



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**FILIPPE PETRY**

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DO MÉTODO DE DOSAGEM  
REPETTE-MELO PARA CONCRETO AUTOADENSÁVEL  
ATRAVÉS DO MODELO DE EMPACOTAMENTO  
COMPRESSÍVEL DE PARTÍCULAS (MEC).**

**Florianópolis/SC**

**Julho de 2015**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**FILIPPE PETRY**

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DO MÉTODO DE DOSAGEM  
REPETTE-MELO PARA CONCRETO AUTOADENSÁVEL  
ATRAVÉS DO MODELO DE EMPACOTAMENTO  
COMPRESSÍVEL DE PARTÍCULAS (MEC).**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

**Orientador:** Prof. Dr. Wellington Longuini Repette

**Coorientador:** Eng. Lucas Onghero

**Florianópolis/SC**

**Julho de 2015**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Petry, Filippe

Análise e otimização do método de dosagem Repette-Melo para concreto autoadensável através do modelo de empacotamento compressível de partículas (MEC). / Filippe Petry ; orientador, Wellington Longuini Repette ; coorientador, Lucas Onghero. - Florianópolis, SC, 2015. 103 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

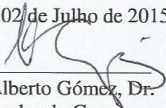
1. Engenharia Civil. 2. Concreto Autoadensável. 3. Método Repette-Melo. 4. Modelo de Empacotamento de partículas (MEC). I. Repette, Wellington Longuini. II. Onghero, Lucas. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

**Filippe Petry**

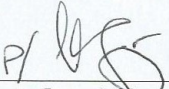
**Análise e otimização do método de dosagem Repette-Melo para  
concreto autoadensável através do modelo de empacotamento  
compressível de partículas (MEC).**

Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de  
“Engenheiro Civil”, e aprovado em sua forma final pelo Departamento  
de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 02 de Julho de 2015.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Luis Alberto Gómez, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Wellington Longuini Repette, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina (Videoconferência)

Eng. Lucas Onghero  
Coorientador

Prof. Philippe Jean Paul Gleize, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



## AGRADECIMENTOS

Durante todo o caminho trilhado na Universidade tenho que agradecer a muitas pessoas que me ajudaram, fosse realizando trabalhos comigo em especial este, fosse apenas com uma palavra de incentivo ou de orientação. Ou os dois juntos.

Agradeço a Deus por estar presente em todos os momentos de minha jornada seja nos difíceis ou nos de alegria sempre senti sua presença comigo.

A minha família pela compreensão e apoio durante esses cinco anos. Em especial aos meus pais Alfredo João Petry e Valquiria Richartz Petry, a minha irmã Ana Carolina Petry e a minha namorada Isabel Maria Schmitt por estar do meu lado.

Ao meu professor orientador Wellington Longuini Repette, pelo apoio na criação deste trabalho. Em especial por acreditar em mim e me incentivar a me manter firme no tema do trabalho.

Ao meu co-orientador Lucas Onghero pela ajuda nos ensaios realizados e na elaboração deste trabalho. Sempre disposto em me ajudar.

Aos meus amigos do GTec por sempre estarem prontos para ajudar ou sanar alguma dúvida. Em especial ao professor Prudêncio por ter me aceito neste grupo, pois graças a esta oportunidade que iniciei os estudos em concreto e assim me fez escolher o tema deste trabalho.

Aos técnicos e funcionários do LMCC e do Departamento de Engenharia Civil da UFSC. Também ao técnico do Laboratório de Solos da UFSC.

A empresa CONCREMOHR na pessoa do Eng. Cleiton pela doação dos materiais utilizados neste estudo.

Aos amigos da UFSC que estiveram ao meu lado nesta trajetória, sempre superando os desafios em conjunto.

**Nunca, jamais desanimeis, embora venham ventos contrários.**

**(Santa Paulina)**





## RESUMO

O concreto autoadensável (CAA) foi desenvolvido com o objetivo de sanar os problemas recorrentes nas obras onde se utiliza concreto armado. Sendo os mais comuns os nichos de concretagem, gerados pelo excesso de armadura e pela má vibração do concreto convencional. Estes problemas também acontecem por não haver mão de obra especializada na etapa de concretagem, problema este que não ocorre com a utilização do CAA.

Sendo assim desde sua concepção, diversos autores propuseram métodos de dosagem para o CAA. Dentre estes se destaca o método Repette-Melo (MELO, 2005). Método este que se baseia em experimentação no qual é feita adição de agregados e se avalia a mistura desde a etapa de formulação da pasta até o ajuste final do concreto.

Outro método de dosagem de concreto que vem ganhando destaque é o modelo de empacotamento compressível (MEC) desenvolvido por De Larrard (1999). Sendo este um método que emprega dados dos materiais utilizados e por meio destes a dosagem é feita totalmente por formulações matemáticas.

Conhecendo os métodos citados, este trabalho tem como objetivo analisar e otimizar o método Repette-Melo através do MEC, para assim melhorar e agilizar o processo de dosagem do mesmo. Para isto se dosou um concreto autoadensável pelo método Repette-Melo e, depois de encontrada a dosagem final, se executou todos os ensaios referentes ao MEC.

Como resultado principal constatou-se que o MEC foi muito eficaz na obtenção do objetivo proposto, pois uma das etapas mais demoradas, a de argamassa, no método Repette-Melo pode ser simplificada para a execução de apenas um único traço de argamassa onde será feito apenas o ajuste de aditivo. Assim sendo, é visível o ganho de velocidade e economia de material para a obtenção de CAA utilizando o MEC.

**Palavras-chave:** Concreto Autoadensável, Repette-Melo, MEC.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ensaio de Slump Flow.....	29
Figura 2: Funil - V.....	31
Figura 3: Caixa L.....	32
Figura 4: Fluxograma do método de dosagem proposto.....	35
Figura 5: Arranjo de partículas cúbicas e esferas CFC.....	43
Figura 6: Classe Dominante da Mistura.....	44
Figura 7: Mistura binária sem interação: (a) classe1 dominante e (b) classe2 dominante.....	46
Figura 8: Efeito de afastamento.....	48
Figura 9: Efeito de parede.....	48
Figura 10: Fases do ensaio de demanda de água.....	51
Figura 11: Especificações ensaio de compressão+vibração.....	53
Figura 12: Materiais utilizados no CAA.....	55
Figura 13: Ferramental para o ensaio de módulo de elasticidade.....	59
Figura 14: Equipamentos para o ensaio de demanda de água.....	61
Figura 15: Equipamentos para ensaio de compressão+ vibração.....	63
Figura 16: Distribuição granulométrica areia fina.....	64
Figura 17: Distribuição granulométrica de areia média.....	65
Figura 18: Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	66
Figura 19: Pasta com 25% de filer.....	67
Figura 20: Determinação ponto de saturação.....	68
Figura 21: Cone de Marsh (esquerda) e Minislump (direita).....	68
Figura 22: Ensaio de Funil V (esquerda) e espalhamento (direita) para argamassa.....	70
Figura 23: Ensaio T500 dos concretos.....	73
Figura 24: Ensaio de espalhamento dos concretos.....	74
Figura 25: Ensaio Funil V dos concretos.....	74
Figura 26: Ensaio caixa L do concretos.....	75
Figura 27: Resultado do ensaio de espalhamento do CAA.....	76
Figura 28: Resultado do ensaio de espalhamento. a) região central, b) borda.....	76
Figura 29: CP de CAA 27% antes e após ruptura.....	77

Figura 30: CP de CAA 30% antes e após ruptura. ....	77
Figura 31: CP de CAA 33% antes e após ruptura. ....	78
Figura 32: Análise resultados de resistência dos concretos I. ....	80
Figura 33: Análise resultados de resistência dos concretos II. ....	80
Figura 34: Curva tensão x deformação para CAA 27%. ....	81
Figura 35: Curva tensão x deformação para CAA 30%. ....	82
Figura 36: Curva tensão x deformação para CAA 33%. ....	82
Figura 37: Ponto de demanda de água.....	85
Figura 38: Espalhamento X Empacotamento .....	89
Figura 39: Resistência aos 28 dias X Empacotamento.....	90
Figura 40: Resistência aos 28 dias X Empacotamento II.....	90
Figura 41: Espalhamento X Empacotamento do Concreto .....	91
Figura 42: Funil V X Empacotamento .....	92
Figura 43: Caixa L X Empacotamento.....	92
Figura 44: Resistência aos 28 dias X Empacotamento concreto.....	93
Figura 45: Módulo de Elasticidade X Empacotamento.....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação e aplicações do CAA conforme resultados do slump flow.....	30
Tabela 2: Classificação dos concretos quanto à viscosidade aparente. .	31
Tabela 3: Relação água/cimento e resistência para cada classe de agressividade.....	36
Tabela 4: Limites de aceitação do CAA de acordo com o método de ensaio.....	40
Tabela 5: Protocolos de empacotamento e valores de K.....	50
Tabela 6: Resultados dos ensaios para definição teor de superplastificante.....	67
Tabela 7: Resultados da composição das areias.....	69
Tabela 8: Resultados da resistência à compressão argamassas.....	70
Tabela 9: Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas.....	71
Tabela 10: Resistência à compressão das argamassas.....	72
Tabela 11: Ensaio no estado fresco do concreto.....	72
Tabela 12: Traço final em massa e volume.....	79
Tabela 13: Resultados da resistência à compressão do concreto.....	79
Tabela 14: Empacotamento do cimento (C).....	84
Tabela 15: Empacotamento do fíler calcário (C).....	84
Tabela 16: Empacotamento da areia fina.....	85
Tabela 17: Empacotamento da areia média.....	86
Tabela 18: Empacotamento do agregado graúdo.....	86
Tabela 19: Empacotamento Virtual Materiais.....	86
Tabela 20: Empacotamento Virtual da Pasta.....	87
Tabela 21: Empacotamento Virtual das Argamassas.....	88
Tabela 22: Empacotamento Virtual dos concretos.....	88



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
$C$	Compacidade real da classe granular ou do material.
CAA	Concreto Autoadensável
CFC	Arranjo cúbico de face centrada
CCV	Concreto Convencional
CP	Corpo de Prova
$D_c$	Diâmetro interno do cilindro utilizado no ensaio de compressão+vibração
EFNARC	European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete
H	Altura final da camada do material compactado no ensaio de compressão+vibração
H1 e H2	Altura do concreto em determinados trechos do ensaio da caixa L
$K$	Índice de compactação.
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
M1	Massa do material analisado no ensaio de demanda de água.
$me_1$	Massa específica do material estudado no ensaio de demanda de água.
MEC	Modelo de Empacotamento Compressível

$M_{H_2O}$	Massa de água utilizada no ensaio de demanda de água.
MIN	Função que leva ao valor mínimo.
$M_S$	Massa do material seco utilizado no ensaio de compressão+vibração
NBR	Norma Brasileira
$T_{500}$	Parâmetro obtido do ensaio de espalhamento que indica o tempo para o CAA atingir a abertura de 500 mm.
$\beta$	Compacidade virtual da classe granular ou do material.
$\gamma$	Compacidade virtual da mistura
$\rho_s$	Massa específica do material no ensaio de compressão+vibração
$\phi$	Volumes parciais
y	Frações volumétricas
$\pi$	Porosidade



## SUMÁRIO

RESUMO .....	9
LISTA DE FIGURAS .....	11
LISTA DE TABELAS .....	13
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES.....	15
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	21
2. OBJETIVO .....	22
3. ETAPAS E DIVISÃO DOS CAPÍTULOS.....	22
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	23
4.1. CONCRETO AUTOADENSÁVEL .....	23
4.1.1. Materiais constituintes.....	25
4.1.1.1. Cimento .....	26
4.1.1.2. Agregado miúdo.....	26
4.1.1.3. Agregado graúdo .....	26
4.1.1.4. Adições minerais.....	27
4.1.1.5. Aditivos .....	27
4.2. CARACTERÍSTICAS DO ESTADO FRESCO .....	28
4.2.1. Slump Flow .....	29
4.2.2. Funil V .....	30
4.2.3. Caixa L.....	31
4.3. CARACTERÍSTICAS DO ESTADO ENDURECIDO .....	32
4.3.1. Resistência à Compressão .....	32
4.3.2. Módulo de Elasticidade.....	33
4.4. DOSAGEM DE CAA.....	33
4.4.1. Estratégias de dosagem do CAA .....	33

5.	MÉTODO DE DOSAGEM REPETTE-MELO .....	34
5.1.	DESCRIÇÃO GERAL .....	34
5.2.	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM .....	35
5.2.1.	Composição da pasta.....	36
5.2.1.1.	Relação água/cimento .....	36
5.2.1.2.	Teor de finos .....	37
5.2.2.	Composição da argamassa .....	37
5.2.2.1.	Teor de agregado miúdo .....	38
5.2.2.2.	Ajuste final do teor de adição .....	39
5.2.3.	Composição do concreto .....	39
5.2.3.1.	Teor de agregado graúdo.....	39
5.2.3.2.	Ajuste final do aditivo.....	40
5.2.4.	Avaliação das propriedades mecânicas.....	41
6.	MODELO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL .....	41
6.1.	CÁLCULO DA COMPACIDADE .....	42
6.2.	DESCRIÇÃO CONCEITUAL DO MEC.....	43
6.3.	EMPACOTAMENTO VIRTUAL.....	45
6.3.1.	Misturas binárias .....	45
6.3.1.1.	Misturas binárias sem interação .....	46
6.3.1.2.	Misturas binárias com interação.....	47
6.3.2.	Misturas Polidispersas sem interação.....	49
6.3.3.	Misturas Polidispersas com interação .....	49
6.4.	EMPACOTAMENTO REAL.....	50
6.4.1.	Ensaio de demanda de água .....	51
6.4.2.	Ensaio de compressão + vibração .....	52

7.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	53
7.1.	OBTENÇÃO DE CAA PELO MÉTODO REPETTE-MELO .....	54
7.1.1.	Caracterização dos materiais .....	54
7.1.2.	Estudos em pasta .....	55
7.1.2.1.	Teor de filer .....	55
7.1.2.2.	Teor de superplastificante .....	55
7.1.3.	Estudos em argamassa .....	56
7.1.3.1.	Composições das areias .....	56
7.1.3.2.	Teor de agregado miúdo na argamassa .....	57
7.1.4.	Estudos em concreto .....	58
7.1.4.1.	Teor de agregado graúdo no concreto .....	58
7.2.	ENSAIOS DO MEC .....	59
7.2.1.	Procedimento do Ensaio de demanda de água .....	60
7.2.2.	Procedimento do Ensaio de Compressão + vibração ...	61
8.	RESULTADOS E ANÁLISES .....	63
8.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	63
8.1.1.	Filer Calcário .....	63
8.1.2.	Areia Fina .....	64
8.1.3.	Areia Média .....	64
8.1.4.	Agregado graúdo .....	65
8.2.	ENSAIOS EM PASTA .....	66
8.2.1.	Teor de Filer Calcário .....	66
8.2.2.	Teor de superplastificante .....	67
8.3.	ENSAIOS EM ARGAMASSA .....	69

8.3.1.	Composições de areias .....	69
8.3.2.	Teor de agregado miúdo.....	70
8.4.	ENSAIOS EM CONCRETO.....	72
8.4.1.	Ensaio no estado fresco .....	72
8.4.2.	Análises visuais no estado fresco .....	75
8.4.3.	Análises visuais no estado endurecido .....	77
8.4.4.	Traço Final .....	78
8.4.5.	Ensaio no estado Endurecido.....	79
8.5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO MÉTODO REPETTE- MELO .....	83
8.6.	ENSAIOS DO MEC.....	84
8.6.1.	Ensaio de demanda de água.....	84
8.6.2.	Ensaio de compressão + vibração.....	85
8.6.3.	Resultados do empacotamento virtual.....	86
8.6.4.	Resultados do empacotamento virtual da pasta.....	87
8.6.5.	Resultados do empacotamento virtual das argamassas	87
8.6.6.	Resultados do empacotamento virtual dos concretos...	88
8.7.	CORRELAÇÕES ENTRE OS MÉTODOS .....	89
8.7.1.	Correlações nas argamassas .....	89
8.7.2.	Correlações dos concretos.....	91
9.	CONCLUSÕES .....	94
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	96
	ANEXO A – Características do cimento.....	99
	ANEXO B – Características do aditivo superplastificante.....	101

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Segundo Repette (2011), o concreto autoadensável se diferencia do concreto convencional por não necessitar de adensamento, pois este ocorre por meio do peso próprio da mistura.

Diante desta característica do CAA, o material se tornou capaz de suprir a deficiência de mão de obra especializada no serviço de concretagem. Haja vista que à medida que as estruturas se tornaram maiores, mais altas e também mais esbeltas em virtude do aumento da resistência do concreto, surgiu a necessidade de se aumentar o cuidado com a qualidade das estruturas de concreto. Exigindo assim a melhora das técnicas de concretagem, principalmente se tratando da etapa de vibração do concreto.

Porém, mesmo com a melhora das técnicas, em situações onde o grau de armadura é elevado, como é o caso de regiões de encontro de pilares e vigas, se torna difícil se executar uma vibração adequada. Destas situações, são gerados nichos de concretagem, que se tornam pontos fracos da estrutura.

Logo, para garantir a boa qualidade da estrutura, o CAA deve apresentar três características principais: habilidade de preenchimento (não deixando nenhum local da estrutura sem concreto), habilidade passante (capacidade de passar por obstáculos sem apresentar bloqueio) e habilidade de manter-se coeso durante todo o processo de concretagem (RILEM, 2006).

Para o aperfeiçoamento do CAA demandou-se um grande número de estudos, bem como foram desenvolvidos diversos métodos de como produzi-lo. Somente no Brasil pode-se citar os surgimentos dos seguintes: Repette-Melo (2009), Alencar e Helene (2006) e Tutikian e Dal Molin (2007).

Entre estes optou-se por trabalhar com o método Repette-Melo, pois consiste em um método racional que emprega o conceito de adição de agregados a pasta e no qual já se dosa partindo de uma relação água cimento que propiciará a resistência desejada.

No entanto, por tratar-se de um método racional, demanda uma grande quantidade de ensaios, tornando o processo de dosagem mais lento e exigindo a utilização de grande quantidade de material para a execução dos ensaios.

