

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**PROPRIEDADES MECÂNICAS E RETRAÇÃO DO
CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

MATHEUS BORGES SILVA

ORIENTADORA: VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
CIVIL**

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO/2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**PROPRIEDADES MECÂNICAS E RETRAÇÃO DO
CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

MATHEUS BORGES SILVA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO, DSc. (UnB)
(ORIENTADORA)

CLÁUDIO HENRIQUE DE ALMEIDA FEITOSA PEREIRA, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

SHEILLA PEREIRA VIEIRA, Mestranda (UNIPAM)
(EXAMINADORA EXTERNA)

DATA: BRASÍLIA/DF, 06 DE DEZEMBRO DE 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, MATHEUS BORGES

Propriedades mecânicas e retração do concreto autoadensável

[Distrito Federal] 2016

x, 65 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2016)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Concreto autoadensável

2. Propriedades mecânicas

3. Retração

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, M.B. (2016). Propriedades mecânicas e retração do concreto autoadensável. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 65 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Matheus Borges Silva

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Propriedades mecânicas e retração do concreto autoadensável

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Matheus Borges Silva

CSB 10 Lote 6/7 Bloco A Apartamento 305

72.015-605 - Taguatinga/DF - Brasil

RESUMO

O concreto autoadensável (CAA) possui como principais propriedades a capacidade de preenchimento, habilidade de fluir entre obstáculos e resistência à segregação. Essas características, aliadas ao fato do material possuir uma grande quantidade de finos em sua composição, provocam um aumento na qualidade e na durabilidade do concreto autoadensável, uma vez que o adensamento é mais eficiente por não demandar vibração externa. Para a produção do CAA nessa pesquisa foi utilizado o cimento CP II F - 40 e o fíler calcário como adição mineral. A dosagem foi feita a partir da composição do esqueleto granular e tendo como base os parâmetros da ACI 237R-07, porém não se limitando totalmente a eles. Foram fixadas duas relações água/cimento e dois valores de consumo de cimento, produzindo 4 traços para o estudo. A porcentagem de superplastificante foi ajustada para obter uma classe de espalhamento de no mínimo SF2. Para verificar as propriedades do concreto no estado fresco e avaliar as propriedades de autoadensabilidade foram realizados os ensaios de espalhamento, funil V e caixa L. No estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e retração. A cura do concreto foi feita em câmara úmida. As propriedades mecânicas e a retração do CAA foram analisadas, avaliando a influência dos diferentes traços estudados e comparando com resultados encontrados na literatura. De uma maneira geral, percebeu-se que a relação água/cimento e o consumo de cimento possuem grande impacto na determinação das propriedades mecânicas do concreto, dado que uma baixa relação água/cimento e um elevado consumo de cimento tendem a aumentar a resistência mecânica do mesmo. Com relação à retração, observou-se que uma baixa relação água/cimento favorece a retração autógena e desfavorece a retração por secagem, enquanto não se notou um grande impacto do consumo de cimento na retração do concreto.

Palavras-chave: Concreto autoadensável, propriedades mecânicas e retração.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL	3
2.2 DEFINIÇÃO E PROPRIEDADES DO CAA	4
2.3 MATERIAIS CONSTITUINTES DO CAA	5
2.3.1 Cimento Portland	5
2.3.2 Agregados	6
2.3.3 Aditivos.....	8
2.3.3.1 Superplastificantes	8
2.3.3.2 Modificadores de viscosidade	10
2.3.4 Adições minerais.....	10
2.3.5 Água.....	12
2.4 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA TRABALHABILIDADE DO CAA	13
2.4.1 Método do cone de Abrams	14
2.4.2 Método do Anel J.....	16
2.4.3 Método da caixa L	18
2.4.4 Método do funil V.....	19
2.4.5 Método da coluna de segregação	21
2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS	23
2.6 RETRAÇÃO.....	24
2.6.1 Retração do concreto autoadensável	25
3. METODOLOGIA	29
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	30
3.1.1 Cimento Portland	30
3.1.2 Agregado miúdo.....	31
3.1.3 Agregado graúdo.....	32
3.1.4 Adição mineral.....	32
3.1.5 Aditivo superplastificante	32
3.2 ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....	32
3.3 ENSAIOS DE AUTOADENSABILIDADE.....	34

3.4 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	35
3.4.1 Propriedades mecânicas	35
3.4.2 Retração	36
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	38
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	38
4.1.1 Cimento Portland	38
4.1.2 Agregado miúdo.....	38
4.1.3 Agregado graúdo.....	41
4.1.4 Adição mineral.....	43
4.1.5 Aditivo superplastificante	43
4.2 ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....	44
4.2.1 Composição do esqueleto granular	44
4.2.2 Determinação dos traços	46
4.3 ENSAIOS DE AUTOADENSABILIDADE.....	48
4.4 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	49
4.4.1 Propriedades mecânicas	49
4.4.1.1 Compressão simples.....	50
4.4.1.2 Tração.....	52
4.4.1.2.1 Análise visual dos corpos de prova rompidos	54
4.4.1.3 Módulo de elasticidade.....	54
4.4.2 Retração	56
5. CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Influência dos tipos de areia sobre a tensão de cisalhamento da mistura do CAA quando em movimento, onde τ é a tensão de cisalhamento e σ a tensão normal	7
Figura 2.2 – Cone de Abrams	14
Figura 2.3 – Anel J	17
Figura 2.4 – Caixa L	18
Figura 2.5 – Funil V	20
Figura 2.6 – Coluna de Segregação	21
Figura 2.7 – Módulo de elasticidade de CAA e CCV em função do teor de argamassa	24
Figura 2.8 – Extensão total de retração das misturas binárias	26
Figura 2.9 – Extensão total de retração das misturas ternárias	26
Figura 2.10 – Curvas médias de retração autógena do concreto de referência MCWSF e dos concretos com reforço fibroso	27
Figura 2.11 – Curvas obtidas no ensaio de retração por secagem do concreto de referência MCWSF e dos concretos com reforço fibroso	28
Figura 3.1 – Etapas do procedimento experimental	29
Figura 3.2 – Ensaio de caracterização dos materiais	30
Figura 3.3 – Estudo de dosagem do CAA	33
Figura 3.4 – Ensaio de autoadensabilidade	34
Figura 3.5 – Ensaio no estado endurecido	35
Figura 3.6 – Vistas frontal, lateral e superior das fôrmas de retração	36
Figura 3.7 – Equipamento para medição do comprimento dos corpos de prova	37
Figura 4.1 – Gráfico da composição granulométrica da areia média	39
Figura 4.2 – Gráfico da composição granulométrica da areia fina	40
Figura 4.3 – Gráfico da composição granulométrica da brita $D_{\text{máx}} = 12,5 \text{ mm}$	42
Figura 4.4 – Gráfico da composição granulométrica da brita $D_{\text{máx}} = 19,0 \text{ mm}$	43
Figura 4.5 – Exsudação na tentativa de produção do concreto com consumo de cimento de 350 kg/m^3 e 10% de adição de fíler	47
Figura 4.6 – (a) Ensaio de espalhamento (b) Ensaio da caixa L e funil V	48
Figura 4.7 – (a) Resultado dos ensaios de compressão dos traços 1 e 2 (b) Resultado dos ensaios de compressão dos traços 3 e 4 (c) Resultado dos ensaios de compressão dos traços 2 e 3 (d) Resultados dos ensaios de compressão dos traços estudados	51
Figura 4.8 – (a) Resultado dos ensaios de tração dos traços 1 e 2 (b) Resultado dos ensaios de tração dos traços 3 e 4 (c) Resultado dos ensaios de tração dos traços 2 e 3 (d) Resultados dos ensaios de tração dos traços estudados	53

Figura 4.9 – Corpos de prova após ruptura	54
Figura 4.10 – (a) Resultados de módulo de elasticidade dos traços 1 e 2 (b) Resultados de módulo de elasticidade dos traços 3 e 4 (c) Resultados de módulo de elasticidade dos traços 2 e 3 (d) Resultados de módulo de elasticidade dos traços estudados	55
Figura 4.11 – Retração autógena dos traços estudados	57
Figura 4.12 – (a) Resultados de retração dos traços 1 e 2 (b) Resultados de retração dos traços 3 e 4 (c) Resultado de retração dos traços 2 e 3 (d) Resultados de retração dos traços estudados.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação das adições minerais	11
Tabela 2.2 – Ensaios de avaliação da trabalhabilidade do CAA	13
Tabela 2.3 – Classes de espalhamento	15
Tabela 2.4 – Classes de viscosidade aparente	15
Tabela 2.5 – Limites superiores e inferiores de espalhamento para CAA encontrados na literatura	16
Tabela 2.6 – Classes de habilidade passante pelo Anel J	17
Tabela 2.7 – Classes de habilidade passante pela caixa L	19
Tabela 2.8 – Limites de resultados encontrados na literatura	19
Tabela 2.9 – Classes de viscosidade pelo funil V	20
Tabela 2.10 – Limites superiores e inferiores para o ensaio do funil V encontrados na literatura.....	21
Tabela 2.11 – Classes de resistência à segregação	22
Tabela 3.1 – Parâmetros para o concreto autoadensável	34
Tabela 4.1 – Ensaios de caracterização do cimento Portland	38
Tabela 4.2 – Ensaios de caracterização das areias	39
Tabela 4.3 – Distribuição granulométrica da areia média	39
Tabela 4.4 – Distribuição granulométrica da areia fina	40
Tabela 4.5 – Ensaios de caracterização das britas	41
Tabela 4.6 – Distribuição granulométrica da brita $D_{m\acute{a}x} = 12,5 \text{ mm}$	41
Tabela 4.7 – Distribuição granulométrica da brita $D_{m\acute{a}x} = 19,0 \text{ mm}$	42
Tabela 4.8 – Ensaio de caracterização do fíler calcário	43
Tabela 4.9 – Especificações do superplastificante TEC FLOW 7000	44
Tabela 4.10 – Composição entre britas	44
Tabela 4.11 – Composição entre material 1 (70% Brita $D_{m\acute{a}x} = 12,5 \text{ mm}$ / 30% Brita $D_{m\acute{a}x} = 19,0 \text{ mm}$) e areia média	45
Tabela 4.12 – Composição entre material 2 (60% Material 1 / 40% Areia média) e areia fina.....	45
Tabela 4.13 – Traços resultantes do estudo de dosagem do concreto autoadensável	46
Tabela 4.14 – Resultados dos parâmetros do ACI 237R-07 para os traços estudados	47
Tabela 4.15 – Resultados dos ensaios de autoadensabilidade dos traços estudados	49
Tabela 4.16 – Propriedades mecânicas dos traços produzidos	50
Tabela 4.17 – Retração dos traços estudados	57

LISTA DE ABREVIações

a/agl – Relação água/aglomerante

a/c – Relação água/cimento

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

C₂S – Silicato dicálcico

C₃S – Silicato tricálcico

CAA – Concreto autoadensável

CCV – Concreto convencional vibrado

VMA – Aditivo modificador de viscosidade

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material com uma estrutura bastante complexa. O conhecimento do seu comportamento e suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido é algo fundamental na engenharia civil, uma vez que pode assegurar um aumento da vida útil e da segurança das estruturas em geral (GIROTTI, 2012).

O emprego do concreto convencional em determinadas situações, como estruturas submersas, reforços estruturais e fundações, apresenta alguns obstáculos, causados principalmente pela alta taxa de armadura desses elementos estruturais. Dentre as alternativas existentes para superar essas dificuldades se encontram os concretos especiais, sendo que o concreto autoadensável (CAA) merece destaque (FERRAZ, 2009).

O concreto autoadensável (CAA), desenvolvido no Japão em 1986, surgiu como uma solução para problemas ligados ao adensamento ineficiente do concreto pelos operários, que causavam prejuízo à durabilidade das estruturas. Ele representa um tipo especial de concreto, definido pela ABNT NBR 15823-1:2010 como o “concreto que é capaz de fluir, autoadensar pelo seu próprio peso, preencher a forma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento”.

O CAA possui uma série de vantagens em relação ao concreto convencional devido às suas propriedades. A eliminação da necessidade de sua vibração pode produzir concretos com maior qualidade e com maior eficiência econômica, uma vez que apresenta maior velocidade na concretagem e redução no trabalho e custo dos equipamentos. Além disso, ele representa uma melhoria no sentido da automação na construção civil, levando à melhoria nas condições de trabalho e diminuição dos riscos de saúde dos operários (MANUEL, 2005).

O concreto autoadensável vem ganhando cada vez mais espaço em obras por todo o mundo. Isso se deve ao grande número de pesquisas que vem sendo realizadas a respeito do material e também de aplicações bem sucedidas. Apesar disso, o CAA ainda carece de estudos sobre diversos aspectos, havendo até mesmo informações contraditórias (COUTINHO, 2011).

O aumento da utilização do concreto autoadensável na construção civil, suas vantagens em relação aos outros tipos de concreto e a relativa carência de informações a respeito do tema consistem nas motivações dessa pesquisa. Além das propriedades mecânicas de resistência à compressão e tração, foi destinada atenção ao estudo do módulo de elasticidade, que tende a ser menor no concreto autoadensável devido à menor quantidade de agregado graúdo em sua

composição, e à retração, que possui a tendência de aumentar em concretos com muitos finos, como é o caso do CAA.

1.1 OBJETIVOS

Essa pesquisa tem como objetivo geral dosar e produzir concretos autoadensáveis, avaliando suas propriedades no estado fresco, determinar as propriedades mecânicas no estado endurecido e verificar o comportamento da retração.

Diante disso, os objetivos específicos serão:

- Dosar o concreto autoadensável a partir da composição do esqueleto granular e nos critérios do ACI 237R-07;
- Determinar as propriedades do CAA no estado fresco a partir dos ensaios de espalhamento, caixa L e funil V, a fim de comprovar se o material se encontra dentro dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 15823-1:2010;
- Determinar as propriedades mecânicas do concreto autoadensável, avaliando a influência dos traços produzidos com diferentes relações água/cimento e consumos de cimento distintos;
- Acompanhar a retração do CAA com o objetivo de avaliar a influência dos constituintes do material e dos traços produzidos com diferentes relações água/cimento e consumos de cimento distintos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos relevantes relacionados ao projeto desenvolvido. Nele será possível encontrar uma análise do desenvolvimento do concreto autoadensável, como também suas vantagens e aplicações na construção civil. Além disso, serão apresentados aspectos teóricos fundamentais que serão utilizados nesta pesquisa, dentre os quais é possível destacar: a definição do concreto autoadensável, os materiais constituintes do mesmo e determinadas propriedades no estado fresco e endurecido, em especial a retração.

2.1 HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Por muitos anos, desde 1983, a durabilidade das estruturas de concreto representou um grande problema no Japão. A execução de construções duráveis dependia de adequada compactação realizada por profissionais especializados. Como nessa época houve uma queda acentuada no número desse perfil de operário na indústria da construção japonesa, ocorreu uma grande redução da qualidade dos serviços e, conseqüentemente, da durabilidade das estruturas (OKAMURA; OUCHI, 2003).

O desenvolvimento do concreto autoadensável aparece como uma solução para essa questão, uma vez que uma de suas principais características é a autocompactação quando ele é aplicado. Sendo assim, ele foi desenvolvido para resolver os problemas ligados ao adensamento a partir de suas propriedades de capacidade de preenchimento, resistência à segregação e capacidade de fluir entre obstáculos.

Diante da necessidade de alcançar estruturas mais econômicas, com maior qualidade de adensamento e que exigiam menor tempo de execução, foi elaborado o concreto autoadensável. O CAA foi desenvolvido no Japão pelo Professor Hajime Okamura em 1986. Após a realização de estudos relacionados aos materiais constituintes, foi obtido o primeiro protótipo por Ozawa, em 1988. (GOMES; BARROS, 2009; TUTIKIAN, 2004).

O primeiro modelo de CAA foi elaborado com os materiais disponíveis no mercado na época. Ele se comportou satisfatoriamente em relação às seguintes propriedades: secagem e retração, calor de hidratação, densidade após o endurecimento, entre outras. Esse novo concreto, que recebeu o nome inicial de “Concreto de Alto Desempenho”, foi definido a partir de seu comportamento nos diferentes estados: no estado fresco apresentava autoadensabilidade, nas primeiras idades evitava defeitos iniciais e após o endurecimento era resistente aos fatores externos (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Entretanto, quase no mesmo período, “Concreto de Alto Desempenho” foi definido por Aitcin et al. como sendo um concreto com elevada durabilidade devido à baixa relação água/cimento (GAGNE et al., 1989). Por causa disso, os autores passaram a empregar o nome “Concreto Autoadensável de Alto Desempenho” para se referir a esse material (OKAMURA; OUCHI, 2003).

O desenvolvimento do concreto autoadensável teve bastante repercussão na área de tecnologia do concreto no período (TUTIKIAN, 2004). Com base no protótipo de CAA desenvolvido e em estudos na área, várias pesquisas e publicações foram realizadas no Japão, além de aplicações do novo concreto (OKAMURA; OUCHI, 1999). Essa evolução veloz e intensiva fez com que a nova tecnologia fosse rapidamente empregada em muitos países da Europa, além do próprio Japão (BARTOS, 2000).

Nos dias de hoje, a importância do concreto autoadensável vem crescendo bastante no mundo inteiro. Isso é demonstrado pelo grande número de pesquisas, congressos e seminários que tratam do tema e também pelas aplicações justificadas pelas vantagens em relação aos outros tipos de concreto, o que vem chamando a atenção das construtoras. Na América do Sul, com destaque para o Brasil, a tendência é a mesma dos outros países: o emprego do CAA aumenta a cada ano (GOMES; BARROS, 2009).

2.2 DEFINIÇÃO E PROPRIEDADES DO CAA

De acordo com a ABNT NBR 15823-1:2010, o concreto autoadensável é o “concreto que é capaz de fluir, autoadensar pelo seu próprio peso, preencher a forma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento”.

A habilidade de preenchimento representa a capacidade do concreto fluir ao longo das formas, passando pelos obstáculos e armaduras, e preenchendo seus espaços. Essa propriedade, que é bastante influenciada pela fluidez da mistura, geralmente provoca um bom desempenho do CAA em relação ao acabamento superficial das estruturas (FERRAZ, 2009).

A capacidade de passar entre obstáculos é a propriedade caracterizada pela habilidade do CAA de fluir pela fôrma, movimentando-se pelas armaduras e outros obstáculos, sem que haja obstrução do fluxo e sem que a mistura apresente segregação. (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). A viscosidade e as características dos agregados provocam impacto direto nessa qualidade (GOMES; BARROS, 2009).

A resistência à segregação consiste na capacidade do concreto manter sua uniformidade durante seu transporte, lançamento e adensamento, sendo que a coesão e a viscosidade da mistura são fundamentais para garantir essa habilidade (FERRARIS et al., 2000). Uma boa resistência à segregação, que provoca uma distribuição das partículas semelhante em todos os locais e níveis do material, é importante para se evitar baixa deformabilidade do material, alta retração e não uniformidade na resistência do concreto (FERRAZ, 2009).

Tais propriedades devem ser avaliadas e quantificadas através da realização de ensaios que simulam a aplicação do CAA. Existe uma grande variedade de métodos para verificar esses parâmetros, sendo que alguns qualificam mais de um aspecto. A escolha do tipo de ensaio deve ser feita considerando as condições locais da obra e as características do lançamento. (EFNARC, 2005).

Seja qual for o tipo de concreto, a presença de bolhas de ar ou falhas de concretagem caracteriza um dos principais fatores que alteram a qualidade do concreto no estado endurecido. O CAA deve ser capaz de se compactar e evitar esse problema sem qualquer tipo de auxílio externo, fazendo uso apenas do seu próprio peso (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

2.3 MATERIAIS CONSTITUINTES DO CAA

Uma das etapas fundamentais para se determinar a dosagem do concreto é a escolha dos materiais que vão integrar a mistura. Os materiais empregados na produção do CAA podem ser os mesmos usados no concreto convencional, porém em diferentes proporções. O concreto autoadensável geralmente apresenta uma menor quantidade de agregados graúdos e uma maior proporção de finos, agregados miúdos e superplastificantes (COUTINHO, 2011).

O CAA exige um elevado controle de qualidade dos materiais e um maior cuidado na seleção. Isso se deve ao fato dele ser muito sensível a mudanças nas características dos materiais, procedimentos de produção e suas propriedades reológicas particulares, como fluidez, coesão e resistência à segregação (GIROTTI, 2012).

