 7 dias de cura.

Tabela 29 - Valores de módulo de elasticidade para 7 dias para o concreto autoadensável

Concreto Autoadensável - Ec (7 dias)						
traços	Ec (GPa)			média	σ	cv (%)
CAA1	26,606	30,246	31,016	29,29	2,36	8,04
CAA2	25,985	26,544	27,725	26,75	0,89	3,32
CAA3	32,392	29,257	29,164	30,27	1,84	6,07

A Tabela 30 apresenta os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade para os casos de concreto autoadensável referentes aos 28 dias de cura.

Tabela 30 - Valores de módulo de elasticidade para 28 dias para o concreto autoadensável

Concreto Autoadensável - Ec (28 dias)						
traços	Ec (GPa)			média	σ	cv (%)
CAA1	31,408	31,503	33,211	32,04	1,01	3,17
CAA2	35,092	34,626	35,050	34,92	0,26	0,74
CAA3	31,903	40,288	33,394	35,19	4,47	12,71

▪ **Ensaio de absorção d'água**

Os ensaios de absorção foram realizados exclusivamente para a idade de 28 dias de cura.

A Tabela 31 apresenta os resultados dos ensaios de absorção d'água referentes aos casos de concreto vibrado.

Tabela 31 - Valores de absorção para 28 dias para o concreto vibrado

Concreto Vibrado - Absorção						
traços	massa úmida	massa seca	absorção (%)	média	σ	cv (%)
V1	3,745	3,560	5,200	5,170	0,040	0,778
	3,695	3,515	5,120			
	3,755	3,570	5,180			
V2	3,570	3,390	5,310	5,160	0,160	3,095
	3,650	3,470	5,190			
	3,680	3,505	4,990			
V3	3,685	3,470	6,196	5,903	0,264	4,478
	3,720	3,515	5,832			
	3,720	3,520	5,682			
V4	3,720	3,560	4,494	4,522	0,128	2,828
	3,705	3,540	4,661			
	3,670	3,515	4,410			
V5	3,630	3,445	5,370	5,626	0,248	4,407
	3,650	3,455	5,644			
	3,610	3,410	5,865			

A Tabela 32 apresenta os resultados dos ensaios de absorção d'água referentes aos casos de concreto autoadensável.

Tabela 32 - Valores de absorção para 28 dias para o concreto autoadensável

Concreto Autoadensável-Absorção						
traços	massa úmida	massa seca	absorção (%)	média	σ	cv (%)
CAA1	3,400	3,570	5,000	5,098	0,170	3,331
	3,400	3,570	5,000			
	3,400	3,580	5,294			
CAA2	3,300	3,480	5,455	5,555	0,146	2,633
	3,280	3,460	5,488			
	3,320	3,510	5,723			
CAA3	3,510	3,340	4,843	4,753	0,169	3,548
	3,500	3,330	4,857			
	3,510	3,350	4,558			

4.3 Análise dos resultados

4.3.1 Concreto no estado fresco

4.3.1.1 Concreto autoadensável

Conforme os resultados da Tabela 14 referentes ao ensaio *Slump-flow test*, em escoamento livre, observa-se que: os valores para os diâmetros de espalhamento se apresentam de acordo com os limites mínimos requeridos pela AFGC (2000), a qual estabelece como limite mínimo o valor de 60cm.

Ainda, a diferença entre os diâmetros de espalhamento para cada caso, se apresentam abaixo de 5cm, que, segundo AFGC (2000), fornecem o indicativo de que a superfície era circular e homogênea. Conforme a Figura 14, apresentada anteriormente, observa-se a ausência da concentração de materiais indicando que o concreto não apresentou segregação.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 15, referentes ao ensaio de escoamento confinado, *V-funnel*, observa-se que existe redução da vazão com a diminuição da relação água/cimento. Estes resultados dão o indicativo da aptidão desse tipo de material quanto ao escoamento em meio confinado, o qual se desenvolve sob condicionantes diferentes daqueles que são aplicados quando no caso do escoamento livre. Para o caso do escoamento confinado, são relevantes não só a competitividade dos materiais como também a interação entre os agregados, que podem promover os choques intergranulares de maneira a se criar bloqueios. Nesse sentido, a diminuição gradual do teor de agregados em relação aos aglomerantes, para esse tipo de composição, permitiu a viabilidade do processo.

Na Tabela 16 são apresentados os valores de massa específica aparente para o concreto, os quais se apresentam em proximidade dos valores alcançados em Alcantara (2004) e Kumayama (2014).

Na Tabela 17 são apresentados os valores do ensaio da Caixa em “L”, mostrando igualdade para todos os traços, independente dos parâmetros adotados, indicando a presença de um fator preponderante atuando no comportamento do concreto fresco. Relata-se que se observou que a viscosidade do concreto encontrava-se muito acentuada no momento da realização deste ensaio.

A isto, recomenda-se que este tipo de concreto seja aplicado rigorosamente dentro do período de manutenção das condições de fluidez, logo após a mistura. Como causas prováveis para a rápida modificação das condições reológicas do concreto no estado fresco têm-se a elevada finura das cinzas, a atuação do superplastificante e as condições ambientais do dia da concretagem, favorecendo a rápida evaporação da água, acentuando as propriedades viscosas do material.

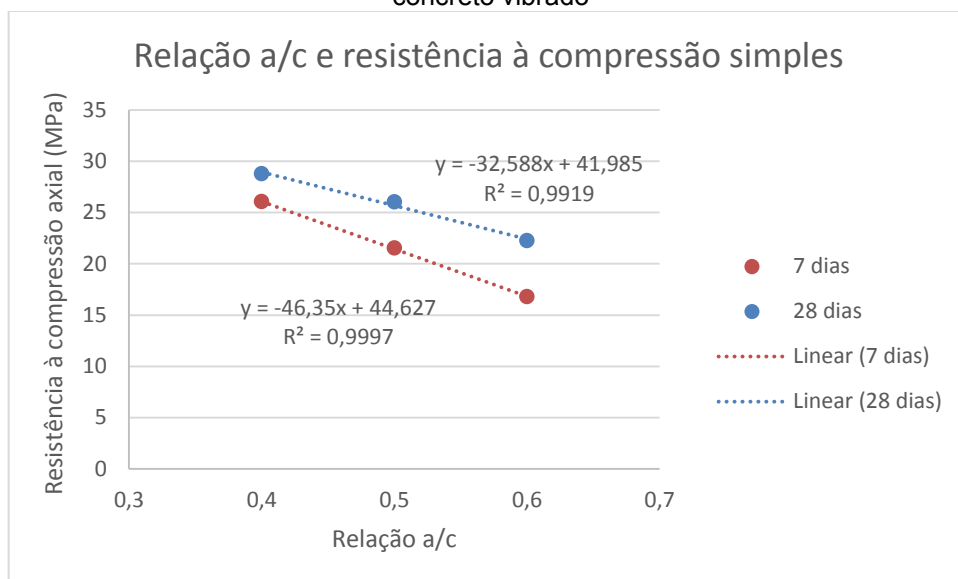
Com relação aos ensaios de segregação, encontraram-se valores que indicam uma elevada estabilidade do material, frente aos esforços que promovem a segregação, resultando em segregação equivalente à zero, conforme os índices prescritos para o ensaios conforme AFGC (2000).

4.3.2 Concreto no estado endurecido

4.3.2.1 Concreto vibrado

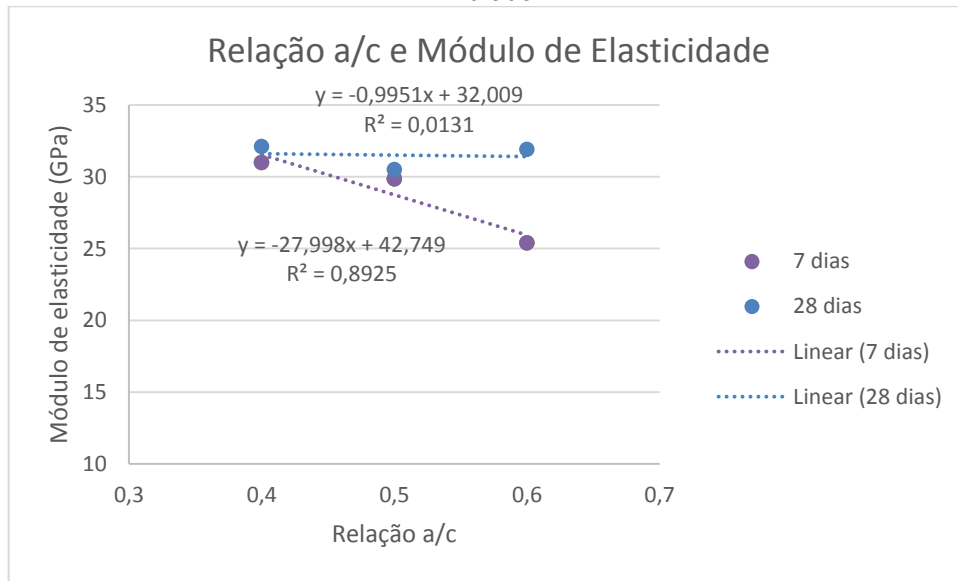
Com relação ao concreto vibrado, observa-se através das Figuras 16 e 17, apresentadas a seguir, onde se mantém uma estrutura próxima para o concreto em termos de agregados e matriz, que as propriedades de resistência à compressão simples e de módulo de elasticidade variam inversamente com a relação água/cimento.

Figura 16 - Relação entre o fator a/c e a resistência à compressão axial para 7 e 28 dias para o concreto vibrado



Fonte: Próprio Autor

Figura 17 - Relação entre o fator a/c e o módulo de elasticidade para 7 e 28 dias para o concreto vibrado



Fonte: Próprio Autor

Observa-se que a influência da variação da relação água/cimento se dá tanto para 7 como para 28 dias.