Para isto se propõe neste trabalho a utilização de conceitos de um método de dosagem que vem ganhando destaque na produção de

concreto autoadensável o método desenvolvido por De Larrard (1999), intitulado MEC – Modelo de empacotamento compressível de partículas.

Este método se baseia no conceito da elaboração de uma matriz de agregados com o maior grau de empacotamento e posteriormente a adição da pasta.

Porém o principal diferencial deste método é que este gera os parâmetros de dosagem através de uma formulação algébrica, necessitando apenas dos dados de caracterização dos materiais empregados no concreto, tornando o processo de dosagem mais ágil.

Desta forma a utilização de conceitos do MEC no método Repette-Melo só tende a agregar benefícios ao mesmo. Haja vista que tendo sido obtida a matriz de agregados necessária para a produção de um CAA pelo MEC, ajusta-se a mesma pela teoria proposta pelo método Repette-Melo.

Gerando assim um produto final adequado, ou seja, um CAA que atenda as especificações corretas para sua utilização, com menor custo do estudo da dosagem. Partindo desta premissa decidiu-se desenvolver este trabalho.

## **2. OBJETIVO**

Analisar e otimizar o método de dosagem REPETTE-MELO para concreto autoadensável através do modelo de empacotamento compressível de partículas (MEC).

## **3. ETAPAS E DIVISÃO DOS CAPÍTULOS**

Este trabalho é dividido em quatro etapas principais:

- Dosar um concreto pelo método REPETTE-MELO e analisar o processo.
- Implementar os métodos de obtenção dos dados necessários para utilização do MEC.
- Determinar a compacidade dos concretos autoadensáveis dosados pelo método REPETTE-MELO através do MEC.

- Analisar a possibilidade da utilização de conceitos do MEC no método Repette-Melo.

Quanto a estrutura é separado em 9 capítulos, cujo conteúdo é resumido a seguir:

O Capítulo 1 realiza uma introdução do trabalho, onde se relata a importância da pesquisa e sua justificativa.

O Capítulo 2 apresenta o objetivo que se pretende alcançar com a pesquisa.

O Capítulo 3 apresenta as principais etapas do trabalho e sua estrutura.

O Capítulo 4 apresenta a revisão bibliográfica sobre concreto autoadensável.

O Capítulo 5 expõe o método Repette-Melo para dosagem de concreto autoadensável.

O Capítulo 6 exhibe o Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), seus fundamentos teóricos e o procedimento para a aplicação deste método de dosagem.

O Capítulo 7 apresenta os materiais e métodos utilizados na execução deste trabalho.

O Capítulo 8 expõe todos os resultados encontrados e análises dos mesmos.

Por fim o Capítulo 9 apresenta as conclusões obtidas com esta pesquisa.

## **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1. CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

O concreto autoadensável surgiu para suprir a deficiência de mão de obra qualificada no serviço de concretagem, uma vez que o adensamento inadequado é uma das causas da diminuição da durabilidade da estrutura.

Esta classe de concreto tem como principal característica não precisar de adensamento, uma vez que este é realizado pelo peso próprio da mistura (REPETTE, 2011).

As características do concreto no estado fresco são as que diferenciam o CAA do concreto convencional. Dentre as principais, pode-se citar a elevada fluidez e a estabilidade da mistura. Da mesma

forma, a habilidade de passagem do concreto, está relacionada com a coesão, pois um material coeso tende a permanecer homogêneo em situações de áreas restritas ou com grande quantidade de armaduras (OKAMURA E OUCHI, 2003).

A estabilidade da mistura é um índice simultâneo da capacidade de reter água e de manter os agregados graúdos dispersos de forma homogênea. Através deste conceito, em um concreto se busca evitar a exsudação, fenômeno que ocorre com o afloramento de água e/ou pasta na superfície do concreto depois do seu lançamento; e a segregação, que é a separação dos agregados graúdos na massa de concreto fresco, deixando a mistura heterogênea.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a coesão de um material é a resistência à exsudação e a segregação.

Além das especificações exigidas para a obtenção de um bom concreto convencional, o CAA deve apresentar 3 características que não competem ao concreto convencional (RILEM, 2006):

- **Habilidade de preenchimento:** o CAA deve preencher completamente a fôrma e os espaços entre as armaduras, sem necessidade de força externa;
- **Habilidade passante:** deve ser capaz de passar através de obstáculos, como as barras de armadura, sem apresentar bloqueio por restrição do movimento dos agregados;
- **Resistência à segregação ou estabilidade:** deve se manter homogêneo durante a mistura, transporte e aplicação, sem a ocorrência de segregação ou exsudação.

Repetto (2011) acrescenta que algumas propriedades aplicáveis ao concreto convencional também se aplicam ao CCA.

- **Tempo em aberto:** capacidade que corresponde ao tempo em que o CAA mantém suas propriedades de escoar, sem comprometer a utilização adequada;
- **Bombeabilidade:** relaciona a facilidade de o CCA ser bombeado, possibilitando um menor desgaste das bombas e maiores distâncias de bombeamento.



- **Acabamento superficial:** está ligada a qualidade do acabamento superficial, como presença de bolhas, textura homogênea e coloração.
- **Resistência mecânica e Durabilidade:** características no estado endurecido necessárias ao CAA.

Após inúmeras pesquisas vêm investigando os parâmetros de adensabilidade e suas vantagens da utilização do CAA, chegando a conclusão que (TUTIKIAN, 2008 e REPETTE, 2011):

- Acelera a construção;
- Reduz mão-de-obra no canteiro;
- Melhora o acabamento superficial da estrutura;
- Pode aumentar a durabilidade da estrutura, em decorrência deste levar a peças de melhor qualidade sem os característicos ninhos de concretagem;
- Permite concretagens em peças com seções reduzidas ou com altas taxas de armadura além de ser possível concretar peças com formas diferenciadas como curvas;
- Elimina o barulho de vibração;
- Torna o local de trabalho mais seguro, em decorrência da menor demanda de funcionários;
- Permite o bombeamento do concreto a maiores distâncias;
- Permite o uso de grande quantidade de aditivos minerais, provenientes de resíduos industriais, contribuindo para a diminuição do impacto ambiental.

O custo de produção do CAA acaba sendo maior quando comparado ao concreto convencional (CV) devido à elevada demanda de finos para a estabilização da mistura, além dos cuidados que se deve ter com os materiais utilizados e a necessidade de mão de obra treinada para manutenção de qualidade da sua produção. Porém se levarmos em consideração todas as vantagens mencionadas, o CAA pode ser mais eficiente e o seu custo mais elevado se equipara ao convencional.

#### **4.1.1. Materiais constituintes**

De acordo com Repette (2011), o CAA é basicamente constituído pelos mesmos materiais que compõe o concreto convencional. A diferença entre o convencional e o autoadensável, é que na produção do CAA é necessária uma maior quantidade de finos e o uso de aditivos específicos, como aditivos superplastificantes.

#### 4.1.1.1. Cimento

Não há restrição sobre qual cimento deve-se utilizar para o CAA, a princípio todos os cimentos empregados no concreto convencional podem ser utilizados. Porém Repette (2011) ressalta que cimentos com maior finura são mais adequados na produção do CAA.

#### 4.1.1.2. Agregado miúdo

Todos os tipos de agregados miúdos podem ser utilizados para confeccionar o CAA. Porém as areias naturais são mais indicadas para o uso, pois seus grãos apresentam forma mais arredondada e uniforme; diferente das areias artificiais, que são obtidas através de britagem, assim possuindo grãos com elevada angulosidade e aspereza superficial, causando um maior intertravamento das partículas e a necessidade de maior quantidade de água e aditivos superplastificantes.

A quantidade de agregado miúdo tipicamente utilizada na produção de CAA varia na faixa de 40% a 50% do volume da argamassa presente no concreto. (MELO, 2005).

#### 4.1.1.3. Agregado graúdo

Podem-se utilizar agregados graúdos de qualquer natureza no CAA, porém é preferível o uso de agregados com formato regular. Agregados angulosos ou lamelares e com textura áspera, ou seja, com formato irregular, devem ser empregados com granulometria mais fina, a fim de minimizar o efeito na fluidez do concreto (REPETTE, 2011).

A dimensão máxima do agregado graúdo para o CAA, em geral é de 19 mm, devendo-se considerar que quanto maior o diâmetro do agregado, maior deverá ser a viscosidade do CAA, com a finalidade de se evitar a segregação. Além da maior probabilidade da ocorrência de

bloqueios devido as restrições como o espaçamento das armaduras. (REPETTE, 2011).

Porém (MELO, 2005), recomenda a utilização de agregados grãos com dimensão máxima de 9,5 mm, pois resultou em CAA de melhor qualidade.

#### 4.1.1.4. Adições minerais

O uso de adições minerais na construção civil é anterior à invenção do cimento Portland (Malhotra e Mehta (1996) *apud* Isaia (2011)). Pode-se citar o uso da pozolana e da cal. Atualmente as adições minerais são resíduos provenientes de outras indústrias, que seriam descartados em grandes quantidades em locais impróprios, gerando risco de contaminação do solo.

Consideram-se adições ou finos, os materiais que apresentam dimensões menores do que 0,150mm, sendo indicado que mais que 75% tenham dimensões menores que 0,075mm.

As adições minerais são geralmente utilizadas com o intuito de aumentar a quantidade de finos nas misturas, evitando assim a utilização de cimento para esta finalidade.

O filer é uma adição mineral fina sem atividade química, onde sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (DAL MOLIN, 2011).

O filer traz algumas melhorias nas propriedades do concreto, entre elas, pode-se citar: trabalhabilidade, massa específica, diminuição da permeabilidade, exsudação e tendência à fissuração, conforme Neville (1995) *apud* Isaia (2011).

#### 4.1.1.5. Aditivos

Os aditivos são produtos químicos que são capazes de alterar as propriedades do concreto estando presentes em pequenas proporções, geralmente entre 0,05% e 5% da massa total de aglomerante. (HARTMANN et. al., 2011).

Os aditivos mais utilizados no CAA são os aditivos superplastificantes (dispersantes) de grande eficiência e os promotores de viscosidade.

Os superplastificantes, também são conhecidos como aditivos de elevada redução de água, já que devem promover uma redução de no mínimo 20%. Podem ser divididos em duas categorias: os do tipo I que contém sais condensados de naftaleno sulfonato ou melamina sulfonato, enquanto os do tipo II são à base de policarboxilato-poliéteres.

Os superplastificante do tipo II têm como vantagem promover uma melhor fluidez, também uma maior manutenção da trabalhabilidade e proporcionam tempos de pega mais previsíveis do que os dos superplastificantes a base naftaleno e melamina (HARTMANN et. al., 2011).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994) os superplastificantes tem outra vantagem sobre os plastificantes: é possível dosar quantidades maiores de superplastificantes sem causar exsudação ou segregação excessiva. Isso se deve ao tamanho coloidal da longa cadeia de partículas que forma os superplastificantes, que obstrui os canais de exsudação no concreto.

Os aditivos promotores de viscosidade são usados para melhorar a resistência à segregação do CAA (REPETTE, 2011). Seu uso é dispensável na produção do CAA, porém são aditivos importantes a serem usados quando se tem falta de finos, além de ser uma alternativa quando a forma e a distribuição dos agregados miúdos é muito variável.

## 4.2. CARACTERÍSTICAS DO ESTADO FRESCO

A definição de concreto autoadensável está relacionada com o seu estado fresco, pois o concreto deve ter habilidade de preenchimento e de passagem pelas restrições como também deve resistir à segregação.

Enquanto no concreto tradicional vibrado se faz necessário apenas o ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*) que define suas características no estado fresco, no concreto autoadensável é necessária a realização de vários ensaios complementares para as medidas de diversas propriedades: consistência, viscosidade, habilidade passante e resistência à segregação.

A capacidade de fluxo avalia a consistência da mistura e a sua habilidade de preenchimento dos espaços pelo peso próprio do concreto, uma vez que a mistura deve ser capaz de fluir e preencher completamente as fôrmas e os espaços entre armaduras (RILEM, 2006). Essa propriedade pode ser avaliada pelo slump flow e pelo funil V.

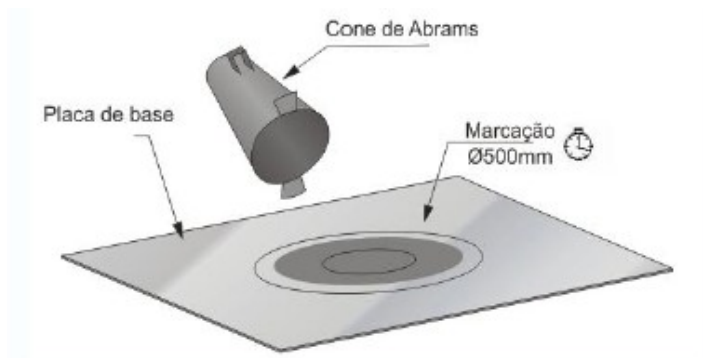
### 4.2.1. Slump Flow

Também conhecido como ensaio de espalhamento, o ensaio mede o diâmetro final da amostra após a retirada do molde tronco-cônico (Figura 1). Segundo a ABNT NBR 15823 (2010), o CAA pode ser classificado em três classes, conforme o apresentado na Tabela 1.

Além da medida do diâmetro de espalhamento, o ensaio mede também o tempo para que o diâmetro de espalhamento chegue a 500 mm (t500). Este resultado mede indiretamente a viscosidade do CAA. A classificação dos concretos com relação ao resultado do t500 pode ser observada na Tabela 2.

O valor obtido no ensaio de espalhamento é influenciado pelo consumo de água do concreto e, principalmente, pelo tipo e teor de aditivo superplastificante empregado.

**Figura 1: Ensaio de Slump Flow.**



**Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15823 (2010).**

**Tabela 1: Classificação e aplicações do CAA conforme resultados do slump flow.**

Classe de espalhamento	Espalhamento (mm)	Aplicação	Exemplo
SF 1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto com deslocamento livre. Concreto autoadensável bombeado. Estruturas que exigem um curto espalhamento horizontal do CAA.	Lajes  Revestimento de túneis  Estacas e certas fundações profundas
SF 2	660 a 750	Adequada para a maioria das aplicações correntes.	Paredes, vigas, pilares e outras.
SF3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm).	Pilares-parede, paredes diafragma e pilares.

Fonte: ABNT NBR 15823 (2010).

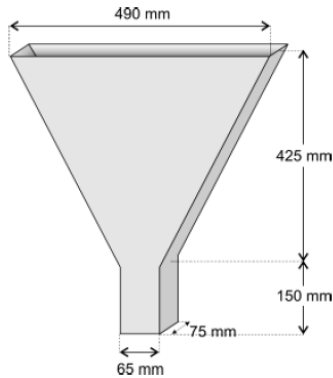
#### 4.2.2. Funil V

O ensaio mede o tempo necessário para que o concreto escoe por um funil de dimensões padronizadas, conforme apresentado na Figura 2. Este ensaio mede indiretamente a viscosidade aparente do material (quanto mais viscoso, maior o tempo de escoamento).

A Tabela 2 apresenta a classificação dos CAA quanto à viscosidade, baseada tanto nos resultados do Funil V quanto do t500, citado anteriormente.

A viscosidade aparente é governada, principalmente, pelo consumo de água e teor de finos da mistura. CAA com consumos de água inferiores a 180 l/m<sup>3</sup> tendem a ser muito viscosos. Esta característica tende a se acentuar quando o consumo de finos (cimento, adições e material pulverulento dos agregados) passa de 500 kg/m<sup>3</sup> (SCHANKOSKI, 2014).

**Figura 2: Funil - V**



**Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15823 (2010).**

**Tabela 2: Classificação dos concretos quanto à viscosidade aparente.**

Classe de viscosidade aparente	$T_{500}$ (s)	Funil-V (s)	Aplicação	Exemplo
VS1 / VF1	$\leq 2$	$\leq 8$	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação. Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.	Lajes, paredes diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente.
VS2 / VF 2	$> 2$	9 a 25	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação. Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e susceptibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas	Vigas, pilares e outras.

**Fonte: ABNT NBR 15823 (2010).**

### 4.2.3. Caixa L

O ensaio da caixa L determina a habilidade passante, que é a capacidade do concreto fresco de fluir através de aberturas estreitas, como espaços entre as barra de aço, sem apresentar segregação ou bloqueio (EFNARC, 2005).

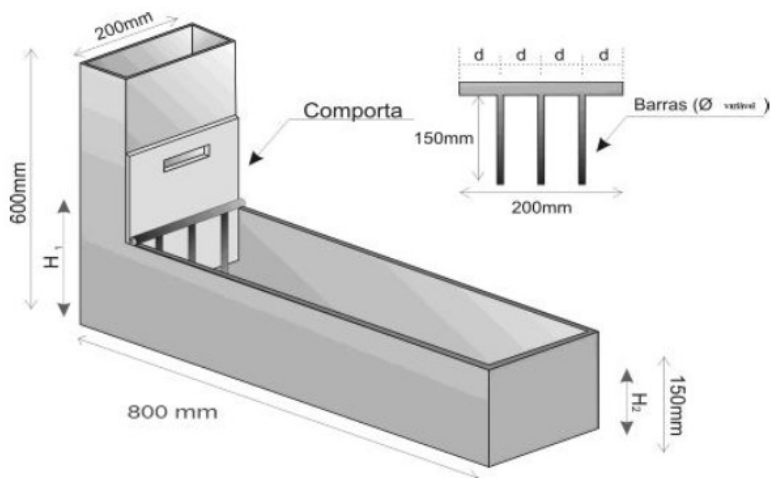
O concreto é colocado na parte vertical, com a comporta fechada. Na frente da comporta, dentro da parte horizontal, é posicionada uma grade composta por duas ou três barras. Quando se utiliza duas barras, o

espaçamento deve ser de  $(58 \pm 1)$  mm e, no caso de três barras,  $(40 \pm 1)$  mm, como mostra a figura 3.

Quando a comporta é aberta, o concreto é forçado a escoar através da grade e, ao final do ensaio, é anotada a altura da camada de concreto no início e no fim da parte horizontal da caixa L ( $H_1$ ,  $H_2$ ). A habilidade passante (HP) é calculada por  $H_2/H_1$ .