2.3.1 Cimento Portland

Cimento pode ser definido como todo material com propriedades adesivas e coesivas capaz de ligar fragmentos de outros materiais formando um todo. Na esfera da construção civil, o termo “cimento” é empregado para se referir aos materiais aglomerantes usados com agregados, blocos, tijolos, entre outros (NEVILLE, 2015).

Para a produção de CAA podem ser usados os mesmos tipos de cimento utilizados na produção de concretos convencionais, sendo que as recomendações quanto à durabilidade e tipos de uso são as mesmas. Não há critérios científicos que especifiquem qual o melhor tipo de cimento para o CAA: todos os cimentos do tipo Portland podem ser empregados no concreto autoadensável. A escolha do cimento deve ser feita de acordo com as exigências e especificidades de cada obra ou ensaio. (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; GOMES; BARROS, 2009).

O tipo de cimento pode ser um fator importante na fissuração e retração do concretos nas primeiras idades, podendo provocar variações em seus resultados. Isso se deve, entre outros aspectos, ao aumento da temperatura pelo calor de hidratação do cimento e às reações do C_3S e C_3A decorrentes da potencialidade de suas reações de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2015).

Alguns estudos encontrados nas literaturas apontam que cimentos com mais de 10% de C_3A em sua composição apresentam rápida perda de fluidez, podendo causar problemas de baixa trabalhabilidade e dificultar a aplicação do CAA em obras (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; GOMES; BARROS, 2009). Vale destacar que a presença de C_3A no cimento é indesejável, pois ele pouco contribui para a resistência e, quando a pasta de cimento é atacada por sulfatos, a formação de etringita pode gerar desagregação do concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013).

No concreto autoadensável, a quantidade de cimento depende da utilização ou não de adições e fica entre 200 e 450 kg/m³. Quando a dosagem ultrapassa o valor de 500 kg/m³, é necessário empregar cuidados especiais devido a possíveis problemas ligados à retração. Por outro lado, quando a dosagem obtém um valor menor que 300 kg/m³, é necessário incluir na mistura outro material cimentício, como a cinza volante e a escória de alto forno (GOMES; BARROS, 2009).

2.3.2 Agregados

A qualidade dos agregados é de grande importância para qualquer tipo de concreto, uma vez que ocupa pelo menos $\frac{3}{4}$ do volume do material. O agregado pode ter relevante influência na resistência, pois características indesejáveis de agregados podem reduzi-la, além de poder comprometer a durabilidade e o desempenho do concreto (NEVILLE, 2015).

Não existem limitações em relação à natureza dos agregados miúdos em concretos. Porém, é necessário empregar areias cuja distribuição granulométrica seja contínua. O conteúdo

de areia pode representar de 50% a 60% dos agregados no concreto, dependendo da proporção e características dos demais constituintes do mesmo (FERRAZ, 2009).

A seleção do agregado miúdo é relacionada à demanda de água, que influencia diretamente a fluidez e a coesão do concreto, propriedades essenciais do CAA. A utilização de agregados miúdos com partículas lisas e arredondadas é melhor para o concreto autoadensável, uma vez que aumenta a fluidez sem necessidade de acréscimo de água (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). De acordo com Okamura e Ouchi (2003), quanto mais angulosas são as partículas do agregado miúdo, maior é a resistência ao cisalhamento e menor é a deformabilidade do concreto, como pode ser notado na Figura 2.1.

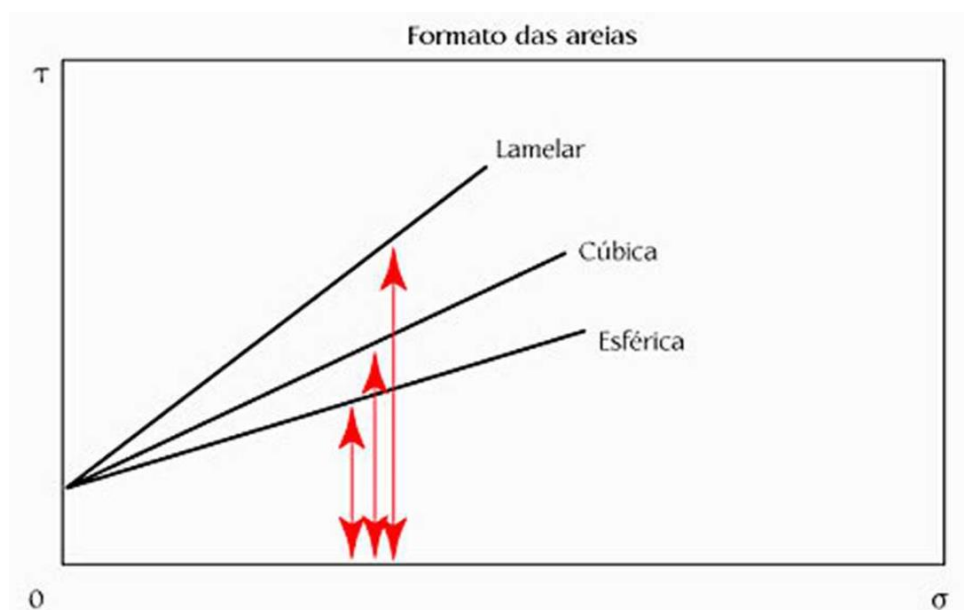


Figura 2.1 – Influência dos tipos de areia sobre a tensão de cisalhamento da mistura do CAA quando em movimento, onde τ é a tensão de cisalhamento e σ a tensão normal. (Fonte: Adaptado de Okamura e Ouchi, 2003)

Agregados angulares apresentam melhor aderência com a pasta cimentícia que agregados arredondados, influenciando no comportamento mecânico do concreto endurecido. Porém, se a angulosidade for bastante acentuada, pode haver redução da trabalhabilidade e aumento do consumo de água. Sendo assim, agregados angulares requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis, elevando o custo do concreto. Diante disso, para o CAA, assim como para os demais tipos de concreto, é indicado que se empregue agregados com coeficiente de forma próximo de 1 (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Com relação ao agregado graúdo, as exigências quanto à dimensão máxima do agregado são mais limitantes. Gómez e Maestro (2005) recomendam que a dimensão máxima do

agregado graúdo seja menor que $\frac{2}{3}$ do espaçamento entre barras e que $\frac{3}{4}$ do cobrimento mínimo de concreto. A ABNT NBR 6118:2014 estabelece que a dimensão máxima característica do agregado graúdo não pode superar em 20% a espessura nominal do cobrimento do concreto.

Gomes e Barros (2009) indicam que o volume de agregado miúdo no CAA varia normalmente entre 40% e 50% do volume de argamassa, com proporções entre 710 e 900 kg/m³. Além disso, afirmam que o concreto autoadensável deve possuir baixo volume de agregado graúdo, variando entre 28% e 35% do volume de concreto, e uma relação de peso agregado graúdo/concreto entre 32% e 40%, com proporções de aproximadamente 750 a 920 kg/m³.

2.3.3 Aditivos

A ABNT NBR 11768:2011 define aditivo químico como “produtos que, adicionados em pequenas quantidades a concretos de cimento Portland, modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições”. Segundo a RILEM (1999), aditivo é um material que é adicionado ao concreto ou argamassa com o objetivo de melhorar suas propriedades no estado fresco ou endurecido.

Embora sua presença não seja essencial no concreto, os aditivos consistem em um componente muito importante do mesmo, sendo empregados de maneira crescente em todo o mundo. A grande utilização desses materiais se devem à sua capacidade de provocar melhorias físicas e econômicas no concreto, incluindo o uso em condições nas quais seria impensável utilizar concreto sem aditivos (NEVILLE, 2015).

No caso do CAA, os aditivos mais utilizados são os superplastificantes, em especial os policarboxilatos, e os modificadores de viscosidade. Porém, outros aditivos também podem ser empregados em conjuntos com os anteriores, como retardadores de pega e incorporadores de ar (COUTINHO, 2011).

2.3.3.1 Superplastificantes

Os aditivos superplastificantes integram uma categoria de redutores de água quimicamente distintos dos agentes redutores normais, podendo reduzir o consumo de água em até 30% (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Eles atuam no concreto dispersando as partículas de

cimento, que possuem uma forte tendência em formar flocos quando entram em contato com a água de amassamento (AİTCIN, 2000).

A utilização do superplastificantes no CAA é fundamental, de tal forma que seria impensável a ideia de concreto autoadensável sem esses componentes. Essa importância se deve ao fato desse tipo de aditivo ser responsável pela fluidez da mistura, uma das principais propriedades do CAA (GOMES; BARROS, 2009).

Os aditivos superplastificantes podem ser divididos em duas categorias: os de 2ª geração, composto por polímeros sintéticos sulfonados, e os de 3ª geração, que compreendem os policarboxilatos. Esses últimos apresentam uma grande eficiência na repulsão dos grãos de cimento (CAVALCANTI, 2006).

Os superplastificantes mais recomendados para o concreto autoadensável são os policarboxilatos, aditivos de 3ª geração, pois provocam uma maior redução do consumo de água maiores resistência iniciais, além de manter a fluidez da mistura por um maior período de tempo, se comparados aos superplastificantes de 2ª geração (NUNES, 2001).

Ainda assim, uma relevante dificuldade relacionada ao uso desses aditivos é a elevada taxa de perda de consistência com o tempo em comparação ao concreto convencional vibrado. A consistência alcançada pelo superplastificantes se mantém por um período de apenas 30 a 60 minutos, enquanto a máxima trabalhabilidade obtida permanece por 10 a 15 minutos, seguida por uma rápida perda do espalhamento (MAILVA-GANAN, 1979 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Devido a essa complicação, a colocação do superplastificante no concreto deve ser realizada pouco antes do seu lançamento. A consistência inicial e a taxa de perda de consistência em concretos com esses aditivos são influenciados por alguns fatores, tais como: tipo de aditivo, dosagem, temperatura, momento de incorporação na mistura, procedimento de mistura, tipo de cimento, entre outros (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

A adição de superplastificante influencia no comportamento de todos os tipos de cimento Portland, aumentando a trabalhabilidade dos mesmos. Entretanto, a eficiência em cada um dos tipos é diferente. De uma maneira geral, quanto maior a finura das partículas do cimento, menor é a ação dos aditivos superplastificantes por causa da redução da concentração das moléculas absorvidas na superfície dos grãos do cimento (BUCHER, 1989).

2.3.3.2 Modificadores de viscosidade

Aditivos moderadores de viscosidade (VMA) são materiais utilizados para aumentar a coesão e a estabilidade de compostos à base de cimento. Esse efeito é produzido pelo aumento da viscosidade da água da mistura e da capacidade da pasta de manter seus componentes em suspensão (LACHEMI et al., 2004).

O emprego desses aditivos não é imprescindível quando se trabalha com quantidades ótimas de cimento e adições minerais (FERRAZ, 2009). Além disso, esses agentes se mostram extremamente úteis quando o concreto apresenta agregados mal graduados e não há disponibilidade de adições minerais a um preço razoável. (SEDRAM et al., 1996).

É necessário fazer ensaios prévios para avaliar a compatibilidade entre os VMA e os superplastificantes quando estes forem usados em conjunto, principalmente em relação ao cimento. Isso deve ser feito a fim de evitar que surjam problemas como retardamento da pega, coesão excessiva, aumento da retração, mudança da resistência nas primeiras idades, entre outros defeitos (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Quando empregados em elevadas doses, os modificadores de viscosidade podem provocar um aumento da retração por secagem. Além disso, podem alterar o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto, fazendo com que concretos nas idades menores tenham uma pequena redução na resistência. Isso ocorre porque acontece um retardo das reações de hidratação do cimento, uma vez que parte da água disponível fica retida no aditivo (KRAUS, 2006).

2.3.4 Adições minerais

Nos últimos anos, tem se verificado um crescimento na utilização de adições minerais na produção de cimento Portland e de concretos. Isso se deve às melhorias físicas, mecânicas e de durabilidade que podem ser proporcionadas com esses ingredientes e também a fatores econômicos e ambientais, uma vez que esses materiais são geralmente resíduos industriais que precisam ser descartados (SANTOS; CASTRO; BARBOSA, 2015).

As adições minerais são materiais finamente moídos que, quando adicionados ao concreto, possuem a capacidade de conferir alguma propriedade adicional à mistura. Elas podem melhorar a trabalhabilidade do concreto e também aumentar a resistência à fissuração térmica, à expansão álcali agregado e ao ataque por sulfatos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A utilização de adições é fundamental no concreto autoadensável, uma vez que ele demanda uma grande quantidade de finos. Dentro da adição de finos também se incluem os finos por parte das areias, que, em geral, passam pelas peneiras de 0,08 a 0,063 (FERRAZ, 2009).

A adição de finos provoca um aumento da trabalhabilidade, garantindo uma resistência à segregação do concreto e coesão da pasta. Além disso, ela melhora as propriedades mecânicas do CAA no estado endurecido, uma vez que causa um melhor preenchimento dos vazios, deixando o material mais denso (FERRAZ, 2009).

O efeito químico das adições minerais se relaciona à capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio, produto da hidratação do cimento Portland, formando C-S-H, composto responsável pelo aumento da resistência mecânica e da durabilidade do concreto. Já o efeito físico envolve três resultados principais: o efeito fíler, que consiste no aumento da densidade da mistura em consequência do preenchimento dos vazios; o refinamento da estrutura de poros e dos produtos da hidratação do cimento, causado pelas partículas das adições que podem servir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação; e a mudança da microestrutura da zona de transição, na qual ocorre redução da quantidade de água livre (NEVILLE, 2015).

As adições minerais podem ser divididas segundo sua capacidade reativa com a água. De acordo com EFNARC (2005), elas podem ser:

Tabela 2.1 – Classificação das adições minerais. (Fonte: Adaptado de EFNARC, 2005)

TIPO I	Inertes ou semi-inertes	Fíleres de agregados. Pigmentos.
TIPO II	Pozolânicas	Cinza volante, conforme a EM 450-1. Sílica ativa, conforme a EM 13263-1.
	Hidráulicas	Escória de alto-forno.

Os materiais do Tipo I são componentes sem atividade química. Os fíleres são materiais naturais ou inorgânicos finamente divididos. Sua atividade envolve apenas o empacotamento granulométrico e a ação como pontos de nucleação para as reações de hidratação do cimento. Para a produção de CAA, os mais usados têm sido o calcário e a areia fina (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

As adições do Tipo II, por serem quimicamente ativas, podem melhorar consideravelmente a durabilidade do concreto. O concreto autoadensável pode ser produzido com as mesmas adições dessa categoria empregadas em concretos convencionais. É importante

ressaltar que as adições pozolânicas, como sílica ativa, cinza de casca de arroz e metacaulim, apresentam melhores resultados com relação ao aumento da coesão, da resistência e da durabilidade do CAA (GOMES; BARROS, 2009; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

O emprego de adições minerais deve ser feito de maneira adequada para não produzir efeitos negativos. Uma alta dosagem de cinza volante prejudica a fluidez do CAA. A sílica ativa, por ser muito eficiente na redução da exsudação, pode causar endurecimento superficial muito rápido. Já a escória de alto-forno, quando em elevados níveis, pode impactar a estabilidade do concreto autoadensável (GOMES; BARROS, 2009).

2.3.5 Água

A água é um componente do concreto que é pouco submetida a controle de qualidade. No entanto, é um componente fundamental na definição das propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no endurecido, podendo provocar mudanças significativas nas características de acordo com sua quantidade e qualidade.

A qualidade da água tem papel importante nas propriedades, visto que impurezas presentes na mesma podem causar redução da resistência e manchamento na superfície do concreto, além de promover corrosão das armaduras. Por esse motivo, é necessário se preocupar com a qualidade da água de amassamento e para cura do concreto (NEVILLE, 2015).

A água de amassamento não deve conter matérias orgânicas prejudiciais nem substâncias inorgânicas em excesso. Geralmente, o uso de água potável para amassamento produz resultados satisfatórios. Porém, existem algumas exceções, como por exemplo em regiões áridas, onde a água potável é salobra e pode conter níveis elevados de cloretos (NEVILLE, 2015).

O elevado teor de água pode aumentar a porosidade do concreto e reduzir sua resistência. Por outro lado, o aumento na quantidade de água na mistura reduz a tensão de escoamento e a viscosidade da mesma, o que é importante no caso do CAA. Nesse contexto, é importante o emprego de superplastificantes, que compensam parte da água de amassamento e garantem fluidez adequada sem prejuízo para a resistência (MELO, 2005).

A quantidade de água no concreto depende profundamente do seu tipo. Concretos convencionais geralmente apresentam fator água/cimento em torno de 0,50, enquanto concretos de alto desempenho possuem essa relação na faixa de 0,35 (GOMES; BARROS, 2009).

2.4 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA TRABALHABILIDADE DO CAA

Existe na literatura uma grande diversidade de métodos de ensaio para avaliar as propriedades do CAA no estado fresco. No Brasil, em 2010, foi aprovada a norma que estabelece os critérios relacionados ao concreto autoadensável: ABNT NBR 15823:2010.

A ABNT NBR 15823:2010 apresenta os requisitos para classificação, controle e aceitação do concreto autoadensável no estado fresco, além de estabelecer limites para as classes de autoadensabilidade do material. Ela também prescreve os ensaios para avaliar as propriedades do CAA, indicando procedimentos e valores de referência.

Em seu trabalho, Petersson (1999) lista diversos tipos de ensaio para caracterização do concreto autoadensável estabelecendo uma relação com sua utilização e propriedades analisadas. Na Tabela 2.2 é mostrada a classificação encontrada no estudo apenas para os ensaios encontrados na ABNT NBR 15823:2010, com exceção do método da coluna de segregação, que não foi abordado na pesquisa.

Tabela 2.2 – Ensaios de avaliação da trabalhabilidade do CAA. (Fonte: Petersson, 1999)

Ensaio	Utilização		Propriedades avaliadas		
	Laboratório	Canteiro	Fluidez	Hab. passante	Coesão
Espalhamento	XXX	XXX	XXX	N	X
Tempo de escoamento T ₅₀₀	XXX	XX	XXX	N	X
Funil – V	XX	X	XX	N	X
Caixa – L	XX	N	N	XXX	XX
Anel - J	XXX	XXX	X	XXX	XX

XXX – altamente recomendável; XX – recomendável; X – pouco recomendável; N – não relevante

É possível notar na Tabela 2.2 que, embora seja importante avaliar as propriedades do CAA por diferentes métodos em laboratório, nem todos os ensaios são realmente necessários ou até mesmo viáveis de serem realizados em um canteiro de obras. Pode-se perceber que o espalhamento e o anel J são considerados fundamentais no canteiro, uma vez que conseguem avaliar de forma confiável as três propriedades do concreto autoadensável.

Os ensaios descritos pela norma brasileira são: método do cone de Abrams, para determinação do espalhamento e tempo de escoamento; método do anel J, para determinação da habilidade passante; método da caixa L, para determinação da habilidade passante; método do funil V, para determinação da viscosidade; e método da coluna de segregação, para determinação da resistência à segregação.

A ABNT NBR 15823:2010 determina que a aceitação do CAA no estado fresco deve ser baseada no mínimo pela comprovação da fluidez e viscosidade aparente, avaliadas pelo método do cone de Abrams, e da habilidade passante, determinada pelo método do anel J. Ela ainda estabelece que, quando forem especificados os ensaios da caixa L e/ou do funil V, podem ser dispensados o ensaio do anel J e/ou a medida do tempo de escoamento.

A norma brasileira de concreto autoadensável é recente, uma vez que foi consolidada apenas em 2010. Antes dela ser elaborada, vários autores estabeleceram limites de resultados, para cada um dos ensaios de autoadensabilidade, para o concreto ser considerado autoadensável. As tabelas apresentadas nos tópicos seguintes destacam alguns limites encontrados na literatura para os ensaios de espalhamento, caixa L e funil V. Pode-se notar que a ABNT NBR 15823:2010 apresenta valores iguais ou mais conservadores em relação a esses defendidos pelos autores antes de sua composição.

2.4.1 Método do cone de Abrams

Trata-se de um método para determinação da fluidez do concreto autoadensável. A partir desse procedimento, são determinados dois parâmetros de avaliação: o espalhamento e o tempo de escoamento (T_{500}).