Para o caso onde a relação água/cimento é constante e ocorre variação da proporção de agregados em mistura, verifica-se que pode ocorrer a diminuição do valor da resistência mecânica para casos onde a porcentagem de agregados aumenta em mistura.

Para o caso onde se variou o valor da relação água/cimento, a influência no valor da resistência mecânica se apresenta esperada, conforme o que é prescrito pela literatura por meio das experiências de Feret, descritas em Neville (1997), onde a quantidade de vazios presentes no material se torna relevante para o valor da resistência. Também é do consenso que a quantidade de água incorporada ao concreto e, particularmente com relação à quantidade de cimento, implicará em um material que poderá ser mais ou menos enriquecido na formação da estrutura cristalina e com relação à presença de vazios.

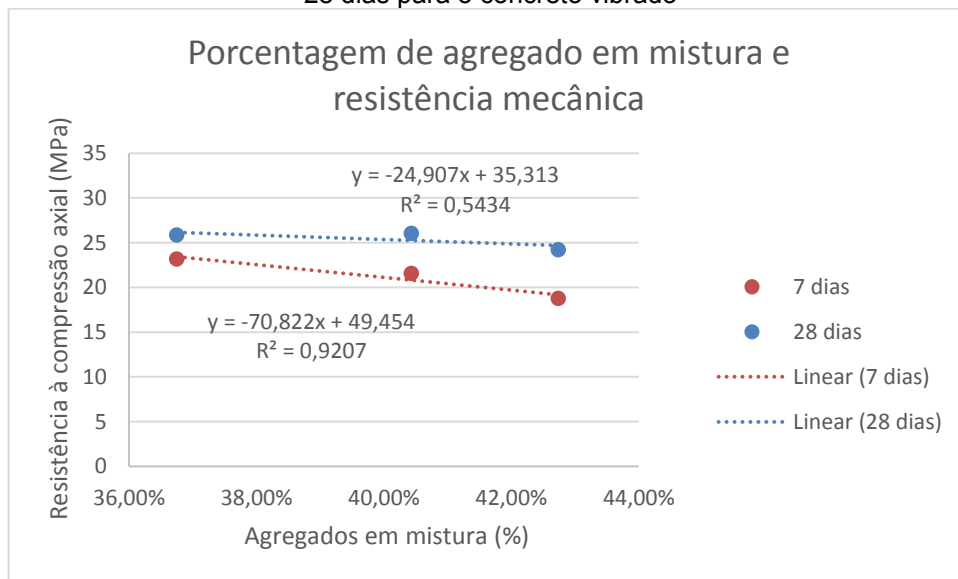
Conforme análise das Figuras 18 e 19 a seguir, referentes à variação do valor da resistência mecânica e do módulo de elasticidade quando se mantem próximos os valores da relação água/cimento, verifica-se que estes valores podem diminuir com o aumento da porcentagem de agregados em mistura.

Por outro lado, quanto à porcentagem de agregados em mistura, se considera uma surpresa que venha a acontecer a diminuição da resistência mecânica quando ocorre maior incorporação de agregados à mistura, visto que, para este nível de

resistência, os agregados constituem-se como principais responsáveis pela absorção dos esforços mecânicos, juntamente com a pasta.

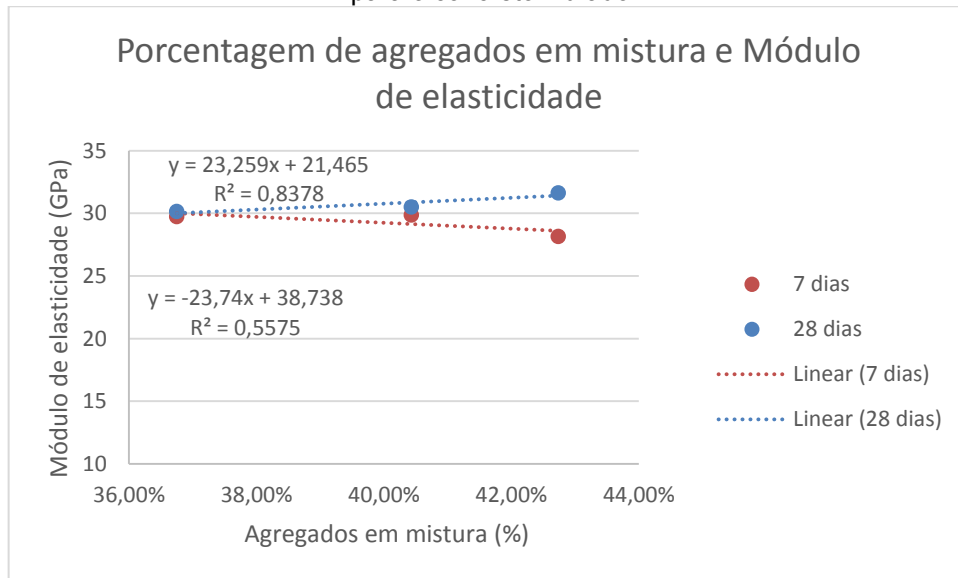
Segundo Neville (1997), a porcentagem de agregados com relação ao volume total de concreto pode causar influência sobre o valor da resistência mecânica no sentido de que: quando se considera a variação em volume de 20 a 40% de agregados graúdos com relação ao volume total, tende a ocorrer a diminuição do valor da resistência mecânica e, entre os valores de 40 e 80%, o valor da resistência tende a adquirir o comportamento inverso. Cabe observar que os três casos de concreto apresentados se situam na faixa abaixo de 40% de agregados com relação ao volume total de concreto, conforme apresentado anteriormente na Tabela 3.7. Nesse sentido, a variação de resistência segundo o aumento da porcentagem de agregados em mistura se apresenta coerente.

Figura 18 - Relação entre a porcentagem de agregados e a resistência à compressão axial para 7 e 28 dias para o concreto vibrado



Fonte: Próprio Autor

Figura 19 - Relação entre a porcentagem de agregados e o módulo de elasticidade para 7 e 28 dias para o concreto vibrado



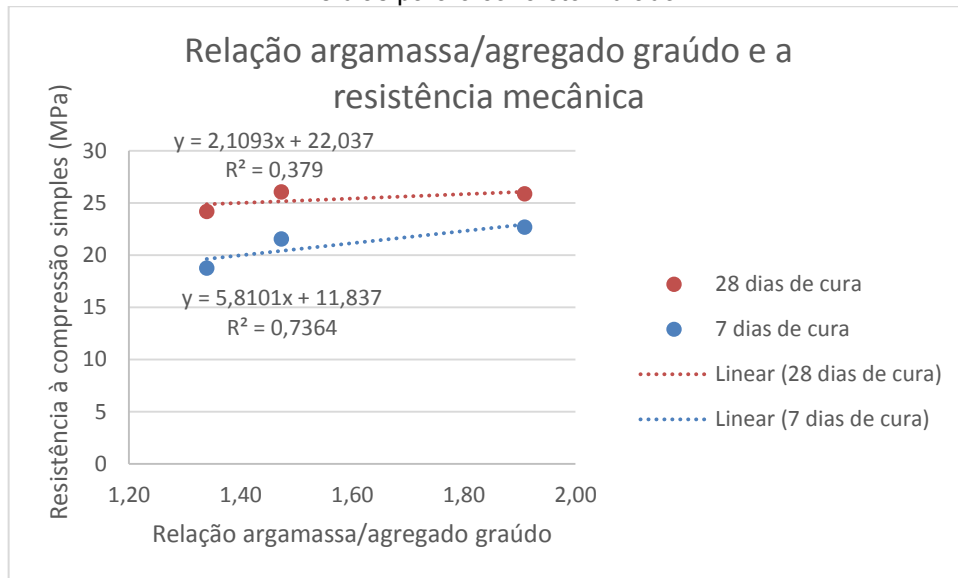
Fonte: Próprio Autor

Algumas considerações são então importantes para se entender essa questão. Se por um lado os agregados são importantes quanto à absorção dos esforços mecânicos, por outro lado, fatores podem ser tomados em consideração, como a interface agregado/pasta e as condições de confinamento dos agregados pela fase argamassa.

Observa-se, possivelmente, que a influência do confinamento e da natureza da pasta envolvente aos agregados é mais relevante nas primeiras idades, onde o grau de hidratação do cimento e, conseqüentemente, a contribuição da pasta na resistência são menores. Para 28 dias de cura, observa-se que a influência da porcentagem de agregados tanto na resistência quanto no módulo de elasticidade são mais atenuados, possivelmente devido à melhor condição da pasta.

A Figura 20 apresenta a influência da relação argamassa/agregado graúdo na resistência do concreto.