A NBR 15823 (2010) estipula que a habilidade passante ( $H_2/H_1$ ) do concreto para uma caixa com duas ou três grades de ser  $\geq 0,8$ .

**Figura 3: Caixa L.**



**Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15823 (2010).**

### 4.3. CARACTERÍSTICAS DO ESTADO ENDURECIDO

Em geral as propriedades mecânicas do CAA e do concreto convencional são bastante semelhantes, uma vez que a resistência à compressão depende, basicamente, do tipo de cimento e da relação água/cimento empregadas.

#### 4.3.1. Resistência à Compressão

A resistência à compressão é a principal propriedade do concreto e é a característica especificada e testada com frequência.



O comportamento do CAA à compressão é bastante similar aos concretos convencionais. No entanto, é comum que, para uma mesma relação água/cimento, a resistência à compressão do CAA seja ligeiramente superior à do concreto convencional vibrado.

Isso ocorre porque a falta de vibração melhora a ligação entre a pasta e os agregados, beneficiando a zona de transição (EFNARC, 2005).

O avanço da resistência mecânica também não difere significativamente dos concretos convencionais produzidos com os mesmos cimentos e superplastificantes (REPETTE, 2011).

#### **4.3.2. Módulo de Elasticidade**

O módulo de elasticidade do concreto tende a ser maior que o módulo referente à pasta de cimento e menor que o referente aos agregados (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Como o concreto convencional possui um maior volume de agregados, o módulo de elasticidade do concreto tende a se aproximar ao dos agregados. Dessa forma, no CAA, que possui um maior volume de pasta, o módulo de elasticidade tende a ser menor que o do concreto convencional.

Repette (2011) salienta que a variação do módulo de elasticidade depende do nível de resistência do concreto e da sua composição.

#### **4.4. DOSAGEM DE CAA**

Segundo Repette (2011) a dosagem do CAA é um dos temas mais estudados devido a sua complexidade. Esta dificuldade é devida a maior exigência ao atendimento de parâmetros a serem satisfeitos, principalmente no estado fresco. Podendo destacar a elevada fluidez, resistência à segregação, capacidade de se adensar pelo peso próprio e capacidade passante. Dos métodos desenvolvidos no Brasil pode-se citar Repette-Melo, Alencar e Helene, Tutikian e Dal Molin dentre outros que podem ser encontrados em Gomes e Barros (2009).

##### **4.4.1. Estratégias de dosagem do CAA**

A forma de como se dosa concreto autoadensável varia de acordo com o método utilizado. Na prática, dividem-se seguindo três estratégias (REPETTE, 2011).

A primeira seria a que analisa o preenchimento do esqueleto de agregado, na qual determina-se uma composição de agregados com o maior grau de empacotamento das partículas e conseqüentemente o menor índice de vazios. Por seqüência a pasta é adicionada ao esqueleto até o ponto em que a relação pasta/agregados atenda as propriedades no estado fresco do concreto.

O controle de segregação seria a segunda estratégia. Nesta utilizam-se conhecimentos teóricos para definição das propriedades da pasta para que não ocorra a segregação dos agregados do CAA.

Por fim a terceira considera a incorporação de agregado na pasta, na qual através de ensaios se produz uma pasta que atenda quesitos de estabilidade e capacidade de escoamento. Então a agregado miúdo é adicionado a mistura e por meio de ensaios de espalhamento e escoamento se determina o melhor teor. Para o agregado graúdo o procedimento é similar. Sendo o teor de aditivo inicialmente definido pela saturação da pasta ajustado em todas as etapas.

Repette (2011) afirma que os métodos que utilizam a estratégia de incorporação de agregados são os mais empregados atualmente na dosagem de CAA. Sendo o método Repette-Melo de destaque na utilização desta estratégia e este tem uma relevância maior em virtude de o mesmo permitir a produção de um CAA com a resistência desejada baseado na curva de resistência do cimento empregado. Em virtude destes pontos optou-se pela utilização do método Repette-Melo neste estudo.

## **5. MÉTODO DE DOSAGEM REPETTE-MELO**

### **5.1. DESCRIÇÃO GERAL**

Este método tem como base a dosagem de composições de CAA para resistências à compressão pré-determinadas, sendo que a relação água/cimento é determinada por meio de resistências conhecidas para o cimento utilizado na mistura. O método foi desenvolvido por Melo (2005) e atualizado no livro Métodos de dosagem de concreto autoadensável de Gomes e Barros (2009).

A relação filer/cimento é determinada, inicialmente, em misturas de pasta produzidas com a relação água/cimento já estipulada, de forma que não haja indícios de segregação ou exsudação nestas misturas (MELO, 2005).

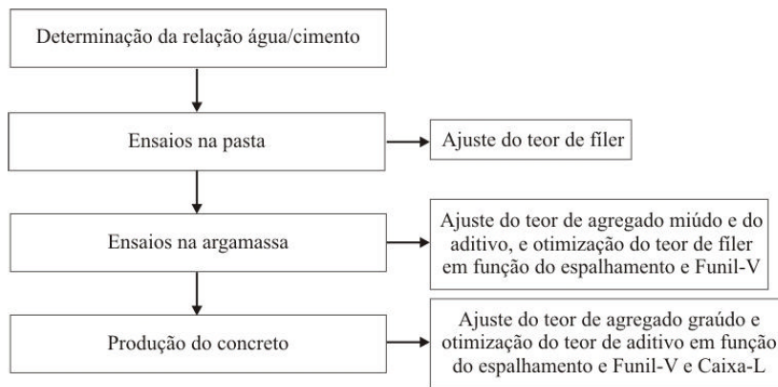
Em sequência determina-se a relação volumétrica do agregado miúdo/argamassa, através de parâmetros obtidos de ensaios de espalhamento e fluidez nas argamassas, variando-se, para isto, o teor de aditivo.

Definido o teor de agregado miúdo, se necessário o teor de filer é redosado levando-se em consideração a economia e a autocompactabilidade das misturas.

Com relação ao volume de agregado graúdo, este é determinado levando-se em consideração o volume total de concreto, de forma a se obter misturas adequadas em função dos ensaios de espalhamento, fluidez e Caixa-L, além de se verificar sua estabilidade e a distribuição dos agregados, através de análise visual.

Com estes mesmos ensaios é realizado o ajuste final do teor de aditivo no concreto. Na Figura 04 tem-se a representação esquemática do método proposto.

**Figura 4: Fluxograma do método de dosagem proposto.**



Fonte: MELO, 2005.

## 5.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM

É importante ressaltar que o método foi desenvolvido por Melo (2005) e possibilita a produção de CAA com valores de resistência à

compressão praticados usualmente, o que permite ajudar a difundir sua aplicação aproximando-o das construções correntes.

Na definição da relação água/cimento, deve-se levar em consideração as especificações da NBR6118/2014 para o valor mínimo necessário para que sejam atendidos os requisitos de durabilidade, como segue a tabela 03, proveniente da norma, em função das condições de exposição da estrutura.

Além disso, o consumo de cimento também deve ser controlado em função do teor mínimo exigido, que segundo Gomes (2002) para o CAA é de 200 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabela 3: Relação água/cimento e resistência para cada classe de agressividade.**

Concreto <sup>a</sup>	Tipo <sup>b, c</sup>	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

<sup>a</sup> O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.  
<sup>b</sup> CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.  
<sup>c</sup> CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

**Fonte: NBR6118 (2014)**

### 5.2.1. Composição da pasta

Nesta etapa são definidos os parâmetros para o estudo da composição da pasta utilizada no estudo.

#### 5.2.1.1. Relação água/cimento

A relação água/cimento é obtida, como primeiro parâmetro de dosagem, em função da resistência à compressão desejada, utilizando-se, para isto, curvas de resistência em função da água/cimento (curvas de Abrams), definidas para o tipo de cimento empregado.

Como exigência básica do método Repette-Melo, foi considerado que a incorporação de filer nos teores determinados pelo método não interfere significativamente no desenvolvimento da resistência à compressão da pasta, sendo esta função da relação água/cimento.

É preferível que a relação água/cimento seja adotada a partir de relações com a resistência estabelecidas para concretos, mesmo que convencionais produzidos com o cimento e materiais utilizados na mistura (MELO, 2005).

Na definição da família de concretos, deve-se determinar um valor de água/cimento para cada resistência especificada (deve-se adotar no mínimo três valores de resistência para a definição da família de composições).

#### 5.2.1.2. Teor de finos

O teor de finos deve ser determinado para cada relação água/cimento especificada. Desde que a pasta se apresente instável, ou seja, a mistura apresente excesso de água, então se emprega filer para corrigir esta instabilidade.

Ressalta-se que, nesta etapa, somente a porção fina de filer, ou seja, aquela que passa pela peneira de malha 0,075mm, é incorporada à pasta.

A incorporação deve ser feita até que não seja observada a ocorrência de segregação dos constituintes, obtendo-se o teor ideal de finos para promover a adequada retenção de água.

Cabe salientar que o teor de filer aqui definido poderá, posteriormente, sofrer ajuste para que o efeito do aditivo superplastificante seja corrigido na etapa de argamassa.

Preferencialmente, a fração fina do filer calcário (partículas <0,075mm) deverá ter distribuição granulométrica similar ou com uma curva de menor inclinação, o que indica melhor distribuição das dimensões, se comparada à do cimento empregado.

#### 5.2.2. Composição da argamassa

Para esta etapa da dosagem, define-se o teor de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa, faz-se um ajuste do teor de adição de filer caso necessário, e determina-se o teor base de aditivo

superplastificante que será, por meio de experimento, ratificado ou corrigido no concreto.

#### 5.2.2.1. Teor de agregado miúdo

O teor de agregado miúdo deve ser ajustado para uma única relação água/cimento (a intermediária, no caso da construção da curva da família de concreto com três resistências), sendo o valor encontrado adotado para as demais misturas (com teores extremos de água/cimento). Para se definir o teor ideal de agregado miúdo, ensaiam-se argamassas com diferentes teores de agregado miúdo e de aditivo superplastificante. Nesta fase, somente argamassas com o teor intermediário de água necessitam ser ensaiadas, uma vez que o mesmo volume de agregado pode ser empregado para as demais relações água/cimento.

O volume de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa deve ser, preferencialmente, não inferior a 35% e não superior a 55%. Valores entre 40 e 50% são mais prováveis de levarem a argamassas adequadas (MELO, 2005).

Partindo-se do valor inferior adotado, incrementos de 5% no teor de agregado miúdo são geralmente suficientes para a obtenção do teor adequado, podendo-se empregar incrementos de 2,5% ou menores quando se desejar um ajuste mais fino da mistura.

As argamassas são avaliadas pelos ensaios de espalhamento e Funil-V, incorporando-se aditivo superplastificante em intervalos de 0,05% ou menores, partindo-se do teor de 0,1% (massa de sólidos do aditivo em relação à massa de cimento). Deve-se determinar o teor de aditivo para que se obtenha diâmetro de espalhamento da argamassa entre 200 e 280 mm e tempo de escoamento no Funil-V que deve estar entre 3,5 e 10 segundos. Destaca-se que as misturas que segregarem no ensaio do Funil-V devem ser descartadas.

O volume ideal de agregado miúdo é selecionado dentre as misturas que contêm o maior teor deste material. Este parâmetro permanece fixo para as argamassas com outras relações água/cimento, e para o concreto.

É importante ressaltar que a porção da parte da grossa do filer (partículas >0,075mm), caso exista, é considerada como parte do agregado miúdo.

### 5.2.2.2. Ajuste final do teor de adição

Melo (2005) constatou que pelo uso de aditivo superplastificante, a quantidade de adição definida na pasta pode ser aumentada, para que sejam obtidas misturas mais econômicas. Desta forma, após a definição da quantidade de agregado miúdo, o teor de filer deve ser aumentado em relação ao que foi definido inicialmente na pasta, podendo ser adotado um aumento de 5%. Segundo a autora, este teor seria satisfatório.

O ajuste do teor de adição deve ser feito a partir da incorporação de aditivo, podendo-se partir do teor definido na etapa de ajuste do agregado miúdo. Este teor deve ser variado em incrementos de 0,05%, ou menores, caso se deseje maior refinamento dos resultados.

As argamassas são avaliadas novamente por meio dos ensaios de espalhamento e fluidez, porém com novas faixas de aceitação, para o diâmetro de espalhamento deve ser de 250 a 280 mm, e o tempo de escoamento no Funil-V de 5 a 10 segundos.

Desta forma, tem-se a otimização da fase de argamassa, sendo os valores encontrados adotados na produção do concreto, exceto o teor de aditivos, que poderá necessitar de novo ajuste.

### 5.2.3. Composição do concreto

Para a dosagem final dos componentes, foram definidos o teor de agregado graúdo e o de aditivo superplastificante por meio de ensaios em concreto, determinando-se as suas propriedades no estado fresco.

#### 5.2.3.1. Teor de agregado graúdo

Utilizando-se a argamassa com teor intermediário de água/cimento definida anteriormente preparam-se concretos com diferentes teores de agregado graúdo, propondo-se valores que podem ser de 27, 28,5, 30, 31,5 e 33% em relação ao volume total de concreto.

Para o teor mínimo adotado, devem ser realizados os ensaios de espalhamento, Funil-V e Caixa-L, ajustando-se o teor de aditivo para que se atinjam os requisitos exigidos. Em seguida, o teor de agregado graúdo deve ser aumentado de acordo com o intervalo definido, realizando-se novamente os ensaios especificados.

O teor de aditivo deve ser ajustado sempre que houver perda das propriedades de autocompactabilidade decorrentes da incorporação de agregado. O teor ideal de agregado graúdo é o máximo possível para que sejam atendidos os requisitos de ensaio.

A escolha deve se dar também a partir da análise da uniformidade na distribuição das partículas do agregado, devendo-se, para isto, observar a existência de um excesso de pasta no espalhamento; e da ocorrência de bloqueio, verificado pela Caixa-L e de segregação, verificada no funil.

Na Tabela 04 encontram-se os intervalos de aceitação dos ensaios empregados na análise do concreto.

**Tabela 4: Limites de aceitação do CAA de acordo com o método de ensaio.**

<b>Método de ensaio</b>	<b>Valores aceitáveis para CAA</b>
Espalhamento (d)	550 a 800 mm
Funil V (t)	< 10 s
Caixa-L (H2/H1)	$\geq 0,8$

**Fonte: Gomes e Barros (2009).**

#### 5.2.3.2. Ajuste final do aditivo

Com a definição de todos os parâmetros de dosagem, deve-se fazer o ajuste final do aditivo para que o concreto obtido seja considerado autoadensável. Para isto, deve-se variar o teor de aditivo, realizando-se os ensaios de espalhamento, Funil-V e Caixa-L, seguindo os mesmos critérios já definidos.

O teor de aditivo obtido na argamassa dá um indicativo do resultado que será obtido no concreto, sendo assim considerado o teor inicialmente testado para as misturas de concreto. O ajuste do teor foi feito com adições de 0,05%, podendo ser menores para a obtenção de um melhor ajuste da mistura.

No decorrer da produção dos concretos, deve-se atentar para a perda de fluidez, que deve ser medida pelos ensaios de fluidez. O limite de aceitação da perda de fluidez depende do tipo de aplicação do concreto, e pode variar em função das condições de produção ou



propriedades dos materiais constituintes, dependendo muito da eficiência do superplastificante.

#### **5.2.4. Avaliação das propriedades mecânicas**

Primeiramente deve-se determinar a resistência à compressão nas argamassas, para verificar se a relação água/cimento definida foi adequada para a obtenção da resistência desejada. Isto permite detectar algum erro de dosagem, podendo ser corrigido antes de se passar para a produção do concreto.

Para isto moldam-se 6 corpos-de-prova, sendo três ensaiados aos 7 dias e 3 aos 28 dias. A resistência à compressão obtida aos 7 dias já indica alguma desconformidade com resultados esperados.

Para acompanhar as propriedades mecânicas do concreto, devem ser moldados 3 corpos-de-prova para cada idade de ensaio desejada na determinação da resistência à compressão, e dois corpos-de-prova para a análise do módulo de elasticidade aos 28 dias, ou em outra idade desejada.

### **6. MODELO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL**

Segundo De Larrard (2009) a dosagem de um concreto consiste em um problema de empacotamento. Diversos métodos comprovam esta afirmativa, como são os casos dos modelos propostos por Furnas, Andreasen e Alfred, que propõem através de uma equação obter uma curva granulométrica “ideal”, onde obterá o empacotamento máximo (HENCHE e MAZER, 2010).

Porém cada autor propõe curvas diferentes, o que levanta dúvidas quanto à solidez de seus métodos. Com base em mais de uma década de estudo de sua equipe, De Larrard conseguiu construir uma teoria que soluciona a questão de empacotamento de misturas secas em todos componentes utilizados na dosagem do concreto.

Estes estudos levaram ao desenvolvimento do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) que é uma versão aprimorada dos diversos modelos de empacotamento desenvolvidos pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)*.

O MEC se sobressai dos demais modelos devido aos seguintes fatores:

- O desenvolvimento deste método baseia-se em princípios científicos fundamentando-se em uma observação dos fenômenos, levantamento de hipóteses, criação de modelos matemáticos que representam os fenômenos e na confirmação experimental da eficácia dos modelos estabelecidos;

- Este inclui em seus modelos matemáticos a utilização de novos materiais que estão sendo amplamente utilizados na confecção dos concretos nos dias atuais, tais como, microsilica, filler calcário, superplasticantes, entre outros;

- Para comprovar a veracidade dos modelos o MEC utiliza um grande conjunto de dados experimentais para diversos concretos;

- É um método capaz de ser implementado computacionalmente.

A seguir será apresentada a teoria desenvolvida por De Larrard para o cálculo da compactidade de uma mistura granular.

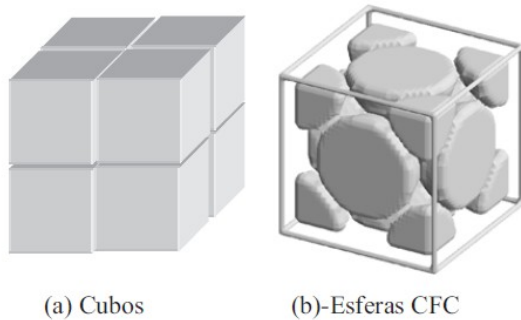
## 6.1. CÁLCULO DA COMPACIDADE

Para compreender o MEC, este se dividi em dois módulos. No primeiro foi desenvolvida uma formulação matemática que deduz as relações para o empacotamento virtual, onde se define empacotamento virtual como sendo aquele obtido quando se arranjam as partículas uma a uma correspondendo a um arranjo geométrico ideal.