O ensaio é bem simples e necessita de poucos materiais. É composto por uma base metálica de no mínimo 900 mm de lado e 1,5 mm de espessura que não absorva água nem reaja com componentes do concreto e pelo Cone de Abrams, conforme ABNT NBR NM 67:1998. A base deve possuir três marcações circulares centradas com diâmetros de 100 mm, 200 mm e 500 mm. São necessários também: régua metálica, recipiente de material não absorvente, complemento metálico tronco-cônico, colher de pedreiro e cronômetro com precisão mínima de 0,1 segundos (ABNT NBR 15823-2:2010).

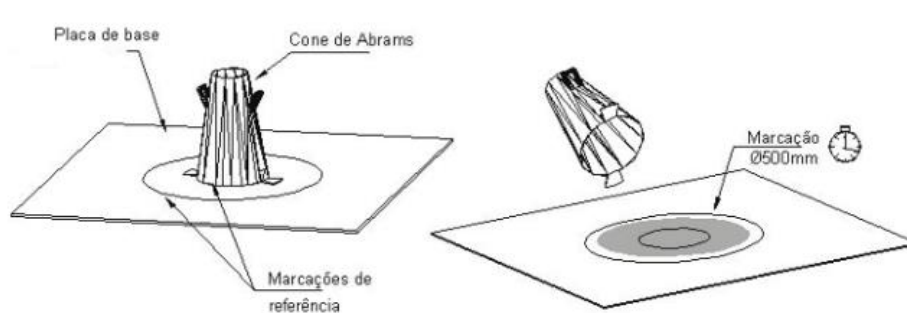


Figura 2.2 – Cone de Abrams. (Fonte: ABNT NBR 15823-2:2010)

O procedimento de execução inicia-se com umedecimento da base e do molde e a colocação da base em superfície nivelada. Deve-se posicionar o molde sobre a base centralizado na marcação de 200 mm. Após isso, preenche-se o cone de Abrams com uma amostra de concreto com o auxílio do complemento cônico, sem realizar nenhum tipo de adensamento. Ao fim do preenchimento, retira-se o complemento e remove-se o excesso de concreto com a colher de pedreiro. Por fim, levanta-se verticalmente o cone com velocidade constante, deixando o concreto fluir livremente. No momento em que o cone é levantado deve ser disparado o cronômetro, sendo esse parado quando a massa de concreto cobrir a marca circular de 500 mm, marcando esse intervalo de tempo (t_{500}) em segundos (ABNT NBR 15823-2:2010).

O espalhamento (SF) é determinado pela média aritmética de duas medidas perpendiculares do diâmetro do espalhamento final, sendo dado em milímetros. O tempo de escoamento (t_{500}) consiste no intervalo de tempo entre o início do escoamento e o momento em que a marca circular de 500 mm é alcançada pelo concreto, sendo fornecido em segundos (NBR 15823-2:2010).

De acordo com a ABNT NBR 15823:2010, os CAAs podem ser divididos nas seguintes classes, conforme seus valores de espalhamento:

Tabela 2.3 – Classes de espalhamento. (Fonte: ABNT NBR 15823:2010)

Classe	Espalhamento (mm)
SF1	550 a 650
SF2	660 a 750
SF3	760 a 850

Os concretos da classe SF1 são indicados para aplicações em estruturas com baixa taxa de armadura e para situações de bombeamento, enquanto a classe SF2 é adequada para a maior parte das utilizações correntes. Já os concretos da classe SF3 são recomendados para estruturas com elevada densidade de armadura e formas mais complexas (ABNT NBR 15823:2010).

Ainda conforme a ABNT NBR 15823:2010, existem duas classes de viscosidade aparente que dependem do valor de T_{500} . São elas:

Tabela 2.4 – Classes de viscosidade aparente. (Fonte: ABNT NBR 15823:2010)

Classe	t_{500} (s)
VS1	≤ 2
VS2	> 2

Recomenda-se a utilização de CAAs da classe VS1 para estruturas com elevada taxa de armadura, exigindo porém controle em relação à segregação e exsudação. Já os concretos da classe VS2 se mostram adequados para a maioria das aplicações correntes (ABNT NBR 15823:2010).

Diversos autores defendem determinados limites de espalhamento e tempo de escoamento para os concretos autoadensáveis, sendo esses valores de referência sugeridos antes da publicação da ABNT NBR 15823:2010. Na Tabela 2.5 podem ser encontrados valores encontrados na literatura, que em geral se encontram dentro dos limites estabelecidos pela norma brasileira.

Tabela 2.5 – Limites superiores e inferiores de espalhamento para CAA encontrados na literatura. (Fonte: Tutikian, 2004)

Referências	Espalhamento (mm)		t ₅₀₀ (s)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Gomes (2002)	600	700	4	10
Gomes et al. (2003)	600	750	3	7
Araújo et al. (2003)	650	800	2	5
Petersson (1999)	650	725	3	7
Tviksta (2000)	600	-	3	7
Coppola (2000)	600	750	5	12
Palma (2001)	650	750	3	6
EFNARC (2005) *	550	850	≤ 2	> 2

*Dados adicionados pelo autor

2.4.2 Método do Anel J

Os resultados obtidos com o ensaio de espalhamento não permitem que seja feita uma análise direta a respeito da habilidade passante do concreto autoadensável. Para avaliar essa propriedade pode ser realizado o ensaio do Anel J (GOMES; BARROS, 2009).

O ensaio necessita dos mesmos materiais empregados no método do Cone de Abrams e um Anel J. Esse último consiste em um anel metálico com 300 mm de diâmetro e 120 mm de altura que possui barras verticais de 10 mm de diâmetro distribuídas a cada (58 ± 2) mm, como pode ser observado na Figura 2.3 (ABNT NBR 15823-3:2010).

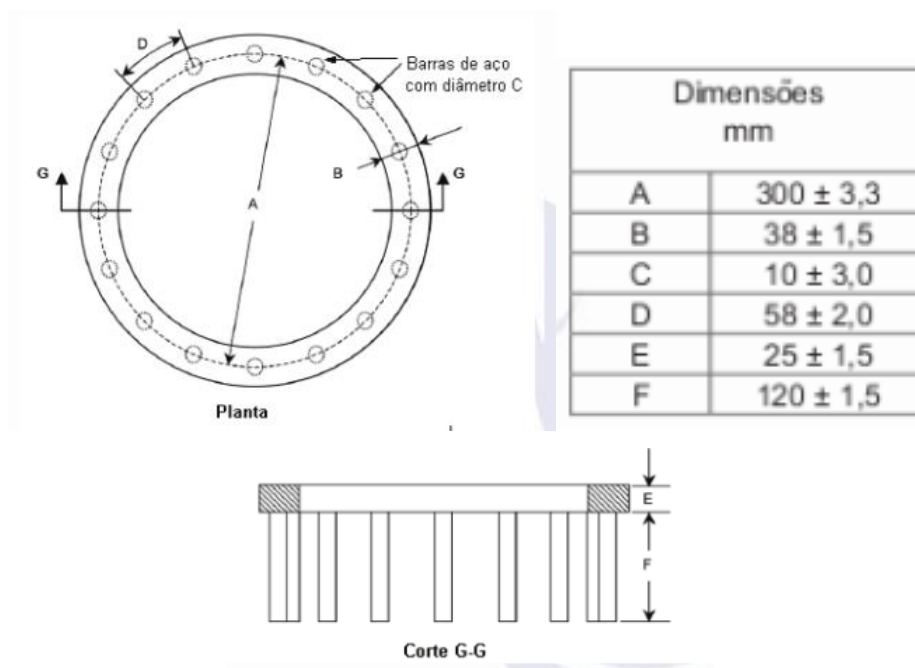


Figura 2.3 – Anel J. (Fonte: ABNT NBR 15823-3:2010)

O procedimento de execução é o mesmo do método do Cone de Abrams, com o acréscimo do Anel J sobre a base metálica, em torno do molde. O ensaio é finalizado quando se termina o espalhamento. Os resultados encontrados são: o diâmetro final (d_F) atingido pelo concreto, a diferença entre o diâmetro médio determinado no método do Cone de Abrams e nesse método e a obstrução à passagem do concreto pelas barras do Anel J. O diâmetro final é determinado pela média aritmética de duas medidas perpendiculares do diâmetro do espalhamento final, sendo dado em milímetros (GOMES; BARROS, 2009; ABNT NBR 14823-3:2010).

De acordo com a NBR 15823:2010, os CAAs podem ser divididos nas seguintes classes, conforme seus valores de diâmetro final:

Tabela 2.6 – Classes de habilidade passante pelo Anel J. (Fonte: ABNT NBR 15823:2010)

Classe	Anel J (mm)
PJ1	0 a 25 com 16 barras de aço
PJ2	25 a 50 com 16 barras de aço

Os concretos da classe PJ1 são indicados para aplicações em estruturas com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm, enquanto a classe PJ2 é adequada para a maior parte das utilizações correntes e elementos com espaçamentos de armaduras e 60 mm a 80 mm (ABNT NBR 15823:2010).

2.4.3 Método da caixa L

Trata-se de um método para determinação da habilidade passante do concreto autoadensável. A partir desse procedimento, podem ser avaliadas ao mesmo tempo a capacidade do CAA de passar por obstáculos e se manter coeso (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

O equipamento consiste em uma caixa metálica em forma de L com uma divisória móvel separando a parte vertical da horizontal e provida de um dispositivos de grade, que podem possuir duas ou três barras metálicas de diâmetro de $(12,5 \pm 0,2)$ mm, como pode ser observado na figura 2.4. Além da caixa, são necessários também: régua metálica, recipiente de material não absorvente e colher de pedreiro (ABNT NBR 15823-4:2010).

O procedimento de execução inicia-se com umedecimento da parte interna da caixa L. Deve-se então preencher todo o compartimento vertical da caixa com a amostra sem nenhum tipo de adensamento, retirando o excesso com a colher de pedreiro. Após 30 a 60 segundos do preenchimento com a amostra, abre-se a comporta rapidamente, permitindo o escoamento livre do CAA pela caixa (ABNT NBR 15823-4:2010).

A habilidade passante (HP) é calculada pela razão entre H1 e H2. Esses valores de altura do concreto, obtidos nas extremidades do compartimento horizontal da caixa L, estão representados na Figura 2.4.

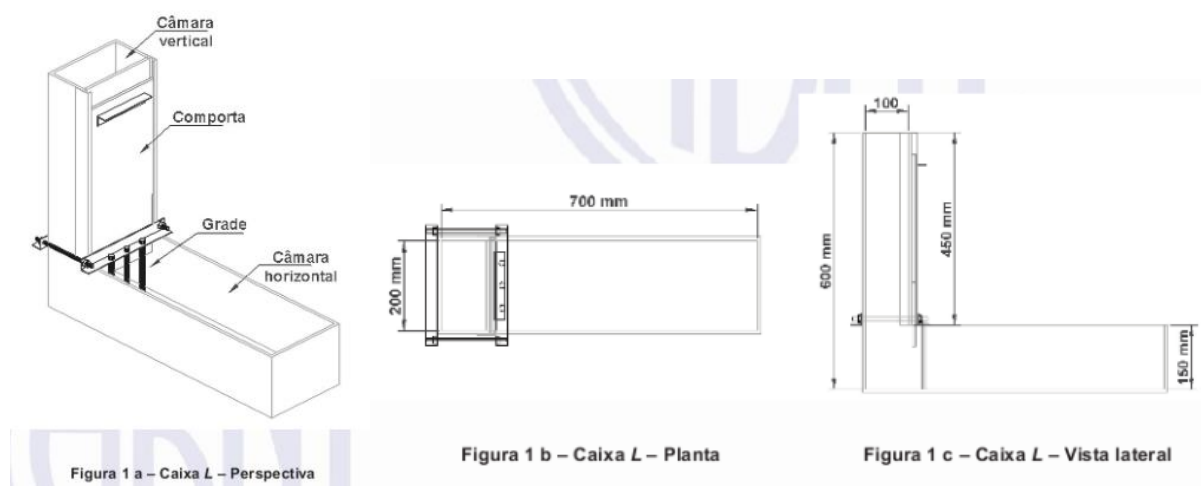


Figura 2.4 – Caixa L. (Fonte: ABNT NBR 15823-4:2010)

Conforme a ABNT NBR 15823:2010, existem duas classes de habilidade passante:

Tabela 2.7 – Classes de habilidade passante pela caixa L. (Fonte: NBR 15823-1:2010)

Classe	Caixa L
PL1	≥ 0,80 com duas barras de aço
PL2	≥ 0,80 com três barras de aço

Os concretos da classe PL1 são indicados para aplicações em estruturas com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm, enquanto a classe PL2 é adequada para a maior parte das utilizações correntes e elementos com espaçamentos de armaduras e 60 mm a 80 mm (ABNT NBR 15823-1:2010).

Tutikian (2004) apresenta em seu estudo uma tabela com uma série de resultados experimentais de diversos autores relacionados com as dimensões da caixa empregada nos ensaios, que pode ser observada na Tabela 2.8. Esses valores de referência eram sugeridos antes da publicação da ABNT NBR 15823:2010. Nota-se que não há nenhum valor menor que 0,80, independentemente das medidas da caixa L utilizada.

Tabela 2.8 – Limites de resultados encontrados na literatura. (Fonte: Tutikian, 2004)

Referências	H1/H2	Dimensões (mm)				
		A	B	C	D	E
Gomes (2002)	0,80	100	200	600	700	150
Gomes et al. (2003)	0,80	100	200	600	700	150
Petersson (1999)	0,80	100	200	600	700	150
Tviksta (2000)	0,85	100	200	600	-	150
Coppola (2000)	0,90	120	300	600	780	200
EFNARC (2005) *	0,80	100	200	600	700	150

*Dados adicionados pelo autor

2.4.4 Método do funil V

Esse método tem a função de medir a fluidez do concreto autoadensável. Ele se mostra adequado para concretos com agregados graúdos com diâmetro máximo de 20 mm e é utilizado também para verificar a ocorrência de segregação, quando há impedimento da passagem de concreto pela saída do funil (ABNT NBR 15823-5:2010).

O funil V é um equipamento confeccionado em chapa metálica com as dimensões mostradas na Figura 2.5. Além do funil, também são necessários ao ensaio: recipiente metálico, colher de pedreiro, concha metálica e cronômetro (ABNT NBR 15823-5:2010).

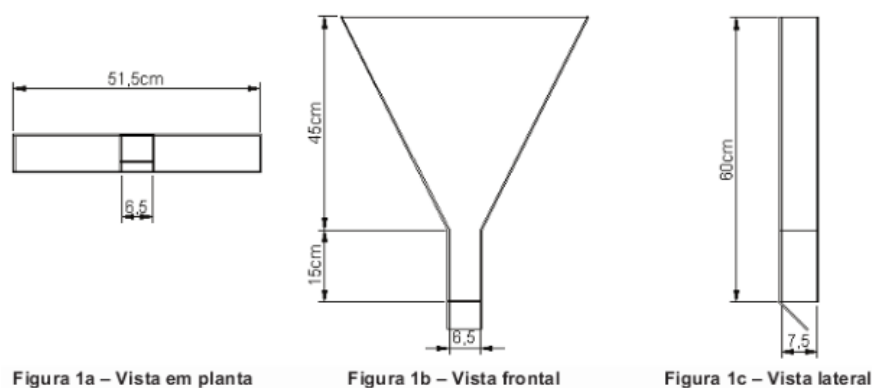


Figura 2.5 – Funil V. (Fonte: ABNT NBR 15823-5:2010)

O procedimento inicia-se com umedecimento da parte interna do funil V. Deve-se então preencher todo o funil com a amostra sem realizar nenhum tipo de adensamento, retirando o excesso com a colher de pedreiro. Por fim, abre-se a comporta em um tempo menor que 30 segundos após o preenchimento do funil e o cronômetro é disparado, devendo esse ser parado quando todo o concreto tiver escoado, registrando o intervalo de tempo correspondente ao escoamento de toda a massa da amostra ($T_{30\text{seg}}$) (ABNT NBR 15823-5:2010).

Eventualmente pode-se medir o tempo de escoamento do CAA após 5 minutos do preenchimento do funil V. Para isso, deve-se preencher o funil imediatamente após a medida do $T_{30\text{seg}}$ com o material coletado pelo recipiente. Espera-se 5 minutos após a colocação da amostra, abre-se a comporta e o cronômetro é disparado, sendo parado depois que todo o material tiver escoado. O tempo registrado para esse escoamento é o $T_{5\text{min}}$.

De acordo a ABNT NBR 15823:2010, existem duas classes de habilidade passante:

Tabela 2.9 – Classes de viscosidade pelo funil V. (Fonte: ABNT NBR 15823:2010)

Classe	Funil V (s)
VF1	< 9
VF2	9 a 25

Recomenda-se a utilização de CAAs da classe VF1 para estruturas com elevada taxa de armadura, exigindo porém controle em relação à segregação e exsudação. Já os concretos da classe VF2 se mostram adequados para a maioria das aplicações correntes (ABNT NBR 15823:2010).

Uma série de autores, a partir de suas pesquisas, defendem determinados limites de tempo para o ensaio do funil V, sendo esses valores de referência sugeridos antes da publicação

da ABNT NBR 15823:2010. Na Tabela 2.10 podem ser encontrados valores encontrados na literatura, que em geral se encontram dentro dos limites estabelecidos pela norma brasileira.

Tabela 2.10 – Limites superiores e inferiores para o ensaio do funil V encontrados na literatura. (Fonte: Tutikian, 2004)

Referências	Tempo (s)	
	Mínimo	Máximo
Gomes (2002)	10	15
Gomes et al. (2003)	7	13
Araújo et al. (2003)	6	12
Petersson (1999)	5	15
EFNARC (2002)	6	12

2.4.5 Método da coluna de segregação

Esse método tem a função de determinar a resistência à segregação do concreto autoadensável. Ele é realizado a partir da diferença das massas de agregado graúdo existentes no topo e na parte de baixo da coluna de segregação (ABNT NBR 15823-6:2010).

A coluna de segregação é um tubo de PVC com diâmetro de 200 mm e altura total de 660 mm. Ele é dividido em três partes: um topo e uma base com 165 mm de altura e uma parte central com 330 mm de altura. Além do tubo, o ensaio demanda o uso de: colher de pedreiro, concha metálica e cronômetro (ABNT NBR 15823-6:2010). O esquema do tubo pode ser observado na Figura 2.6.

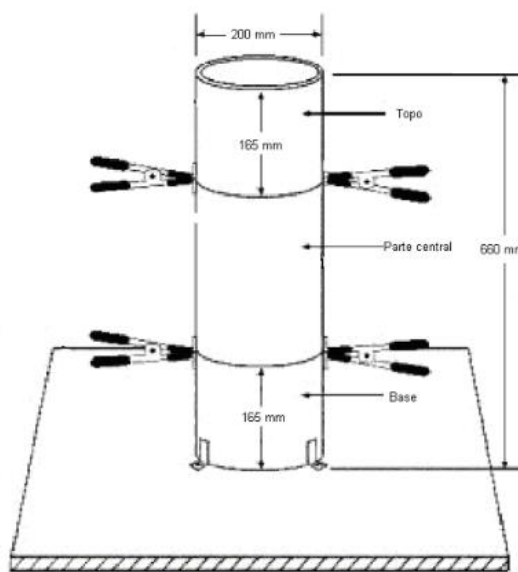


Figura 2.6 – Coluna de Segregação. (Fonte: ABNT NBR 15823-6:2010)

O procedimento inicia-se com umedecimento da coluna de segregação e a colocação da mesma em uma superfície plana. Deve-se então preencher todo o tubo com a amostra sem nenhum tipo de adensamento, retirando o excesso com a colher de pedreiro. Após 20 minutos do preenchimento da coluna, devem ser retiradas as porções de concreto do topo e da base com o auxílio de uma chapa metálica. Depois disso, cada amostra deve ser lavada sobre uma peneira com abertura de malha de 5 mm, removendo toda a argamassa. Por fim, os agregados graúdos de cada porção devem ser submetidos a secagem e posteriormente pesados, obtendo as massas m_B e m_T de cada amostra (ABNT NBR 15823-6:2010).

A resistência à segregação é determinada pela Equação 1:

$$SR = \frac{2(m_B - m_T)}{m_B + m_T} \times 100 \quad (1)$$

Sendo:

- SR = Resistência à segregação do concreto, em porcentagem.
- m_B = Massa de agregado graúdo contida na base do tubo, em gramas.
- m_T = Massa de agregado graúdo contida no topo do tubo, em gramas.