Figura 20 - Relação entre argamassa/agregado graúdo e a resistência à compressão axial para 7 e 28 dias para o concreto vibrado



Fonte: Próprio Autor

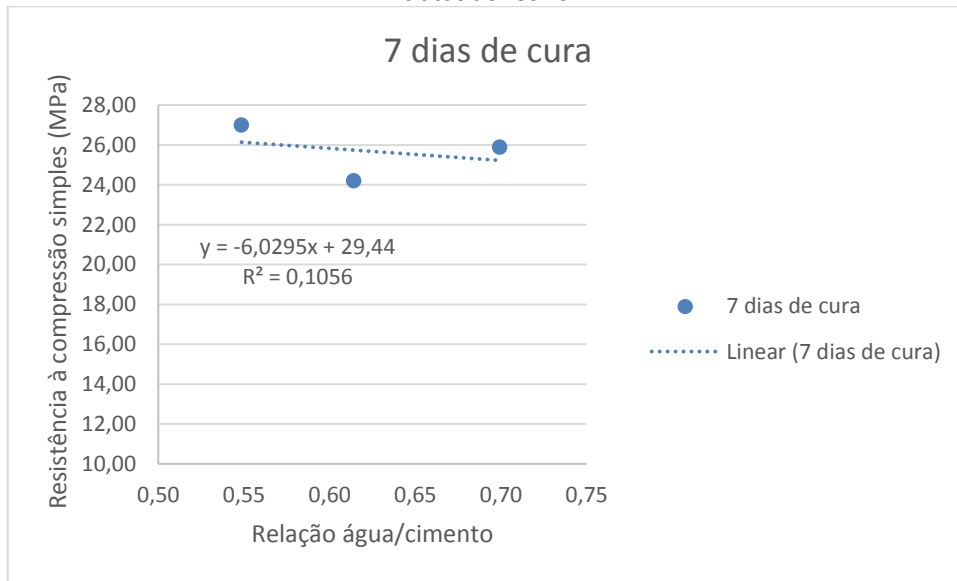
Sendo o concreto um composto formado pela associação dos materiais granulares com a pasta de cimento endurecido, fica evidente que a variação da resistência global do material está intimamente ligada à natureza da pasta endurecida, assim como à aglutinação dos materiais granulares pela referida pasta, em termos das condições de interface e de recobrimento dos agregados.

4.3.2.2 Concreto autoadensável

Os valores apresentados se encontram em acordo com os apresentados em Alcantara e Lima (2009) para casos de concreto autoadensável com cinzas de casca de arroz.

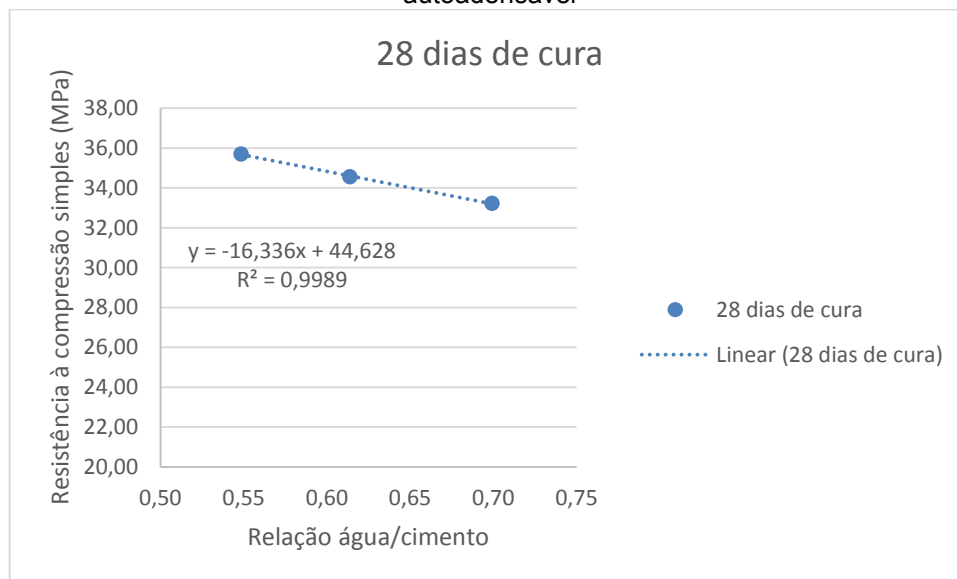
As Figuras 21 e 22 ilustram a variação da resistência à compressão simples com relação à variação da relação água/cimento para as idades de 7 e 28 dias de cura, respectivamente.

Figura 21 - Relação entre o fator a/c e a resistência à compressão axial para 7 dias para o concreto autoadensável



Fonte: Próprio Autor

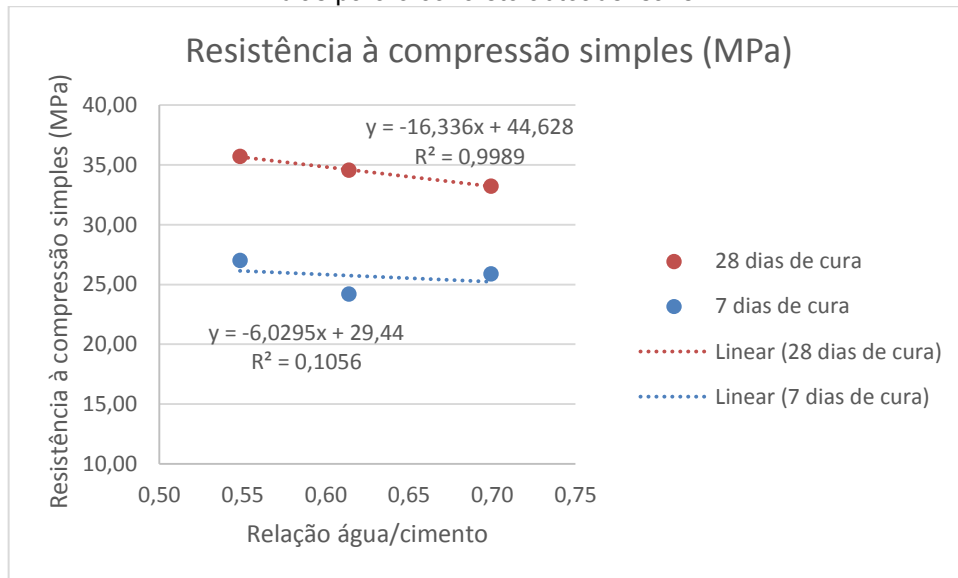
Figura 22 - Relação entre o fator a/c e a resistência à compressão axial para 28 dias para o concreto autoadensável



Fonte: Próprio Autor

A Figura 23 apresenta uma comparação entre os valores alcançados para os CAAs aos 7 e 28 dias de cura.

Figura 23 - Comparação da relação entre o fator a/c e a resistência à compressão axial para 7 e 28 dias para o concreto autoadensável



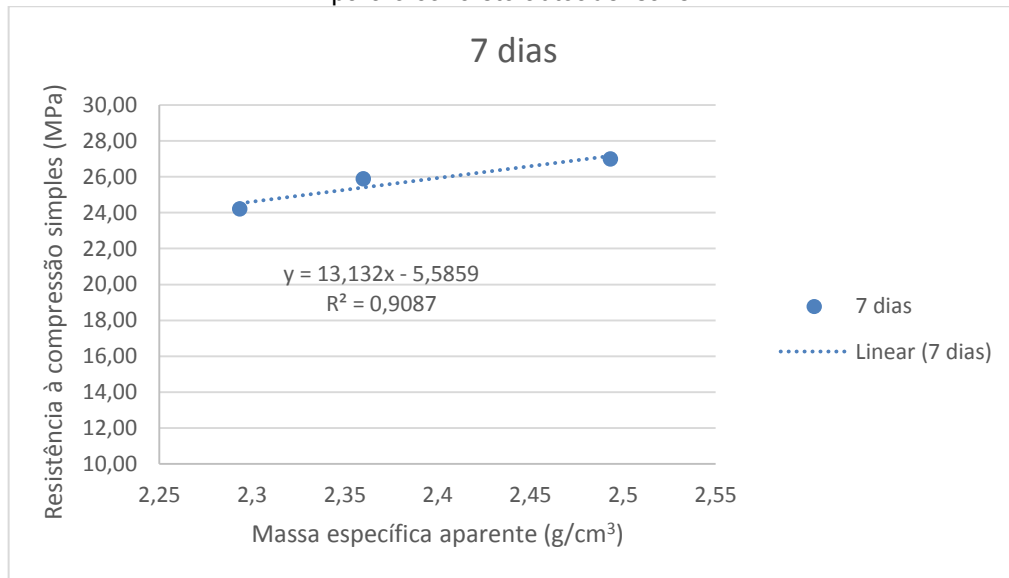
Fonte: Próprio Autor

Observa-se que os valores de resistência mecânica são inversamente proporcionais aos valores das respectivas relações água/cimento, assim como para os casos de concreto vibrado.

Para o caso de 7 dias, observa-se oscilação de resultados, provavelmente em decorrência do fato de que a composição CAA2 apresentou menor valor com relação à massa específica aparente, sendo esta variação mais sensível para esta idade. De fato, conforme ilustra a Figura 24 a seguir, para a idade de 7 dias, o valor da resistência mecânica se encontra em coerência com os valores de massa específica aparente alcançados.

Isto estaria em acordo com Neville (1997), o qual considera que as condições de resistência alcançadas pelo concreto são relacionadas às máximas condições de compactação alcançadas, quando no adensamento. Para Kumayama (2014), para o caso de concretos autoadensáveis, este aspecto vem a ser muito importante, visto que o adensamento é realizado unicamente em função do seu peso próprio.

