

**DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS DE  
AÇO PELO MÉTODO DO EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL**

**FELIPE BARRETO FRANÇA SANTANA**

**TIAGO TARQUINIO OLIVEIRA**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO – 2018

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM  
FIBRAS DE AÇO PELO MÉTODO DO EMPACOTAMENTO  
COMPRESSÍVEL**

**FELIPE BARRETO FRANÇA SANTANA  
TIAGO TARQUINIO OLIVEIRA**

**ORIENTADOR: PROF. RODRIGO DE MELO LAMEIRAS  
COORIENTADORA: PROF. VALDIRENE MARIA S. CAPUZZO**

**PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL**

**BRASÍLIA – DF, 4 DE DEZEMBRO DE 2018**

**Felipe Barreto França Santana**

**Tiago Tarquinio Oliveira**

**Dosagem do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço pelo método do empacotamento compressível**

Monografia de Projeto Final submetida ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para obtenção do Grau Bacharel em Engenharia Civil, em 04 de dezembro de 2018 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

PROF. RODRIGO DE MELO LAMEIRAS DSc. (UnB)  
(ORIENTADOR)

---

PROF.a VALDIRENE MARIA S. CAPUZZO, DSc. (UnB)  
(COORIENTADORA)

---

PROF.a EUGÊNIA FONSECA DA SILVA, DSc. (UnB)  
(EXAMINADORA INTERNA)

---

PROF.a JOÃO HENRIQUE DA SILVA RÊGO, DSc. (UnB)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

**Brasília, DF**

**04 de dezembro de 2018.**

## CIP – Catalogação Internacional da Publicação ‘

SANTANA, FELIPE BARRETO FRANÇA  
OLIVEIRA, TIAGO TARQUINIO

Dosagem do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço pelo método do empacotamento compressível.

Brasília: UnB, 2018.

xix, 135p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018)  
Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- |  |            |
|--|------------|
| 1. Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras | 4. Dosagem |
| 2. Método do Empacotamento Compressível        |            |
| 3. <i>BetonlabPro3</i>                         |            |

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, T. T., SANTANA, F. B. F. (2018). **Dosagem do concreto autoadensável reforçado com fibras pelo método do empacotamento compressível**. Monografia de Graduação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF. 153p

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: Felipe Barreto França Santana e Tiago Tarquinio Oliveira

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Dosagem do concreto autoadensável reforçado com fibras pelo método do empacotamento compressível

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2018É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Felipe Barreto França Santana  
SQN 211, Bloco J, Apto. 101  
Asa Norte  
CEP: 70.863-100 – Brasília/DF – Brasil

---

Tiago Tarquinio Oliveira  
Qi 9 Conjunto L casa 32  
Guará – 1  
CEP: 71020128 – Brasília/DF – Brasil

## **AGRADECIMENTOS**

Para realização deste trabalho, agradecemos ,primeiramente, aos nossos orientadores Rodrigo de Melo Lameiras e Valdirene Maria S. Capuzzo por todo apoio, paciência, dedicação, disponibilidade e grandes ensinamentos.

Agradecemos às professoras Eugênia Fonseca da Silva e Andréa Prado A. R. Liserre e ao professor João Henrique da Silva Rêgo por toda a contribuição e atenção fornecida.

Agradecemos ao Professor Koji Nagahama da UEFS pela disponibilização do Betonlab, parte fundamental desta pesquisa.

Agradecemos também os alunos Matheus Galvão e ao Renan Ribeiro, alunos do mestrado acadêmico da Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil - PECC/UnB, pela ajuda para a obtenção do tubo necessário para o ensaio de vibração e compressão e para determinar a frequência de vibração da mesa vibratória, respectivamente.

Agradecemos ,também, as empresas BASF e Maccaferri pela disponibilização do superplastificante e das fibras, respectivamente.

Agradecemos por fim, à Universidade de Brasília, instituição na qual carregaremos com muito orgulho durante as nossas vidas.

Agradecemos por fim as nossas famílias pelo apoio e amor.

## RESUMO

O Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras (CARF) é um material que reúne características do concreto autoadensável e do concreto com fibras, tais como: a dispensa da necessidade de vibração devido a sua elevada trabalhabilidade e maior tenacidade, decorrente do ganho de resistência residual obtido com a inclusão das fibras. Esse material pode ser utilizado em estruturas densamente armadas, resultando no preenchimento de vazios sem a etapa de vibração, e na redução da taxa de armadura do elemento estrutural. Entretanto, para se obter um CARF adequado para uso é necessário realizar a dosagem dos materiais constituintes de forma adequada. A dificuldade para realizar esta dosagem está no fato do CARF ter que apresentar características de autoadensabilidade, sem haver segregação, no estado fresco e, ao mesmo tempo apresentar as propriedades desejadas no estado endurecido, tais como resistência à compressão e tenacidade adequadas ao projeto onde será aplicado. Entre os métodos de dosagem atualmente conhecidos, o Método do Empacotamento Compressível (MEC) se destaca por possuir uma fundamentação científica e por possibilitar a obtenção de maior compacidade e empacotamento dos materiais. Este trabalho visa o estudo da dosagem do CARF fazendo-se uso do MEC. Também foram exploradas algumas abordagens simplificadas para consideração das fibras na estrutura granular. Para atingir tais objetivos, foram realizados ensaios de caracterização nos materiais constituintes do CARF, estudo da estrutura granular para determinação do parâmetro  $K$  e para a consideração das fibras no MEC, simulação das dosagens no *software* Betonlab e caracterização do concreto no estado fresco. Desta forma, foi constatado a eficácia do MEC para realizar a dosagem do CARF, foi determinado um valor de  $K$  (13) para o Laboratório de Materiais da Unb e constatou-se que o método do diâmetro equivalente de Yu *et al* (1993) pode ser utilizado para a inclusão das fibras no MEC.