A norma destaca que se o valor de m_T for maior ou igual que o de m_B , a segregação é nula e estabelece que existem duas classes de resistência à segregação:

Tabela 2.11 – Classes de resistência à segregação. (Fonte: ABNT NBR 15823:2010)

Classe	Coluna de segregação (%)
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

É recomendada a utilização de CAAs da classe SR1 para lajes pouco espessas e estruturas com reduzida complexidade. Por outro lado, os concretos da classe SR2 são indicados para fundações profundas, elementos pré-moldados e estruturas mais complexas (ABNT NBR 15823:2010).

2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas do concreto autoadensável, assim como de qualquer tipo de concreto, são resultado da dosagem e do processo de mistura do material. Sendo assim, se for dosado com alto consumo de cimento, apresentará alto calor de hidratação e elevada retração por secagem, enquanto se possuir muito superplastificante em sua composição tenderá a ter sua pega inicial retardada (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Gebler (1982) apud Mehta e Monteiro (2014) realizou estudos comparando o comportamento de concretos autoadensáveis e concretos convencionais dosados com traços típicos. Suas pesquisas mostram que as resistências à compressão e à tração do CAA não são significativamente diferentes das apresentadas pelo CCV com fator água/cimento equivalente. Além disso, revelaram que os concretos autoadensáveis possuem melhores condições de durabilidade que os concretos convencionais.

De acordo com Goodier (2003), o concreto autoadensável produzido com o mesmo fator água/cimento que o concreto convencional possui resistência igual ou superior ao CCV. Esse pequeno aumento da resistência pode ser explicado pela maior quantidade de finos presentes na dosagem do CAA.

Apesar de utilizar os mesmos materiais que o concreto convencional, o CAA precisa de algumas alterações no seu traço para garantir suas propriedades características. Uma das principais mudanças consiste no aumento da quantidade de pasta e argamassa. Devido a isso, o módulo de elasticidade tende a diminuir em comparação com concretos com mais agregados, uma vez que os agregados graúdos são os principais responsáveis por essa propriedade (MARQUES, 2011).

Manuel (2005) realizou um estudo avaliando as propriedades mecânicas de concretos autoadensáveis com diferentes teores de argamassa, comparando-os com um concreto convencional de referência. Os CAA's foram dosados com a utilização do método de Tutikian (2004), fixando a quantidade de areia em todos os traços intermediários, enquanto o CCV foi dosado a partir do método publicado por Helene e Terzian (1992). A Figura 2.7 mostra os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dos concretos produzidos:

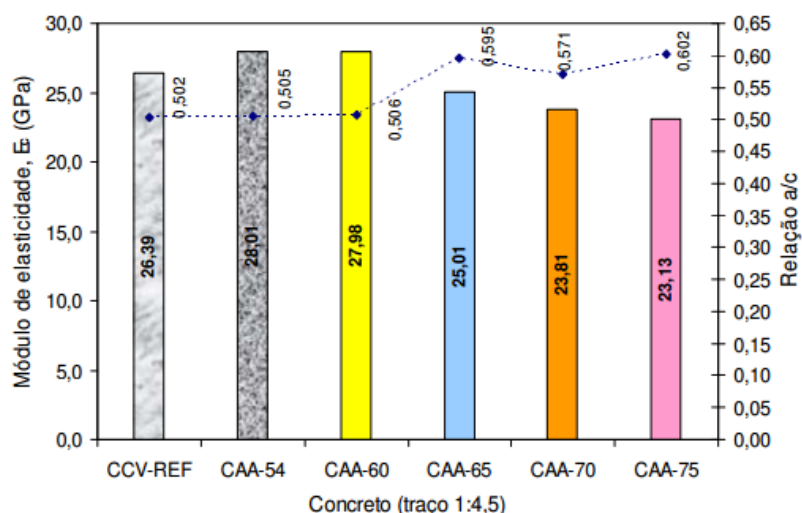


Figura 2.7 – Módulo de elasticidade de CAA e CCV em função do teor de argamassa. (Fonte: Manuel, 2005)

Os resultados atingidos por Manuel (2005) mostram a influência do aumento do teor de argamassa no módulo de elasticidade do CAA. Ele variou o teor de argamassa de 54% a 75%, notando uma queda da propriedade a partir de 65%. Quando se compara o CAA e o CCV com teores de argamassa de 54%, observa-se que o concreto autoadensável apresentou maior módulo de elasticidade, o que pode ser explicado pela maior presença de finos e pelo melhor adensamento.

2.6 RETRAÇÃO

Retração é a redução de volume causada por perda de água no caso do concreto. Ela pode ocorrer nas primeiras idades do material ou ao longo de sua vida útil, além de possuir diversos tipos e fatores de influência (AİTCIN, 2000).

Superficialmente, retração pode ser entendida como a redução do volume de concreto devido à perda de água. Porém, a retração pode ser oriunda de ações térmicas, químicas e hídricas. Nesse contexto, são identificados cinco tipos de retração: autógena, plástica, hidráulica, térmica e por carbonatação (SALES, 2006).

A retração autógena ocorre em decorrência do processo de autosecagem, que consiste na remoção da água dos poros capilares do concreto pelo cimento não hidratado. Ela tende a ser maior em temperaturas mais elevadas, com alto teor de cimento na mistura e com cimentos muito finos, bem como com cimentos com altas proporções de C_3A e C_4AF . Dessa maneira, a

retração autógena é geralmente mais impactante em concretos com baixo fator água/cimento (NEVILLE, 2015).

A retração plástica é decorrente da perda de água por evaporação na superfície do concreto quando esse ainda se encontra no estado plástico. Pode ocorrer significativa fissuração do material caso a quantidade de água perdida por área for muito maior do que a água que sobe para a superfície por exsudação. A temperatura, a velocidade do vento e a umidade do ar possuem grande influência nesse processo (NEVILLE, 2015).

A retração por secagem ou hidráulica pela perda de água do concreto para o ambiente. Mais especificamente, presume-se que ela esteja relacionada à remoção da água adsorvida da pasta endurecida de cimento. A retração hidráulica é geralmente mais crítica em elementos com pequena espessura (NEVILLE, 2015; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em grandes estruturas, devido à grande quantidade de calor produzido pela hidratação do cimento e às condições pobres de dissipação, ocorre um grande aumento da temperatura no interior do concreto em poucos dias após o lançamento. O resfriamento posterior à temperatura ambiente causa o fenômeno da retração térmica, que pode gerar fissuras significativas no material. Esse tipo de retração costuma ser mais considerável em elementos com grande espessura (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Entre os tipos de retração originados de ações químicas se inclui a retração por carbonatação. Ela é causada pela dissolução de cristais de Ca(OH)_2 , sob tensão por causa da retração hidráulica, e deposição de CaCO_3 em espaços não sujeitos a tensão, sendo que a compressibilidade da pasta de cimento hidratado é aumentada temporariamente (NEVILLE, 2015).

2.6.1 Retração do concreto autoadensável

Gebler (1982) apud Mehta e Monteiro (2014) realizou estudos comparando o comportamento de concretos autoadensáveis e concretos convencionais dosados com traços típicos. Suas pesquisas mostram que o concreto autoadensável com aditivos superplastificantes não apresentou diferença na retração por secagem em comparação ao concreto convencional com fator água/cimento equivalente. Por outro lado, em comparação com o concreto convencional com consistência equivalente, o concreto autoadensável apresentou menor retração por secagem.

Em seus estudos, Silva e Brito (2015) produziram 11 misturas de concreto autoadensável para avaliar suas propriedades: uma só com cimento (C); três com cimento (C)

e cinza volante (CV) em 30, 60 e 70% de substituição; três com cimento (C) e fíler calcário (FC) em 30, 60 e 70% de substituição; e quatro com C+CV+FC em combinações de 10-20, 20-10, 20-40 e 40-20% de substituição. Com relação à retração, os resultados obtidos por eles podem ser vistos nas Figuras 2.8 e 2.9, que apresentam a extensão total de retração das amostras.

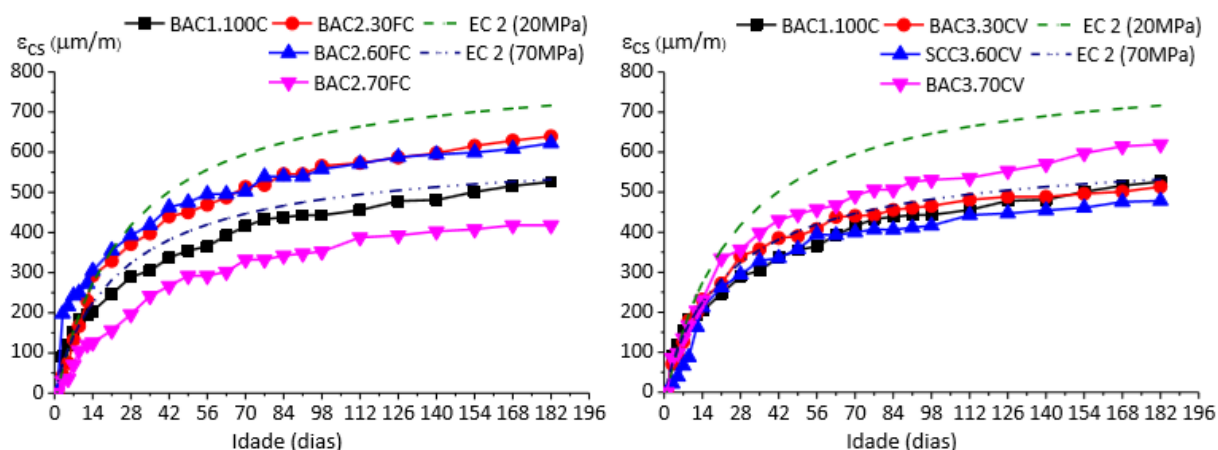


Figura 2.8 – Extensão total de retração das misturas binárias. (Fonte: Silva e Brito, 2015)

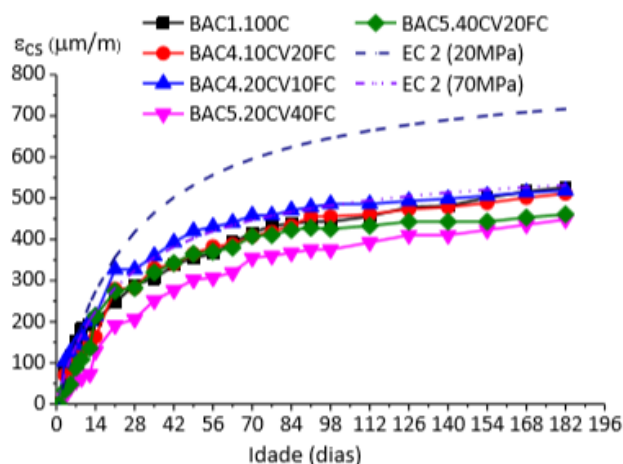


Figura 2.9 – Extensão total de retração das misturas ternárias. (Fonte: Silva e Brito, 2015)

Pode-se observar que houve aumento da retração nas misturas binárias com FC até o percentual de substituição (f_{ad}) de 30%, diminuindo bastante para f_{ad} de 70%. Já no caso das misturas binárias com CV o comportamento foi diferente. Ocorreu redução da retração nas misturas binárias com CV até percentuais de substituição de 60%, atingindo valores máximos para f_{ad} de 70%. Essa redução da retração nas misturas com cinza volante até f_{ad} de 60% pode ser explicada pelo fato de que o aumento de CV pode provocar um grau de hidratação menor e um maior volume de material não hidratado, fazendo com que a CV funcione como um

microagregado que ajuda a reduzir a retração. O aumento da retração para o f_{ad} de 70% pode ser causado pelas reações de hidratação lentas que geram uma estrutura mais porosa nos primeiros dias, favorecendo a retração por secagem (SILVA; BRITO, 2015).

Além disso, é possível observar que as misturas ternárias seguem a tendência das misturas binárias. Sendo assim, ocorre redução da retração com o aumento do percentual de substituição das adições (SILVA; BRITO, 2015).

Velasco (2008) realizou um estudo a respeito da influência da incorporação de fibras de aço no CAA. Para avaliar o efeito na retração autógena e por secagem, ela comparou uma mistura de CAA de referência com misturas reforçadas com 1%, 1,5% e 2% de fibras de aço, sendo que todos os concretos foram produzidos com a utilização de sílica ativa e cinza volante. As Figuras 2.10 e 2.11 mostram o comportamento dos concretos em relação à retração autógena e à retração por secagem.

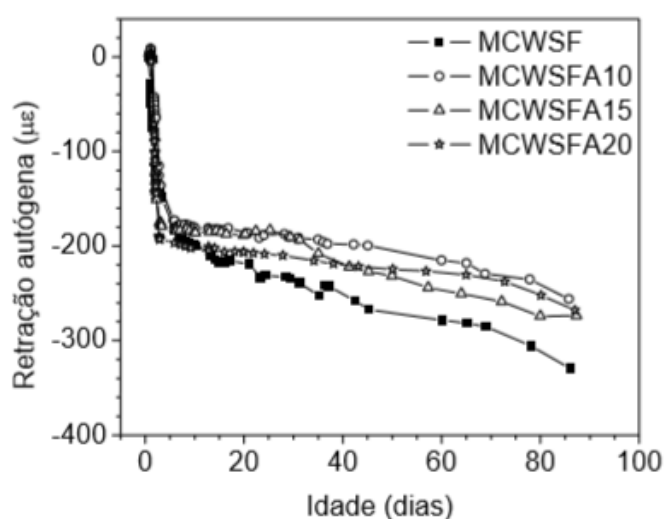


Figura 2.10 – Curvas médias de retração autógena do concreto de referência MCWSF e dos concretos com reforço fibroso. (Fonte: Velasco, 2008)

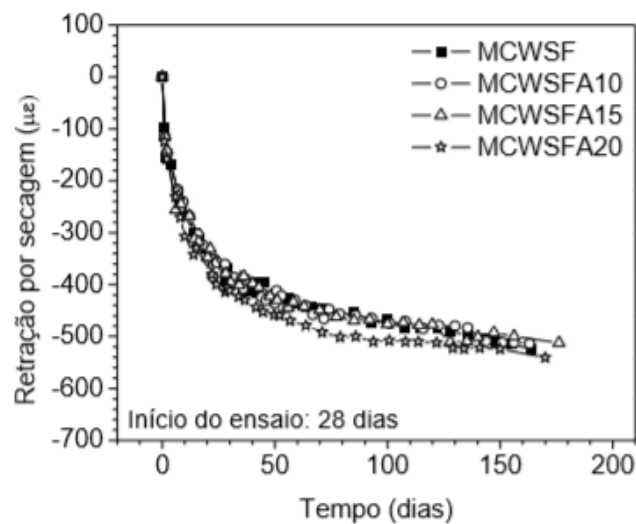


Figura 2.11 – Curvas obtidas no ensaio de retração por secagem do concreto de referência MCWSF e dos concretos com reforço fibroso. (Fonte: Velasco, 2008)

A Figura 2.10 mostra que as fibras de aço causaram uma redução na retração autógena. Por outro lado, o reforço fibroso não acarretou uma grande variação na retração por secagem quando comparado ao concreto de referência, como pode ser observado na Figura 2.11.

3. METODOLOGIA

O programa experimental foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade de Brasília. Ele envolveu as seguintes etapas: ensaios de caracterização dos materiais constituintes; estudo de dosagem de concretos autoadensáveis; ensaios de autoadensabilidade; cura do concreto em câmara úmida e ensaios do concreto no estado endurecido. Foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e retração em ambiente climatizado. Tais procedimentos estão apresentadas no fluxograma presente na Figura 3.1.

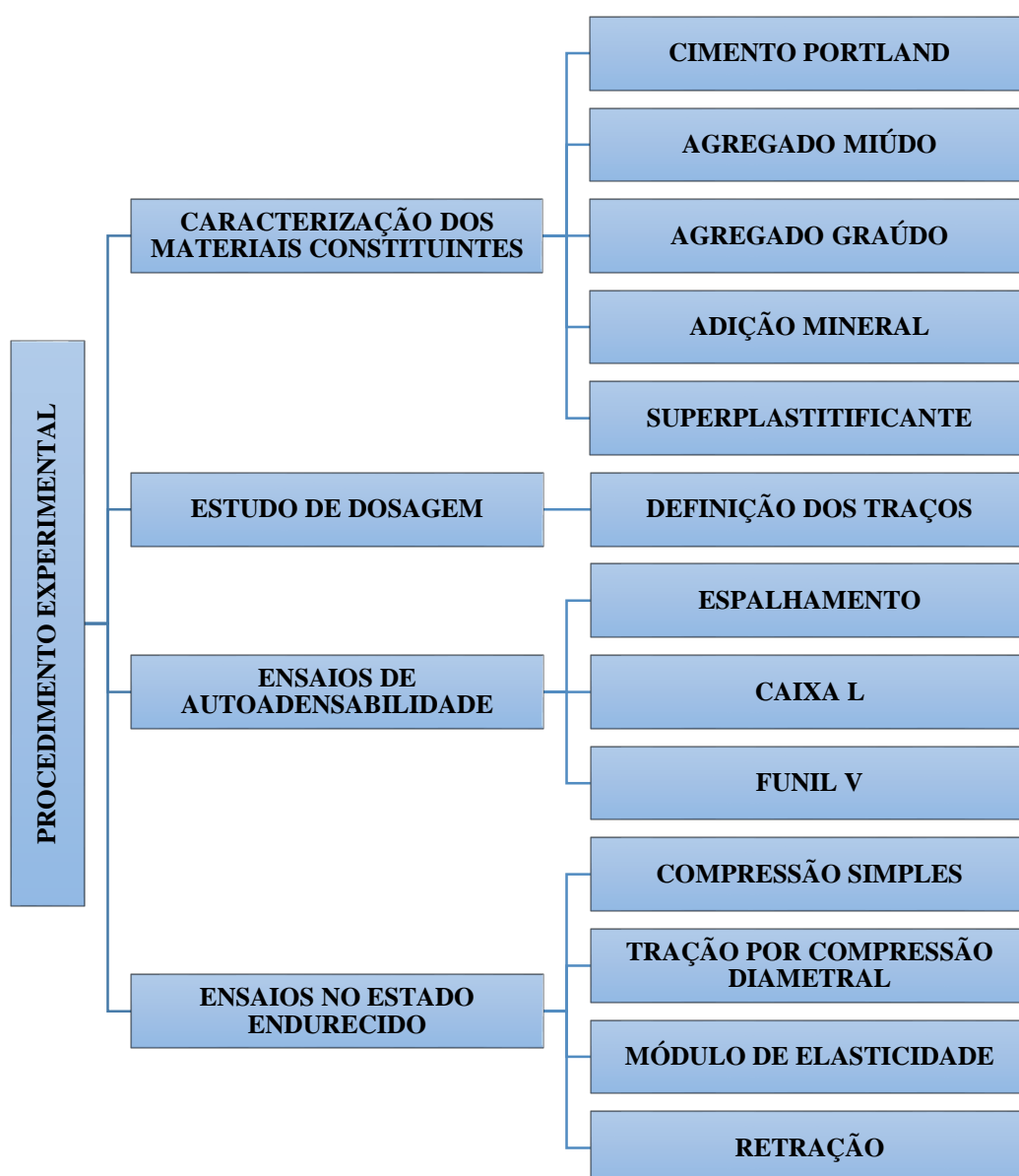


Figura 3.1 – Etapas do procedimento experimental.

As variáveis independentes do programa experimental, ou seja, aquelas que foram manipuladas para verificar sua influência em outras, foram a relação água/cimento, o consumo de cimento e o teor de finos dos traços produzidos. Por outro lado, as variáveis dependentes foram as propriedades no estado fresco, as propriedades mecânicas no estado endurecido e a retração do concreto autoadensável.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os experimentos que foram realizados, bem como as normas utilizadas como base, estão esquematizados na Figura 3.2.