Figura 24 - Relação entre a massa específica aparente e a resistência à compressão axial para 7 dias para o concreto autoadensável

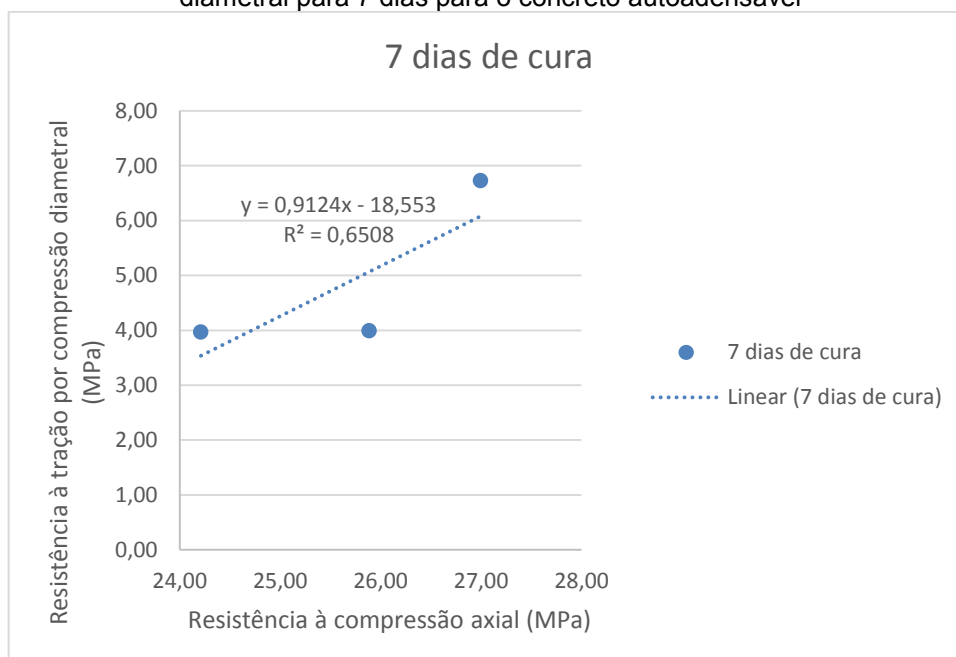


Fonte: Próprio Autor

Para a idade de 28 dias de cura, esta diferença não se mostrou mais tão relevante, em razão provável do grau de hidratação da pasta de cimento para esta idade.

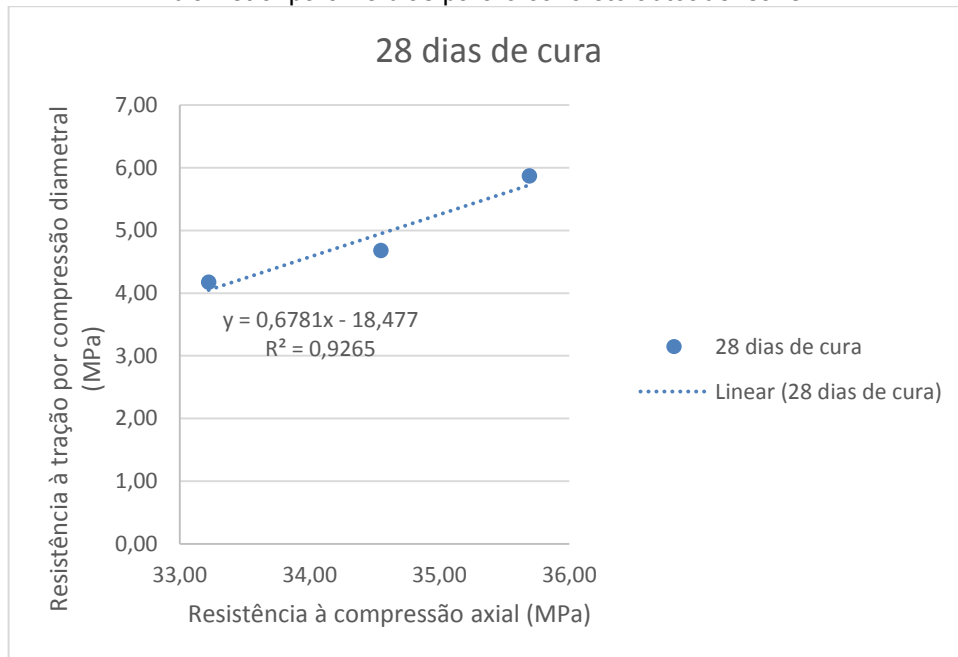
As Figuras 25 e 26 apresentam a relação entre os valores alcançados para os casos de resistência à compressão axial e diametral para as idades de 7 e 28 dias, respectivamente.

Figura 25 - Relação entre a resistência à compressão axial e a resistência à tração por compressão diametral para 7 dias para o concreto autoadensável



Fonte: Próprio Autor

Figura 26 - Relação entre a resistência à compressão axial e a resistência à tração por compressão diametral para 28 dias para o concreto autoadensável

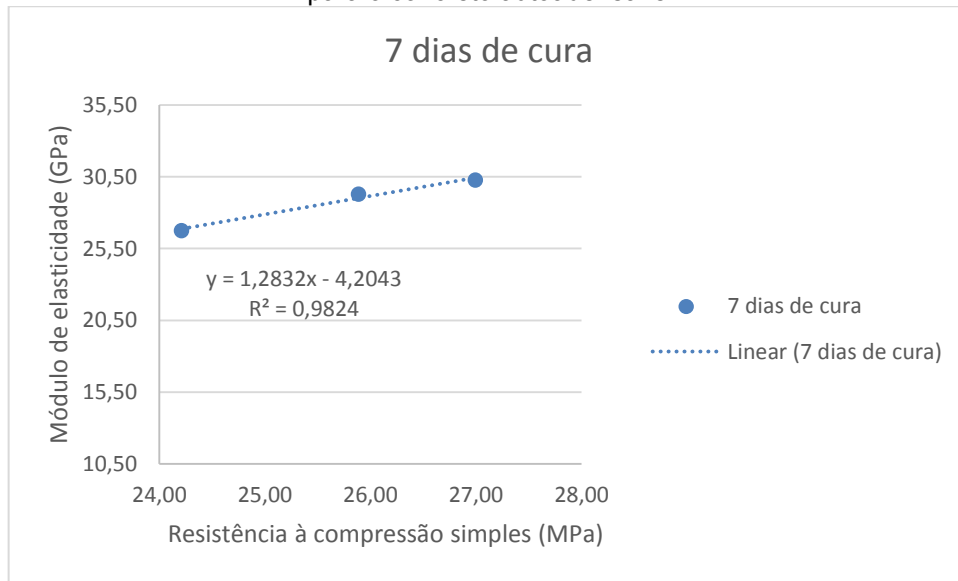


Fonte: Próprio Autor

Observa-se que os valores para a resistência à compressão axial e diametral crescem a uma taxa aproximadamente constante, em especial para 28 dias, em coerência com o grau de cimentação desses materiais (ANDRADE & TUTIKIAN, 2011).

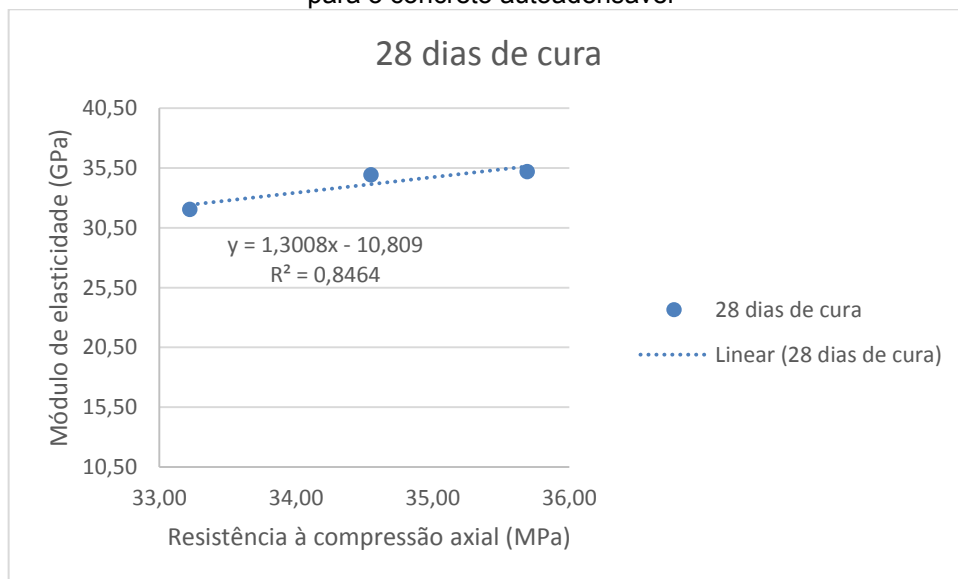
As Figuras 27 e 28 procuram ilustrar a variação da resistência mecânica com os valores do módulo de elasticidade para as idades de 7 e 28 dias de cura, respectivamente.

Figura 27 - Variação da resistência à compressão axial com o módulo de elasticidade para 7 dias para o concreto autoadensável



Fonte: Próprio Autor

Figura 28 - Variação da resistência à compressão axial com o módulo de elasticidade para 28 dias para o concreto autoadensável

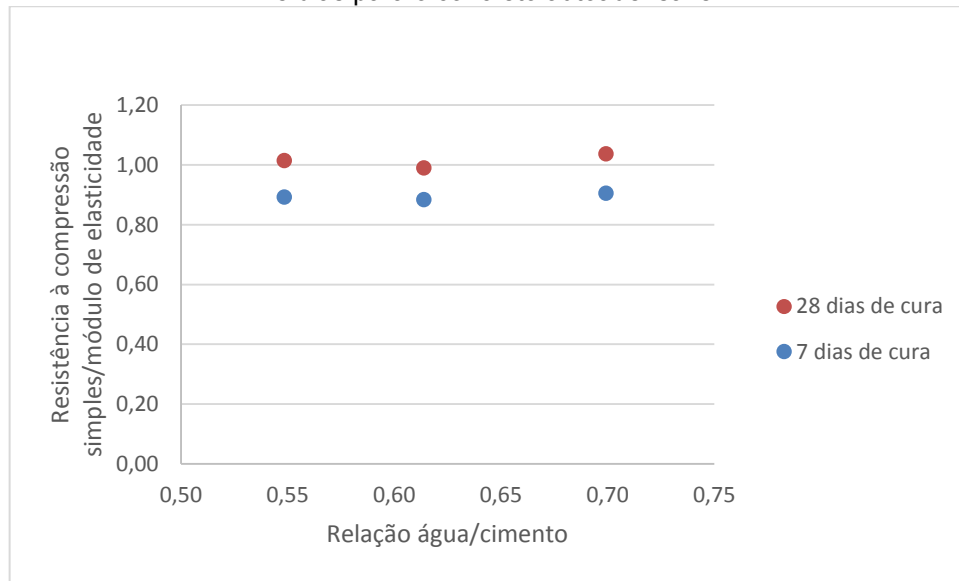


Fonte: Próprio Autor

Observa-se que os valores de resistência mecânica e de módulo de elasticidade se apresentam correlacionados, visto que, com o aumento da resistência mecânica, os níveis de rigidez dos concretos tendem, também, a serem aumentados. Isto está de acordo com o que é apresentado em Andrade e Tutikian (2011).