Palavras chave: Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras, Método do Empacotamento Compressível, Betonlab, Dosagem.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	1
1.2.	MOTIVAÇÃO .....	2
1.3.	OBJETIVOS .....	3
1.3.1.	Objetivo geral .....	3
1.3.2.	Objetivos específicos.....	3
1.4.	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	4
2.	REVISÃO da literatura técnica .....	5
2.1.	MÉTODO DO EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL (MEC).....	5
2.1.1.	Introdução.....	5
2.1.2.	Conceitos fundamentais para aplicação do MEC .....	6
2.1.2.1.	Compacidade de uma mistura granular .....	6
2.1.2.2.	Compacidade virtual de uma mistura granular .....	6
2.1.2.3.	Mistura binária sem interação .....	7
2.1.2.4.	Mistura binaria com iteração total.....	9
2.1.2.5.	Mistura binária com interação parcial – efeito parede e efeito de afastamento.....	10
2.1.3.	Cálculo da compacidade virtual em uma mistura polidispersa .....	13
2.1.4.	Compacidade Real.....	14
2.1.4.1.	Ensaio para a determinação da compacidade real .....	15
2.1.5.	Efeito parede promovido pelas paredes do recipiente .....	18
2.1.6.	Inclusão das fibras no MEC .....	19
2.1.6.1.	Conceito de zona perturbada proposta por De Larrard .....	20
2.1.6.2.	Conceito de diâmetro equivalente .....	21
2.2.	RELAÇÕES ENTRE AS COMPOSIÇÕES DA MISTURA E AS PROPRIEDADES DO CONCRETO .....	22

2.2.1.	Propriedades do concreto no estado fresco.....	22
2.2.1.1.	Reologia do concreto no estado fresco.....	22
2.2.1.2.	Viscosidade Plástica.....	23
2.2.1.3.	Tensão de cisalhamento inicial .....	24
2.2.1.4.	Abatimento do tronco de Abrams ( <i>Slump test</i> ).....	25
2.2.1.5.	Colocabilidade.....	25
2.2.1.6.	Estabilidade .....	27
2.2.1.7.	Trabalhabilidade.....	28
2.2.2.	Propriedade do concreto no estado endurecido .....	29
2.2.2.1.	Resistencia à compressão .....	29
2.3.	DOSAGEM DO CONCRETO .....	31
2.4.	CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....	34
2.4.1.	Introdução.....	34
2.4.2.	Métodos de Dosagem .....	36
2.5.	CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS .....	39
2.5.1.	Introdução.....	39
2.5.2.	Materiais Constituintes.....	40
2.5.2.1.	Cimento .....	40
2.5.2.2.	Agregados.....	40
2.5.2.3.	Aditivos .....	41
2.5.2.4.	Adições.....	41
2.5.3.	Métodos de Dosagem CAARF.....	42
2.5.4.	Propriedades no Estado Fresco.....	45
2.5.5.	Propriedades no estado endurecido .....	47
3.	METODOLOGIA.....	50
3.1.	MATERIAIS CONSTITUINTES.....	52
3.1.1.	Cimento .....	52



3.1.2.	Agregados.....	52
3.1.3.	Aditivo superplastificante.....	53
3.1.4.	Fíler.....	54
3.1.5.	Fibras .....	55
3.2.	PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	56
3.2.1.	Caracterização dos materiais constituintes .....	56
3.2.1.1.	Granulometria.....	56
3.2.1.2.	Massa específica.....	56
3.2.1.3.	Compacidade de materiais finos - Ensaio de demanda de água.....	57
3.2.1.4.	Compacidade de materiais granulares - Ensaio de vibração e compressão .....	57
3.2.2.	Estudo comparativo entre diferentes formas de consideração das fibras no MEC	57
3.2.3.	Dosagem dos CAARF utilizando o <i>software Betonlab Pro 3</i> .....	58
3.2.4.	Validação das dosagens .....	60
3.2.5.	Estudo de dosagem dos CAARF .....	60
4.	RESULTADOS E ANÁLISES .....	62
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	62
4.1.1.	Cimento <i>Portland</i> .....	62
4.1.2.	Fíler.....	63
4.1.3.	Agregados Graúdos .....	64
4.1.4.	Agregados Miúdos.....	65
4.2.	ENSAIOS DE COMPACIDADE.....	66
4.2.1.	Protocolo dos ensaios .....	66
4.2.1.1.	Ensaio de demanda de água .....	66
4.2.1.2.	Ensaio de compressão e vibração.....	69
4.2.2.	Misturas Binárias.....	72
4.2.2.1.	Construção da planilha .....	72