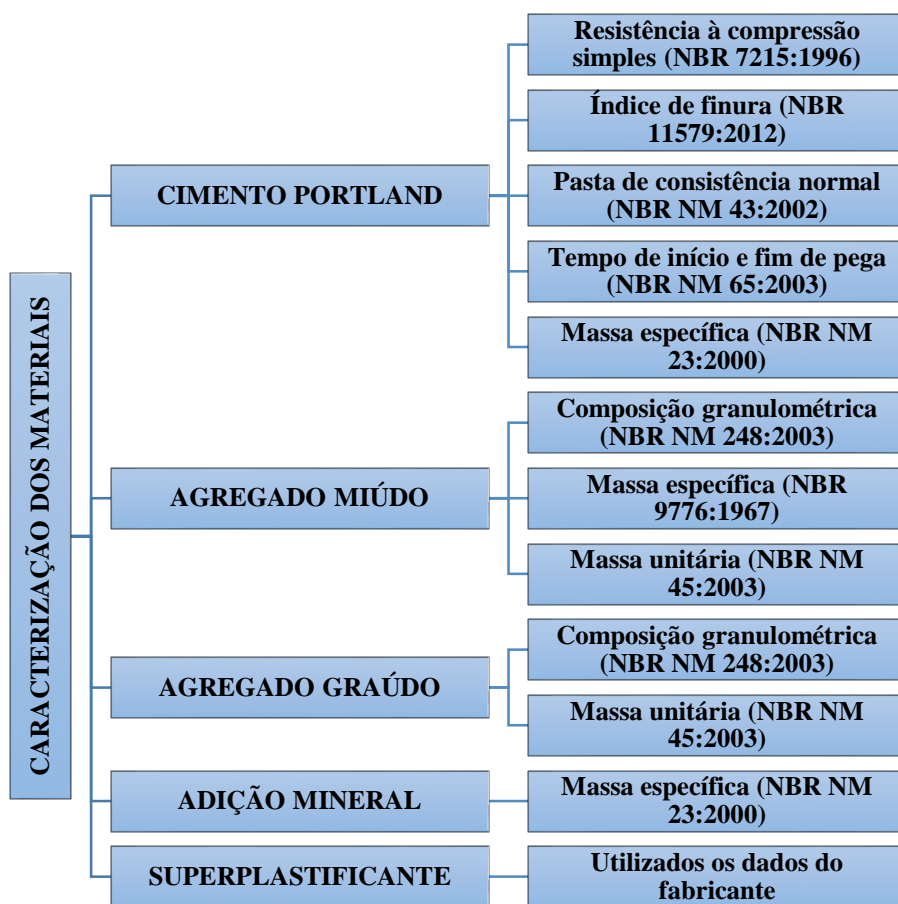


Figura 3.2 – Ensaio de caracterização dos materiais.

3.1.1 Cimento Portland

O tipo de cimento Portland utilizado na pesquisa foi o CP II F-40. Os ensaios de caracterização realizados foram:

- Determinação da resistência à compressão – Foram moldados 12 corpos de prova e estes foram rompidos nas idades de 3, 7 e 28 dias. A norma NBR 7215:1996 foi usada como base para a realização do procedimento.
- Determinação do índice de finura – Foi empregada uma peneira de 75 μ m no procedimento, seguindo recomendações da norma ABNT NBR 11579:2012.
- Determinação da pasta de consistência normal – Usando o aparelho de Vicat com uma sonda Tejmayer, foi verificada empiricamente a quantidade de água necessária para que a sonda chegasse a uma distância de 6 ± 1 mm da placa base, tendo como referência a norma ABNT NBR NM 43:2002.
- Determinação do tempo de início e fim de pega – Os procedimentos foram realizados segundo a norma ABNT NBR NM 65:2003. Usando o aparelho de Vicat com a agulha de Vicat foram determinados os tempos de início e fim de pega.
- Determinação da massa específica – O ensaio foi realizado utilizando o frasco de Le Chatelier, com a presença de líquido não reagente com o cimento, submetido a banho termorregulador pelo período de uma hora. Após essa etapa, o cimento foi colocado no frasco e foi obtida a leitura, seguindo as prescrições da norma ABNT NBR NM 23:2001.

3.1.2 Agregado miúdo

Foram utilizados dois tipos de areia quartzosa na pesquisa. Esta definição foi realizada experimentalmente para obter o melhor empacotamento entre os agregados. Os ensaios de caracterização que foram realizados são:

- Composição granulométrica – Os procedimentos foram realizados segundo a norma ABNT NBR NM 248:2003. Além da granulometria da areia, foram determinados o diâmetro máximo e o módulo de finura do material.
- Massa específica – Foi usado o frasco de Chapman para determinar a massa específica da areia, que estava no estado seco. O ensaio foi feito de acordo com a norma ABNT NBR 9776:1987.
- Massa unitária – Foi empregado o método presente na norma ABNT NBR NM 45:2006, usando o material no estado solto e um recipiente conforme prescrito na norma.

3.1.3 Agregado graúdo

Foram utilizados dois tipos de agregado graúdo na pesquisa, a brita $D_{\text{máx}} = 12,5$ mm e a brita $D_{\text{máx}} = 19,0$ mm. Esta definição foi realizada através do resultado do esqueleto granular. Os ensaios de caracterização que foram feitos são:

- Composição granulométrica – Os procedimentos foram realizados segundo a norma ABNT NBR NM 248:2003. Além da granulometria do agregado graúdo, foram determinados o diâmetro máximo e o módulo de finura do material.
- Massa unitária – Foi empregado o método presente na norma ABNT NBR NM 45:2006, usando o material no estado solto e um recipiente conforme prescrito na norma.

3.1.4 Adição mineral

A adição mineral utilizada na produção dos concretos foi o fíler calcário, que provoca melhorias nas propriedades do CAA tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

O ensaio de caracterização realizado foi a determinação da massa específica. O procedimento foi realizado utilizando o frasco de Le Chatelier, com a presença de líquido não reagente com o fíler calcário, submetido a banho termorregulador pelo período de uma hora. Após essa etapa, o fíler foi colocado no frasco e foi obtida a leitura, seguindo as prescrições da norma ABNT NBR NM 23:2001.

3.1.5 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante empregado na pesquisa foi à base de policarboxilatos. Não foram realizados ensaios de caracterização desse material, sendo que se utilizou as informações fornecidas pelo fabricante.

3.2 ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

O estudo de dosagem do concreto autoadensável que foi realizado na pesquisa está representado no fluxograma da Figura 3.3.

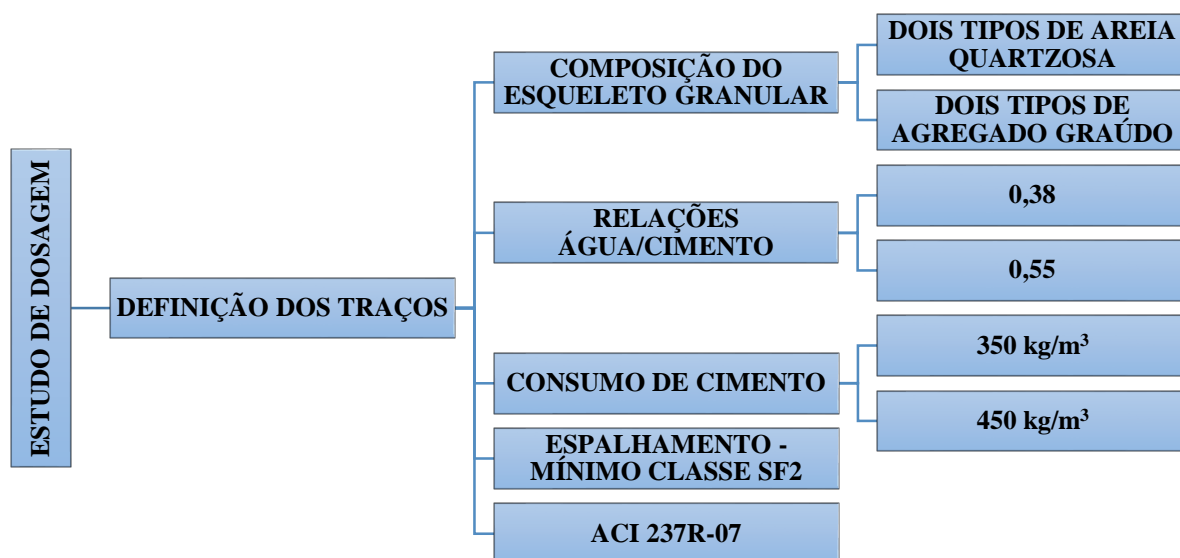


Figura 3.3 – Estudo de dosagem do CAA.

O primeiro procedimento foi a realização da composição do esqueleto granular. Essa etapa consiste em determinar a proporção entre os agregados, grãos e miúdo, com a maior massa unitária e o menor índice de vazios. Para tanto foi realizado o ensaio de massa unitária no estado compactado. O processo começou com a composição entre os agregados de maior granulometria, sendo feito o empacotamento até alcançar o agregado miúdo.

Após a determinação do esqueleto granular, foram obtidos os traços do concreto, realizando o ajuste do percentual do fíler calcário, que foi pré-fixado e feito em adição ao cimento. Para a determinação, foram fixados duas relações água/cimento, 0,38 e 0,55, e dois valores de consumo de cimento, 350 kg/m³ e 450 kg/m³, resultando em quatro traços diferentes para análise na pesquisa. O teor de superplastificante foi ajustado experimentalmente de forma a colocar o concreto autoadensável e sem influenciar no tempo de pega do cimento Portland. A classe de espalhamento de todos os traços foi de no mínimo SF2, sendo o teor de aditivo superplastificante alterado até se chegar a essa categoria de espalhamento.

Todos os traços foram calculados tendo como base os limites presentes na ACI 237R-07, porém eles não ficaram totalmente restritos a esses valores. Os parâmetros da ACI 237R-07 para o concreto autoadensável são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros para o concreto autoadensável. (Fonte: ACI 237R-07)

Parâmetro	Limites	
	Mínimo	Máximo
Volume de agregado graúdo (% do volume de concreto)	28	32
Volume de pasta (% do volume de concreto)	34	40
Volume de argamassa (% do volume de concreto)	68	72
Relação água/cimento	0,32	0,45
Consumo de cimento (kg/m ³)*	386	475

* o consumo inclui o conteúdo de finos e pode ser menor com o uso de VMA

A cura é um procedimento fundamental para as propriedades mecânicas do concreto. Dessa maneira, foi realizada a cura do concreto em câmara úmida, de acordo com a ABNT NBR 9479:2006. Após o seu desmolde, feito 24 horas depois da moldagem, os corpos de prova foram colocados na câmara úmida até a data do ensaio.

3.3 ENSAIOS DE AUTOADENSABILIDADE

A fim de verificar as propriedades do CAA no estado fresco, possibilitando avaliar a conformidade do material com a norma e sua classificação de acordo com a mesma, foram realizados os ensaios presentes no fluxograma da Figura 3.4.

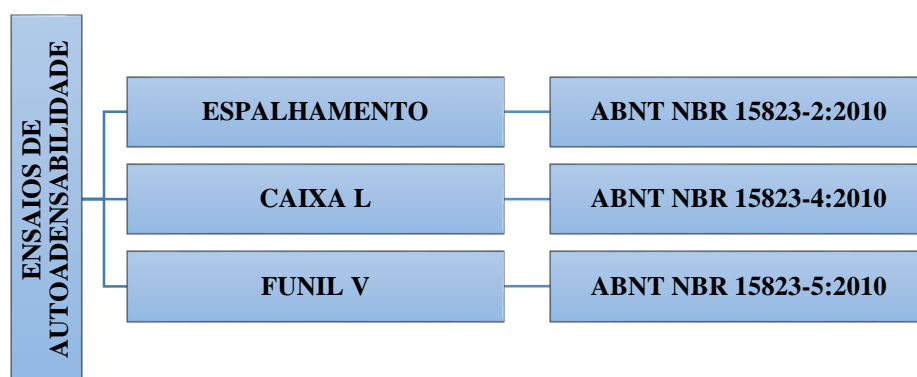


Figura 3.4 – Ensaio de autoadensabilidade.

O concreto autoadensável deve atender a determinados critérios como fluidez (SF), viscosidade plástica aparente (VF ou VS) e habilidade passante (PL ou PJ). A fluidez é avaliada conforme os resultados de espalhamento; a viscosidade segundo o tempo de espalhamento (T_{500}) ou o tempo de escoamento (T_v) e a habilidade passante de acordo com os resultados da caixa L ou anel J. Sendo assim, foram realizados os ensaios de espalhamento, caixa L e funil V

para verificar se o concreto era autoadensável (ABNT NBR 15823-2:2010, ABNT NBR 15823-4:2010, ABNT NBR 15823-5:2010).

3.4 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

O concreto autoadensável foi submetido aos ensaios presentes no fluxograma da Figura 3.5.

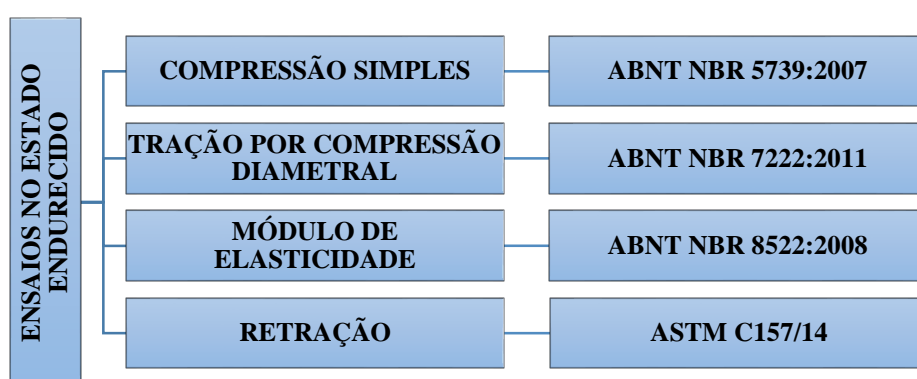


Figura 3.5 – Ensaaios no estado endurecido.

3.4.1 Propriedades mecânicas

Foram realizados os seguintes ensaios de propriedades mecânicas:

- Resistência à compressão simples: Os ensaios foram feitos segundo a ABNT NBR 5739:2007 para as idades de 7, 14 e 28 dias. Foram moldados 3 corpos de prova para cada idade e traço.
- Resistência à tração por compressão diametral: Os ensaios foram feitos segundo a ABNT NBR 7222:2011 para as idades de 7, 14 e 28 dias. Foram moldados 2 corpos de prova para cada idade e traço.
- Módulo de elasticidade: Os ensaios foram feitos segundo a ABNT NBR 8522:2008 para a idade de 28 dias. Foram moldados 3 corpos de prova para cada traço.

3.4.2 Retração

Como referência para os ensaios de retração foi utilizada a norma ASTM C157:2014. Porém, foi necessário fazer certas adaptações em relação ao que a norma estabelece por questão de tempo disponível. Os procedimentos realizados foram os seguintes:

- Foram moldados 3 corpos de prova prismáticos para a avaliação da retração com os mesmos traços dos concretos produzidos para a determinação das propriedades mecânicas. Os corpos foram moldados utilizando fôrmas conforme apresentado na Figura 3.6.

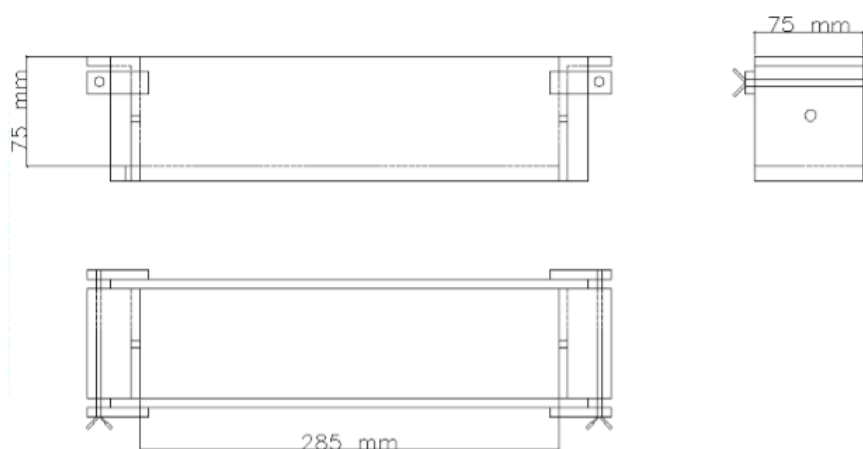


Figura 3.6 – Vistas frontal, lateral e superior das fôrmas de retração.

- Após o desmolde, os corpos de prova foram submersos em solução de cal e água, permanecendo nela por 30 minutos. Depois desse período, eles foram retirados e foram realizadas as medições das leituras de referência e comprimentos com o equipamento da Figura 3.7.
- Os três corpos de prova retornaram para a solução aquosa para o processo de cura em solução de cal e água, permanecendo nessa situação por 28 dias, como recomenda a ASTM C157:2014.
- Depois desse período, foram realizadas novas leituras de retração. Os três corpos de prova que estavam na solução aquosa foram colocados em ambiente climatizado com temperatura de $21 \pm 3^\circ \text{C}$ e umidade de $55 \pm 5\%$.
- Foram realizadas leituras com 0, 7, 14 e 28 dias após a cura em todos os corpos de prova. A norma ASTM C157:2014 estabelece que as leituras sejam feitas com 4, 7, 14 e 28 dias após o período de cura e com 8, 16, 32 e 64 semanas. A adaptação das idades das

medições foi feita devido à indisponibilidade de tempo para a realização da pesquisa e à logística do uso do laboratório. A leitura na idade de 0 dias após a cura foi realizada a fim de avaliar a retração autógena do concreto.

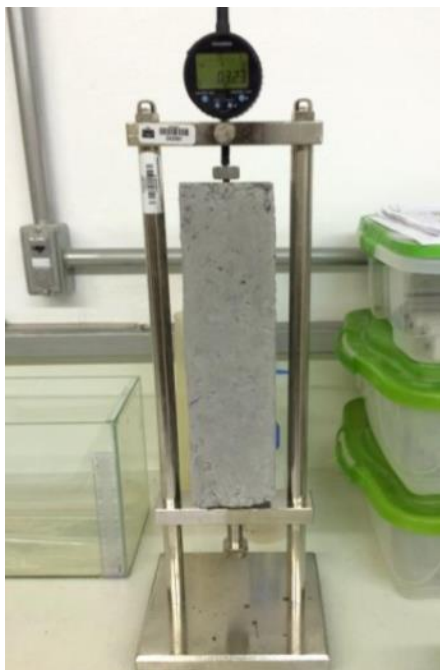


Figura 3.7 – Equipamento para medição do comprimento dos corpos de prova.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios executados de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 3.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Cimento Portland

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização realizados com o cimento Portland empregado na pesquisa:

Tabela 4.1 – Ensaio de caracterização do cimento Portland.

Material	Ensaio	Resultado	
CP II F-40	Determinação da resistência à compressão	3 dias	37,65 MPa
		7 dias	40,11 MPa
		28 dias	48,52 MPa
	Determinação do índice de finura	9,31%	
	Determinação da pasta de consistência normal	a/c = 0,411	
	Determinação do tempo de início e fim de pega	Início	2h e 50min
		Fim	3h e 14min
	Massa específica	3,11 g/cm ³	

4.1.2 Agregado miúdo

Foram utilizados dois tipos de areia quartzosa na pesquisa. Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das areias empregadas:

Tabela 4.2 – Ensaio de caracterização das areias.

Material	Ensaio	Resultado	
Areia média	Composição granulométrica	Diâmetro máximo	2,4 mm
		Módulo de finura	2,36
	Massa específica	2,65 g/cm ³	
	Massa unitária	1,58 kg/dm ³	
Areia fina	Composição granulométrica	Diâmetro máximo	0,6 mm
		Módulo de finura	1,27
	Massa específica	2,62 g/cm ³	
	Massa unitária	1,29 kg/dm ³	

Na Tabela 4.3 e na Figura 4.1 são apresentados os resultados da composição granulométrica da areia média.

Tabela 4.3 – Distribuição granulométrica da areia média.