A Figura 29 ilustra os valores das relações entre resistência à compressão axial/módulo de elasticidade e relação água/cimento para as composições CAA1, CAA2 e CAA3, referentes às idades de 7 e 28 dias.

Figura 29 - Relação entre resistência à compressão axial/módulo de elasticidade e fator a/c para 7 e 28 dias para o concreto autoadensável



Fonte: Próprio Autor

Observa-se pela Figura 29 que: se por um lado os valores referentes ao módulo de elasticidade tendem a variar de modo proporcional ao valor da resistência mecânica para cada idade, por outro lado, aparentemente, os valores do módulo relativos à capacidade resistente tendem a ser mais elevados do que os relativos à deformabilidade para as primeiras idades. Isto está em acordo com Helene e Andrade (2010).

Verifica-se que, para os casos dos concretos autoadensáveis, a base de dados deste trabalho é composta a partir de três composições, variando-se os parâmetros com a relação água/cimento, agregado/cimento e argamassa/agregado graúdo.

Essas variáveis podem expressar: as condições qualitativas da pasta; as condições de interface entre os agregados e a pasta; as condições de confinamento do agregado graúdo.

Observa-se que as composições CAA1, CAA2 e CAA3 variam favoravelmente no sentido de fornecer uma pasta mais rica, de uma melhor zona de transição e de um concreto com agregados mais confinados.

A combinação dessas três variáveis ou parâmetros pode formar outra variável, dada pelo múltiplo dos três, de modo a obter excelente correlação com o valor da resistência à compressão simples.

A Tabela 33 apresenta, para as composições CAA1, CAA2 e CAA3, os respectivos parâmetros de composição citados e os valores da variável proposta como 'k', a qual é o produto desses três parâmetros para cada composição.

Tabela 33 - Parâmetros de composição e variável k

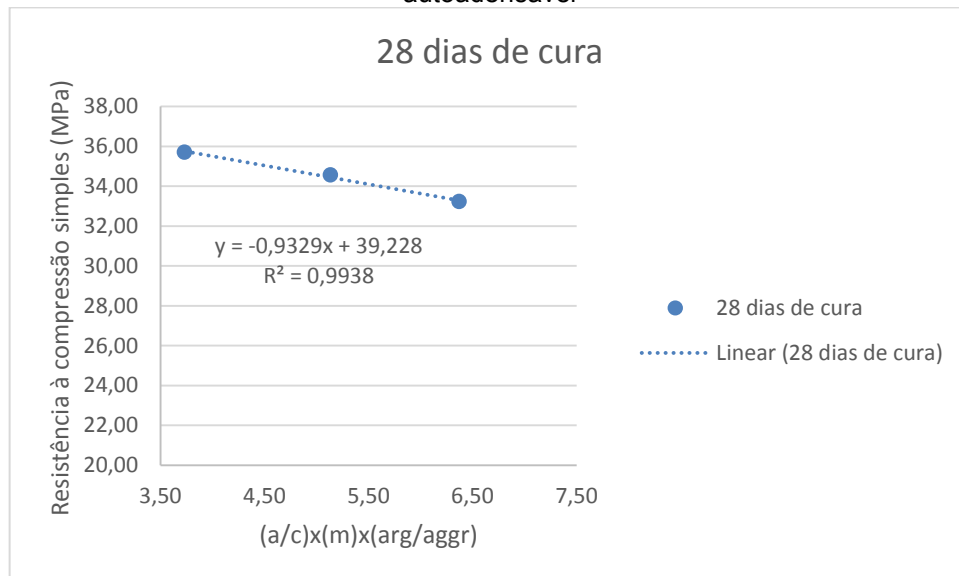
Parâmetro de Composição em Massa				
traços	a/c	agrtot/cim	arg/agrgr	k
CAA1	0,70	5,01	1,78	6,24
CAA2	0,61	4,64	1,8	5,14
CAA3	0,55	4,05	1,84	4,1

A Tabela 34 apresenta os valores de resistência à compressão simples e os valores da variável combinada k.

Tabela 34 - Valores de resistência à compressão axial e da variável k

Resistência à Compressão x k		
traços	f_c (Mpa)	k
CAA1	33,22	6,24
CAA2	34,55	5,14
CAA3	35,7	3,73

Figura 30 - Relação entre a variável k e a resistência à compressão axial para 28 dias para o concreto autoadensável



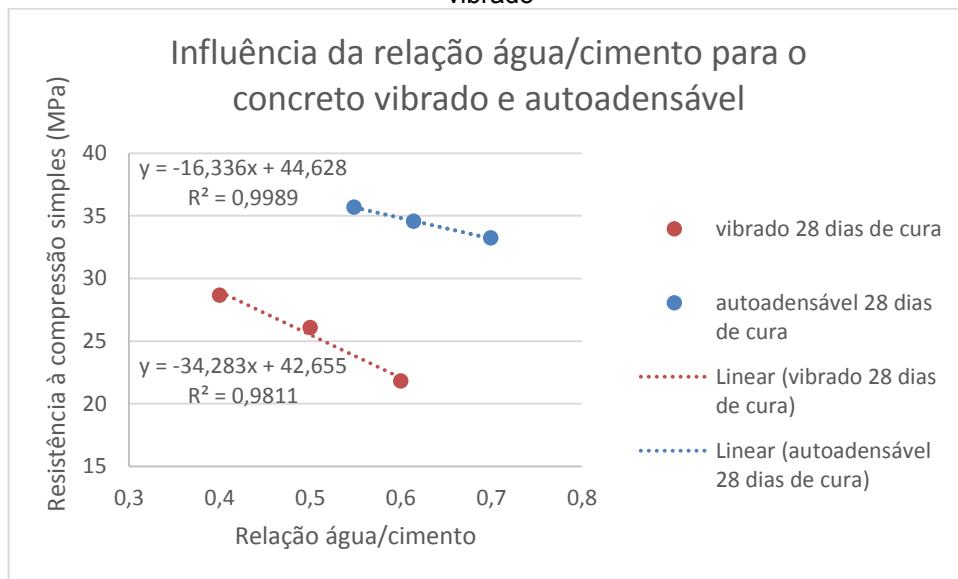
Fonte: Próprio Autor

Conforme a Figura 30 apresentada anteriormente, o valor da resistência à compressão simples apresentou forte correlação com o valor da variável k , indicando assim, a influência relativa aos fatores de qualidade da pasta, da zona de transição pasta/agregado, e da condição de confinamento do agregado graúdo.

4.3.3 Comparação entre os concretos autoadensáveis e vibrados

A Figura 31 busca trazer uma comparação de resistência à compressão simples em função do fator água/cimento para os casos dos concretos autoadensáveis e vibrados. Para tanto, adotaram-se para a análise os resultados das composições de concreto vibrado onde se variou a relação água/cimento, sejam: V1, V4 e V5.

Figura 31 - Influência da relação água/cimento para 28 dias para o concreto autoadensável e para o vibrado



Fonte: Próprio Autor

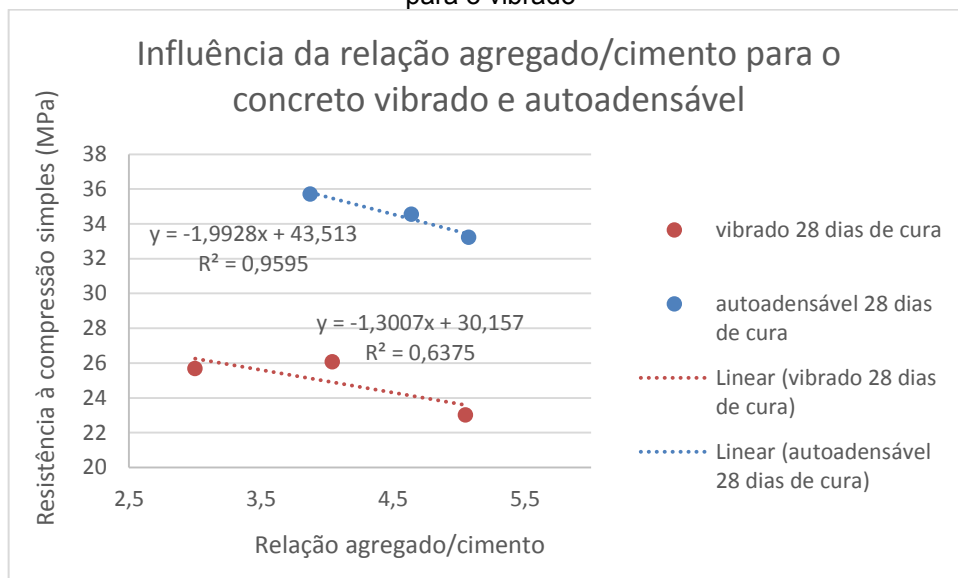
Nota-se, pela Figura 31, que os valores de resistência mecânica, para os concretos autoadensáveis, se apresentam superiores aos que são apresentados para os casos de concretos vibrados, ainda que os valores das respectivas relações água/cimento sejam maiores. Considera-se também que a relação cinza/cimento manteve-se constante para todos os casos de CAA, de modo a se possibilitar a análise.