4.2.2.2.	Validação da Planilha.....	73
4.2.2.3.	Determinação das compacidades experimentais de misturas binárias 74	
4.2.2.4.	Determinação do Índice de Compactação ( $K$ ).....	78
4.2.3.	Efeito da inclusão das fibras no MEC .....	83
4.3.	ESTUDOS DAS DOSAGENS DO <i>BETONLAB pro</i> .....	90
4.3.1.	Inclusão das fibras no <i>Betonlab Pro 3</i> .....	90
4.3.2.	Verificação da dosagem do software.....	92
4.3.2.1.	Calibração dos parâmetros $p$ e $q$ .....	92
4.3.2.2.	Avaliação das dosagens do programa .....	93
4.3.3.	Estudo de dosagem do CAARF, fazendo-se uso de software baseado no MEC, <i>Betonlab Pro 3</i> .....	100
4.3.3.1.	Simulações de diversas dosagens.....	100
4.3.3.2.	Estudo de sensibilidade na mudança do $K$ .....	108
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	110
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	113
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	114

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de compacidades virtuais (,)	6
Figura 2 – Grãos com granulometria superior como classe dominante (DE LARRARD, 1999)	7
Figura 3 - Grãos com granulometria inferior como classe dominante (DE LARRARD, 1999)	7
Figura 4 – Compacidade virtual em uma mistura binária (FORMAGINI, 2005)	9
Figura 5 – Mistura binaria com interação total	9
Figura 6 - Efeito de afastamento (DE LARRARD, 1999)	10
Figura 7 - Efeito arede (DE LARRARD, 1999)	11
Figura 8 - Possíveis interações de uma mistura binária (FORMAGINI, 2004)	12
Figura 9 – Efeito parede e efeito de afastamento dos grãos (DE LARRARD, 1999)	13
Figura 10 - Fases do material granular (SILVA, 2004)	16
Figura 11 – Fases do empacotamento do cimento (SILVA, 2004)	16
Figura 12 - Ensaio de determinação da compacidade experimental dos grãos.	18
Figura 13 – Volume perturbado (SILVA, 2004)	19
Figura 14 – Efeito das fibras rígidas e flexíveis, (DE LARRARD, 1999)	20
Figura 15 – Volume perturbado pela presença de fibras (DE LARRARD, 1999)	20
Figura 16 – Influência de cada material na colocabilidade. (SEDRAN, 2018)	26
Figura 17 – Segregação de uma classe <i>i</i> em uma mistura (DE LARRARD, 1999)	27
Figura 18 - Diagrama de preenchimento e segregação potencial	28
Figura 19 - Máxima espessura de pasta (SILVA, 2004)	30
Figura 20 – Componentes da mistura de um concreto (DE LARRARD, 1999)	32
Figura 21 – Esquema do método de dosagem do CARF proposto por Ferrara et al (2007)	43
Figura 22 – Organograma dos estudos realizados	51
Figura 23 - Aspecto das areias utilizadas nos estudos: (a) areia fina rosa; (b) areia média quartzosa	52
Figura 24 - Aspecto dos agregados graúdos utilizados: (a) brita 0; (b) brita 1.	53
Figura 25 – Granulometria do	62
Figura 26 – Granulometria do fíler	63
Figura 27 – Granulometria do Filer B (Miranda, 2018)	64
Figura 28 – Granulometria brita 0	64

Figura 29 – Granulometria areia fina .....	65
Figura 30 – Granulometria da areia média .....	66
Figura 31 – Ensaio de demanda de água do cimento .....	68
Figura 32 – Ensaio de demanda de água do fíler A.....	68
Figura 33 – Ensaio de demanda de água do fíler B .....	69
Figura 34 – Equipamentos do ensaio de vibração e compressão .....	70
Figura 35 – Ensaio de vibração e compressão.....	71
Figura 36 – Compacidades experimentais pela planilha .....	74
Figura 37 – Curva de compacidades experimentais da mistura M05-M06.....	76
Figura 38 – Curva de compacidades experimentais da mistura M02-M04.....	76
Figura 39 – Curva de compacidades experimentais da mistura M01-M03.....	77
Figura 40 – Curva da mistura binária M05-M06 variando-se o $K$ .....	79
Figura 41 - Curva da mistura binária M02-M04 variando-se o $K$ .....	80
Figura 42 - Curva da mistura binária M01-M03 variando-se o $K$ .....	81
Figura 43 – Curva da mistura M02-M04 com $K$ a partir de 9.....	82
Figura 44 – Curva da mistura M01-M03 com $K$ a partir de 9.....	82
Figura 45 – Curva de compacidade experimental <i>versus</i> teor de fibra .....	84
Figura 46 – Curva de compacidade <i>versus</i> teor de fibras com consideração do diâmetro equivalente.....	86
Figura 47 – Curva de Erro médio <i>versus</i> Diâmetro equivalente das fibras.....	86
Figura 48 – Curva de compacidade <i>versus</i> teor de fibras com diâmetro equivalente e $\beta_1 = 0,74$ .....	88
Figura 49 – Curva de compacidade <i>versus</i> teor de fibra com o conceito de volume perturbado.....	89
Figura 50 – Procedimentos para determinação dos parâmetros de $p$ e $q$ .....	93
Figura 51 – Concretagem do primeiro traço e ensaios no estado fresco .....	97
Figura 52 – Concretagem do segundo traço e ensaios no estado fresco.....	99
Figura 53 – Comparações com relação ao a) volume de agregado graúdo e b) volume de pasta com fíler .....	105
Figura 54 – Comparações com relação ao a) volume de pasta sem fíler e b) volume de argamassa.....	105
Figura 55 – Comparação com relação ao a) Volume de sobre volume de finos e b) volume de agregado miúdos da argamassa.....	105
Figura 56 – Volume de água sobre volume de finos .....	106