Por exemplo, caso tenham-se partículas cúbicas idênticas consegue-se a compactação máxima, ou compactidade virtual de 100%, arranjando os cubos um a um, face a face, e caso tenham-se partículas esféricas correspondendo a um arranjo cúbico de face centrada (CFC) consegue-se, uma compactação, ou compactidade virtual de 74%, compactidade esta utilizada teoricamente para o cálculo da compactidade virtual dos agregados.

A seguir a figura 5 representa os arranjos citados.

**Figura 5: Arranjo de partículas cúbicas e esferas CFC.**



**Fonte Formagini (2005)**

No segundo módulo, são estabelecidas as relações (principalmente físicas e experimentais) que ligam as propriedades virtuais (geométricas) às propriedades reais da mistura granular submetida a um procedimento de empacotamento.

O que é esperado ao se colocar cubos ou mesmo esferas em um recipiente é que estes nunca atingirão a compacidade teórica devido a interação entre os mesmos.

O MEC relaciona então o empacotamento virtual ao empacotamento real caracterizado por um parâmetro condizente ao procedimento real de empacotamento adotado, que é o chamado índice de compactação ( $K$ ).

## 6.2. DESCRIÇÃO CONCEITUAL DO MEC

Uma classe granular  $i$  é um conjunto de grãos unidimensionais de diâmetro  $d_i$  (no sentido da peneira). Assim convencionou-se:

$$d_1 \geq d_2 \geq d_3 \geq d_i \geq d_{i+1} \geq \dots$$

A compacidade, ou densidade de empacotamento (real), de uma mistura é definida como o volume sólido  $C$  em um volume unitário

total. Alternativamente, a compactação pode ser descrita pela porosidade ( $\pi$ ):

$$\pi = 1 - C \quad (1)$$

Já a compactidade virtual, denominada  $\gamma$ , é a compactidade máxima que pode ser atingida arranjando, da melhor forma possível, o empacotamento grão a grão, conforme foi descrito no item anterior.

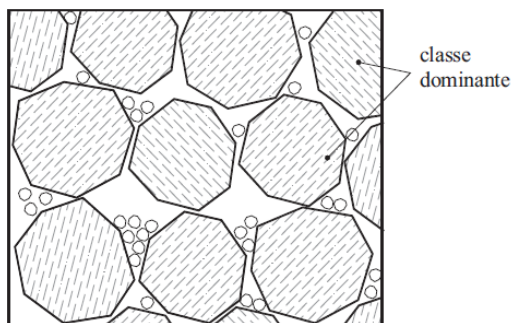
Na prática, os grãos se posicionam com certa desordem, desta forma a compactidade experimental (real)  $C$  é sempre inferior à compactidade virtual.

A compactidade virtual da classe  $i$  tomada individualmente é chamada de  $\beta_i$ , e tem o mesmo significado da compactidade virtual,  $\gamma$ , acima definida, determinada para uma classe granular de apenas um diâmetro (classe mono-tamanho).

O parâmetro  $\beta_i$  caracteriza, dentro do quadro do MEC, a propriedade que uma determinada classe de grãos tem de empacotar mais ou menos que outras classes de grãos.

Outro conceito importante para a elaboração do MEC é o de classe de grãos dominante. Diz-se que a classe granular  $i$  é dominante se esta classe determinar a continuidade sólida da matriz granular, como mostrado na Figura 6.

**Figura 6: Classe Dominante da Mistura.**



Fonte: Formagini (2005)

Desta forma, é possível conceituar que sempre haverá ao menos uma classe dominante, já que se não existisse uma classe dominante, ocorreria o caso de uma suspensão (todas as classes de grãos estariam

flutuando em um líquido) e não um empacotamento (FORMAGINI, 2005).

Formagini (2005) destaca que o empacotamento máximo de uma mistura polidispersa (constituída por grãos de diversos tamanhos) é obtido quando os grãos de diâmetros menores preenchem por completo os espaços vazios entre os grãos de diâmetros maiores.

Outros dois conceitos importantes para o cálculo do empacotamento virtual são os dois efeitos causados pela interação entre os grãos, que tendem a gerar compacidade menor da mistura.

Estes efeitos que ocorrem para classes granulares com diâmetros próximos são o efeito de parede, exercido pelos grãos maiores sobre os menores e pelas formas da estrutura sobre os grãos; e o efeito de afastamento, exercido pelas partículas mais finas sobre as mais grossas (FORMAGINI, 2005).

### 6.3. EMPACOTAMENTO VIRTUAL

As formulações apresentadas para determinação da compacidade de misturas granulares são generalizações das propostas para misturas binárias, ou seja, misturas compostas pela combinação de duas classes granulares. A seguir se encontra o método desenvolvido para a determinação de misturas binárias e por seguinte generalizados para misturas polidispersas constituídas de várias classes granulares.

#### 6.3.1. Misturas binárias

No cálculo da compacidade virtual de uma mistura binária, deve-se conhecer a compacidade virtual de cada uma das classes ( $\beta_1$  e  $\beta_2$ ). É também necessário que se conheçam as frações volumétricas dos materiais, denominadas  $y_1$  e  $y_2$ , definidas como:

$$y_i = \frac{\phi_i}{\phi_1 + \phi_2} \quad (2)$$

Sendo os volumes parciais  $\phi_1$  e  $\phi_2$  correspondentes ao volume de sólidos ocupado por cada classe em um volume unitário da mistura. Seguindo a definição acima, tem-se que:

$$y_1 + y_2 = 1 \quad (3)$$

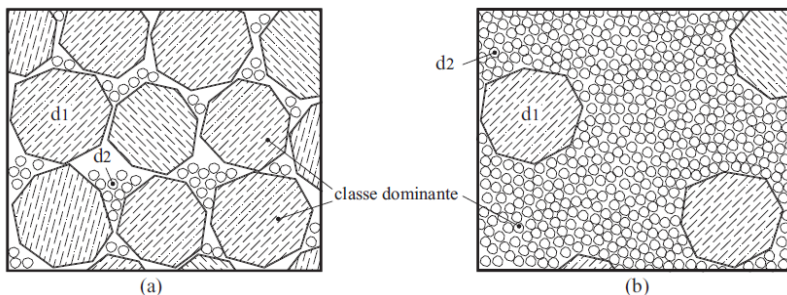
A compacidade virtual de uma mistura binária pode então ser escrita como:

$$\gamma = \phi_1 + \phi_2 \quad (4)$$

### 6.3.1.1. Misturas binárias sem interação

Para uma mistura ser considerada sem interação quando  $d_1 \gg d_2$ , onde  $d_1$  e  $d_2$  equivalem aos diâmetros das classes 1 e 2. Isto significa que, num arranjo global, a matriz de grãos da classe 1 não é perturbada pela presença dos grãos da classe 2 (FORMAGINI, 2005). A figura 7 mostra este comportamento.

**Figura 7: Mistura binária sem interação: (a) classe1 dominante e (b) classe2 dominante**



**Fonte: Formagini (2005)**

No caso (a) da figura 7 em que a classe graúda é dominante, seus grãos preenchem o volume disponível como se nenhum grão fino estivesse presente e o espaço vazio entre os grãos graúdos é preenchido pelos miúdos sem interferência. Através desta premissa e da álgebra já apresentada pode-se determinar a compacidade da mistura através da expressão 5, onde o sobrescrito 1 indica que a classe dominante é a graúda.

$$\gamma = \gamma^{(1)} = \frac{\beta_1}{1 - y_2} \quad (5)$$

Para uma mistura binária, a classe formada pelos grãos graúdos tem seu domínio estendido até o ponto em que os vazios deixados pelo seu empacotamento sejam preenchidos totalmente pelos grãos finos. A partir deste ponto, qualquer grão fino que for adicionado à mistura, irá gerar um afastamento dos grãos da classe graúda ao ser encaixado. Assim a classe dos grãos menores passa a ser dominante na mistura como mostra à figura 7 (b). Deste modo para o caso (b) a compacidade virtual da mistura pode ser calculada pela expressão 6, onde o sobrescrito 2 indica que a classe dominante é a dos grãos finos.

$$\gamma = \gamma^{(2)} = \frac{\beta_2}{1 - (1 - \beta_2)y_1} \quad (6)$$

### 6.3.1.2. Misturas binárias com interação

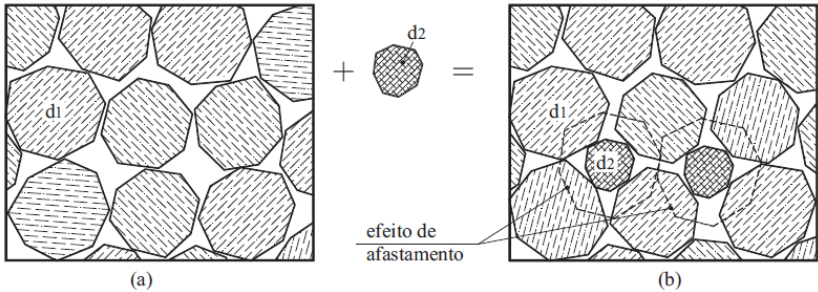
Segundo Formagini (2005), os efeitos de interação que ocorrem em misturas binárias podem ser por afastamento e de parede. Estes ocorrem quando o valor de  $d_1$  não é muito maior que o valor de  $d_2$ . O diâmetro da classe 2 ( $d_2$ ), neste caso, seria maior que o espaço dos vazios deixados pelos grãos empacotados da classe 1. O efeito da adição dos grãos da classe 2 numa mistura em que os grãos da classe 1 são dominantes é esquematizado na Figura 8. Quando um grão da classe de menor diâmetro é adicionado à mistura, ele desloca os grãos maiores para acomodar-se, causando um afrouxamento da vizinhança (Figura 8b).

Para isto dá-se o nome de efeito de afastamento dos grãos da classe 1 dada a presença dos grãos da classe 2. A expressão 7 que calcula a compacidade virtual quando a classe 1 é dominante levando em conta o efeito de afastamento é a seguinte:

$$\gamma^{(1)} = \frac{\beta_1}{1 - (1 - a_{12} \beta_1/\beta_2)y_2} \quad (7)$$

Onde,  $0 \leq a_{12} \leq 1$  é o coeficiente de afastamento produzido pelos grãos da classe 2 sobre os grãos da classe 1.

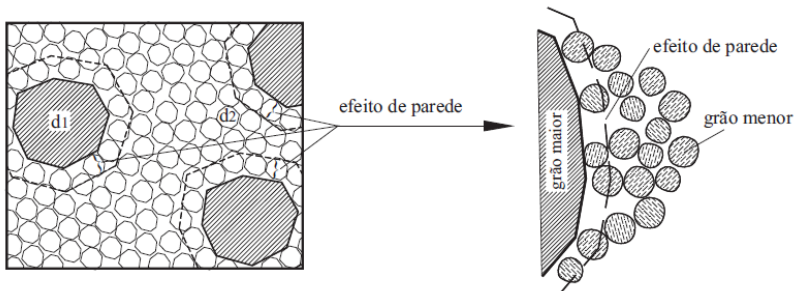
**Figura 8: Efeito de afastamento**



**Fonte: Formagini (2005)**

Já quando um grão de classe 1 é adicionado a uma mistura granular onde a classe 2 é dominante, uma quantidade de vazios ocorrerá na zona de contato das duas classes, conforme mostra a Figura 9. Este fenômeno físico é denominado efeito de parede ( $b_{21}$ ) e é exercido pela classe de grãos maiores sobre a classe de grãos menores (FORMAGINI, 2005).

**Figura 9: Efeito de parede**



**Fonte: Formagini (2005)**

A expressão que permite encontrar a compacidade virtual da mistura binária levando-se em conta o efeito de parede exercido pelos grãos da classe 1 sobre os grãos da classe 2 é:



$$\gamma^{(2)} = \frac{\beta_2}{1 - [1 - \beta_2 + b_{21}\beta_2(1 - 1/\beta_1)]y_1} \quad (8)$$

Silva (2004) propõe uma forma simplificada para a determinação dos coeficientes de interação  $a_{12}$  e  $b_{21}$ , em função dos diâmetros dos grãos, que conduz a uma razoável aproximação, é representada pelas seguintes equações:

$$a_{ij} = \sqrt{1 - (1 - d_j/d_i)^{1,02}} \quad (9)$$

$$b_{ij} = 1 - (1 - d_i/d_j)^{1,50} \quad (10)$$

### 6.3.2. Misturas Polidispersas sem interação

Considerando uma mistura polidispersa sem interação com  $d_1 \gg d_2 \gg \dots \gg d_n$ , há pelo menos uma classe  $i$  dominante. A função da compacidade virtual, quando a classe  $i$  é dominante, é dada então pela generalização das expressões (5) e (6):

$$\gamma = \gamma^i = \frac{\beta_i}{1 - (1 - \beta_i) \sum_{j=1}^{i-1} y_j - \sum_{j=i+1}^n y_j} \quad (11)$$

A compacidade virtual da mistura é obtida pela generalização da expressão (11):

$$\gamma = \text{MIN}_{1 \leq i \leq n} (\gamma^{(i)}) \quad (12)$$

### 6.3.3. Misturas Polidispersas com interação

A compacidade virtual de uma mistura polidispersa aplicada a uma mistura geral de  $n$  classes de grãos, onde a classe  $i$  é dominante, é dada pela generalização das expressões (7) e (8), sendo representada então pela expressão:

$$\gamma = \gamma^i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} [1 - \beta_i + b_{ij}\beta_i(1 - 1/\beta_j)]y_j - \sum_{j=i+1}^n [1 - a_{ij}\beta_i/\beta_j]y_j} \quad (13)$$

A compacidade virtual da mistura é obtida pela generalização da expressão (13):

$$\gamma = \text{MIN}_{1 \leq i \leq n}(\gamma^{(i)}) \quad (14)$$

Todas as formulações propostas para o cálculo da compacidade virtual, supramencionadas foram desenvolvidas por De Larrard (1999) apud Formagini (2005).

#### 6.4. EMPACOTAMENTO REAL

Como citado por Silva (2004) a formulação algébrica apresentada no empacotamento virtual aplica-se somente à compacidade virtual e não pode ser diretamente utilizado para o cálculo da compacidade real, uma vez que a compacidade virtual,  $\gamma$ , descreve apenas as características geométricas do material.

De diferente maneira, compacidade experimental  $C$  ( $C < \gamma$ ) não depende apenas da geometria dos grãos, mas também do protocolo de compactação, assim a ideia é correlacionar  $\gamma$  a  $C$  por meio de um modelo que considere as condições reais (experimentais) de compactação da mistura.

Para isso foi definido o índice de compactação ( $K$ ) que representa o protocolo (energia associada a um procedimento) de empacotamento. A tabela 5 apresenta os valores de  $K$  para os diversos protocolos de empacotamento.

**Tabela 5: Protocolos de empacotamento e valores de K.**

	Empacotamento					
	Seco				Molhado	Virtual
Tipo	Simplex colocação	Apiloamento	Vibração	Vibração + Compressão de 10 KPa	Demanda de água	
<b>K</b>	4,1	4,5	4,75	9	6.7	infinito

Fonte: Adaptado de Silva (2004).

Conhecendo-se dos valores de  $K$  para os diversos protocolos de empacotamento, a equação (15) pode ser usada para a determinação

experimental da compacidade virtual de empacotamento  $\beta$  de uma determinada classe granular ou material.

Para tal, realiza-se um ensaio para a determinação da compacidade real (C), submetendo-se a classe granular ao protocolo de empacotamento (com K conhecido).

$$\beta = \frac{1 + K}{K} C \quad (15)$$

Os ensaios para a determinação da compacidade experimental C devem seguir protocolos específicos para que exista reprodutibilidade dos valores determinados.

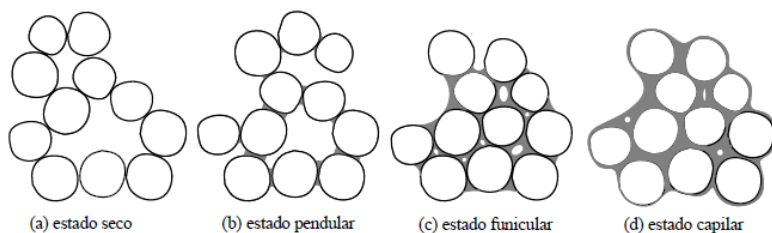
Os protocolos experimentais utilizados têm sido aqueles correspondentes ao ensaio de demanda de água (K=6,7) para misturas granulares com partículas com  $d < 100 \mu\text{m}$  e vibração + compressão (K=9) para misturas granulares com  $d > 100 \mu\text{m}$ .

#### 6.4.1. Ensaio de demanda de água

Este ensaio visa determinar a quantidade de água em massa para preencher todos os vazios da mistura granular (Silva, 2004). O propósito deste ensaio é encontrar a menor quantidade de água necessária para produzir uma pasta densa (compacta). (De Larrard, 1999 *apud* De Souza, 2011).

Até atingir este ponto a mistura granular passa por diversas fases. Como mostra a figura 10.

**Figura 10: Fases do ensaio de demanda de água**



**Fonte: Silva (2004).**

A primeira fase do empacotamento é constituída pelo material seco e, é marcado por um arranjo desordenado de partículas propiciando ao material um elevado índice de vazios. (Formagini, 2005).

Através da adição de água na mistura, que se encontra no estado seco, inicia-se o estado denominado pendular. Neste estado, a água se condensa entre os grãos formando pequenas pontes líquidas e, este fenômeno aumenta em função da adição de água.

A tensão superficial do líquido tende a unir os grãos, empacotando-os de forma aleatória, conforme a disponibilidade de água na mistura. Essa fase se mantém até o instante em que as superfícies de todos os grãos são molhadas por completo dando assim início a fase funicular (FORMAGINI, 2005).