Peneira # (mm)	Amostra 1 M1 (g)	Amostra 2 M2 (g)	% retida média	% retida Acumulada
9,5	0,00	0,00	0,0	0
6,3	3,93	6,16	0,5	1
4,8	4,71	2,51	0,4	1
2,4	33,90	38,77	3,7	5
1,2	232,08	238,38	23,5	29
0,6	189,78	186,08	18,8	48
0,3	169,18	166,24	16,8	65
0,15	231,95	228,25	23,0	88
0,075	84,57	84,32	8,5	96
Fundo	49,33	50,74	5,0	-
Total	999,43	1001,45	100	-

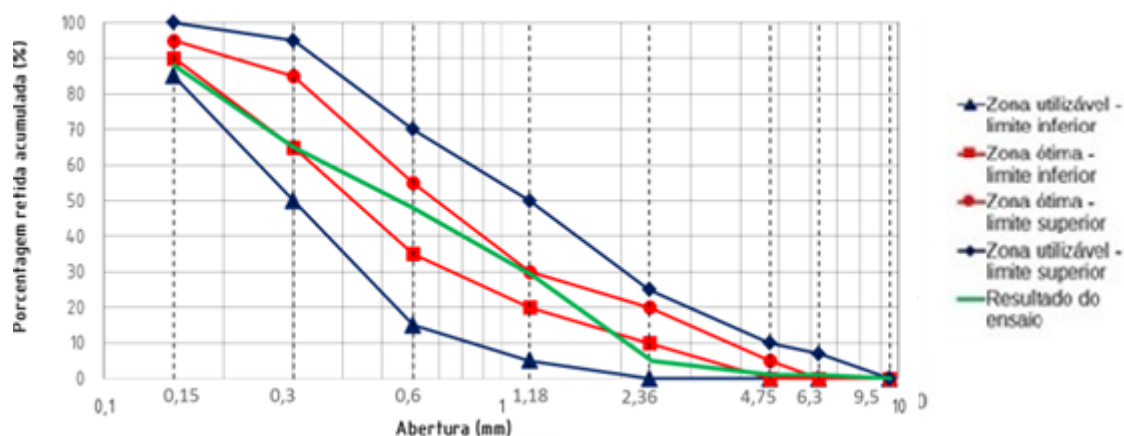


Figura 4.1 – Gráfico da composição granulométrica da areia média.

É possível perceber que o resultado do ensaio ficou dentro da zona utilizável, apresentando alguns desvios da zona ótima de utilização nos limites inferiores.

Na Tabela 4.4 e na Figura 4.2 são apresentados os resultados da composição granulométrica da areia fina.

Tabela 4.4 – Distribuição granulométrica da areia fina.

Peneira # (mm)	Amostra 1 M1 (g)	Amostra 2 M2 (g)	% retida média	% retida Acumulada
9,5	0,00	0,00	0,0	0
6,3	0,95	1,80	0,5	1
4,8	1,64	2,33	0,7	2
2,4	3,21	2,15	0,9	3
1,2	3,12	2,67	1,0	4
0,6	2,81	2,43	0,9	5
0,3	58,49	57,75	19,5	24
0,15	209,86	212,83	70,6	95
0,075	-	-	-	-
Fundo	18,82	17,70	5,9	-
Total	298,90	299,66	100	-

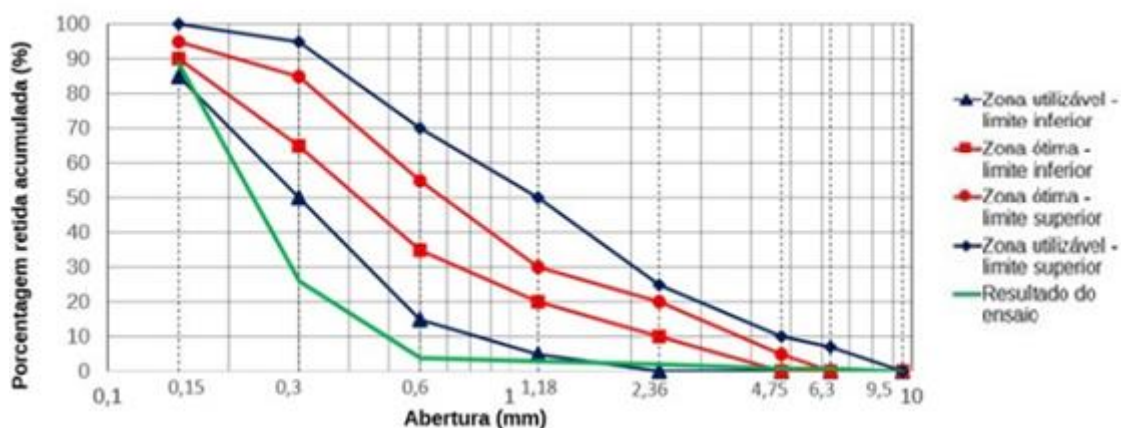


Figura 4.2 – Gráfico da composição granulométrica da areia fina.

Como pode ser observado, o resultado do ensaio ficou em grande parte abaixo do limite inferior da zona utilizável. Isso mostra que se trata de uma areia muito fina.

4.1.3 Agregado graúdo

Foram utilizadas brita $D_{\text{máx}} = 12,5$ mm e brita $D_{\text{máx}} = 19,0$ mm na pesquisa. Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das britas empregadas:

Tabela 4.5 – Ensaio de caracterização das britas.

Material	Ensaio	Resultado	
Brita $D_{\text{máx}} = 12,5$ mm	Composição granulométrica	Diâmetro máximo	12,5 mm
		Módulo de finura	6,04
	Massa unitária	1,37 kg/dm ³	
	Massa específica	2,65 g/cm ³	
Brita $D_{\text{máx}} = 19,0$ mm	Composição granulométrica	Diâmetro máximo	19 mm
		Módulo de finura	6,69
	Massa unitária	1,45 kg/dm ³	
	Massa específica	2,65 g/cm ³	

Na Tabela 4.6 e na Figura 4.3 são apresentados os resultados da composição granulométrica da brita $D_{\text{máx}} = 12,5$ mm.

Tabela 4.6 – Distribuição granulométrica da brita $D_{\text{máx}} = 12,5$ mm.

Peneira # (mm)	Amostra 1 M1 (g)	Amostra 2 M2 (g)	% retida média	% retida Acumulada
12,5	0,00	0,00	0,0	0
9,5	407,42	406,72	20,4	20
6,3	1186,30	1182,50	59,4	79
4,8	307,71	305,60	15,4	94
2,4	80,41	83,40	4,1	98
1,2	0,92	1,90	0,1	98
0,6	0,29	0,20	0,0	98
0,3	0,46	0,43	0,0	98
0,15	2,14	2,03	0,1	98
0,075	0,00	0,00	0,0	98
Fundo	7,58	10,69	0,5	-
Total	1993,23	1993,47	100	-

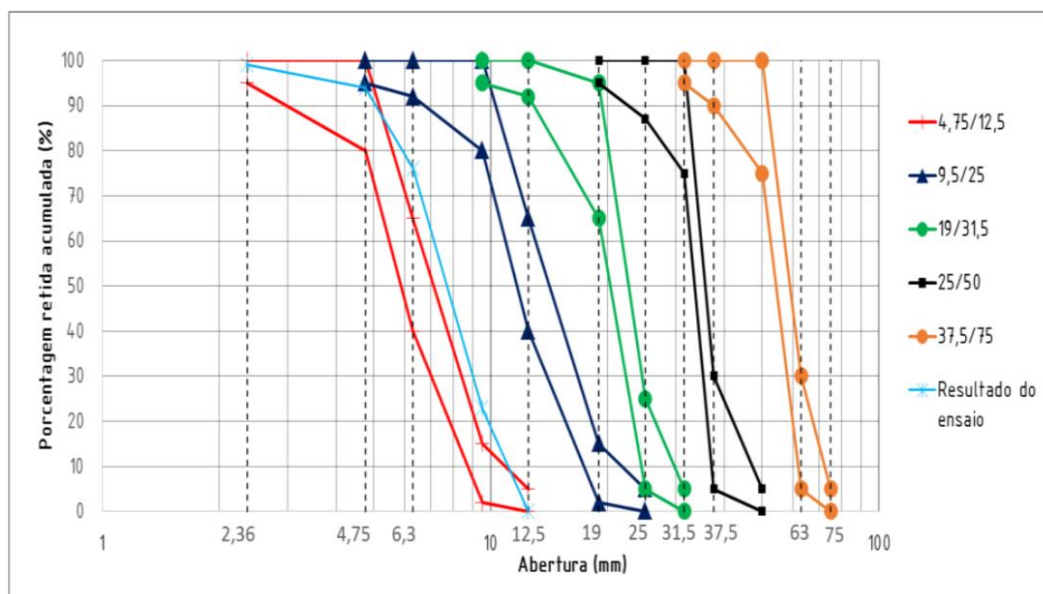


Figura 4.3 – Gráfico da composição granulométrica da brita 0.

Foi empregado o mesmo procedimento para a brita $D_{\text{máx}} = 19,0$ mm. Na Tabela 4.7 e na Figura 4.4 apresentados os resultados da composição granulométrica do material.

Tabela 4.7 – Distribuição granulométrica da brita $D_{\text{máx}} = 19,0$ mm.

Peneira # (mm)	Amostra 1 M1 (kg)	Amostra 2 M2 (kg)	% retida média	% retida Acumulada
25	0,00	0,00	0,0	0
19	0,03	0,03	0,6	1
12,5	2,47	2,54	50,2	51
9,5	1,48	1,41	29,0	80
6,3	0,79	0,80	15,9	96
4,8	0,12	0,11	2,3	98
2,4	0,00	0,00	0,0	98
1,2	0,00	0,00	0,0	98
0,6	0,00	0,00	0,0	98
0,3	0,00	0,00	0,0	98
0,15	0,00	0,00	0,0	98
Fundo	0,10	0,11	2,1	-
Total	4,99	5,00	100	-

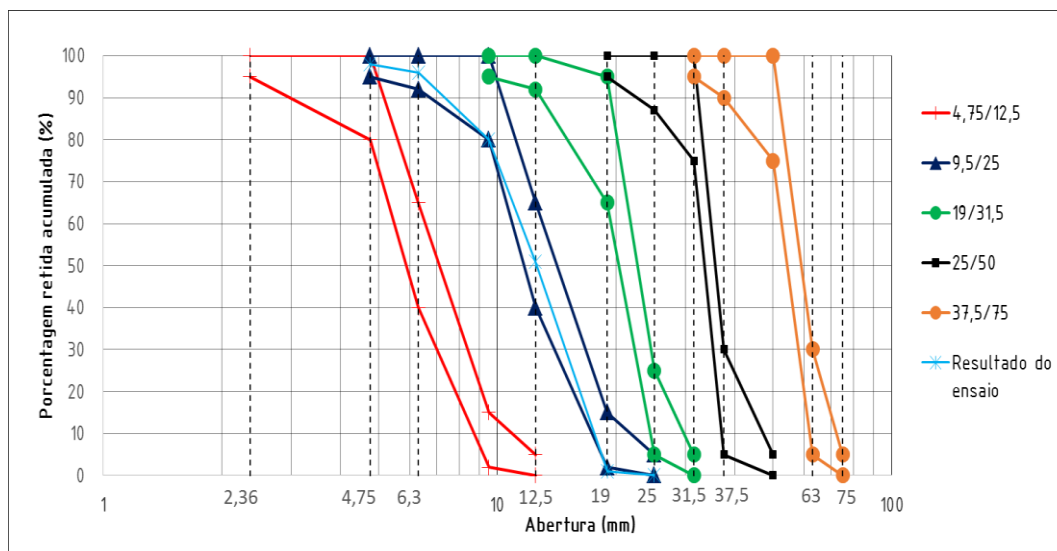


Figura 4.4 – Gráfico da composição granulométrica da brita 1.

É possível observar nas Figuras 4.3 e 4.4 que a granulometria das duas britas analisadas é contínua, o que diminui a quantidade de vazios entre seus constituintes.

4.1.4 Adição mineral

A adição mineral empregada na pesquisa foi o fíler calcário. Na Tabela 4.8 é apresentado o resultado do ensaio de caracterização do material:

Tabela 4.8 – Ensaio de caracterização do fíler calcário.

Material	Ensaio	Resultado
Fíler calcário	Massa específica	2,857 g/cm ³

4.1.5 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante empregado na pesquisa foi o TEC FLOW 7000, da fabricante “Grace Construction”. Ele se trata de um superplastificante à base de policarboxilatos que possui as especificações apresentadas na Tabela 4.9:

Tabela 4.9 – Especificações do superplastificante TEC FLOW 7000. (Fonte: Grace Construction)

Recomendação de uso	Concreto em geral, fluido ou autoadensável
Aspecto / Cor	Líquido alaranjado
Dosagem recomendada (%SPC)	0,3 a 1,2%
Massa específica (g/cm³)	1075 - 1115

4.2 ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

4.2.1 Composição do esqueleto granular

O primeiro passo realizado para determinar os traços estudados na pesquisa foi a composição do esqueleto granular, obtendo a proporção entre os agregados com a maior massa unitária e menor índice de vazios. Para isso, foi realizado o ensaio de massa unitária no estado compactado, começando com as britas até chegar à areia fina. Na Tabela 4.10 é apresentado o resultado da composição da brita $D_{máx} = 19,0$ mm e da brita $D_{máx} = 12,5$ mm.

Tabela 4.10 – Composição entre britas.

Brita $D_{máx} = 19,0$mm / Brita $D_{máx} = 12,5$ mm (%)	Massa Brita $D_{máx} = 19$ mm (kg)	Massa Brita $D_{máx} = 12,5$ mm (kg)	Acréc. (kg)	Peso (kg)	Massa unitária (kg/dm³)
100 / 0	30	0,00	0,00	21,94	1,54
95 / 5	30	1,58	1,58	22,11	1,55
90 / 10	30	3,33	1,75	22,28	1,56
85 / 15	30	5,29	1,96	22,36	1,57
80 / 20	30	7,50	2,21	22,51	1,58
75 / 25	30	10,0	2,50	22,54	1,58
70 / 30	30	12,86	2,86	22,60	1,59
65 / 35	30	16,15	3,29	22,57	1,58

Como pode ser notado, a configuração com maior massa unitária encontrada foi de 70% de brita $D_{máx} = 19,0$ mm e 30% de brita $D_{máx} = 12,5$ mm. Considerando esse resultado como material 1, foi realizada a composição do mesmo com a areia média. No início do ensaio se aumentou a proporção de areia média de 10 em 10% e, a partir de 30% de areia média, passou a se aumentar de 5 em 5% visando uma maior precisão no resultado. Na Tabela 4.11 é apresentado o resultado dessa composição:

Tabela 4.11 – Composição entre material 1 (70% Brita $D_{\text{máx}} = 19,0 \text{ mm}$ / 30% Brita $D_{\text{máx}} = 12,5 \text{ mm}$) e areia média.

Material 1 / Areia (%)	Massa Material 1 (kg)	Massa Areia (kg)	Acréscimo (kg)	Peso (kg)	Massa unitária (kg/dm³)
100 / 0	25	0,00	0,00	22,55	1,58
90 / 10	25	2,78	2,78	24,02	1,69
80 / 20	25	6,25	3,47	25,54	1,79
70 / 30	25	10,71	4,46	26,89	1,89
65 / 35	25	13,46	2,75	27,10	1,90
60 / 40	25	16,67	3,21	27,63	1,94
55 / 45	25	20,45	3,78	27,60	1,94
50 / 50	25	25,00	4,55	27,55	1,93

É possível observar que a configuração com menor índice de vazios obtida foi de 60% de material 1 e 40% de areia média. Por fim, considerando esse resultado como material 2, foi realizada a composição do mesmo com a areia fina. Na Tabela 4.12 é apresentado o resultado dessa composição:

Tabela 4.12 – Composição entre material 2 (60% Material 1 / 40% Areia média) e areia fina.

Material 2 / Areia (%)	Massa Material 2 (kg)	Massa Areia (kg)	Acréscimo (kg)	Peso (kg)	Massa unitária (kg/dm³)
100 / 0	30	0	0	27,15	1,90
95 / 5	30	1,58	1,58	27,41	1,92
90 / 10	30	3,33	1,75	27,71	1,94
85 / 15	30	5,29	1,96	27,80	1,95
80 / 20	30	7,50	2,21	27,88	1,96
75 / 25	30	10,00	2,5	27,73	1,95

Como pode ser observado, a proporção de 80% de material 2 e 20% de areia fina oferece a maior massa unitária. Com o resultado da última composição foi possível determinar a melhor configuração entre os agregados a partir do cálculo:

Material 1 = 70% Brita $D_{\text{máx}} = 19,0 \text{ mm}$ + 30% Brita $D_{\text{máx}} = 12,5 \text{ mm}$

Material 2 = 60% Material 1 + 40% Areia média

Material 3 = 80% Material 2 + 20% Areia fina

Sendo assim tem-se a composição abaixo:

Composição = 80% [60% (70% Brita $D_{\text{máx}} = 19,0 \text{ mm}$ + 30% Brita $D_{\text{máx}} = 12,5 \text{ mm}$) + 40% Areia Média] + 20% Areia Fina

Composição = 33,6% Brita $D_{\text{máx}} = 19,0 \text{ mm}$ + 14,4% Brita $D_{\text{máx}} = 12,5 \text{ mm}$ + 32% Areia Média + 20% Areia Fina

4.2.2 Determinação dos traços

Os traços estudados na pesquisa foram determinados com base nos valores pré-fixados na metodologia, nos resultados do esqueleto granular, nos parâmetros presentes na ACI 237R-07 e em ajustes realizados durante a produção dos concretos. Os resultados obtidos para cada traço são apresentados na Tabela 4.13:

Tabela 4.13 – Traços resultantes do estudo de dosagem do concreto autoadensável.

Traço	1:m	c:f:a:p	a/c	SP (%)	C (kg/m ³)	C + f (kg/m ³)	Massa esp. (kg/m ³)
Traço 1	1:3,8	1:0,1:1,976:1,824	0,38	1,28	450	495,60	2444,21
Traço 2	1:3,35	1:0,1:1,742:1,608	0,55	0,41	450	495,60	2355,79
Traço 3	1:4,82	1:0,3:2,509:2,316	0,55	1,00	350	455,00	2369,82
Traço 4	1:5,27	1:0,3:2,743:2,532	0,50	2,00	350	455,00	2418,95

As siglas c, f, a, p, a/c e SP significam cimento, fíler calcário, areia, brita, relação água/cimento e percentual de superplastificante, respectivamente. São apresentados também na Tabela 4.13 os valores de consumo de cimento e massa específica de cada traço.

A relação água/cimento e o consumo de cimento foram fixados de acordo com a metodologia explicada no Capítulo 3 da pesquisa. A proporção de agregados foi determinada a partir do esqueleto granular e o teor de superplastificante, calculado em relação à quantidade de cimento, foi ajustado experimentalmente para tornar o concreto autoadensável. O teor de finos foi pré-fixado e colocado em adição ao cimento Portland da mistura.

Os traços TR1 e TR2, que possuem consumo de cimento de 450 kg/m³, foram produzidos com 10% de adição de fíler calcário, não apresentando nenhum problema na produção. No entanto, na tentativa de produzir o primeiro traço com 350 kg/m³ com o mesmo teor de finos dos dois primeiros, de 10%, o concreto apresentou elevada exsudação, como pode ser observado na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Exsudação na tentativa de produção do concreto com consumo de cimento de 350 kg/m^3 e 10% de adição de fíler.

Devido a esse problema, optou-se por aumentar o teor de finos dos traços com consumo de cimento de 350 kg/m^3 , adotando um valor de 30% de adição. Com isso, produziu-se o traço TR3 sem apresentar nenhum problema e mantendo os valores pré-fixados.

Na produção do traço TR4, com 30% de adição de fíler, não ocorreu exsudação do concreto. Porém, mesmo chegando a um teor de 2% de superplastificante, o concreto não se tornou autoadensável. Por esse motivo, foi necessário aumentar a quantidade de água da mistura. Sendo assim, a relação água/cimento final do traço 4, que deveria ser de 0,38, foi de 0,50, como pode ser observado na Tabela 4.12.

A determinação dos traços levou em conta os parâmetros do ACI 237R-07. Os resultados para cada traço podem ser observados na Tabela 4.14:

Tabela 4.14 – Resultados dos parâmetros do ACI 237R-07 para os traços estudados.

Parâmetro	Traços				Limites ACI 237R-07	
	TR1	TR2	TR3	TR4	Mínimo	Máximo
Volume de agregado graúdo (%)	31	27	31	32	28	32
Volume de pasta (%)	35	43	36	33	34	40
Volume de argamassa (%)	69	73	69	68	68	72
Relação água/cimento	0,38	0,55	0,55	0,50	0,32	0,45
Consumo de cimento (kg/m^3)	450	450	350	350	386	475

É possível notar na Tabela 4.14 que nem todos os resultados se encaixam nos limites do ACI 237R-07, porém, quando não se enquadram, eles são bem próximos aos presentes no documento. Esses valores foram tomados apenas como referência para a pesquisa, não limitando os resultados.