Figura 57 – a) Consumo de finos em $\text{kg/m}^3$ (cimento + filler) b) consumo de água em $\text{kg/m}^3$ .....	107
Figura 58 – a) Consumo de agregado graúdo em $\text{kg/m}^3$ e b) consumo de agregados miúdos em $\text{kg/m}^3$ .....	107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índice K para os diversos protocolos de empacotamento (DE LARRARD, 1999).....	15
Tabela 2 - Colocabilidade para processos de compactação.....	26
Tabela 3 – Ensaios para avaliação das propriedades do CA .....	35
Tabela 4 – Parâmetros indicativos para a dosagem conforme o (ACI 237R-07, 2007). 37	
Tabela 5 – Valores indicativos para dosagem conforme RILEM TC 174-SCC (2000). 37	
Tabela 6 – Métodos de dosagem para CA .....	38
Tabela 7 – Parâmetros fixados por De Larrard para se garantir a autoadensabilidade de um concreto .....	44
Tabela 8 – Dados técnicos do aditivo superplastificante.....	54
Tabela 9 – – Composição química dos fíleres utilizados (Miranda, 2018).....	55
Tabela 10 – Características das fibras de aço a serem utilizadas (BASF, 2016).....	56
Tabela 11 – Parâmetros a serem inseridos no <i>Betonlab</i> .....	59
Tabela 12 – Parâmetros fixados na pesquisa para alcançar o CAA .....	60
Tabela 13 – Composição de Bogue Adotada.....	63
Tabela 14 – Massa agregados miúdos .....	65
Tabela 15 – Compacidade por demanda de água .....	67
Tabela 16 – Compacidade experimental dos agregados.....	72
Tabela 17 – Resultados das compacidades calculadas pela planilha eletrônica e por Grunewald (2004).....	73
Tabela 18 – Classes e materiais utilizados para ensaios com misturas binárias.....	75
Tabela 19 – Resultado das compacidades experimentais da mistura binária M05-M06	75
Tabela 20 – Resultado das compacidades experimentais da mistura binária M02-M04	76
Tabela 21 – Resultado das compacidades experimentais da mistura binária M01-M03	77
Tabela 22 – Compacidades calculadas das misturas binárias M05-M06 .....	78
Tabela 23 – Compacidades calculadas das misturas binárias M02-M04 .....	79
Tabela 24 – Compacidades calculadas das misturas binárias M01-M03 .....	80
Tabela 25 – Soma dos erros médios das compacidades calculadas das misturas com a mudança do K.....	83
Tabela 26 – Influência das fibras na compacidade do material.....	84
Tabela 27 – Compacidade calculada considerando o diâmetro equivalente das fibras..	85

Tabela 28 - Compacidade calculada considerando o diâmetro equivalente das fibras e $\beta_1 = 0,74$ .....	87
Tabela 29 – Dados para o cálculo da compacidade considerando o volume perturbado	88
Tabela 30 – Compacidades calculadas considerando o volume perturbado .....	89
Tabela 31 - Compacidades pertubas pela fibra FS7 .....	90
Tabela 32 – Simulações método de De Larrard (1998) e Yu et al (1993).....	91
Tabela 33 – Dosagens das calibrações dos parâmetros p e q .....	92
Tabela 34 – Dosagem inicial no BetonLab .....	94
Tabela 35 – Segunda dosagem no Betonlab .....	96
Tabela 36 – Resultados dos ensaios no estado fresco do primeiro concreto .....	96
Tabela 37 – Dosagem com os novos valores de $p$ e $q$ e o novo $f_{fler}$ .....	98
Tabela 38 – Resultados da nova dosagem .....	99
Tabela 39 – Valores da compacidade perturbada pelas fibras FF1 .....	101
Tabela 40 – Valores da compacidade perturbada pelas fibras FF3 .....	101
Tabela 41 – Valores da compacidade perturbada pelas fibras FF4 .....	101
Tabela 42 – Simulações com a fibra FS7 .....	103
Tabela 43 – Dosagens com variação do parâmetro K .....	108

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos latinos

ACI	Instituto Americano de Concreto
$a_{ij}$	Coefficiente de afastamento que o grãos da classe $j$ exercem nos da classe $i$
$a/c$	Relação água cimento
$b_{ij}$	Coefficiente do efeito parede que os grãos da classe $j$ exercem sobre os grãos da classe $i$
CAA	Concreto Autoadensável
CAARF	Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
$d_i$	Diâmetro da classe $i$ dos grãos
$D_c$	Diâmetro interno do cilindro
$d_v$	Diâmetro da esfera equivalente
$D$	Máximo tamanho do agregado
$d_f$	Diâmetro da fibra
$d_p$	Diâmetro equivalente da fibra proposto por Yu <i>et al.</i> (1993)
$f_{c_m}$	Resistência à compressão da matriz do concreto
$f_c$	Resistência a compressão do concreto
$f_{c_g}$	Resistência a compressão do agregado
$f_{c_p}$	Resistência à compressão da pasta de cimento
$g$	Volume dos agregados em um volume unitário de concreto
$g^*$	Compacidade real dos agregados para um índice de compactação K igual a 9