A fase capilar tem início quando todos os vazios entre os grãos são completamente preenchidos pela água, ou seja, quando é encontrado o ponto de saturação da mistura. A partir deste ponto, um pequeno incremento na quantidade de água levará a um pequeno afastamento entre os grãos, diminuindo assim a compacidade e tornando a mistura fluida.

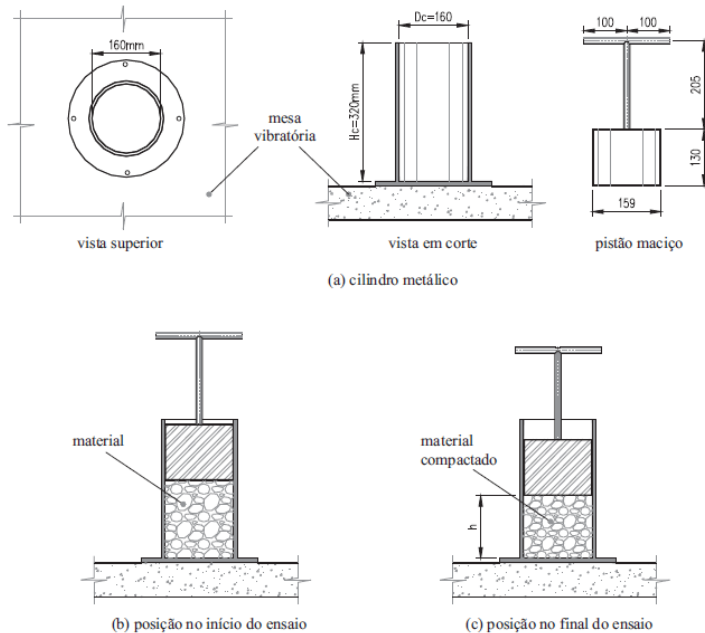
Logo conclui-se que o ponto caracterizado como demanda de água do material encontra-se no início do estado capilar (FORMAGINI, 2005).

O procedimento para determinação da compacidade de materiais através do ensaio de demanda de água é apresentado no tópico 7.2..

#### **6.4.2. Ensaio de compressão + vibração**

O ensaio de compressão + vibração consiste em adicionar uma quantidade padrão de material dentro de um cilindro e aplicar sobre este uma pressão constante, utilizando um pistão aliado ao efeito de vibração com frequência e tempo pré-estabelecidos. Como dado retirado do ensaio tem-se o deslocamento do pistão (Formagini, 2005 e Silva, 2004). A figura 11 ilustra o ensaio.

**Figura 11: Especificações ensaio de compressão+vibração.**



**Fonte: Silva (2004).**

Como forma de medição do deslocamento do pistão, Silva (2004) determinava através de um catetômetro.

O procedimento para determinação de compactidade através do ensaio de compressão+vibração se encontra no tópico 7.2..

## 7. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção do trabalho será apresentada a metodologia de pesquisa e os materiais adotados para execução dos experimentos propostos.

Aqui apresentados em duas partes, onde a primeira trata de todos os procedimentos necessários para a produção do concreto autoadensável pelo método REPETTE-MELO. E na segunda dos procedimentos referentes ao método de empacotamento compressível (MEC).

## 7.1. OBTENÇÃO DE CAA PELO MÉTODO REPETTE-MELO

Primeiramente, para o desenvolvimento do CAA foram determinados os materiais a serem utilizados e o que se pretendia obter com o CAA. Como o principal objetivo da pesquisa é avaliar o concreto autoadensável através do MEC, foi escolhido apenas uma relação A/C sendo a mesma de 0,5, em vez de obter uma curva de resistência em relação a A/C, executando-se assim três relações água/cimento como proposto por Melo (2005).

Já em relação aos materiais utilizados procurou-se utilizar materiais semelhantes aos propostos por Melo (2005), com isso serão utilizados o cimento CPV, filer calcário, uma composição de areia fina e areia média natural, brita com dimensões inferiores a 9,5mm e aditivo superplastificante. Pois, tem-se por objetivo avaliar o método Repette-Melo através da perspectiva do MEC e não modificá-lo, assim se tentou reproduzir ao máximo os materiais utilizados por Melo (2005).

### 7.1.1. Caracterização dos materiais

Para o melhor conhecimento dos materiais a serem utilizados na produção do CAA e assim conseguir realizar uma melhor dosagem, foram caracterizados os materiais a serem utilizados.

Com essa finalidade, foram executados os ensaios de granulometria segundo a norma NBR NM 248 (2003) e massa específica determinada através do método do picnômetro preconizado pela norma NBR NM 52 (2009).

Em relação ao cimento CPV-ARI este foi caracterizado pelo fabricante e possui uma massa específica de 3,1 Kg/dm<sup>3</sup> e as demais caracterizações se encontram no Anexo A.

O aditivo superplastificante utilizado foi o ADVA-525 da GRACE aditivos com 64% de materiais voláteis (ou 36% de sólidos) o relatório do fabricante se encontra no Anexo B.

As caracterizações dos demais materiais se encontram na seção 8 de resultados. A figura 12 mostra os materiais utilizados na produção do CAA.

**Figura 12: Materiais utilizados no CAA.**



### **7.1.2. Estudos em pasta**

Os estudos em pasta consistem em determinação da quantidade de filer calcário que será utilizado e da porcentagem de aditivo superplastificante.

#### **7.1.2.1. Teor de filer**

O procedimento para a definição do teor de filer consiste realizar a incorporação deste material à pasta de cimento por meio de incrementos de 5%, até que se observe que a pasta se apresenta estável sendo que o teor de filer é referente à fração  $< 0,075$  mm (MELO, 2005).

#### **7.1.2.2. Teor de superplastificante**

Para determinação do teor de superplastificante se utilizará do conceito de ponto de saturação que consiste no teor máximo de aditivo que poderá produzir aumento de fluidez sem prejudicar a mistura.

Para encontrar este teor, será adotado o método do Cone de Marsh e também se medirá o espalhamento com o mini-slump que consiste em um tronco de cone.

O ensaio de Cone de Marsh é executado preenchendo-se o cone com 800 ml da pasta, em seguida é medido o tempo para o escoamento de 200 ml (Roncero, 2000 *apud* Melo, 2005).

Para determinar o tempo, se utilizará um cronômetro digital e para medição do volume de pasta um recipiente graduado. Serão feitas adições de 0,05% de aditivo, em relação à massa de cimento, considerando-se apenas o teor de sólidos.

Em relação ao procedimento de mistura da pasta, este deverá seguir o mesmo realizado por Melo (2005), o qual é apresentado abaixo:

- Cimento e 80% da água, em velocidade lenta – 30 seg;
- Adição do filer, em velocidade lenta – 30 seg;
- Mistura em velocidade rápida – 1 min;
- Limpeza da pá e descanso da pasta – 3 min;
- Incorporação do aditivo e restante da água, após 5 minutos do início da mistura;
- Mistura final, em velocidade rápida – 1 min.

### **7.1.3. Estudos em argamassa**

Em relação aos estudos em argamassa estes consistiram na determinação da composição entre as areias e a porcentagem de agregado miúdo a ser utilizada na argamassa.

#### **7.1.3.1. Composições das areias**

Para determinar a composição de areia que apresenta o melhor desempenho nas argamassas, foi proposto analisar três composições, sendo elas: 50-50, 40-60 e 30-70 considerando respectivamente areia fina e areia média.

Estas proporções foram escolhidas baseadas nos experimentos realizados por Melo (2005) e em outros trabalhos, onde se utilizou materiais com características semelhantes.

A avaliação consiste em produzir argamassas com as composições escolhidas e avaliar o espalhamento (slump) apresentado pelas mesmas, mantendo a quantidade de água e de aditivo utilizado sempre constante.

Para ter um parâmetro de análise que seja equivalente a todas, se empregará a razão entre o espalhamento encontrado e o módulo de finura da composição (slump/MF), que segundo a NBR NM 248 (2003) é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa nas peneiras da série normal dividido por 100.

E para posteriores análises da influência das composições de areia na resistência à compressão das argamassas, foram moldados 6 corpos de prova de 5x10cm, sendo 3 para rompimento aos 7 dias e 3 para rompimento aos 28 dias.



### 7.1.3.2. Teor de agregado miúdo na argamassa

Para a determinação do teor ideal de agregado miúdo, produzem-se argamassas com diferentes teores de agregado miúdo, utilizando a composição que apresentou melhor desempenho, de acordo com os critérios anteriormente comentados.

De acordo com o método seguido, o teor de agregado miúdo deve variar de 35 a 55%. Desta maneira, foi escolhido analisar os ensaios para os teores limitantes e um teor intermediário, assim conseguindo obter uma curva de desempenho da mistura.

As argamassas serão avaliadas por meio de ensaios de espalhamento e Funil-V específicos para argamassa, sendo o aditivo incorporado em intervalos de 0,1% em relação ao teor de sólidos partindo-se da porcentagem encontrada deste nos ensaios em pasta.

As argamassas adequadas para uso em concreto autoadensável devem obter diâmetro de espalhamento entre 200 e 280 mm e o tempo de escoamento no Funil-V deve estar entre 3,5 e 10 segundos. O volume ideal de agregado miúdo é obtido dentre as misturas que contêm o maior teor deste material (MELO, 2005).

O procedimento para produção das argamassas a ser utilizado foi o mesmo sugerido pelo método utilizado:

- Cimento, filer e 80% da água, em velocidade lenta – 30 seg;
- Adição do agregado miúdo, em velocidade lenta – 30 seg;
- Mistura em velocidade rápida – 1 min;
- Limpeza da pá e descanso da argamassa – 3 min;
- Incorporação do aditivo e restante da água, após 5 minutos do início da mistura;
- Mistura final, em velocidade rápida – 1 min.

Com o intuito de analisar a influência das diferentes porcentagens de agregado miúdo serão moldados 6 corpos de prova de argamassa de 5x10cm, para rompimento à compressão sendo 3 aos 7 dias e 3 aos 28.

#### **7.1.4. Estudos em concreto**

No caso do concreto as análises efetuadas consistem em determinar a porcentagem de agregado graúdo a ser utilizada no concreto.

##### **7.1.4.1. Teor de agregado graúdo no concreto**

Para obtenção do teor ideal de agregado graúdo primeiramente foi produzido um traço piloto com o intuito de determinar o teor de aditivo necessário para que o concreto se enquadre nos limites que o classifiquem como CAA.

Tendo em mãos este resultado foram produzidos três concretos variando-se o teor de agregado graúdo, sendo os teores analisados de 27, 30 e 33%. Valores estes propostos por Melo (2005).

Para avaliação das propriedades do concreto autoadensável serão feitos os testes de espalhamento, sendo executado também o t500, funil V e caixa L, além da medição da massa específica dos mesmos. Com relação aos aspectos de exsudação e segregação serão feitas análises visuais do CAA no estado fresco e endurecido.

Para avaliação das propriedades do concreto no estado endurecido serão feitos ensaios de resistência à compressão como preconizado pela NBR 5739 (2007) e módulo de elasticidade. Para isso, foram moldados 8 corpos de prova sendo 6 para resistência à compressão, sendo 3 para os 7 dias e 3 para os 28 dias, e 2 corpos de prova para módulo aos 28 dias.

Em relação aos ensaios de módulo de elasticidade estes foram executados conforme a norma NBR8522 (2008) que especifica o procedimento de execução e o de cálculo do módulo de elasticidade. As leituras foram feitas através de extensômetros e armazenadas por um aquisitor de dados, a figura 13 ilustra o procedimento.

**Figura 13: Ferramental para o ensaio de módulo de elasticidade.**



O procedimento de mistura adotado foi o mesmo sugerido pelo método seguido:

- Agregado graúdo e 80% da água – 1 min;
- Cimento, filer e 15% da água, misturados por 1 min e 30 seg;
- Agregado miúdo, mistura durante 1min e 30 seg;
- Remoção do material aderido às pás e paredes da betoneira, que permanecia desligada – 3 min;
- Mistura – 2 min;
- Incorporação do aditivo e restante da água, mistura de 3min;
- Caso necessário realizar nova incorporação de aditivo, mistura de 4min;

## 7.2. ENSAIOS DO MEC

Aqui serão apresentados os ensaios necessários para obtenção dos parâmetros que se utilizaram para o cálculo do empacotamento da mistura do CAA. Estes parâmetros consistem no empacotamento real dos aglomerantes e agregados.

Os ensaios consistem em duas etapas, primeiramente o estudo da demanda de água para partículas com dimensões inferiores a 100  $\mu\text{m}$ ,

neste caso, o cimento e o filer, e o ensaio de vibração mais compactação para materiais com partículas com dimensões superiores a 100  $\mu\text{m}$ , neste estudo constituído pelas areias e brita. Estes procedimentos de ensaios foram propostos por De Larrard (1999).

### **7.2.1. Procedimento do Ensaio de demanda de água**

Os equipamentos necessários para a realização do ensaio de demanda de água são: misturador de bancada (argamassadeira), balança com precisão 0,01g, pisseta com capacidade para 500 ml de água e duas espátulas. Serão realizados no mínimo dois ensaios sendo que a diferença dos valores obtidos não seja superior a 2 %.

O procedimento utilizado para a realização do ensaio foi o proposto por De Souza (2011):

- Pesar uma amostra com 350g de material seco;
- Caso haja mais de um material, realizar a homogeneização prévia destes;
- Colocar o material seco na argamassadeira e adicionar água em pequenas quantidades;
- Se o ensaio for realizado com aditivo superplastificante, adicioná-lo logo ao material no início do ensaio;
- Proceder com a mistura em velocidade baixa por 1 minuto;
- Em seguida, misturar em velocidade alta e adicionar pequenas quantidades de água (formação dos estados pendular e funicular);
- Terminar o ensaio quando a pasta homogênea e compacta se formar no fundo da argamassadeira (início do estado capilar);
- Anotar a massa de água utilizada;
- Um tempo razoável para a realização desse ensaio é de 10 minutos.

A figura 14 mostra os equipamentos utilizados para a execução do ensaio.

**Figura 14: Equipamentos para o ensaio de demanda de água.**



Terminado o ensaio, tomando posse das massas de cimento ou filler e a de água necessária, para atingir o estado de demanda de água, pode-se calcular a compacidade do material, através da expressão genérica 16, De Larrard (1999) apud Silva (2005).

$$C = \frac{1}{1 + me_1 * \frac{M_{H2O}}{M_1}} \quad (16)$$

Onde:

$me_1$  = massa específica do material estudado ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$M_1$  = a massa do material analisado (g); e

$M_{H_2O}$  = a massa de água (g).

### **7.2.2. Procedimento do Ensaio de Compressão + vibração**

O procedimento utilizado para este ensaio foi o mesmo proposto por Silva (2004), porém foram necessárias algumas modificações, no ensaio o cilindro utilizado possui diâmetro de 150 mm e altura 300 mm

diferente do proposto por Silva (2004) que possuía diâmetro de 160 mm e altura 320 mm. Em função disto o peso do pistão foi reduzido para que se mantenha a pressão de 10 KPa exigida. Outra alteração foi a forma de medição do deslocamento do pistão, que Silva (2004) determinava através de um catetômetro e neste trabalho se utilizará a forma de medição proposta por De Souza (2011) que utiliza o paquímetro. Os equipamentos necessários para a realização do ensaio são: balança com precisão de 5 g, cilindro, pistão e mesa vibratória. Serão realizados no mínimo dois ensaios sendo que a diferença dos valores obtidos não seja superior a 2 %.

Desta forma, o procedimento seguido foi:

- Pesar o material (sendo para o agregado graúdo natural 6,5kg, e para o miúdo, 3,0kg, ambos na condição seca);
- Posicionamento do cilindro sobre a mesa vibratória;
- Adição do material seco no interior do cilindro;
- Introdução de um pistão maciço, cujo peso é de aproximadamente 180N, com finalidade de provocar uma pressão constante de 10KPa sobre o material;
- Realização da leitura da posição inicial do pistão com a utilização do paquímetro;
- Ligar a mesa vibratória por um período de três minutos.
- Após a vibração, realiza-se a leitura da nova posição do pistão, correspondente a camada final do material compactado;
- Retira-se o material do interior do cilindro para a realização de um novo ensaio.

De mãos do resultado do deslocamento do pistão, utiliza-se este dado na equação proposta por De Larrard (1999) apud Silva (2005) e determina-se o índice de empacotamento do agregado.

$$C = \frac{4 * M_s}{\pi * h * \rho_s * D_c^2} \quad (17)$$

Onde:

$M_s$  = massa do material seco (g);

$D_c$  = diâmetro interno do cilindro (dm);

$h$  = altura final da camada do material compactado (dm);

$\rho_s$  = massa específica do material ( $\text{g}/\text{dm}^3$ ); e

$C$  = compacidade experimental de empacotamento.

A figura 15 mostra o cilindro, o pistão e a mesa vibratória utilizados para o ensaio de compressão+vibração.

**Figura 15: Equipamentos para ensaio de compressão+ vibração**



## **8. RESULTADOS E ANÁLISES**

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios realizados para dosagem de um concreto autoadensável pelo método REPETTE-MELO e os resultados para a caracterização dos componentes do concreto pelo método de empacotamento compressível (MEC).

### **8.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO**

#### **8.1.1. Filer Calcário**

Com relação ao filer calcário determinou-se a porcentagem de material passante na peneira 0,075 mm, onde se obteve a porcentagem de 85,3% de material passante e o restante foi passante na 0,150 mm. Com relação à massa específica o filer possui o valor de  $2,80 \text{ Kg}/\text{dm}^3$ ,

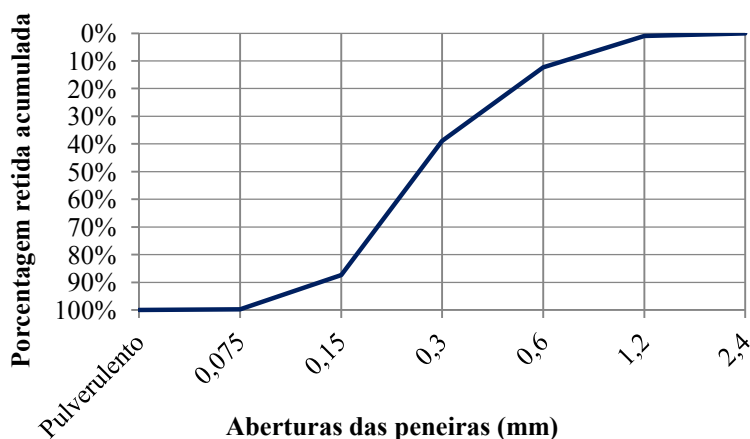
para determinação desta utilizou-se o método do picnômetro adaptado (SCHANKOSKI, 2012).