4.3 ENSAIOS DE AUTOADENSABILIDADE

Para verificar as propriedades do concreto autoadensável no estado fresco e avaliar sua conformidade com a norma brasileira, foram realizados ensaios de autoadensabilidade em cada traço produzido. Foram executados os ensaios de espalhamento, segundo a ABNT NBR 15823-2:2010, da Caixa L, segundo a ABNT NBR 15823-4:2010, e do Funil V, segundo a ABNT NBR 15823-5. Na Figura 4.6 são apresentados os ensaios realizados.

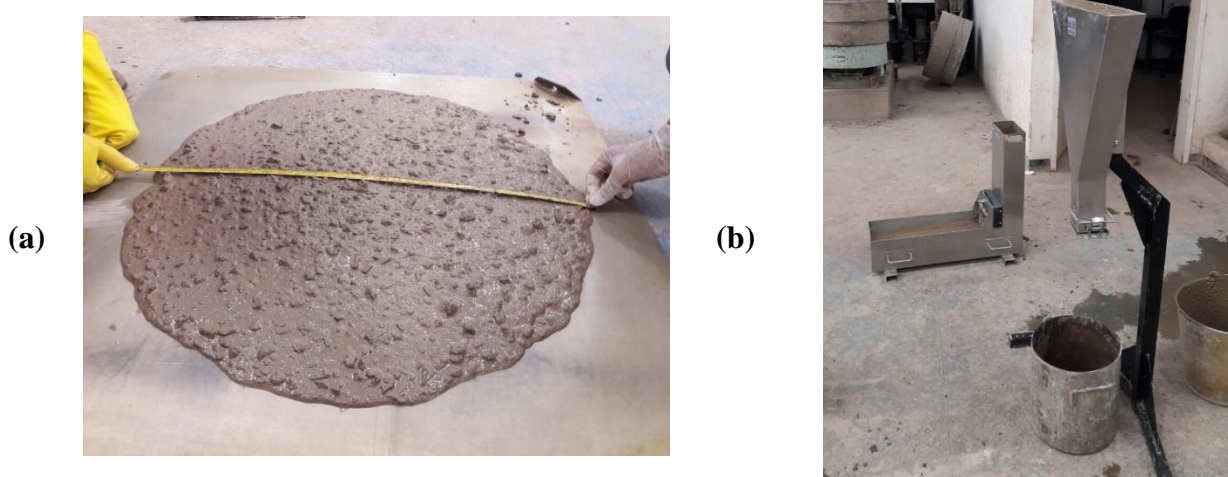


Figura 4.6 – (a) Ensaio de espalhamento (b) Ensaios da caixa L e funil V.

A Tabela 4.15 apresenta os resultados dos ensaios para cada traço da pesquisa, bem como a classificação segundo a ABNT NBR 15823:2010.

Tabela 4.15 – Resultados dos ensaios de autoadensabilidade dos traços estudados.

Ensaio	Parâmetro	Traço 1		Traço 2		Traço 3		Traço 4	
		Valor	Classe	Valor	Classe	Valor	Classe	Valor	Classe
Cone de Abrams	Espalham.(cm)	82,25	SF3	66,25	SF2	71,5	SF2	79,5	SF3
	T ₅₀₀ (s)	8,77	VS2	1,79	VS1	2,76	VS2	3,14	VS2
Caixa L	H1/H2	0,90	PL2	0,81	PL2	0,90	PL2	0,90	PL2
Funil V	T _{30seg} (s)	21,89	VF2	3,02	VF1	13,74	VF2	18,36	VF2
	T _{5min} (s)	27,69	-	3,62	-	15,50	-	31,95	-

A ABNT NBR 15823: 2010 determina que a aceitação do CAA no estado fresco deve ser baseada no mínimo pela comprovação da fluidez e viscosidade aparente, pelo método do cone de Abrams, e da habilidade passante, pelo método do anel J. Ela ainda estabelece que o método do anel J e/ou a medida do tempo de escoamento podem ser dispensados quando forem realizados os ensaios da caixa L e/ou do funil V.

Como pode ser observado na Tabela 4.15, todos os traços atendem os requisitos de aceitação da norma. Além disso, a partir de suas classes, pode-se notar que todos os traços são recomendados, ao menos, para serem utilizados na maioria das aplicações correntes de concreto e que os traços 1 e 4, ambos da classe SF3, são recomendados para estruturas com elevada taxa de armadura. Desse modo, pode-se considerar o resultado satisfatório.

4.4 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

4.4.1 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas de cada traço foram determinadas a partir dos ensaios de compressão simples, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, realizados conforme a metodologia apresentada no Capítulo 3. Os corpos de prova foram desmoldados 1 dia após a produção dos concretos e colocados em câmara úmida para o processo de cura até a data do ensaio.

Os resultados dos ensaios das propriedades mecânicas dos traços no estado endurecido são apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Propriedades mecânicas dos traços produzidos.

Traço	Idade	Compressão (MPa)	Tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Traço 1	7 dias	67,13	17,29	-
	14 dias	69,01	18,48	-
	28 dias	73,04	19,47	49,11
Traço 2	7 dias	47,01	12,26	-
	14 dias	48,06	12,46	-
	28 dias	50,62	13,53	34,83
Traço 3	7 dias	53,10	12,73	-
	14 dias	57,17	13,59	-
	28 dias	61,92	15,28	39,94
Traço 4	7 dias	60,72	14,90	-
	14 dias	63,14	15,29	-
	28 dias	64,54	17,07	44,81

4.4.1.1 Compressão simples

Os resultados de resistência à compressão dos traços estudados na pesquisa são apresentados na Figura 4.7.

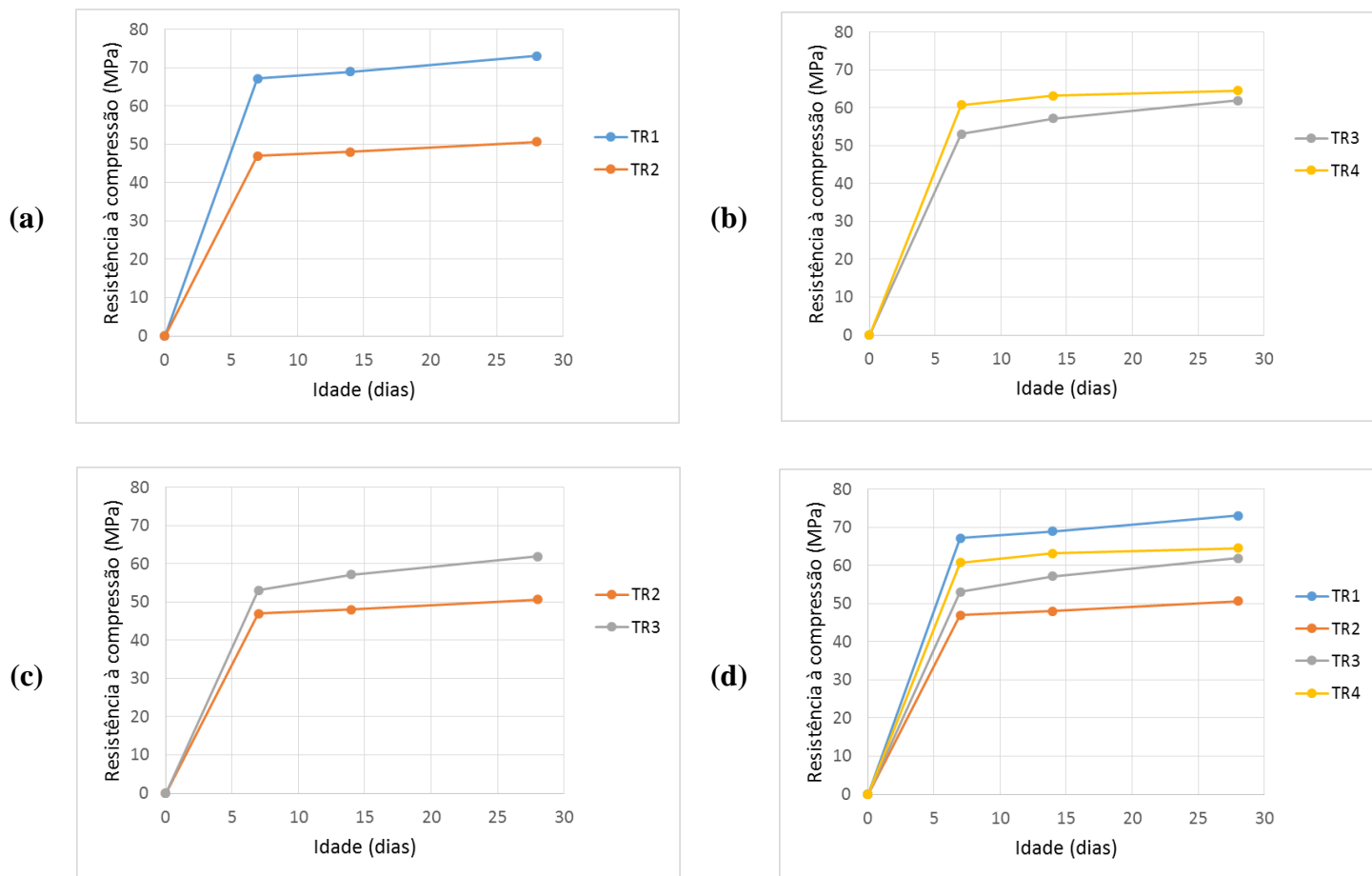


Figura 4.7 – (a) Resultado dos ensaios de compressão dos traços 1 e 2 (b) Resultado dos ensaios de compressão dos traços 3 e 4 (c) Resultado dos ensaios de compressão dos traços 2 e 3 (d) Resultados dos ensaios de compressão dos traços estudados.

A Figura 4.7 (a) apresenta os resultados de resistência à compressão dos traços 1 e 2, que possuem o mesmo consumo de cimento, de 450 kg/m^3 . É possível notar que o traço 1 apresentou uma resistência muito superior ao traço 2, o que é explicado por sua relação água/cimento menor, dado que o TR1 possui relação a/c de 0,38 e o TR2 de 0,55.

A Figura 4.7 (b) apresenta os resultados de resistência à compressão dos traços 3 e 4, que possuem o mesmo consumo de cimento, de 350 kg/m^3 . Observa-se que os dois traços apresentaram valores de resistência próximos, porém o traço 4 obteve resistência um pouco superior, o que também pode ser explicado por sua relação água/cimento menor, dado que o TR4 possui relação a/c de 0,50 e o TR3 de 0,55.

A Figura 4.7 (c) apresenta os resultados de resistência à compressão dos traços 2 e 3, que possuem a mesma relação água/cimento, de 0,55. Pode-se observar que o traço 3, que possui um consumo de cimento menor (350 kg/m^3), apresentou maior resistência mecânica, comportamento oposto do que se esperava em relação apenas ao consumo de cimento. Vale

ressaltar que o traço 3 também apresenta um menor consumo de aglomerante, 455 kg/m^3 . Descartadas todas essas variáveis conclui-se que para o concreto autoadensável é importante levar em consideração a composição do esqueleto granular no ganho de propriedades mecânicas. Como o fíler calcário foi em adição ao cimento Portland e nos traços TR2 e TR3 foram adicionados 10% e 30% respectivamente, tem-se um melhor empacotamento para o traço TR3, proporcionando um menor índice de vazios. Também pode-se observar que o traço 3 possui em sua composição uma quantidade bem maior de agregado graúdo, uma das variáveis responsáveis pela resistência mecânica do concreto.

Por fim, a Figura 4.7 (d) mostra os resultados de resistência à compressão de todos os traços produzidos na pesquisa. É possível perceber que o traço mais resistente é o TR1, o que era esperado, uma vez que possui a menor relação água/cimento e o maior consumo de cimento em relação aos demais.

4.4.1.2 Tração

Os resultados de resistência à tração dos traços estudados na pesquisa são apresentados na Figura 4.8.

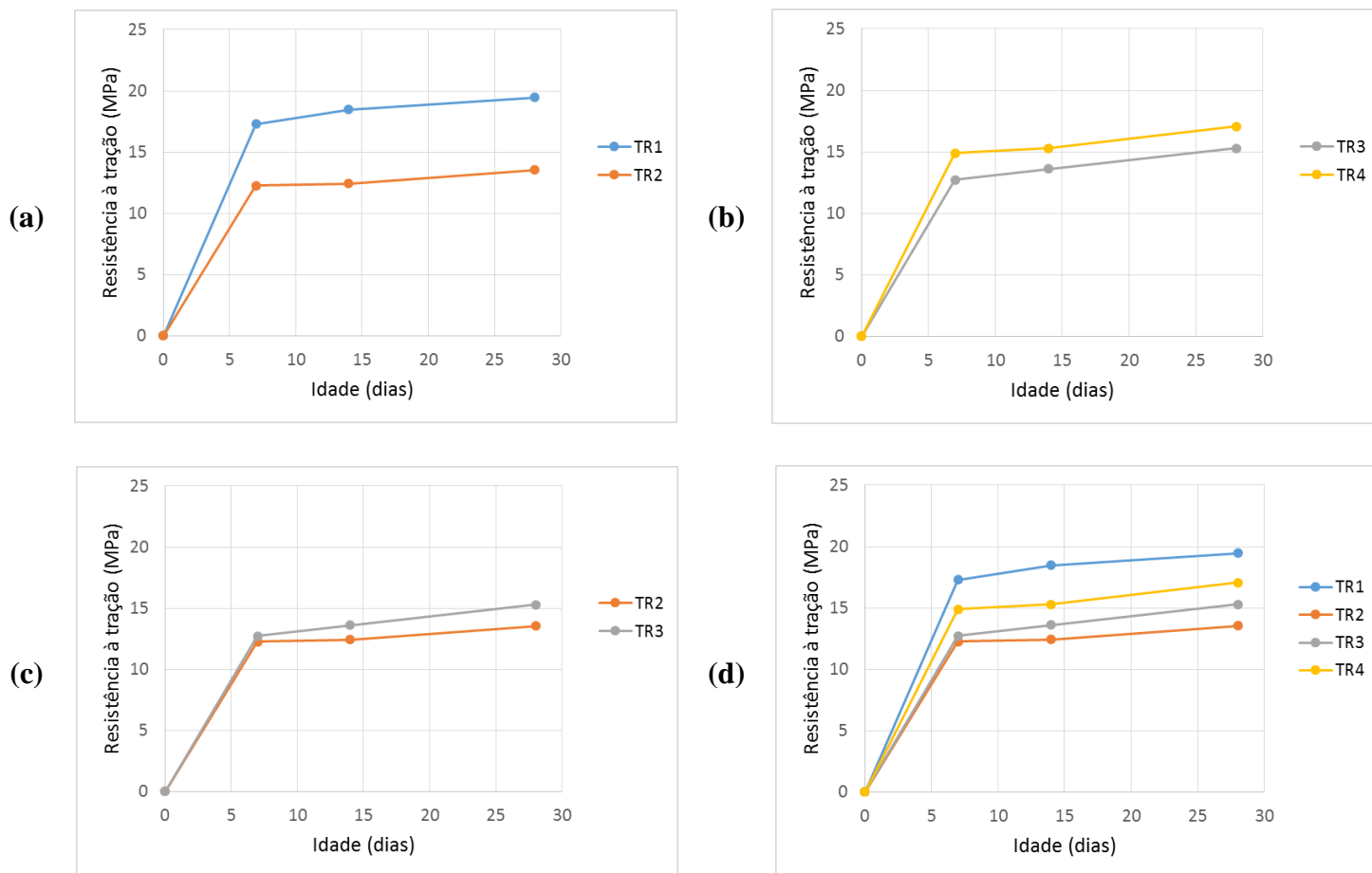


Figura 4.8 – (a) Resultado dos ensaios de tração dos traços 1 e 2 (b) Resultado dos ensaios de tração dos traços 3 e 4 (c) Resultado dos ensaios de tração dos traços 2 e 3 (d) Resultados dos ensaios de tração dos traços estudados.

As Figuras 4.8 (a) e 4.8 (b) apresentam os resultados de resistência à tração dos traços com consumo de cimento de 450 kg/m^3 e com consumo de cimento de 350 kg/m^3 , respectivamente. O resultado foi semelhante ao de resistência à compressão, dado que os traços TR1 e TR4, que apresentam menor relação água/cimento em comparação com os outros, apresentaram resistência mecânica superior.

A Figura 4.8 (c) apresenta os resultados de resistência à tração dos traços com relação água/cimento de 0,55. Pode-se observar que o traço 3, que possui um consumo menor de cimento (350 kg/m^3) e de aglomerante (455 kg/m^3), apresentou resistência mecânica um pouco superior ao traço 2, o que não era esperado. Assim como no caso da resistência à compressão simples, esse resultado destaca a importância da composição do esqueleto granular e do agregado graúdo no ganho de propriedades mecânicas. O traço 3 apresentou maior quantidade de agregado graúdo e um melhor empacotamento de partículas, provocado pela maior adição de fíler calcário.

Por fim, são apresentados na Figura 4.8 (d) os resultados de resistência à tração de todos os traços produzidos na pesquisa, muito semelhantes aos obtidos para a resistência à compressão. Pode-se perceber que o traço mais resistente é o TR1, o que era esperado, uma vez que possui a menor relação água/cimento e o maior consumo de cimento em relação aos demais.

4.4.1.2.1 Análise visual dos corpos de prova rompidos

Durante os ensaios de ruptura dos corpos de prova, foi possível observar algumas características dos concretos produzidos. Como pode ser observado na Figura 4.9, os agregados ficaram bem distribuídos ao longo do material, mostrando que não ocorreu segregação, o que é fundamental no concreto autoadensável.



Figura 4.9 – Corpos de prova após ruptura.

4.4.1.3 Módulo de elasticidade

Os resultados de módulo de elasticidade dos traços estudados na pesquisa são apresentados na Figura 4.10.

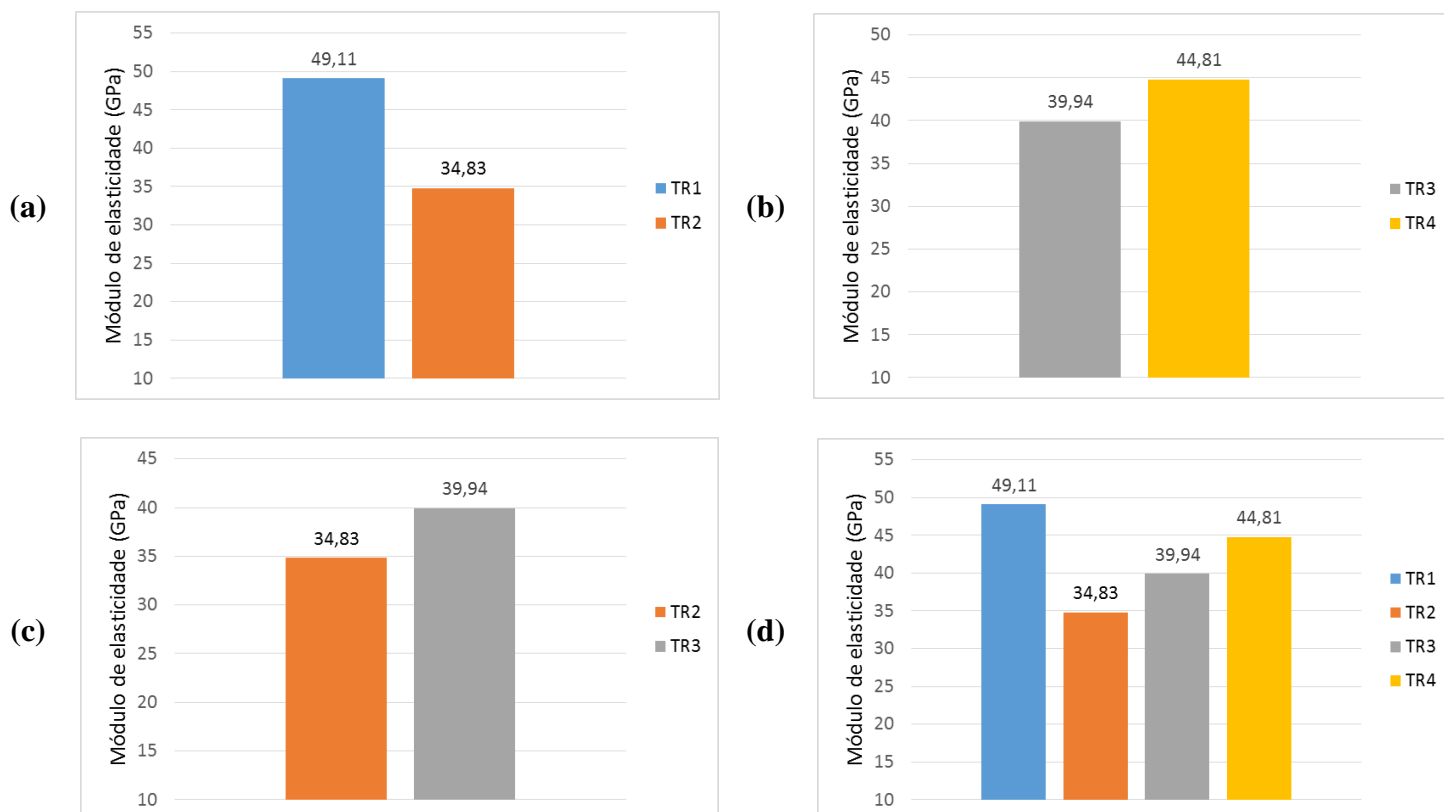


Figura 4.10 – (a) Resultados de módulo de elasticidade dos traços 1 e 2 (b) Resultados de módulo de elasticidade dos traços 3 e 4 (c) Resultados de módulo de elasticidade dos traços 2 e 3 (d) Resultados de módulo de elasticidade dos traços estudados.