$h$	Altura do material compactado
$K_i$	Contribuição da fração $i$ para o índice de compactação da mistura
$K'$	Índice de compactação do concreto sem ar
$K'_c$	Contribuição do cimento para o índice de compactação da mistura
$K'_f$	Contribuição dos finos para o índice de compactação da mistura
$K'_{gg}$	Contribuição do agregado graúdo para o índice de compactação da mistura
$K$	Índice de compactação para a mistura
$K^*$	Índice de compactação relacionado ao processo de lançamento
$k_w$	Coefficiente que depende do tipo de agregado da mistura (igual a 0,88 para agregados arredondados e 0,73 para britados)
$L_f$	Comprimento da fibra
$m_e$	Massa específica do material
$M_{agua}$	Massa de água para atingir o ponto de saturação
$M_i$	Massa do material
$M_s$	Massa do material seco
$MEP$	Máxima espessura de pasta
MEC	Método do Empacotamento Compressível
NBR	Norma Brasileira
$N_{sf}$	Número de fibras por unidade de volume
$p_s$	Densidade do material
$p$	Coefficiente de aderência pasta-agregado
$P$	Porcentagem de superplastificante na mistura
$P^*$	Dose de saturação

$q$	Coeficiente de limitação da resistência à compressão do concreto devido ao agregado
$R_{c28}$	Resistência à compressão do cimento aos 28 dias
$S$	Potencial de segregação
$s$	Abatimento do tronco de cone de Abrams
$v_{cc}$	Volume de cimento num dado volume unitário de concreto
$v_a$	Volume de ar num dado volume unitário de concreto
$v_w$	Volume de água num dado volume unitário de concreto
$v_c$	Volume de cimento em um volume unitário de pasta
$v_p$	Volume perturbado de somente uma fibra;
$V_p$	Volume perturbado
$y_i$	Fração de volume da classe $i$ dos grãos

### **Símbolos gregos**

$\beta$	Compacidade virtual de uma classe de grãos (mistura monodispersa)
$\Phi$	Compacidade (real) da mistura
$\Phi_f$	Porcentagem de fibras no esqueleto granular
$\Phi_i$	Volume parcial da da classe $i$ dos grãos
$\Phi_i^*$	Compacidade real com índice de compactação $K$ igual a 9 (máximo volume que os grãos da classe $i$ podem ocupar)
$\Phi_i/\Phi_i^*$	Concentração normalizada de sólidos (relação de preenchimento de uma classe $i$ de grãos)
$\pi$	Porosidade
$\alpha_c$	Máximo volume de cimento em um volume unitário de pasta

$\bar{\beta}_i$	Compacidade virtual média de $\beta$ , numa mistura afetada pela parede do recipiente ou pela inclusão das fibras
$\phi_f$	Porcentagem de fibras no esqueleto granular
$\Psi$	Esfericidade
$\rho$	Densidade específica do concreto
$\eta_a$	Viscosidade aparente
$\mu$	Viscosidade plástica
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\tau_0$	Tensão de escoamento
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação
$\gamma$	Compacidade virtual da mistura
$\gamma_i$	Compacidade virtual da mistura quando a classe $i$ é dominante

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. IMPORTÂNCIA DO TEMA

O concreto é um material amplamente utilizado na Construção Civil. Ao longo das últimas décadas, houve um aumento nas pesquisas com este material, possibilitando uma série de inovações na tecnologia do concreto que levaram ao surgimento de uma grande variedade de misturas e ao aumento do número de aplicações.

Um material resultante dessas inovações é o Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras (CARF). Esse material associa vantagens do Concreto Autoadensável (CA) e do Concreto Reforçado com Fibras (CRF), resultando em um material com apropriada trabalhabilidade, sem necessidade de vibração e com melhora significativa na tenacidade e na resistência residual (pós-fissuração), quando comparado com o concreto convencional.

O estudo do CARF é realizado com alguns objetivos, tais como a verificação das propriedades do material no estado fresco e no estado endurecido, e, principalmente, a investigação do efeito das fibras na autoadensabilidade do concreto. Esses estudos são de suma importância para a aplicação do CARF na construção civil, que ainda se encontra em estágio inicial. Estudos mostram que o CARF pode ser utilizado em estacas-prancha, segmentos de túneis (GRÜNEWALD, 2004), elementos pré-moldados de telhado (FERRARA e MEDA, 2006), vigas (BARROS *et al.*, 2009), painéis sanduíche (LAMEIRAS *et al.*, 2013), em pisos (SALEHIAN e BARROS, 2015) e lajes (AHMAD *et al.*, 2016).

Estruturas de concreto com uma alta taxa de armadura podem acarretar na ausência do preenchimento de vazios no momento do lançamento do concreto, podendo prejudicar a qualidade e a integridade do elemento estrutural. Diante disso, vê-se a importância do CARF, principalmente por poder reduzir a taxa de armadura da estrutura, além de preencher os vazios e não precisar de vibração.