### 8.1.2. Areia Fina

Abaixo são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização feitos para areia fina. Sendo estes granulometria e massa específica. Para o ensaio de granulometria massa total de areia utilizada foi de 600 gramas.

Por meio do ensaio de granulometria também se determinou o módulo de finura que para a areia fina foi de 1,39. A seguir é apresentada a figura 16 que representa o gráfico da distribuição granulométrica.

**Figura 16: Distribuição granulométrica areia fina**



Com relação à massa específica a areia fina possui  $2,65 \text{ Kg/dm}^3$ .

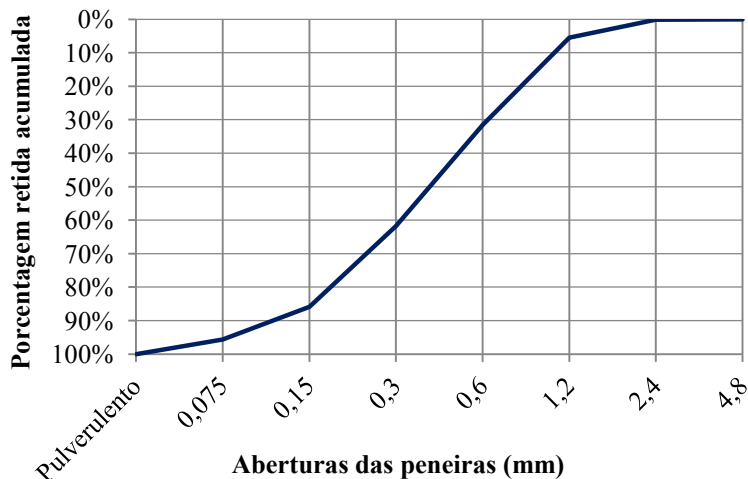
### 8.1.3. Areia Média

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização feitos para areia média. Sendo estes granulometria e massa específica. No ensaio de granulometria a massa total de areia utilizada foi de 600 gramas.



Por meio do ensaio de granulometria também se determinou o módulo de finura que para a areia média foi de 1,85. A seguir é apresentada a figura 17 que representa a distribuição granulométrica.

**Figura 17: Distribuição granulométrica de areia média.**



A massa específica a areia média é de 2,57 Kg/dm<sup>3</sup>.

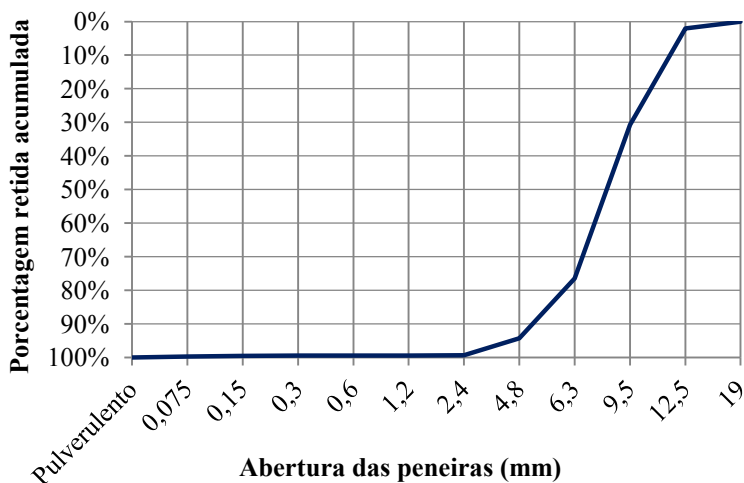
#### **8.1.4. Agregado graúdo**

Os ensaios de caracterização executados no agregado graúdo foram granulometria e massa específica. No ensaio de granulometria a massa total de areia utilizada foi de 700,4 gramas.

Com a granulometria também se determinou o módulo de finura que para o agregado graúdo que foi de 6,22. A seguir é apresentada a figura 18 que representa a distribuição granulométrica do agregado graúdo.

A massa específica determinada para o agregado graúdo foi de 2,64 Kg/dm<sup>3</sup>.

**Figura 18: Distribuição granulométrica do agregado graúdo.**



## 8.2. ENSAIOS EM PASTA

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios executados na etapa de pasta do método Repette-Mello. Ensaios este que são a determinação do teor de filer calcário e o teor de superplastificante através do cone de Marsh.

### 8.2.1. Teor de Filer Calcário

Para de terminação do teor de filer, foram feitos incrementos de 5% à pasta de cimento com a relação água/cimento de 0,5, sendo esta porcentagem referente à massa de cimento. Assim obteve-se uma pasta estável com o percentual de 25%.

A pasta obtida com este percentual pode ser observada na figura 19.

**Figura 19: Pasta com 25% de filler.**



### **8.2.2. Teor de superplastificante**

Com relação aos teores de superplastificante testados foram acrescentados em 0,05%, iniciando em 0,1%. Os resultados dos ensaios realizados são apresentados a seguir na tabela 6.

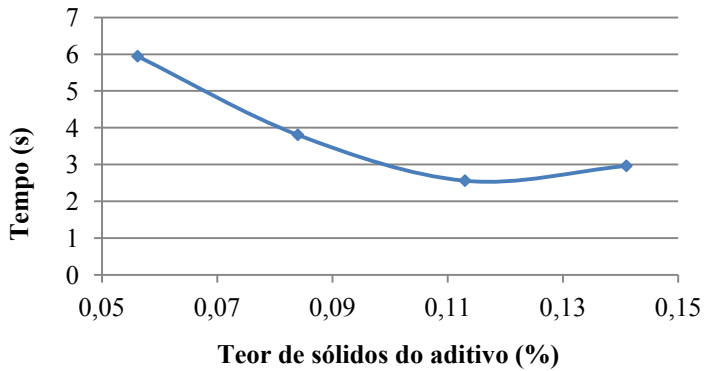
**Tabela 6: Resultados dos ensaios para definição teor de superplastificante.**

Teores de Aditivo (%)	Tempo do cone de Marsh (s)	Espalhamento MiniSlump (mm)
0,06	5,945	96-96
0,08	3,807	132-135
0,11	2,560	152-150
0,14	2,962	193-196

Obs: Porcentagem dos sólidos do aditivo em relação à massa de cimento

Para uma melhor visualização do ponto de saturação utilizou-se da figura 20 que representa o gráfico dos tempos de cone de Marsh pelos teores de aditivo utilizados.

**Figura 20: Determinação ponto de saturação.**



Como pode ser visualizado o ponto de saturação encontrado foi de 0,11%. Para este teor, foi encontrado maior espalhamento e, ao aumentar a quantidade de aditivo, a mistura apresentou exsudação. A figura 21 mostra o equipamento utilizado para o ensaio de cone de Marsh e o minislump.

**Figura 21: Cone de Marsh (esquerda) e Minislump (direita).**



### 8.3. ENSAIOS EM ARGAMASSA

Com relação à etapa de argamassa determinou-se a melhor composição de areias e o teor ideal de agregado miúdo.

#### 8.3.1. Composições de areias

Para determinação da melhor composição de areias produziu-se três argamassas cada uma com sua respectiva composição. Sendo que estas argamassas possuíam a mesma porcentagem de agregado miúdo, neste caso optou-se por 45% do volume de argamassa e o mesmo teor de aditivo que foi o determinado no ensaio de ponto de saturação, 0,11%.

Conforme comentado no método utilizado, foram testadas três proporções entre as areias (fina e média), e avaliado a trabalhabilidade com o auxílio do ensaio de slump. Os resultados desta avaliação podem ser observados na tabela 7.

**Tabela 7: Resultados da composição das areias.**

Composições de areias (fina-média)	Slump (mm)	MF	Slump/MF
50-50	190	1,62	117
40-60	188	1,66	113
30-70	195	1,71	114

Analisando os resultados optou-se pela composição 30-70, pois esta apresentou o segundo melhor resultado do parâmetro slump/MF e a composição 50-50 apresentou uma argamassa menos homogênea e mais áspera.

Também como proposto se analisou a resistência à compressão das argamassas, para posterior avaliação da influência das composições nas resistências das mesmas. A tabela 8 mostra os resultados.

**Tabela 8: Resultados da resistência à compressão argamassas.**

Resistência à compressão (MPa)									
	50-50			40-60			30-70		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
7 dias	40,4	40,1	*	39,4	37,7	*	38,4	36,1	*
28 dias	52,0	49,7	54,6	50,7	49,2	49,0	47,2	45,5	43,9

Com relação à resistência analisando-se os valores potenciais a composição escolhida apresentou os resultados mais baixos em relação às demais.

### **8.3.2. Teor de agregado miúdo**

Para a determinação do teor de agregado miúdo na composição da argamassa, foi utilizado a proporção de areia determinada no procedimento anterior, denominada como ótima. Conforme comentado anteriormente, os teores testados foram 35%, 45% e 55%.

O objetivo nesta etapa foi avaliar o comportamento das argamassas e avaliar a demanda de aditivo necessária para a obtenção dos parâmetros necessário para obter uma argamassa autoadensável.

A figura 22 mostra respectivamente os ensaios de funil V e espalhamento.

**Figura 22: Ensaio de Funil V (esquerda) e espalhamento (direita) para argamassa.**



Os resultados das argamassas no estado fresco são apresentados na tabela 9.

**Tabela 9: Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas.**

<b>Teor de agregado miúdo</b>	<b>35%</b>	<b>45%</b>	<b>55%</b>
Superplastificante (%)	0,22	0,34	0,56
Espalhamento (mm)	256	211	*
Funil V (s)	6	15	*

Analisando os valores encontrados nota-se que para o teor de 35 % estes se encaixam na faixa de aceitação estipulada por Melo (2005). No caso de 45% o tempo de funil foi superior a 10, que é o limite superior da faixa, porém o valor do ensaio de espalhamento está próximo ao limite inferior estipulado para este ensaio. Com relação ao teor de 55% este mesmo aumentando-se o teor de aditivo ainda se mantinha com uma tensão de escoamento muito alta não apresentando o espalhamento desejado e por este motivo também não foi executado o ensaio de funil.

Comparando-se os resultados obtidos e sabendo que com o aumento do teor de aditivo na argamassa com 45% de agregado miúdo poder-se-ia obter um aumento da fluidez da mesma assim fazendo com que o tempo de funil diminuísse e ficasse mais próximo da faixa de aceitação, adotou-se este teor para a execução dos concretos. Também tendo como premissa de que com isto se diminuiria o consumo de cimento reduzindo-se custo e ajudando a combater a retração gerada nos concretos em geral decorrente principalmente de secagem e de o volume total dos produtos hidratados ser inferior à soma dos volumes do cimento anidro e da água (retração autógena), este combate da retração é devido as restrições que os agregados criam na matriz do concreto, (HELENE e ANDRADE, 2010).

Como proposto também foi determinada a resistência à compressão destas argamassas para analisar o efeito da variação do teor de agregado miúdo nas mesmas. A tabela 10 mostra os resultados encontrados.

**Tabela 10: Resistência à compressão das argamassas.**

<b>Resistência à compressão (MPa)</b>									
	<b>35%</b>			<b>45%</b>			<b>55%</b>		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
<b>7 dias</b>	43,9	43,2	43,3	42,9	45,9	45,9	41,7	44,1	44,7
<b>Média</b>	43,4			44,9			43,5		
<b>28 dias</b>	48,7	48,1	53,1	48,7	51,6	52,5	47,4	48,2	43,7
<b>Média</b>	50,0			50,9			46,4		

Analisando-se os resultados de resistência a compressão percebe-se que o teor que apresentou os melhores resultados foi o teor escolhido de 45%.

#### 8.4. ENSAIOS EM CONCRETO

Nesta seção são apresentados os resultados encontrados para os ensaios realizados nos CAA tanto no estado fresco como endurecido. Para os concretos produzidos o teor de superplastificante foi de 0,39% considerando-se a parte sólida do aditivo.

##### 8.4.1. Ensaios no estado fresco

Os resultados encontrados para os ensaios no estado fresco dos CAA estudados encontram-se na tabela 11.

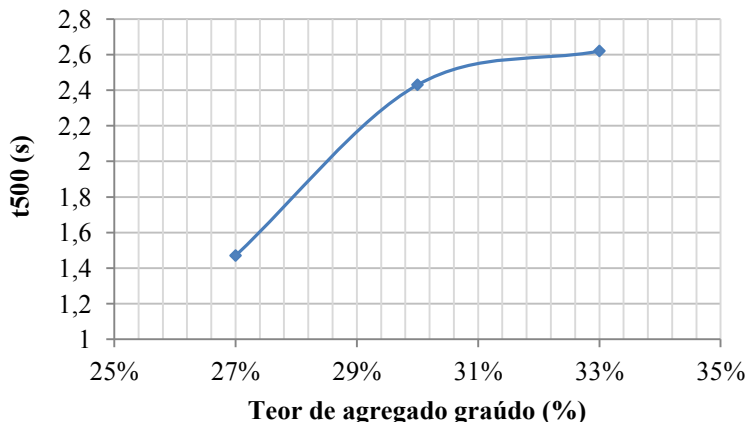
**Tabela 11: Ensaios no estado fresco do concreto.**

<b>Ensaio no estado fresco do concreto</b>			
<b>Agregado graúdo</b>	27%	30%	33%
<b>t500 (s)</b>	1,47	2,43	2,62
<b>Espalhamento (mm)</b>	747,5	696	705
<b>Funil V (s)</b>	6,09	8,68	8,79
<b>Caixa L (H2/H1)</b>	0,98	0,88	0,87
<b>Massa específica (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	2,28	2,31	2,32



Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos gerou-se os gráficos a seguir. Na figura 23, encontra-se a relação entre o parâmetro t500 e o teor de agregado graúdo. Onde se pode notar que o tempo de espalhamento cresce com o aumento do teor de agregado graúdo.

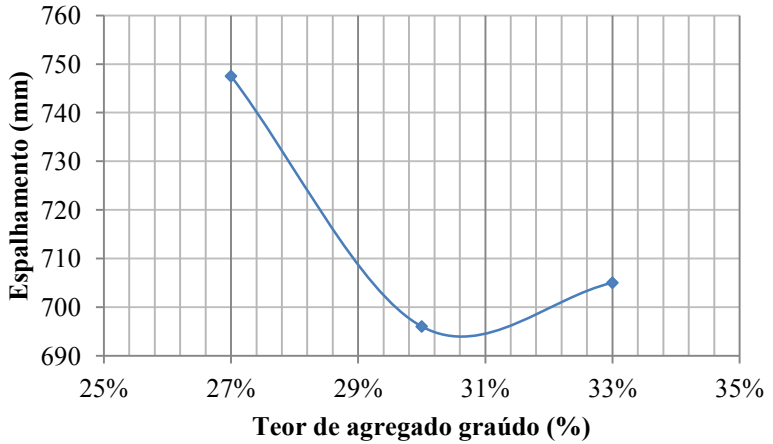
**Figura 23: Ensaio T500 dos concretos**



A figura 24 representa a relação entre o espalhamento e o teor de agregado graúdo. Para este parâmetro constata-se que o espalhamento diminui com o aumento do teor de agregado graúdo.

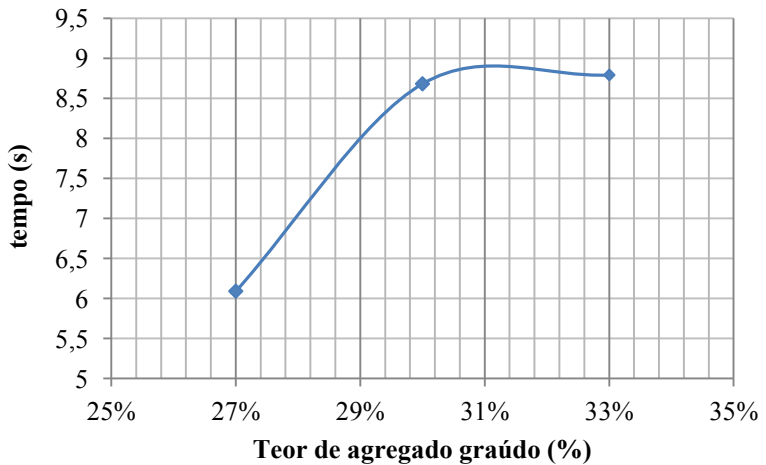
Porém percebe-se que no teor de 33% houve um aumento no valor do espalhamento onde era esperado um valor inferior ao teor de 30%. Como os valores encontrados foram muito próximos, este efeito deve ser influência do procedimento de ensaio.

**Figura 24: Ensaio de espalhamento dos concretos.**



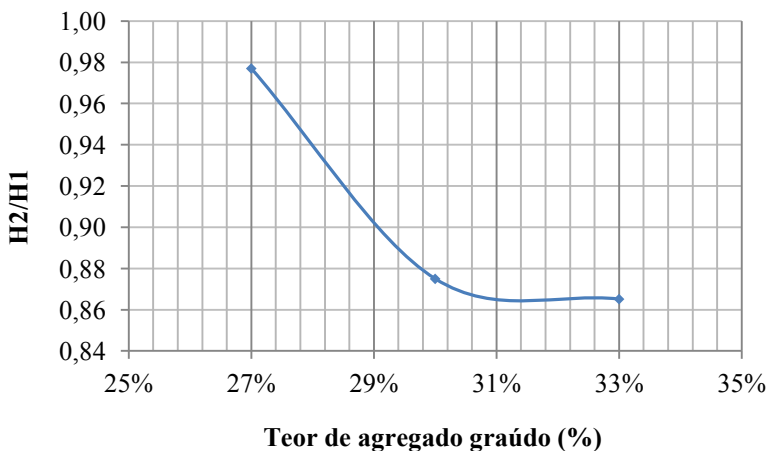
No caso da figura 25 esta relaciona o parâmetro funil V com o teor de agregado graúdo. Analisando-se este gráfico percebe-se o aumento do tempo de funil com o aumento do teor de agregado.