Ao grande desempenho dos CAA's, se atribui a possível influência das cinzas de casca de arroz, no sentido de se proporcionar uma pasta mais rica. As cinzas de casca de arroz podem ter atuado tanto pelo efeito fíler como por ação pozolânica.

Verifica-se, também, que a variação do valor de resistência à compressão simples apresenta menor amplitude quando se varia a relação água/cimento para os casos de concreto autoadensável.

A Figura 32 apresenta a variação do valor de resistência à compressão simples com relação à variação da relação agregado/cimento. Adotaram-se para a análise os resultados das composições de concreto vibrado onde se variou a relação agregado/cimento, e se manteve fixo a relação água/cimento, sejam: V1, V2 e V3.

Figura 32 - Influência da relação agregado/cimento para 28 dias para o concreto autoadensável e para o vibrado

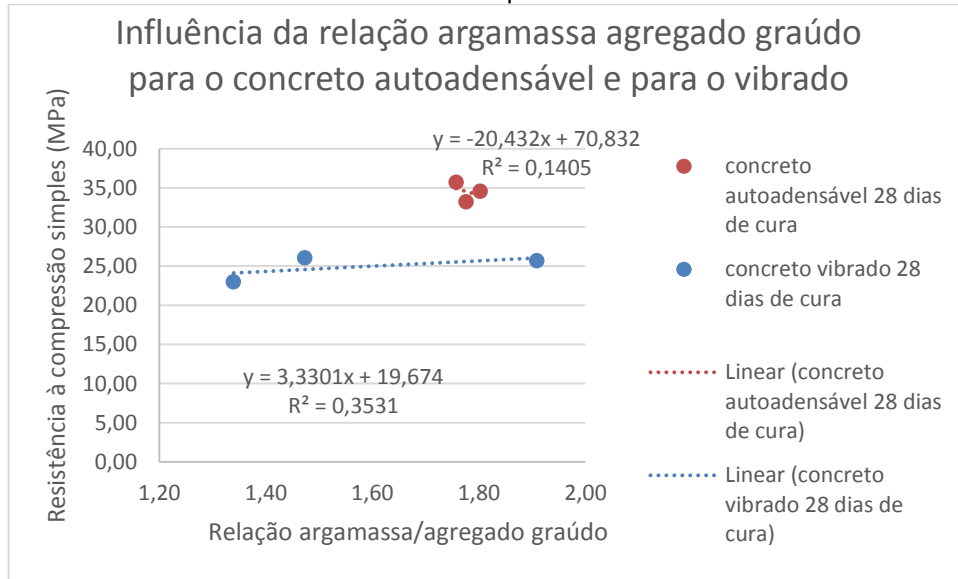


Fonte: Próprio Autor

Observa-se pela Figura 32 que, aparentemente, o CAA sofre variação com o valor da relação agregado/cimento. Neste caso, embora não seja uma variável independente, pois a relação água/cimento também variou, esta variação pode ter implicado em maior quantidade de água e pasta para o envolvimento dos agregados de modo a melhor enriquecer a zona de transição da mistura.

A Figura 33 ilustra a comparação entre os casos de autoadensáveis e vibrados com relação ao parâmetro argamassa/agregado graúdo. Para isto, adotaram-se para a análise os resultados das composições onde se variou a relação agregado/cimento, sejam: V1, V4 e V5.

Figura 33 - Influência da relação argamassa/agregado graúdo para 28 dias para o concreto autoadensável e para o vibrado



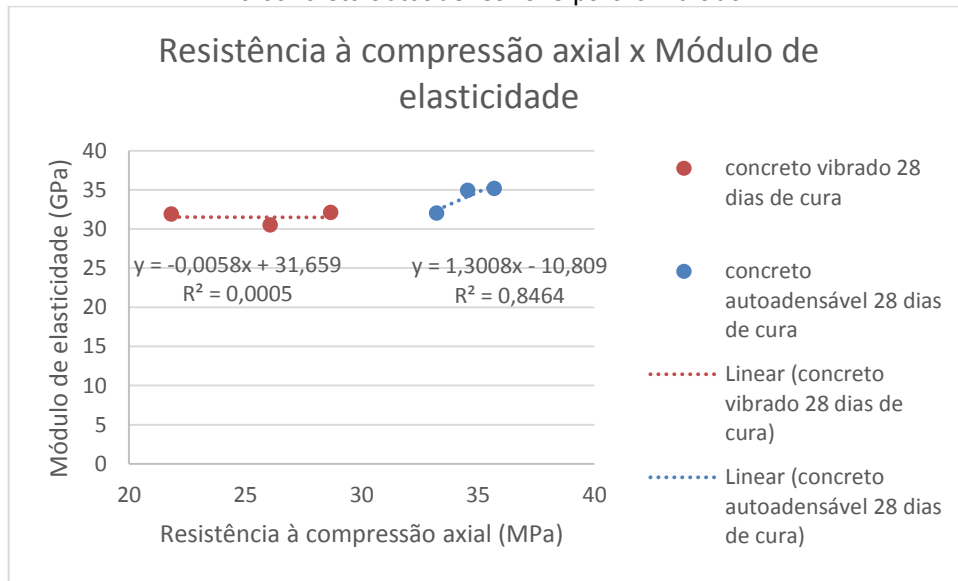
Fonte: Próprio Autor

Observa-se que para este parâmetro os valores se tornam globalmente mais elevados para os casos de CAA em comparação com o caso dos vibrados, podendo, isto, também ter sido importante para que os valores de resistência mecânica para os casos de CAA fossem mais elevados.

Considerando que a amplitude de variação entre os valores argamassa/agregado graúdo e de resistência mecânica são muito menores para o caso dos CAA's, não se permite avaliar a natureza da correlação, todavia, compreende-se que o melhor recobrimento de pasta pode atuar em sinergia com a aderência entre esta e o agregado, assim como com a sua própria resistência, no sentido de se contribuir para o valor da resistência global.

A Figura 34 apresenta uma comparação entre os valores do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão axial para os CAA's e para os vibrados.

Figura 34 - Relação entre resistência à compressão axial e módulo de elasticidade para 28 dias para o concreto autoadensável e para o vibrado



Fonte: Próprio Autor

Com relação aos patamares de resistência, nota-se que os valores do módulo de elasticidade para os concretos vibrados são bastante elevados para seus níveis menores de resistência à compressão axial, em comparação com os casos dos concretos autoadensáveis. Este fato evidencia que os CAA's podem ser considerados mais dúcteis do que os vibrados, tendo em vista a sua natureza, produzidos com uma grande quantidade de pasta.

Isto pode estar em acordo com a matriz cimentante dos CAA's, onde a sua proporção em pasta é muito maior do que para os casos do concreto vibrado, conforme Alcantara (2004).

Ainda, Helene e Andrade (2007) apresentam, em termos genéricos, que o módulo de elasticidade pode sofrer majorações ou minorações em função dos agregados utilizados e do tipo de concreto quanto à sua consistência, de modo que:

$$E_c = a_1 \cdot a_2 \cdot 5600 f_{ck}^{1/2} \quad [\text{Eq. 4.1}]$$

Onde a_1 e a_2 são expressos em função das condições apresentadas na Tabela 35.

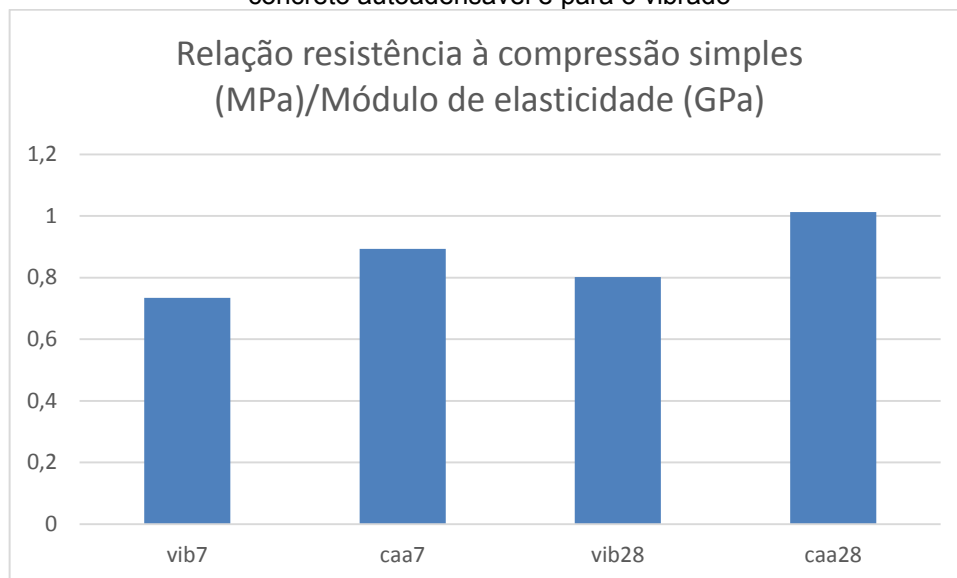
Tabela 35 - Influência do tipo de agregado graúdo e da consistência do concreto sobre o módulo de elasticidade

Natureza do agregado graúdo	a1	Consistência do concreto fresco	a2
Basalto e diabásio	1,1	Fluida	0,9
Granito e gnaisse	1	Plástica	1
Calcário, arenito, e metassedimento	0,9	Seca	1,1

Fonte: adaptado de Helene e Andrade (2007)

A Figura 35 ilustra a variação da relação entre os valores de resistência à compressão simples e o módulo de elasticidade para 7 e 28 dias de cura, indicando uma maior ductilidade para os casos dos concretos autoadensáveis.