Para alcançar um CARF de fato com propriedades de autoadensabilidade, que apresente um grau de segregação aceitável e que tenha as propriedades desejadas/requeridas no estado endurecido, é necessário obter uma adequada dosagem dos materiais constituintes. Dentre os vários métodos de dosagem desenvolvidos, atualmente, o método de dosagem para concretos chamado de Método do Empacotamento

Compressível (MEC), proposto por De Larrard (1999), se destaca por sua precisão, fundamentação teórica, e por ser um método inovador, que considera o empacotamento das partículas em misturas granulares, encontrando a maior compacidade possível para uma mistura. A validade do MEC tem sido comprovada por diversos trabalhos que o utilizam (GRÜNEWALD, 2004; SILVA, 2004). Nesse método, a dosagem do concreto depende da compacidade virtual da mistura granular que o compõe, ou seja, do arranjo das partículas da mistura seca, e da relação entre as propriedades virtuais com propriedades reais que a mistura é submetida em procedimento experimental.

Diversos trabalhos que abordam o CARF foram realizados em âmbito nacional e internacional (GRÜNEWALD, 2004; SILVA, 2004; PEREIRA *et al.*, 2008; DE BARROS *et al.*, 2009; FRITIH *et al.*, 2013; BOZKURT e YAZICIOĞLU, 2015). Entretanto, as pesquisas relacionadas a esse material são relativamente recentes, ainda sendo necessário elaborar mais estudos para se ter uma melhor compreensão do comportamento do material em elementos estruturais.

A utilização do MEC para a dosagem do CARF ainda é pouco estudada (GRÜNEWALD, 2004; MARANGON, 2006) e possui algumas limitações. Primeiramente, a consideração das fibras no MEC ocorre de forma simplificada, existindo o conceito de “zona perturbada”, proposto por De Larrard (1999), ou do conceito de diâmetro equivalente, proposto por Yu *et al.* (1993). Tais simplificações ainda precisam de maior análise, a fim de se obter resultados precisos para a dosagem do concreto.

## 1.2. MOTIVAÇÃO

O CARF já é amplamente estudado em âmbito nacional e internacional. As pesquisas analisam, principalmente, o efeito das fibras na autoadensibilidade do concreto, além de avaliar as propriedades do material no estado fresco e endurecido. Ainda existem poucas pesquisas sobre a dosagem desse material pelo Método do Empacotamento Compressível.

O presente trabalho tem como motivação o melhor entendimento da dosagem do Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras pelo método do empacotamento compressível e o efeito da inclusão das fibras na autoadensibilidade do concreto. Além disso, tendo em vista a limitação de literaturas disponíveis sobre o tema, é oportuno o

aprofundamento do estudo da dosagem desse material pelo MEC, tendo em vista a importância da aplicação desse material na construção civil, podendo ser de grande utilidade para construção de túneis, pisos industriais e elementos densamente armados.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo geral

Estudar a dosagem do CARF fazendo-se uso do MEC, avaliando suas características no estado fresco.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

O trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Implementar o ensaio de determinação da compactação de misturas granulares monodispersas no Laboratório de Ensaios em Materiais (LEM), da UnB;
- Determinar o índice de compactação de uma mistura granular,  $K$ , característico do procedimento implementado para o ensaio de determinação da compactação de misturas granulares;
- Explorar diferentes formas simplificadas de se considerar, no MEC, o efeito das fibras na estrutura granular;
- Criar rotina de como utilizar o *software Betonlab Pro 3*, com seus respectivos procedimentos, variáveis de entrada e saída;
- Verificar experimentalmente, em laboratório, se as propriedades no estado fresco de um CARF dosado fazendo-se uso do MEC apresenta as propriedades reológicas e resistência à segregação especificadas;
- Realizar o estudo de dosagem do CARF, fazendo-se uso de software baseado no MEC, Betonlab Pro, utilizando 1 tipo de fibra (FS7), 4 classes de resistência (30, 50, 70 e 90 MPa) e 6 teores de fibras (0, 30, 45, 60, 75 e 90 kg/m<sup>3</sup>);
- Comparar as dosagens obtidas para o CARF fazendo-se uso do MEC com os limites para as composições para o CAA (sem fibras) recomendados pelo ACI 237R-07 e pelo RILEM TC 174-SCC.

#### 1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em três capítulos. O primeiro capítulo é composto pela introdução, onde é abordada a importância do tema, a motivação para realização desse trabalho, objetivos gerais e específicos do estudo e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo é composto pela revisão da literatura técnica, que descreve sobre o Método do Empacotamento Compressível (MEC), as relações entre as composições da mistura e as propriedades do concreto e a dosagem do concreto pelo MEC. Além disso, esse capítulo aborda sobre o concreto autoadensável e sobre o concreto autoadensável reforçado com fibras.

O terceiro capítulo descreve a metodologia experimental realizada. Nesse capítulo estão definidos os materiais constituintes que foram utilizados no presente trabalho, o programa experimental e o cronograma do trabalho.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos com os ensaios realizados, bem como a análise desses. Por fim, no quinto capítulo é apresentada as conclusões obtidas nesse trabalho. Após essa parte foi apresentada a bibliografia utilizada. Complementam esse trabalho as referências citadas no texto e quatro apêndices. No apêndice A é apresentado a planilha eletrônica utilizada, no apêndice B os resultados experimentais das misturas binárias, no apêndice C as compacidades calculadas para um valor de  $K$  maior que 9 e por fim, o apêndice D exemplifica o modo de utilização do *Betonlab pro 3*

## 2. REVISÃO DA LITERATURA TÉCNICA

### 2.1. MÉTODO DO EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL (MEC)

#### 2.1.1. Introdução

O objetivo de uma dosagem de concreto otimizada é obter uma proporção entre os grãos que resulte na maior massa unitária possível. Segundo De Larrard (1999), a dosagem de concretos é principalmente um problema de compacidade, ou densidade de empacotamento. Para qualquer mistura pode-se escrever a seguinte relação:

$$\Phi + \pi = 1 \quad (1)$$

Sendo  $\Phi$  e  $\pi$  são a compacidade e a porosidade, respectivamente.