**Figura 25: Ensaio Funil V dos concretos**



Para a caixa L, apresentada na figura 26, esta é relacionada também com o teor de agregado graúdo. Observando este gráfico percebe-se a queda do valor do parâmetro H2/H1 com o aumento do teor de agregado. Sendo isto explicado por um maior bloqueio dos grãos o que dificulta o escoamento do CAA.

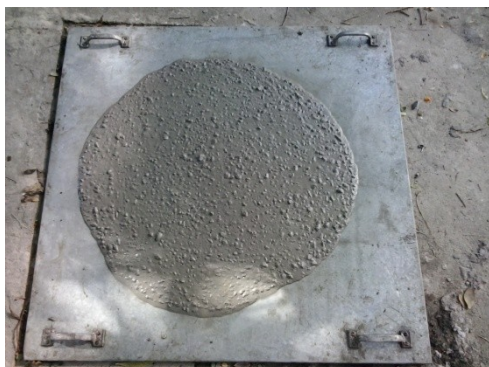
**Figura 26: Ensaio caixa L do concretos.**



#### **8.4.2. Análises visuais no estado fresco**

Como proposto realizou-se análises visuais do concreto. A figura 27 ilustra o resultado do ensaio de espalhamento do concreto, onde é possível notar que o concreto se espalhou de forma uniforme, sem presença de segregação e exsudação após a realização do ensaio.

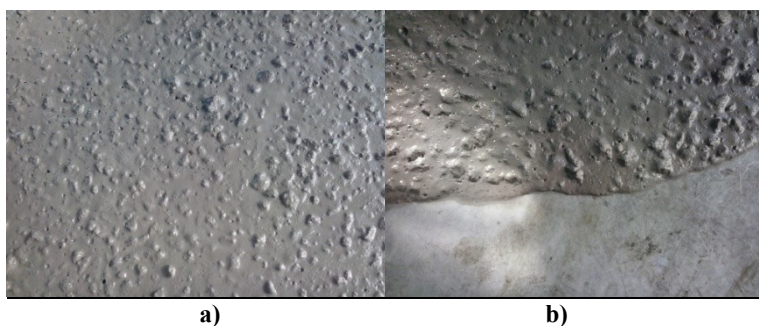
**Figura 27: Resultado do ensaio de espalhamento do CAA.**



A figura 28 mostra a região central do concreto após o ensaio de espalhamento sendo visível que não ocorreu acúmulo de agregados nesta região evidenciando assim a boa coesão do CAA.

A mesma figura mostra a região da borda, onde perceber-se que não há presença de segregação, sendo visto que não se encontra água de exsudação característica nesta região. Estes comportamentos se refletiram nos três concretos produzidos.

**Figura 28: Resultado do ensaio de espalhamento. a) região central, b) borda**



### 8.4.3. Análises visuais no estado endurecido

Já no estado endurecido as figuras 29, 30 e 31 apresentam os corpos de prova moldados para os ensaios de resistência à compressão.

Pode-se perceber que os mesmos apresentam pequenas bolhas decorrentes da incorporação de ar durante o processo de mistura. Este ar incorporado foi identificado tanto na superfície como no interior das amostras e, sua presença é prejudicial à resistência do concreto.

Com relação à exsudação e segregação pode-se notar nas figuras que estas não ocorreram, pois temos uma massa homogênea e com os agregados graúdos bem distribuídos.

**Figura 29: CP de CAA 27% antes e após ruptura.**



**Figura 30: CP de CAA 30% antes e após ruptura.**



**Figura 31: CP de CAA 33% antes e após ruptura.**



Analisando-se todos os resultados dos ensaios no estado fresco do concreto e das análises visuais, constata-se que os três concretos dosados com diferentes teores de agregado graúdo são classificados como concretos autoadensáveis perante o método Repette-Melo e a NBR 15823 (2010).

Logo se opta pelo teor 33% de agregado graúdo para definição do traço final em virtude do mesmo ter apresentado um bom desempenho em relação aos parâmetros exigidos para um CAA além de que na análise visual o mesmo se manteve coeso não apresentando segregação e exsudação. Com tudo este teor por apresentar um teor mais elevado de agregado graúdo contribui para diminuir problemas de retração e se torna mais econômico por utilizar menos cimento.

#### **8.4.4. Traço Final**

Através da dosagem pelo método Repette-Melo obteve-se um concreto autoadensável que atende os requisitos necessários para a utilização. O traço final é apresentado na tabela 12.

**Tabela 12: Traço final em massa e volume.**

<b>Traço Final</b>						
	<b>Cimento</b>	<b>Fíler Calcário</b>	<b>Areia fina</b>	<b>Areia Média</b>	<b>Brita</b>	<b>Água</b>
<b>Massa (Kg/m³)</b>	404,1	101,0	239,7	542,4	871,2	202,0
<b>Volume (%)</b>	13,0	3,6	9,0	21,1	33,0	20,2

A relação água finos obtida foi de 0,4 em massa, o teor de pasta de 0,36 e teor de argamassa de 0,66 em volume. Com relação ao custo utilizaram-se dados do traço e da tabela SINAPI de julho de 2015 para o cálculo, obtendo-se o valor de R\$ 276,2/m³. Valor este próximo dos valores apresentados nesta mesma tabela para este tipo de concreto, levando em consideração que o valor só é referente aos custos dos materiais.

#### **8.4.5. Ensaio no estado Endurecido**

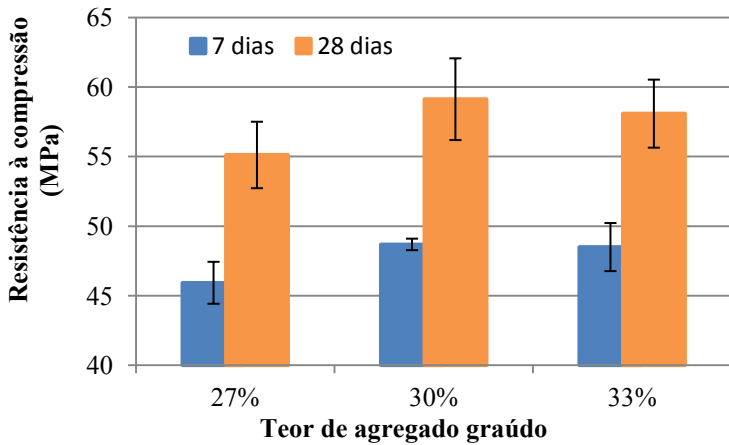
Com relação aos valores encontrados para a resistência compressão dos CAA analisados, estes são apresentados na tabela 13.

**Tabela 13: Resultados da resistência à compressão do concreto.**

<b>Resistência à compressão (MPa)</b>									
	<b>27%</b>			<b>30%</b>			<b>33%</b>		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
<b>7 dias</b>	44,2	46,7	46,9	48,3	49,1	48,7	50,1	48,7	46,7
<b>28 dias</b>	57,2	55,6	52,5	55,8	60,4	61,2	55,3	59,4	59,6

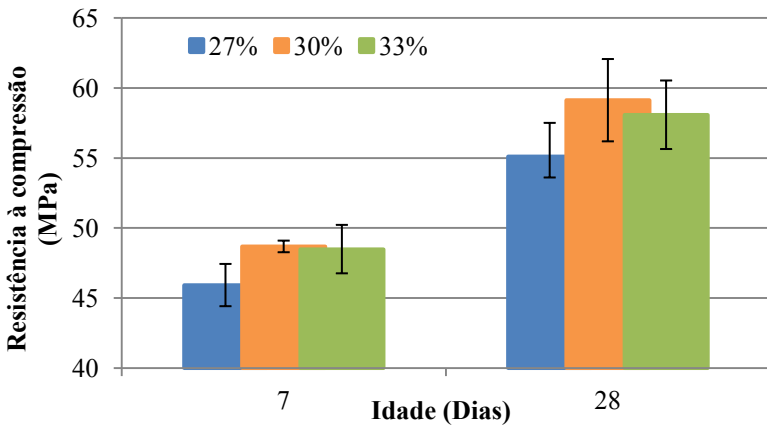
Para obter-se uma análise mais apurada dos dados obtidos, calculou-se a média e o desvio padrão destes valores e geraram-se os gráficos apresentados nas figuras 32 e 33. Sendo a figura 32 a relação entre a resistência à compressão e o teor de agregado graúdo onde é possível analisar a evolução da resistência para cada teor de agregado graúdo.

**Figura 32: Análise resultados de resistência dos concretos I.**



A figura 33 relaciona a resistência à compressão e a idade de rompimento. Nesta é possível diferenciar o valor da resistência para a mesma idade e em diferentes teores de agregado gráudo.

**Figura 33: Análise resultados de resistência dos concretos II.**

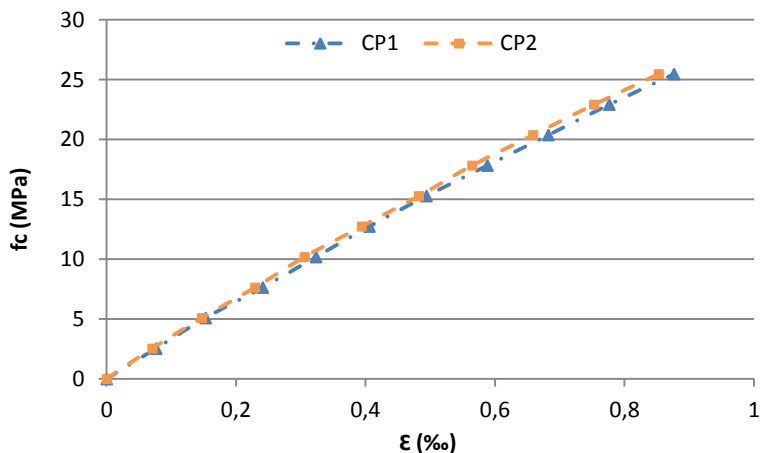




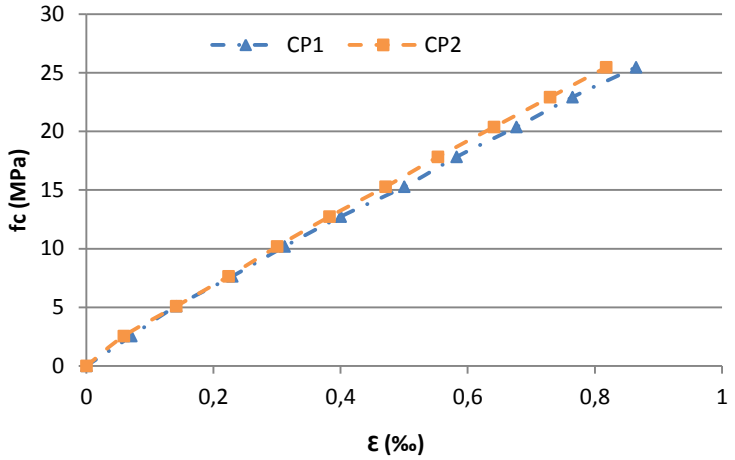
De mão dos dados coletados calculou-se o módulo de elasticidade para os CAA estudados sendo que estes apresentavam **27, 30 e 33%** de agregado graúdo. Os valores obtidos são respectivamente **31,0 GPa, 31,3 GPa e 31,3GPa**.

A seguir são apresentadas as curvas de tensão x deformação geradas através dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade. Sendo através destas que foram encontrados os valores dos módulos já apresentados. Pode-se perceber que as duas amostras analisadas nos três casos apresentam um comportamento praticamente igual validando o ensaio.

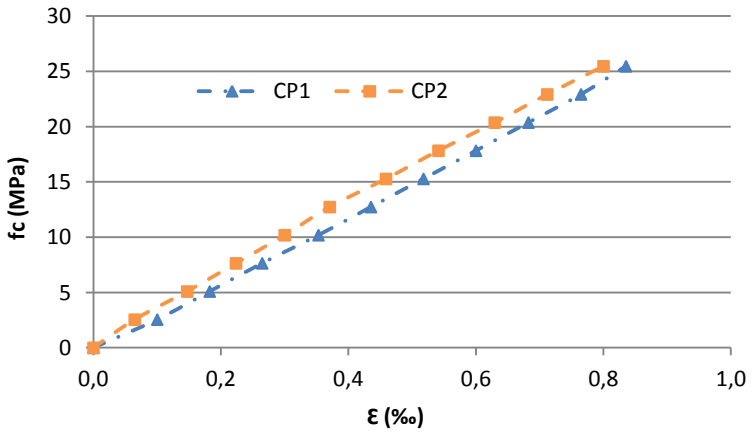
**Figura 34: Curva tensão x deformação para CAA 27%.**



**Figura 35: Curva tensão x deformação para CAA 30%.**



**Figura 36: Curva tensão x deformação para CAA 33%.**



## 8.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO MÉTODO REPETTE-MELO

Analisando as etapas do método, é possível perceber que na etapa da pasta, onde se deseja definir o teor de aditivo este ensaio não é muito eficaz, funciona como um parâmetro inicial, porém o dado encontrado está longe do que virá a ser utilizado na argamassa. Logo não otimizando muito o processo.

Além disto, se constatou que ao invés de utilizar o método de cone de Marsh proposto por Melo (2005) é mais vantajoso se utilizar do ensaio de espalhamento da pasta, que levou aos mesmos resultados, economizando assim mais material e tempo.

Com relação à etapa de argamassa, constatou-se que o método utilizado por este autor para a escolha da composição das areias não levou a composição que apresentou a maior resistência à compressão. Porém como a escolha foi feita através de parâmetros no estado fresco, esta escolha não foi equivocada. De qualquer forma, a diferença dos valores das resistências das argamassas não foi tão representativa.

No caso da escolha do teor ideal de agregado graúdo o método proposto por Melo (2005) levou a escolha do melhor teor, entretanto como constatado pela própria autora os resultados do ensaio de funil V para argamassa tendem a apresentar valores fora do esperado. Uma proposta seria fazer um estudo mais aprofundado e estipular uma nova faixa de valores para o mesmo.

Já na etapa de concreto pode-se concluir que com o aumento do teor de agregado graúdo os concretos autoadensáveis perdem fluidez e aumentam o grau de restrições nos ensaios de escoamento, como funil V e caixa L. Com relação ao aditivo superplastificante a porcentagem utilizada na etapa de argamassa pode ser utilizada no concreto necessitando apenas um pequeno ajuste. Um problema encontrado nos CAA produzidos foi à incorporação de ar nos mesmos, sendo que este prejudica diretamente a resistência dos concretos. Sendo assim, se propõe que em próximos estudos se faça teste para determinar teor de ar incorporado e se tome medidas para reduzi-lo, como utilização de outro aditivo superplastificante que não incorpore ar ou melhorar o processo de mistura.

## 8.6. ENSAIOS DO MEC

### 8.6.1. Ensaios de demanda de água

Como já mencionado através do ensaio de demanda de água se determina o empacotamento real do cimento e do filer. Os resultados para estes materiais se encontram a nas tabelas 14 e 15. Como já mencionado o ponto de demanda de água é alcançado quando uma pasta homogênea e compacta se formar no fundo da argamassadeira, sendo este ponto o início do estado capilar. A figura 37 mostra este ponto.

**Tabela 14: Empacotamento do cimento (C)**

<b>Empacotamento do Cimento</b>	
<b>Ensaio</b>	<b>C</b>
<b>1</b>	0,512
<b>2</b>	0,522
<b>3</b>	0,523
<b>4</b>	0,526
<b>Média</b>	0,521
<b>Desvio Padrão</b>	0,006

**Tabela 15: Empacotamento do filer calcário (C)**

<b>Empacotamento do Filer Calcário</b>	
<b>Ensaio</b>	<b>C</b>
<b>1</b>	0,565
<b>2</b>	0,572
<b>Média</b>	0,568

**Figura 37: Ponto de demanda de água**



### **8.6.2. Ensaios de compressão + vibração**

No caso do ensaio de compressão + vibração este determinou o empacotamento real das areias utilizadas e do agregado graúdo. Os resultados são apresentados nas tabelas 16, 17 e 18.

**Tabela 16: Empacotamento da areia fina**

<b>Empacotamento da areia fina</b>	
<b>Ensaio</b>	<b>C</b>
<b>1</b>	0,663
<b>2</b>	0,662
<b>3</b>	0,649
<b>Média</b>	0,658
<b>Desvio Padrão</b>	0,008

**Tabela 17: Empacotamento da areia média**

<b>Empacotamento da areia média</b>	
<b>Ensaio</b>	<b>C</b>
<b>1</b>	0,606
<b>2</b>	0,592
<b>Média</b>	0,599

**Tabela 18: Empacotamento do agregado graúdo**

<b>Empacotamento do agregado graúdo</b>	
<b>Ensaio</b>	<b>C</b>
<b>1</b>	0,574
<b>2</b>	0,566
<b>Média</b>	0,570

### **8.6.3. Resultados do empacotamento virtual**

Através dos resultados do empacotamento real dos materiais constituintes do CAA, foram calculados, por meio da equação 21 os valores do empacotamento virtual dos mesmos.

**Tabela 19: Empacotamento Virtual Materiais**

<b>Empacotamento Virtual</b>	
<b>Material</b>	<b><math>\beta</math></b>
<b>Cimento</b>	0,599
<b>Fíler Calcário</b>	0,653
<b>Areia Fina</b>	0,731
<b>Areia Média</b>	0,666
<b>Agregado Graúdo</b>	0,633

#### 8.6.4. Resultados do empacotamento virtual da pasta

No caso da pasta, analisando-se os resultados de empacotamento virtual encontrados nota-se que à medida que se aumenta o teor de filer calcário, a mistura se torna mais densa, ou seja, mais compacta. Neste caso o cimento foi o material dominante. Para os cálculos do empacotamento se utilizaram as equações 6 e 7.

**Tabela 20: Empacotamento Virtual da Pasta**

<b>Empacotamento Virtual da Pasta</b>	
<b>Fíler Calcário (%)</b>	<b><math>\gamma</math></b>
<b>10</b>	0,621
<b>15</b>	0,632
<b>20</b>	0,642
<b>25</b>	0,651
<b>30</b>	0,660

#### 8.6.5. Resultados do empacotamento virtual das argamassas

Com relação às argamassas analisou-se o empacotamento virtual considerando as composições e o teor de agregado miúdo. Dentre as composições de areias estudadas, a que apresentou o maior empacotamento foi a de 50-50.