O resultado do módulo de elasticidade foi muito parecido com os resultados de resistência à compressão e à tração. Na Figura 4.10 (a) são apresentados os resultados de módulo de elasticidade dos traços com consumo de cimento de 450 kg/m^3 . O traço 1 apresentou módulo superior ao traço 2, o que era esperado, uma vez que o TR1 possui relação água/cimento menor.

A Figura 4.10 (b) apresenta os resultados de módulo de elasticidade dos traços com consumo de cimento de 350 kg/m^3 . Observa-se que o traço 4 obteve módulo maior, o que também pode ser explicado por sua relação água/cimento menor, dado que o TR4 possui relação a/c de 0,50 e o TR3 de 0,55.

A Figura 4.10 (c) apresenta os resultados de módulo de elasticidade com relação água/cimento de 0,55. Pode-se observar que o traço 3, que possui um consumo de cimento menor, apresentou módulo um pouco superior ao traço 2, efeito contrário ao que era esperado em relação ao consumo de cimento. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que o traço 3 possui em sua composição uma quantidade bem maior de agregado graúdo, uma das variáveis responsáveis pelo módulo de elasticidade do concreto. Além disso, o TR3 apresentou um

melhor empacotamento a partir da adição de finos, como foi evidenciado na análise da resistência à compressão e à tração.

Por fim, a Figura 4.10 (d) mostra os resultados de módulo de elasticidade de todos os traços estudados na pesquisa. O traço com maior módulo é o TR1, que possui menor relação água/cimento e o maior consumo de cimento entre todos. Pode-se notar também que, os traços apresentaram valores relativamente elevados de módulo, o que se justifica pelo emprego de brita $D_{\text{máx}} = 19,0$ mm na composição dos concretos.

4.4.2 Retração

Para se determinar os resultados de retração dos traços estudados, foram tomadas medidas dos corpos de prova nas idades de 0, 7, 14, e 28 dias após o período de cura em câmara úmida, que foi de 28 dias. Para realizar o cálculo da retração, os valores foram comparados com os dados de referência dos corpos de prova, obtidos após o desmolde, de acordo com a ASTM C157:2014.

Para realizar a análise dos resultados obtidos, considerou-se que a retração na idade de 0 dias era apenas retração autógena, já que a retração por secagem era insignificante devido ao fato dos corpos de prova estarem em câmara úmida. Por outro lado, considerou-se os resultados de retração nas demais idades como sendo retração por secagem, julgando que a maior parte da retração autógena já havia ocorrido no período de cura.

Os resultados de retração dos traços estudados na pesquisa são apresentados na Tabela 4.17. Na Figura 4.11 são apresentados separadamente os resultados de retração autógena dos traços estudados. Na Figura 4.12 são apresentados os valores de retração em todas as idades a partir do momento em que as leituras de retração começaram a ser tomadas.

Tabela 4.17 – Retração dos traços estudados.

Traço	Idade	Retração (‰)
Traço 1	0 dias	-0,081
	7 dias	-0,198
	14 dias	-0,344
	28 dias	-0,358
Traço 2	0 dias	-0,067
	7 dias	-0,231
	14 dias	-0,376
	28 dias	-0,377
Traço 3	0 dias	-0,063
	7 dias	-0,235
	14 dias	-0,345
	28 dias	-0,388
Traço 4	0 dias	-0,032
	7 dias	-0,168
	14 dias	-0,218
	28 dias	-0,277

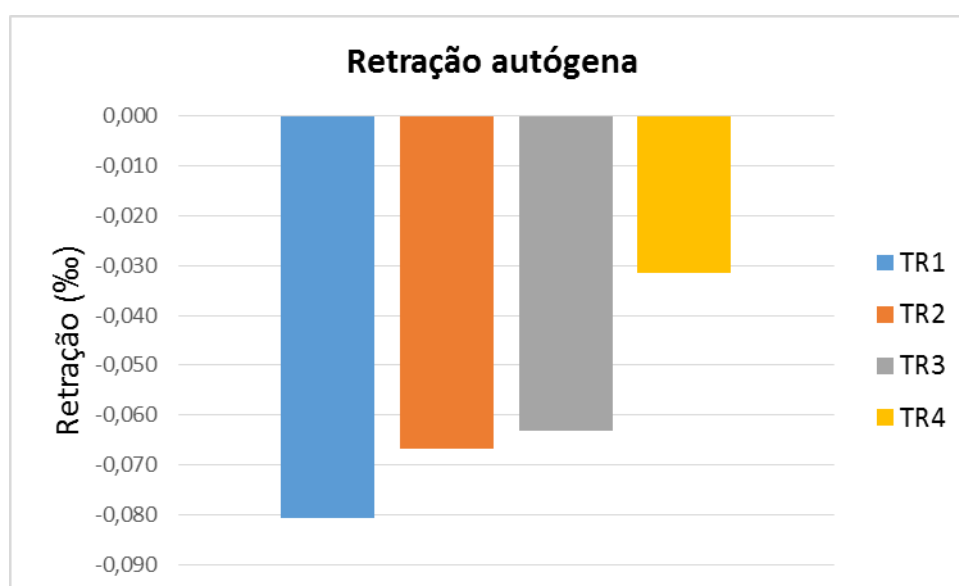


Figura 4.11 – Retração autógena dos traços estudados.

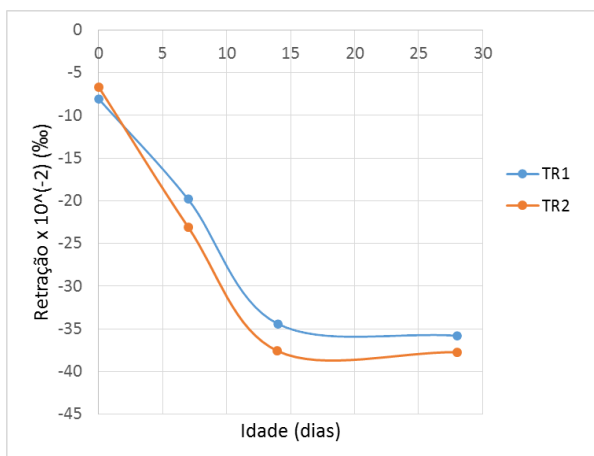
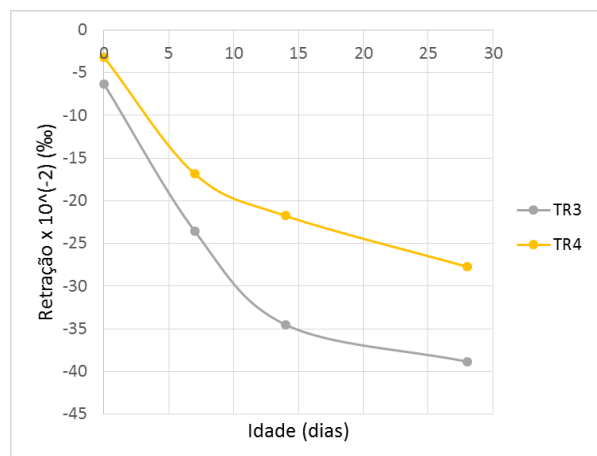
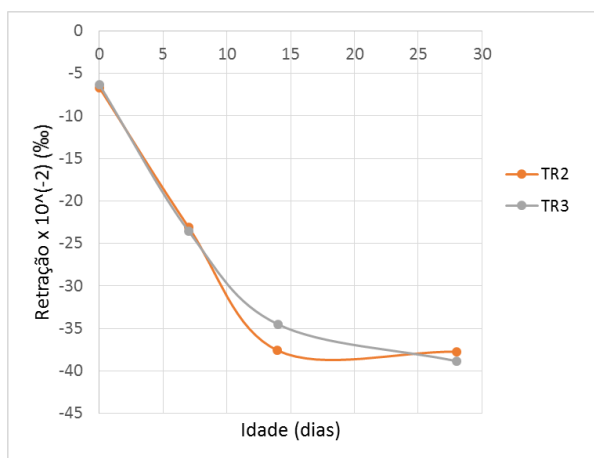
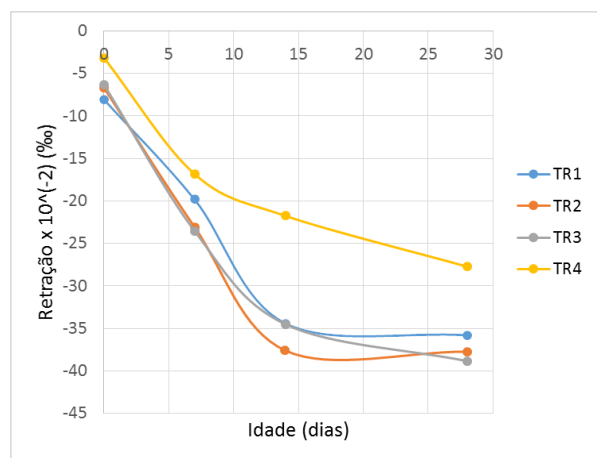
(a)**(b)****(c)****(d)**

Figura 4.12 – (a) Resultados de retração dos traços 1 e 2 (b) Resultados de retração dos traços 3 e 4 (c) Resultado de retração dos traços 2 e 3 (d) Resultados de retração dos traços estudados.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 (a) são apresentados os resultados de retração dos traços 1 e 2, que possuem o mesmo consumo de cimento, de 450 kg/m³. É possível notar que o traço 1 apresentou uma retração autóloga superior ao traço 2, o que é explicado por sua relação água/cimento menor. Também pode-se observar que o traço 2 apresentou retração por secagem maior que o traço 1, o que é justificado por sua maior relação a/c, que tende a aumentar esse tipo de retração.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 (b) são apresentados os resultados de retração dos traços 3 e 4, que possuem o mesmo consumo de cimento, de 350 kg/m³. Observa-se que o traço 3 apresentou uma retração bem maior que o traço 4. Isso pode ser explicado pelo fato de o traço 4 possuir uma relação água/cimento um pouco menor e apresentar uma maior quantidade de agregados em sua composição. Recomenda-se refazer os ensaios de retração dos traços 3 e 4, uma vez que esta diferença nos resultados não era esperada.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 (c) são apresentados os resultados de retração dos traços 2 e 3, que possuem a mesma relação água/cimento, de 0,55. Pode-se observar que os resultados foram muito próximos, mostrando que o consumo de cimento não provocou uma grande mudança na retração do concreto. Isso pode ser explicado pela maior adição de finos no traço 3, que fez com que os traços ficassem com um consumo de aglomerantes próximo e que, por isso, apresentassem comportamento semelhante.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 (d) são apresentados os resultados de retração de todos os traços produzidos na pesquisa. É possível perceber que o traço com maior retração autógena é o TR1, o que condiz com suas características, uma vez que possui a menor relação água/cimento e o maior consumo de cimento em relação aos demais. Além disso, pode-se perceber que os traços com maior proporção de água em sua composição, TR2 e TR3, apresentaram maiores valores de retração por secagem, o que se justifica pelo fato de haver mais água disponível para se perder.

5. CONCLUSÕES

Os traços produzidos na pesquisa atenderam a todos os requisitos da ABNT NBR 15823:2010 para o concreto autoadensável. Todos apresentaram classe de espalhamento SF2 ou SF3, o que significa que são recomendados para a maior parte das utilizações correntes. Vale destacar que dois traços, TR1 e TR4, por suas propriedades no estado fresco, são recomendados para estruturas com elevadas taxas de armadura.

Foi possível observar que a relação água/cimento e o consumo de cimento possuem influência direta na determinação das propriedades mecânicas do concreto. Isso pôde ser notado, por exemplo, no traço TR1, que, possuindo a menor relação a/c e o maior consumo de cimento em relação aos demais traços, apresentou maior resistência à compressão, maior resistência à tração e maior módulo de elasticidade.

O concreto autoadensável, por geralmente possuir uma menor quantidade de agregado graúdo em sua composição, tende a apresentar uma pequena redução no valor do módulo de elasticidade. Nesta pesquisa, os resultados de módulo de elasticidade foram relativamente elevados, o que se justifica pela opção de empregar a brita $D_{\text{máx}} = 19,0$ mm na produção do concreto.

A resistência à segregação é uma característica fundamental do concreto autoadensável. Todos os traços apresentaram resultado satisfatório quanto a essa propriedade. Isso foi observado na pesquisa durante os ensaios de ruptura do concreto, onde se pôde notar que houve uma boa distribuição das partículas ao longo do material.

Com relação à retração, não se percebeu uma grande influência do consumo de cimento na retração do concreto. Notou-se que traços com consumos de cimento diferentes porém com consumos de aglomerantes próximos apresentaram comportamento muito semelhante na retração.

A partir dos resultados do projeto, percebeu-se que, ao mesmo tempo que uma baixa relação água/cimento tende a aumentar a resistência mecânica do concreto, ela favorece a retração autógena e desfavorece a retração por secagem. Observou-se essa influência em todos os traços, uma vez que concretos com mais água apresentaram maior retração por secagem, enquanto o traço com menor relação a/c apresentou maior retração autógena.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI COMMITTEE 237, Self-consolidating concrete, ACI 237R-07, American Concrete Institute, 2008, 30p.

AÏTCIN, P. C.; Concreto de alto desempenho. 1ed. São Paulo: PINI, 2000.

ALMEIDA FILHO, F. M. Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos auto-adensáveis. Tese de Doutorado, São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 157; Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. Pennsylvania. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento portland. 7.ed. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768; Aditivos para concreto de Cimento Portland. Rio de Janeiro, 2011.

_____. NBR 15823-1; Concreto auto-adensável – Parte 1 – Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 15823-2; Concreto auto-adensável – Parte 2 – Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do Cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 15823-3; Concreto auto-adensável – Parte 3 – Determinação da habilidade passante – Método do Anel J. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 15823-4; Concreto auto-adensável – Parte 4 – Determinação da habilidade passante – Método da Caixa L. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 15823-5; Concreto auto-adensável – Parte 5 – Determinação da viscosidade – Método do Funil V. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 15823-6; Concreto auto-adensável – Parte 6 – Determinação da resistência à segregação – Método da Coluna de Segregação. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 43; Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2002.

_____. NBR 7681-2; Calda de cimento para injeção Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 5738; Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR 5739; Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 6118; Projetos de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 6508; Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro. 1984.

_____. NBR 7181; Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1988.

_____. NBR 7222; Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. NBR 7222; Concreto e argamassa -Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. NBR 8522; Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 9776; Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

_____. NBR 9479; Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-deprova. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR 11579; Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO – AMN NBR NM 23; Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

_____. NBR NM 43; Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2002.

_____. NBR NM 45; Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR NM 52; Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 65; Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 67; Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998

_____. NBR NM 248; Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BARROS, P.G.S. Avaliação das Propriedades de Durabilidade do Concreto Auto-Adensável Obtido com Resíduo de Corte de Mármore e Granito. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, 101p. Maceió-AL, 2008.

BARTOS, P. J. M. Measurement of key properties of fresh self-compacting concrete. In: CEN/STAR PNR Workshop. Paris, 2000.

BUCHER, H. R. E. Desempenho de aditivos redutores de água de alta eficiência em pastas, argamassas ou concretos. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30, 1988, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: IBRACON, 1988. V.2, p.609-625.

CAVALCANTI, D. J. H. Contribuição ao Estudo de Propriedades do Concreto Auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia, Maceió, 2006.

COUTINHO, B. S. Propriedades e comportamento estrutural do concreto auto-adensável. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. 2005.

FERRARIS, C.; BROWER, L.; OZYILDIRIM, C.; DACZKO, J. Workability of self-compacting concrete. In: PCI/FHWA/FIB – International Symposium on High Performance Concrete: The economical solution for durable bridges and transporting structures, Orlando, 2000.

FERRAZ, A. L. N. Avaliação da retração e fluência do concreto auto-adensável para aplicação em elementos pré-moldados. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas-SP, 2009.

GAGNE, R.; PIGEON, M.; AİTCIN, P. C. Deicer salt scaling resistance of high performance concrete. Paul Klieger Symposium on Performance of Concrete, SP-122, ACI, 1989.

GIROTTO, L. S. Investigação da retração plástica e da fissuração da argamassa do concreto auto-adensável. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2012.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. Métodos de dosagem de concreto autoadensável. 1. ed. São Paulo: Pini, 2009.

GOMES, J. F; MAESTRO, M. B. Guia práctica para la utilización del hormigón autocompactante. Instituto Español del cemento y sus aplicaciones. Madrid, 2005.

GOODIER, C. I. Development of self-compacting concrete, Proceedings of the ICE – Structures and Buildings, 156 (4), p. 405-414, 2003.

KRAUS, Z. F. Investigação de misturas de argamassas para dosagem do concreto auto-adensável contendo ora fíler calcário, ora aditivo promotor de viscosidade em substituição ao fíler. Tese de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis-SC, 2006.

- LACHEMI, M; HOSSAIN, K. M. A.; LAMBROS, V.; NKINAMUBANZI, P. C.; BOUZOUBAË, N. Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste. *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 185–193.
- MANUEL, P. J. M. Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2005.
- MARQUES, A. C. Concreto auto-adensável: caracterização da evolução das propriedades mecânicas e estudo de sua deformabilidade por solicitação mecânica, retração e fluência. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, 2011.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. 2.ed. São Paulo: Pini, 2014.
- MELO, K. A. Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário. 2005. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 5.ed. São Paulo: Pini, 2015.
- NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. *Tecnologia do Concreto*. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- NUNES, S.C.B. *Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades*. PósGraduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto. 2001, p.198.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. In: *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.
- PETERSSON, Ö. Workability. In: *Brite EuRam Program: Rational production and improved working environments through using self-compacting concrete*. Task 2, p. 1-56, 1999.
- RILEM. *State of the Art of Rilem Technical Committee, 174-SCC. Self-Compacting Concrete*. Stockholm, Sweden, 1999.
- SALES, A. T. C. Retração, fluência e fratura em compósitos cimentício reforçados com polpa de bambu. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2006.
- SANTOS, R.; CASTRO, A.; BARBOSA, M. Utilização da pozolana obtida a partir de resíduo de cerâmica na composição do concreto autoadensável. *IV Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável*, 2015.
- SEDRAN, T. et al. Mix design of self- compacting concrete. In: *INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON PRODUCTION METHODS AND WORKABILITY OF CONCRETE*, BARTOS, P. J. M. (ed.), E. & F. N. Spon, p, 439-450, 1996.

SILVA, P.; BRITO, J. Propriedades mecânicas e retração de BAC produzido em misturas binárias e ternárias de cinzas volantes e fíler calcário. IV Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável, 2015.

TUTIKIAN, B. F. Método para dosagem de concretos auto-adensáveis. 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2004.

TUTIKIAN, B. F. Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis. 2007. 162 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2007.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. Concreto Auto-Adensável. 1. ed. São Paulo: Pini, 2008.

VELASCO, R. V. Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas. Tese (Doutorado) – UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2008.