O método do empacotamento compressível parte desse princípio, o objetivo é encontrar a maior compacidade possível para um concreto com as características desejadas pelo operador. Para isso, De Larrard (1999) propôs um modelo com dois módulos. O primeiro estabelece uma álgebra para o cálculo da compacidade virtual e o segundo relaciona essa com as propriedades reais da mistura.

Dessa forma, foram propostas equações que relacionam o método com as características do concreto no estado fresco e endurecido. Assim, pode-se notar uma das grandes vantagens do método, pois o mesmo utiliza parâmetros científicos para otimizar as dosagens de concretos. Segundo Silva (2004), observa-se as seguintes vantagens do método do empacotamento compressível:

- O desenvolvimento deste método segue os princípios científicos, ou seja, é fundamentado na observação dos fenômenos, levantamento de hipóteses, estabelecimento de modelos matemáticos que representam os fenômenos e nas comprovações experimentais dos modelos estabelecidos;
- Ele inclui em seus modelos matemáticos a contribuição dos novos materiais que estão sendo utilizados na confecção dos concretos atualmente, tais como, sílica ativa, fíler 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;



## 2.1.2. Conceitos fundamentais para aplicação do MEC

Esta seção tem como objetivo apresentar os conceitos fundamentais utilizados no MEC. O texto abaixo está baseado no livro de De Larrard (1999).

### 2.1.2.1. Compacidade de uma mistura granular

A compacidade experimental ou real ( $\Phi$ ) de uma mistura granular é definida como o volume de sólidos presentes em um determinado volume unitário. Segundo De Larrard (1999), a compacidade de uma mistura polidispersa depende de três fatores: tamanho dos grãos, forma dos grãos e método de compactação empregado.

Para o concreto, o objetivo é geralmente combinar classes de grãos para obter a menor porosidade e, portanto, a maior densidade de empacotamento possível, obtendo uma curva granulométrica “ideal”.

### 2.1.2.2. Compacidade virtual de uma mistura granular

A compacidade virtual de uma mistura,  $\gamma$ , é um dos principais conceitos para a utilização do MEC. Essa é definida como a máxima compacidade possível que se pode obter colocando grão a grão em um volume unitário. Também pode ser entendida como uma mistura com uma grande energia de compactação, não havendo quebras de grãos (GOMES, 2009).

A compacidade virtual de uma classe de grãos (grãos com o mesmo diâmetro) é denominada  $\beta$ . Para exemplificar, supõe-se partículas cúbicas iguais, como ilustrado na Figura 1. Nesse caso, as partículas preenchem todo o volume disponível, obtendo uma compacidade virtual  $\beta = 1$ . No caso de partículas esféricas, ilustrado na figura 1b, nota-se que não é possível ocupar todo o volume, mesmo em um arranjo de forma cúbica de face centrada (CFC), obtendo, assim, um  $\beta = 0,74$ .

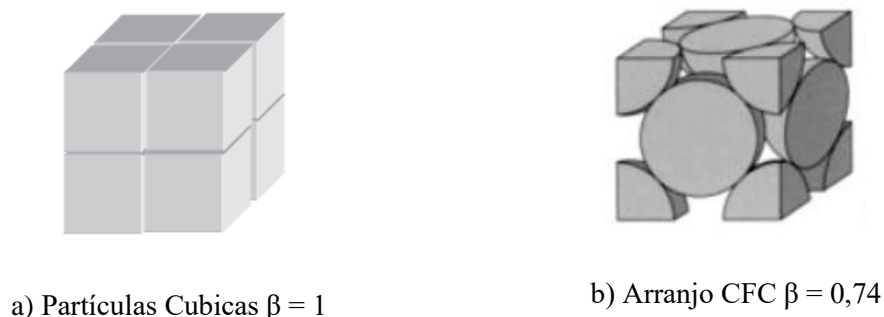


Figura 1 – Exemplo de compacidades virtuais (SILVA, 2004)

### 2.1.2.3. Mistura binária sem interação

Uma mistura granular pode ser dividida em classes de grãos com diâmetros similares. A classe dominante é aquela que garante a continuidade sólida do corpo granular. A Figura 2 ilustra uma situação na qual a classe de maior diâmetro é dominante, é notável que todas as faces da mistura podem ser alcançadas percorrendo apenas os grãos de maior dimensão.

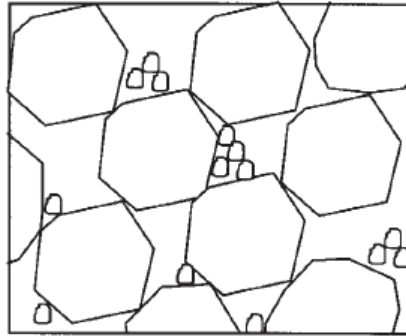


Figura 2 – Grãos com granulometria superior como classe dominante (DE LARRARD, 1999)

Por outro lado, na Figura 3, é demonstrado uma mistura cuja classe dominante possui um diâmetro inferior. Seguindo o mesmo raciocínio qualquer face do corpo granular pode ser ligada por grãos de menor dimensão.