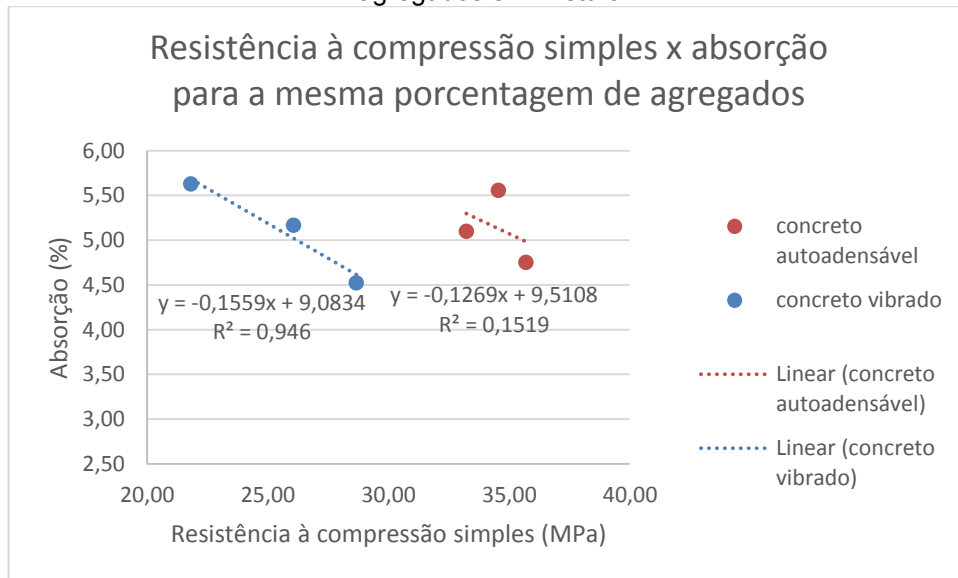
Figura 35 - Relação resistência à compressão axial/módulo de elasticidade para 7 e 28 dias para o concreto autoadensável e para o vibrado



Fonte: Próprio Autor

A Figura 36 apresenta uma comparação entre os valores de absorção correlacionados com os valores de resistência à compressão simples para os casos de concreto vibrado e autoadensável.

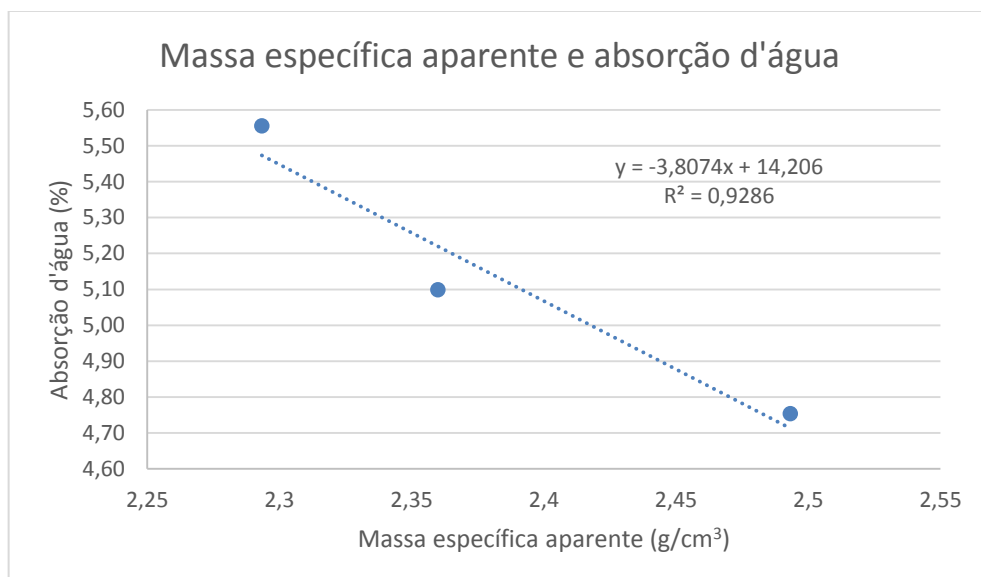
Figura 36 - Relação entre resistência à compressão axial e absorção para a mesma porcentagem de agregados em mistura



Fonte: Próprio Autor

Observa-se que, para os dois tipos de concreto, o valor da absorção tende a diminuir com o aumento do valor da resistência mecânica. Para o caso do concreto autoadensável, observa-se certa oscilação de resultados, onde o valor da absorção para o CAA2 se apresenta bastante relevante em comparação com os demais. Cumpre observar que esta composição apresentou valor mais baixo para a massa específica aparente no estado fresco, indicando, deste modo, menor concentração de material. De fato, conforme a Figura 37, a variação da absorção com relação à massa específica aparente se mostrou mais coerente.

Figura 37 - Relação entre a massa específica aparente e a absorção para o concreto autoadensável



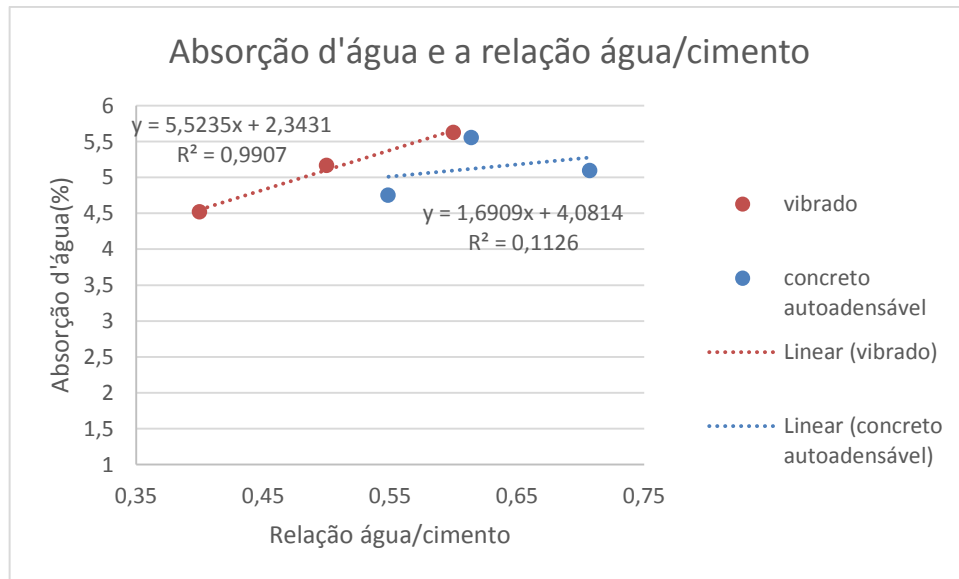
Fonte: Próprio Autor

Nota-se que, embora o valor da absorção tende a apresentar correlação com o valor da resistência mecânica, os valores médios apresentados para os casos dos concretos autoadensáveis se apresentam próximos aos valores apresentados para os casos de concretos vibrados, apesar de os valores de resistência mecânica dos concretos autoadensáveis serem mais elevados do que os apresentados pelos vibrados. Com isto, nota-se que se trata de diferentes famílias de concreto, distinguindo-se os tipos de matriz e de proporção entre pasta e componentes granulares.

Os concretos autoadensáveis apresentam elevada porcentagem de pasta em relação aos concretos vibrados, tornando o material, possivelmente, mais poroso e higroscópico. De fato, considerando as composições de concreto vibrado apresentadas neste trabalho, observa-se que as composições que apresentaram maior quantidade de pasta, apresentaram, também, maior valor de absorção. Ainda para os casos dos concretos vibrados apresentados neste trabalho, observou-se que o valor da absorção diminuiu com a diminuição do valor da relação água/cimento, tornando a pasta mais rica e impermeável, fato que também tende a se observar para os casos dos concretos autoadensáveis.

Mesmo que os CAA's neste trabalho tenham apresentado valores elevados de absorção, nota-se pela Figura 38 que os valores de resistência mecânica alcançados foram bastante elevados quando comparados com os casos de vibrados, embora estejam nos mesmos patamares de absorção, dando, deste modo, um forte indicativo de cimentação interna.

Figura 38 - Relação entre o fator a/c e a absorção para os concretos autoadensáveis e vibrados



Fonte: Próprio Autor

5 CONCLUSÕES

- A CCA se apresentou promissora para a utilização como finos na produção de CAA's.

- Os CAA's produzidos com CCA aparentemente apresentam menor sensibilidade na variação do valor da resistência mecânica com relação à variação da relação água/cimento do que os concretos vibrados.

- A microestrutura da pasta dos CAA's produzidos com a CCA se mostrou enriquecida e com melhor condição na zona de transição desta com os agregados, contribuindo para um melhor desempenho mecânico do concreto.

- O confinamento dos agregados graúdos pela argamassa exerce papel relevante no desempenho dos CAA's, de modo que a solidarização entre a pasta e o agregado se apresenta relevante no sentido de absorver os esforços mecânicos.

- Da comparação dos valores dos módulos de elasticidade frente aos respectivos patamares de resistência à compressão axial, os concretos autoadensáveis se apresentaram mais dúcteis do que os vibrados.

- Os CAA's produzidos com CCA apresentaram níveis de resistência mais elevados quando comparados com os vibrados, para os mesmos níveis de absorção, dando indicativo de um grande nível de cimentação interna.

▪ **Proposta de continuidade de pesquisa**

A continuidade desta pesquisa pode ser baseada nas respectivas propostas:

- Novos estudos de dosagem do concreto com adição de novos aditivos superplastificantes disponíveis no mercado.
- Estudos de dosagem e avaliação das propriedades do concreto no estado fresco, variando-se a relação finos/cimento.
- Ensaio de arrancamento de armadura, avaliando-se a eficácia do material no sentido de favorecer a aderência concreto-aço.
- Avaliação dos parâmetros reológicos (tensão de escoamento, tensão cisalhante, viscosidade) por meio de ensaios com reômetros.