Já com as argamassas, onde se variou o teor de agregado miúdo, o teor com maior empacotamento foi o de 45%.

É preciso ressaltar que no caso da argamassa com a composição 50-50 e a argamassa de 35% de agregado miúdo o material dominante da mistura passa a ser o cimento ao invés da areia média. Para os cálculos do empacotamento se utilizaram as equações 11 e 12.

**Tabela 21: Empacotamento Virtual das Argamassas**

<b>Empacotamento Virtual das Argamassas</b>	
<b>Composições</b>	<b><math>\gamma</math></b>
<b>50/50</b>	0,843
<b>40/60</b>	0,837
<b>30/70</b>	0,815
<b>Agregado Graúdo (%)</b>	<b><math>\gamma</math></b>
<b>35</b>	0,807
<b>45</b>	0,815
<b>55</b>	0,796

#### **8.6.6. Resultados do empacotamento virtual dos concretos**

Para os concretos, quanto maior o teor de agregado graúdo, menor foi o empacotamento encontrado. Isto pode ser explicado, pois quanto mais agregados graúdos, estes acabam criando mais espaços vazios entre eles, sendo que estes espaços acabam não sendo preenchidos pelos grãos menores que não são suficientes na matriz de grãos. Para os cálculos do empacotamento se utilizaram as equações 11 e 12.

**Tabela 22: Empacotamento Virtual dos concretos**

<b>Empacotamento Virtual dos concretos</b>	
<b>Agregado graúdo (%)</b>	<b><math>\gamma</math></b>
<b>27</b>	0,833
<b>30</b>	0,820
<b>33</b>	0,807



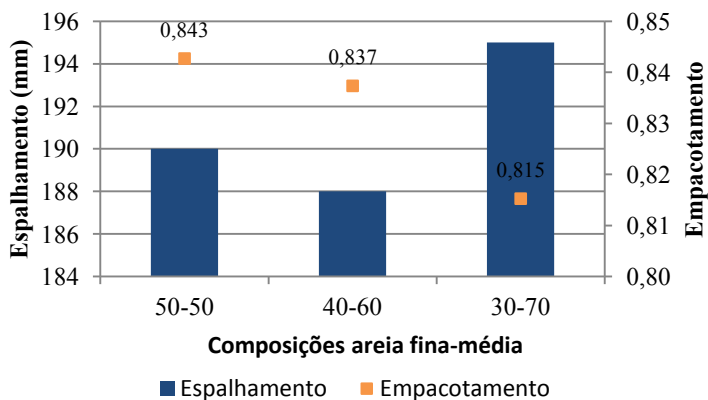
## 8.7. CORRELAÇÕES ENTRE OS MÉTODOS

Nesta seção serão apresentadas correlações feitas através dos dados obtidos pelo método Repette-Melo e do MEC, tanto para argamassa, quanto para concreto.

### 8.7.1. Correlações nas argamassas

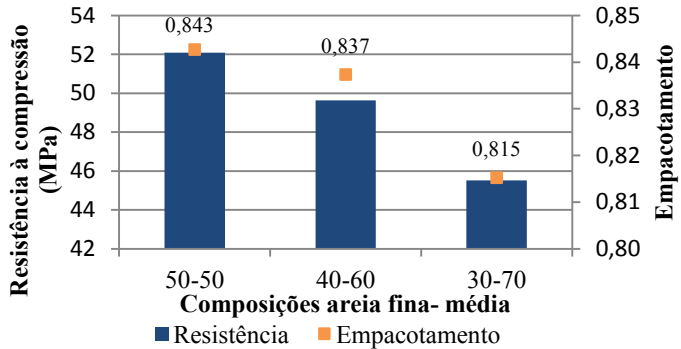
A primeira correlação é apresentada na figura 38, sendo feita entre os valores de espalhamento e empacotamento das argamassas produzidas na etapa de escolha das composições. Analisando-se a figura 38, as composições 50-50 e 30-70 apresentaram os maiores valores de espalhamento, porém a 50-50 apresentou o melhor empacotamento.

**Figura 38: Espalhamento X Empacotamento**



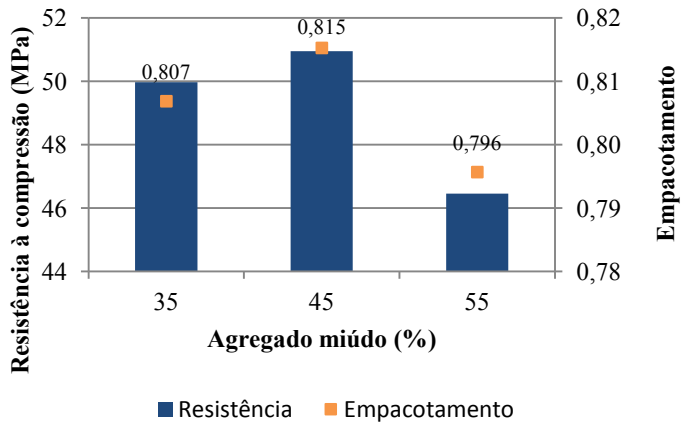
Na figura 39 percebe-se que as curvas do empacotamento e da resistência à compressão das composições tem um comportamento similar. E que a melhor composição foi a 50-50 com a maior resistência e empacotamento.

**Figura 39: Resistência aos 28 dias X Empacotamento**



Na etapa da escolha do teor ideal de agregado miúdo nas argamassas, a figura 40 mostra que as curvas tem um comportamento parecido, que indica o teor de 45% como sendo o que apresenta a maior resistência à compressão e o maior empacotamento.

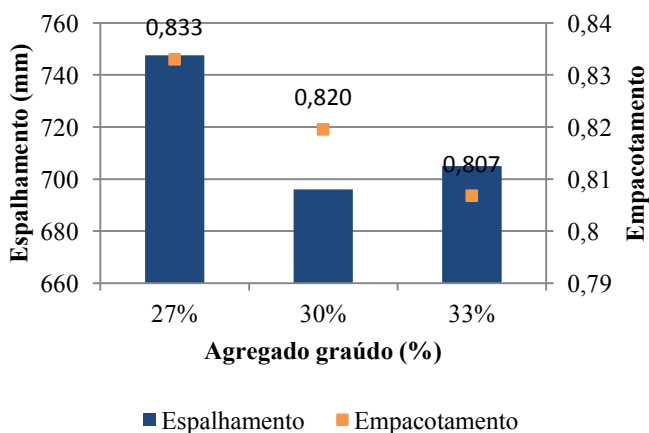
**Figura 40: Resistência aos 28 dias X Empacotamento II**



## 8.7.2. Correlações dos concretos

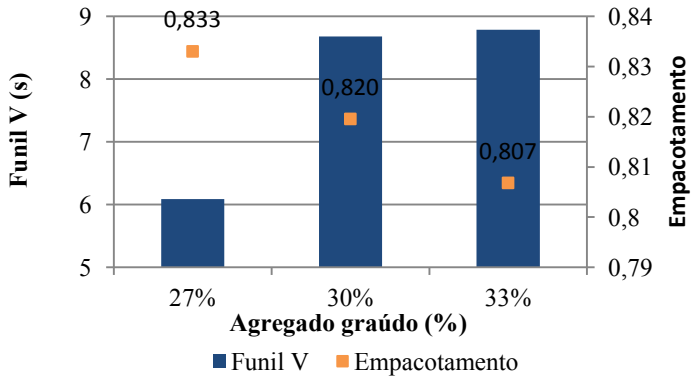
Quando se analisa a influência do espalhamento do concreto pelo empacotamento percebe-se que à medida que o empacotamento diminui o espalhamento segue a mesma tendência. É possível verificar que o teor de 27% de agregado graúdo é o que apresenta maior espalhamento e maior empacotamento.

**Figura 41: Espalhamento X Empacotamento do Concreto**



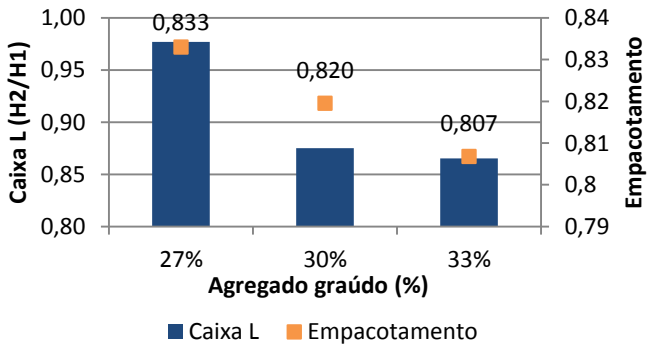
Os valores do ensaio de funil V vão aumentando à medida que se aumenta o teor de agregado graúdo em contrapartida o empacotamento sofre redução com este aumento. Sendo assim os concretos com valores de empacotamento mais baixos apresentam os valores mais altos de tempo de funil V, como mostra a figura 42.

**Figura 42: Funil V X Empacotamento**



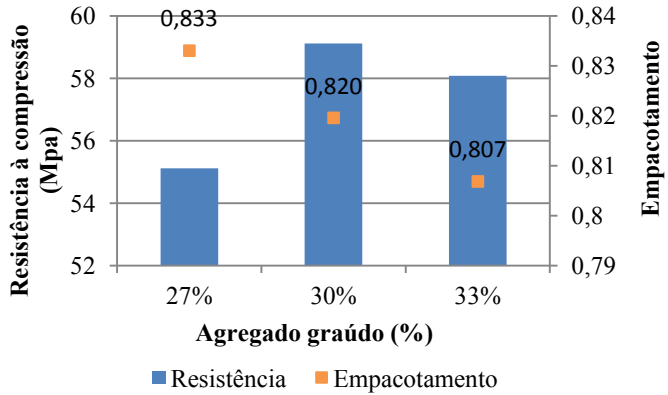
O comportamento das curvas de empacotamento e caixa L é parecido, enquanto os valores de empacotamento decrescem os da razão H2/H1 segue a mesma tendência. Como mostra a figura 43.

**Figura 43: Caixa L X Empacotamento**



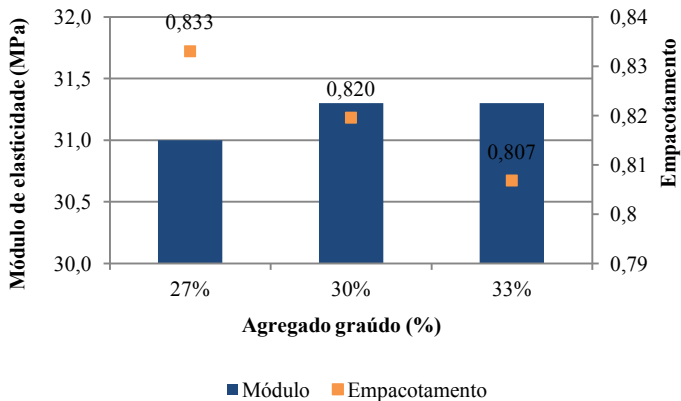
No caso da resistência à compressão em relação ao empacotamento, os maiores valores de resistência são os que apresentaram os menores valores de empacotamento, como mostra a figura 44.

**Figura 44: Resistência aos 28 dias X Empacotamento concreto**



O módulo de elasticidade não sofreu variação em função do empacotamento, pois como mostra a figura 45 este se manteve praticamente constante diante da variação do empacotamento.

**Figura 45: Módulo de Elasticidade X Empacotamento**



## 9. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES FINAIS

Através dos resultados obtidos e das análises feitas dos mesmos pode-se concluir que o objetivo proposto para execução deste trabalho foi alcançado.

Analisando-se os resultados do método de empacotamento compressível (MEC), conclui-se que este em algumas etapas pode ser implementado no método Repette-Melo assim otimizando o mesmo e agilizando o processo de dosagem do CAA.

Na etapa de pasta constatou-se que quanto maior a porcentagem de filer, maior o empacotamento da mistura. Porém através do MEC não foi possível se obter um teor ideal de filer, mostrando que nesta etapa a melhor forma de se definir o teor de filer é se utilizar o procedimento proposto por Melo (2005).

No caso da argamassa, o MEC se mostrou muito promissor tanto para determinação da composição das areias quanto para determinação do teor de agregado miúdo. Isso porque se analisando os valores de resistência à compressão, constatou-se que quanto maior o valor do empacotamento da argamassa, maior foi a resistência encontrada.

Para as composições, a argamassa que apresentou o maior empacotamento foi a 50-50 e tendo visto que nos ensaios de espalhamento das composições esta teve um bom resultado, logo, esta foi a melhor composição, alcançada pelo MEC.

Já no caso do teor de agregado miúdo tanto o método Repette-Melo quanto o MEC levaram ao mesmo resultado o de 45%. Pelo MEC este teor apresentou o maior empacotamento e a maior resistência. Logo se percebe que ao em vez de se fazer diversas argamassas para se encontrar a melhor composição e o teor ideal de agregado miúdo, pode-se determinar estes parâmetros por meio do MEC e produzir apenas uma argamassa na qual se fará somente o ajuste do aditivo superplastificante. Desta forma economizando material e tempo no processo.

O MEC no caso dos concretos autoadensáveis produzidos mostra que quanto maior o teor de agregado graúdo menor será o empacotamento.

Isto leva a pensar que se a matriz de grãos possui mais vazios estará mais frágil e a resistência será menor, porém os resultados de resistência não refletiram este raciocínio, pois o CAA menos resistente foi o com o maior empacotamento. Além disto todos os teores de

agregado graúdo apresentaram bons resultados. Logo se optaria por escolher o CAA com o teor de 33%. Desta forma o MEC não se apresentou útil para a escolha do teor de agregado graúdo. Porém, cabe aqui fazer um estudo mais detalhado da influência do MEC para uma faixa maior de porcentagem de agregado graúdo, para assim se descobrir se este convergiria para um teor ideal de agregado graúdo.

Entretanto algumas informações podem ser úteis para a dosagem do CAA utilizando o MEC na etapa de concreto. Conclui-se que para a produção de concretos mais fluidos é necessário uma matriz de agregados mais compacta. Além disso, quanto menor o empacotamento maior foi o tempo de funil V e de caixa-L, indicando que houve um aumento nos bloqueios devido aos agregados graúdos fazendo com que a habilidade passante do CAA fosse prejudicada.

Por meio dessas informações e conhecendo a faixa de aceitação do método Repette-Melo, dependendo do tipo de aplicação a que será empregado o CAA pode-se através do MEC ter uma ideia de qual será o teor de agregado graúdo que melhor se adapta para esta situação.

O método Repette-Melo se trata de um método racional, no qual todas as etapas necessitam de diversos ensaios para se determinar os teores dos agregados utilizados no concreto. Já a metodologia MEC necessita apenas da caracterização dos materiais utilizados no concreto e, por meio de uma formulação algébrica, executa sua dosagem. Logo, a implementação de conceitos de empacotamento no método Repette-Melo só veio a contribuir para este, uma vez que ele foi otimizado principalmente nas etapas de argamassa e de concreto. Cabe destacar que estas etapas são as que demandam uma maior quantidade de ensaios e de material. Em virtude destes benefícios empregados ao método Repette-Melo o objetivo proposto para este trabalho foi alcançado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, R. S. A.; Helene, P. **Concreto autoadensável de elevada resistência – inovação tecnológica na indústria de pré-fabricados**. Revista Concreto e Construções, Ed. IBRACON, São Paulo, n. 43, p. 46-52, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823**. Concreto Autoadensável 1-6. Rio de Janeiro, 2010.

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

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

Caixa Econômica Federal. **Tabela SINAPI: SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL**. Disponível em: <[http://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-a-partir-jul-2014/sc/SINAPI\\_Precos\\_Ref\\_Insumos\\_SC\\_052015\\_Desonerado.PDF](http://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-a-partir-jul-2014/sc/SINAPI_Precos_Ref_Insumos_SC_052015_Desonerado.PDF)>. Acesso em: 20 jun. 2015.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In. ISAIA, G. C.. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 8, vol. 1.

DE LARRARD, FRANÇOIS. **Concrete optimisation with regard to packing density and rheology**. 3rd RILEM international symposium on



rheology of cement suspensions such as fresh concrete, Aug 2009, France. 8p, 2009.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). Specification and guidelines for self-compacting concrete. Specification, Production and Use. In: **EFNARC**. 2005.

FORMAGINI, SIDICLEI. **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, rio de Janeiro, 2004.

GOMES, P.C.C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Pini, 2009. 160 p.

HARTMAN et al. Aditivos. In: ISAÍÁ, G. C.. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 10, vol. 1.

HELENE, P. E ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: **Materiais de Construção Civil E Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Editor Geraldo C. Isaia. Volume II, Pg 945-984. IBRACON. 2010.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1.ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v e 2v.

MELO, K.A. **Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de filer calcário**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFSC – Florianópolis – SC, (2005).

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedade e materiais**. São Paulo. Pini, 2008.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, Vol.1, n.1, p. 5-15, 2003.

REPETTE, W.L. Concreto Autoadensável. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Editor Geraldo C. Isaia. Volume II, Pg 1807-1842. IBRACON. 2011.

TUTIKIAN, B.F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos autoadensáveis**. 2007. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

TUTIKIAN, B.F; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Auto-Adensável**. 2008. Editora PINI

RILEM. **Casting of Self Compacting concrete**. Report 35, Final report of RILEM TC188-CSC. Skarendahl, A.; Bilberg, P. (Ed). Bagneux, França: RILEM Publications S.A.R.L. 2006. p.41.

SCHANKOSKI, R.A. **Influência do tipo de argamassa nas propriedades mecânicas de alvenarias estruturais de blocos de concreto de alta resistência**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SCHANKOSKI, R.A. **Estudo de concreto autoadensável contendo filer de britagem para moldagem de peças pré-fabricadas**. Exame de qualificação para candidatura ao doutorado-Proposta de Tese, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

SILVA, ALEX SANDRO MALAQUIAS DA. **Dosagem de concreto pelos Métodos de Empacotamento Compressível e Aïtcin-Faury Modificado**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, rio de Janeiro, 2004.

## **ANEXO A – Características do cimento.**



## **ANEXO B – Características do aditivo superplastificante.**