REFERÊNCIAS

- AÍTCIN, P.-C. (2000). **Concreto de alto desempenho**. Tradução: Geraldo G. Serra. São Paulo: PINI, 667p.
- ALCANTARA, M.A.M; LORRAIN, M.; BARBOSA.M.P. **A avaliação da influência da posição da armadura no desenvolvimento das tensões de aderência na interface entre o concreto auto-adensável e a armadura**. In: 48, Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, 2004. Anais. IBRACON, 2004, p.76-90.
- ALCANTARA, M.A.M.; WATANABE, W. O. **O uso de cinzas de casca de arroz e do pó de pedra na fabricação de blocos de concreto auto-adensável para pavimentação**. 39 Reunião anual de pavimentação, Recife, 2008, Anais: 39 Reunião anual de pavimentação, ABPv, np, cd-r.
- ALCANTARA, M.A.M.; LIMA, G.G.S. **O uso de cinzas de casca de arroz e do pó de pedra como finos na produção do concreto auto-adensável**. In: Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-moldado, 2, 2009, São Carlos.
- ALCANTARA, M.A.M.; SANTOS, B. V. **O uso de resíduos como finos na fabricação do concreto auto-adensável**. In: Simpósio Latino Americano sobre Concreto Auto-Adensável, 1, 2012, Maceió: IBRACON, 2012.
- ALCANTARA, M.A.M.; NUNES, S. C. B; RIO, J.F.E. **Proposta de elaboração do solo-cimento na forma auto-adensável a partir de solos da região do Porto-Pt** In: 55 Congresso Brasileiro do Concreto, 2013, Gramado: IBRACON,np, cd-r.
- ANDRADE, J. J. O; TUTIKIAN, B. F. **Resistência Mecânica do Concreto**. Concreto: Ciência e Tecnologia. Edição G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2011. V1, pp. 615-651.

ASSIE, S.; ESCANDEILLAS, G.; MARCHESE, G. **Durability of self-compacting concrete**. In: International Symposium on Self-Compacting Concrete. 3, 2003, Reykjavik, pp 655-654.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 30: Agregado miúdo. Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 33: Concreto. Amostragem de concreto fresco**. Rio de Janeiro, 1998a.

_____. **NBR NM 46: Agregado. Determinação do teor de material pulverulento**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52: Agregado miúdo. Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

_____. **NBR 5738. Concreto. Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739: Concreto. Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificações**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 7222: Argamassa e concreto. Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 7223:** Consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 8522:** Concreto. Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 9778:** Argamassa de concreto endurecida. Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, ABNT, 2005 Versão corrigida 2: 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland.** 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106).

ASSOCIATION FRANÇAISE DE GENIE CIVIL (AFGC). **Bétons autoplaçants, recommandations provisoires.** Paris, 2000, np.

BANFILL, P. F. G. **Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials.** Construction and Building Materials. V.8. Nº 1. pp.43-49. 1994.

BARBOSA, M.B. **Utilização de cinzas de casca de arroz e borracha de pneus em concreto de elevado desempenho.** Ilha Solteira. 2007, FEIS/UNESP. (Dissertação de mestrado).

BAUER, L.A.F. **Materiais de construção civil,** Rio de Janeiro, LTC, 1994, 531p.

BENTUR, A. **Cimentitious Materials. Nine millenia and a New Century, past, present, future.** Journal of materials of civil engineering, 14-1, ASCE- American Society of Civil Engineers Materials Engineering Divisions, 2002.

CABRERA, O. A.; DONZA, H. A. **Estrutura y propiedades de los hormigones de alta performance com agregados triturados.** In: Congresso Brasileiro do Cimento,

5, 1999, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1999, 2-21, CD, 13p.

CINCOTTO, M.A.; KAUPATEZ, R.M.Z. **Seleção de materiais quanto à atividade pozolânica**. Tecnologia de Edificações, IPT/PINI. **A Construção**, São Paulo, 37 (1905): 15-18, 1984.

COOK, D. J., 1986, "Rice husk ash". In: Swamy, R. N. (ed), **Concrete technology and design – v. 3 Cement Replacement Materials**, London: Blackie and Son Ltd., pp. 171-196.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realização. Edição G. C. Isaia. São Paulo: Ibracon, 2005. V1, pp. 345-379.

DINIZ, J. Z. F.; FERNANDES, J. F.; KUPERMAN, S. C. **Retração e Fluência**. São Paulo: IBRACON, 2011.

DOMONE, P. L. **A review of the hardened mechanical properties of self compacting concrete**. Cement and Concrete Composites, 29. 2006. pp. 1-12.

EFNARC. Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete. United Kingdom, 2002.

FURNAS. **Concreto – Determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável utilizando-se o cone de Abrams (*slump flow test*) – método de ensaio**. Manual de Qualidade. 2004a.

FURNAS. **Concreto – Determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável pelo método do funil em V – método de ensaio**. Manual de Qualidade. 2004b.

FURNAS. **Concreto – Determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável pelo método da caixa em L (L-Box test) – método de ensaio.** Manual de Qualidade. 2004c.

GOMES, P. C. C. **Estudo de Parâmetros que Influenciam a Produção e as Propriedades dos Concretos de Alta Resistência.** Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro/RJ, 1995.

GOMES, P.C.C. **Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete.** 2002. 139p. Tese - Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Engenharia de Materiais.** Concreto: Ciência e Tecnologia. Edição G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2010. V1, pp. 905-944.

HOLSCHEMACHER, K. KLUG, Y. **A database for the evaluation of hardened properties of SCC.** LACER, N° 7. 2002. pp. 123-134.

ISAIA, Geraldo Cechella et al. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: Ibracon, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola.** Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 03 abril 2014.

JAMES, J.; RAO, M. **Reactivity of Rice husk ash.** Cement and Concrete Research: Pergamon Press, Ltd. v.16, 1986.

KLUG, Y.; HOLCHMACHER, K. **Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete. Rheological measurements on self-compacting fibre reinforced concrete.** In: Thirid International Symposium on Self-compacting concrete. 2003, Reykjavik, pp. 596-605.

KUMAYAMA, R. **Estudo da viabilidade do emprego do pó de mármore para a produção de concreto autoadensável e substituição parcial dos agregados por pérolas de poliestireno expandido.** Ilha Solteira. 2014, FEIS/UNESP. (Dissertação de mestrado).

LI, V.; KONG, H.; BIKE, S. **Constitutive Rheological design for developement of Self-Compacting engineed cementitius composites.** 2d International Symposium on Self-Compacting Concrete. Tokyo, 2001, pp147-158.

LISBOA, E. M. **Obtenção do Concreto Auto- Adensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas.** Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFAL, Maceió, 2004.

LEITE, F. C. M. **Influência do tipo de adição mineral e da dimensão máxima do agregado graúdo no comportamento do concreto auto-adensável.** Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Londrina. 2007.

MARINGOLO, V. **Clínquer co-processado: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento.** São Paulo: USP, 2001. 174p. Tese (Doutorado em Mineralogia), Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

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

MEHTA, P. K. Rice Husk Ash: **A Unique Supplementary Cementing Material.** *Advances in Concrete Technology*, Ottawa: Canmet, p. 407-431, 1992.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 1.ed. São Paulo: PINI, 1994, p. 573.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. 2005.

NEVILLE, A.M. Concrete in the year 2000. In: MALHOTRA, V.M. (ed.) **Advances in Concrete Technology**. Ottawa, 1992, p.21-78.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Pini, 1997, 828p.

PÁDUA, P. G. L. **Argamassas para concretos estruturais confeccionados com cinza de bagaço de cana-de-açúcar in Natura**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 53, 2011, Florianópolis: IBRACON, 2011.

PAULON, V. A. **Estudos da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado**. São Paulo: USP, 1991. 190p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A. P. **Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido**. Concreto: Ciência e Tecnologia. Edição G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2011. V1, pp. 585-650.

PETRUCCI, E.J. **Concreto de Cimento Portland**. 7 ed. São Paulo: Globo, 1980. 307p.

PROSKE, T. GRAUBNER, C. A. **Influence of the coarse aggregates on the concrete properties of SCC**. In: Annual Journal on Concrete and Concrete Structures, V. 20. Darmstadt, 2005.

PROUST, E.; PONS, G.; ASSIE, S. **Creep and shrinkage of sel-compacting concrete**. In: International Symposium on Self-Compacting Concrete. 3, 2003, Reykjavik, pp 645-654.

REGO, J.H.S. **As cinzas de casca de arroz amorfa e cristalina como adição mineral aos cimentos-aspectos de microestrutura das pastas**. Brasília, 2004, 301p. (Tese de Doutorado).

REPETTE, W. L. **Concreto de última geração: presente e futuro**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realização. Edição G. C. Isaia. São Paulo: Ibracon, 2005. V2, pp. 1509-1550.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. **Final report of RILEM TC 188-CSC 'casting of self-compacting concrete'**. Materials and Structures. Maio, 2006.

SILVA, C. A. R. **Estudo da influência da incorporação da cinza de casca de arroz no concreto**. Ilha Solteira, 2004. 96f. Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

SILVA, E.J. **Contribuição para utilização de cinzas de casca de arroz na construção civil**. Ilha Solteira, 2009, pp117, Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

SUGITA, S; SHOYA, M; TOKUDA, H. Evaluation of pozzolanic activity of rice husk ash. In: **4 th International Conference on Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, 1992**. Proceedings. Detroit: American Institute, 1993, v.1., p.495-511.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. Porto Alegre, 2004. 149p. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFGRS.

TUTIKIAN, B.F.; MOLIN, D.C.D. **Concreto autoadensável**. São Paulo: PINI, 2008. 140p.