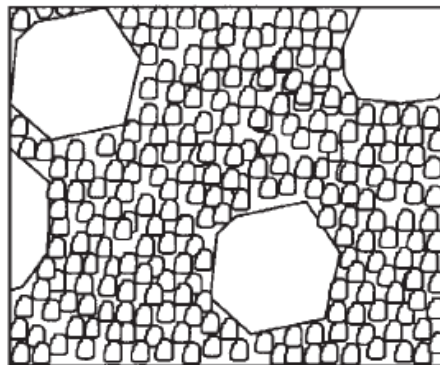


Figura 3 - Grãos com granulometria inferior como classe dominante (DE LARRARD, 1999)

Uma mistura binária sem interação acontece quando tem-se  $d_1 \gg d_2$ , sendo  $d_1$  e  $d_2$  os diâmetros das classes presentes, respectivamente. Como há uma grande diferença entre os diâmetros, pode-se concluir que um grão não perturba o outro e, portanto, a mistura é definida sem interação. As proporções em volume de cada classe ( $y_i$ ) da mistura podem ser calculadas como:

$$y_i = \frac{\Phi_i}{\Phi_1 + \Phi_2} \quad (2)$$

Sendo  $\Phi_i$  o volume parcial da classe  $i$ .

Supondo uma mistura binária com a classe 1 dominante, tem-se que a quantidade de grãos desta classe é constante e igual a  $\beta_1$ . Já a quantidade da classe 2 é igual ao seu volume  $\Phi_2$ , podendo variar de 0 até um valor no qual a classe 1 deixa de ser dominante. Assim, pode-se deduzir que a compacidade virtual da mistura ( $\gamma$ ) é:

$$\gamma = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (3)$$

Como:

$$\Phi_1 = \beta_1 \quad (4)$$

Pode-se, a partir das equações 2, 3 e 4 deduzir:

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - y_2} \quad (5)$$

Esta equação é válida até o ponto que os grãos de classe 2 preenchem todos os vazios deixados pelos grãos de granulometria superior. A partir desse ponto, os grãos da classe 2 tendem a afastar os grãos da classe 1, e, conseqüentemente, a classe 2 passa a ser a classe dominante.

Nesta situação, os grãos da classe 2 tendem a bloquear espaços deixados entre os grãos da classe 1, podendo aumentar até um volume correspondente a  $\beta_2$ , no qual apenas grãos da classe 2 estão presentes. Partindo deste princípio, pode-se deduzir:

$$\Phi_2 = \beta_2 (1 - \Phi_1) \quad (6)$$

Então, a partir de uma análise similar à realizada com classe 1 dominante, porém utilizando a equação (6), obtém-se:

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - (1 - \beta_2)\gamma_1} \quad (7)$$

A Figura 4 mostra a evolução da compacidade virtual em uma mistura binária à medida que se aumenta o volume de grãos da classe 2. A mudança de domínio da mistura acontece a partir do ponto que os grãos da classe 2 preenchem todos os vazios deixados

pela classe 1, obtendo-se a compacidade virtual máxima. Portanto, a equação (5) é válida para  $0 < y_2 < 0,205$ , e a equação (7) é válida para  $0,205 < y_2 < 1$ .

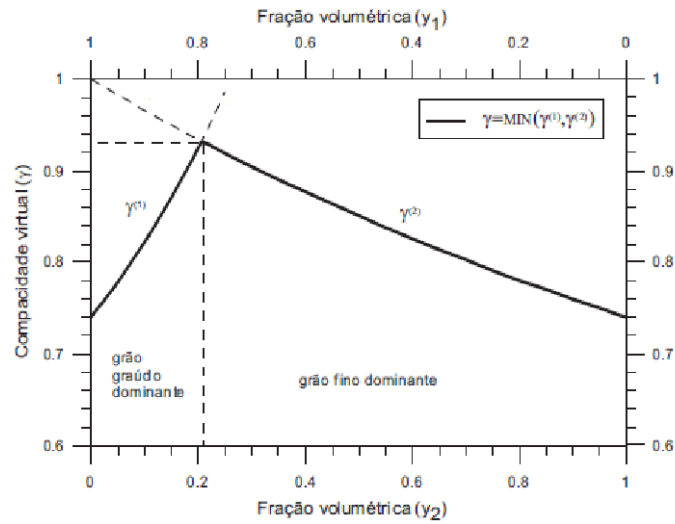


Figura 4 – Compacidade virtual em uma mistura binária (FORMAGINI, 2005)

Assim, pode-se intuitivamente escrever:

$$\gamma = \text{MIN}(\gamma_1, \gamma_2) \quad (8)$$

Sendo  $\gamma$  é a compacidade virtual da mistura.

#### 2.1.2.4. Mistura binária com interação total

Uma mistura binária possui uma interação total quando tem-se  $d_1 = d_2$ , nesta situação, parte do volume é preenchido por grãos da classe 1 e a outra parte é ocupada por grãos da classe 2, como mostra a Figura 5.

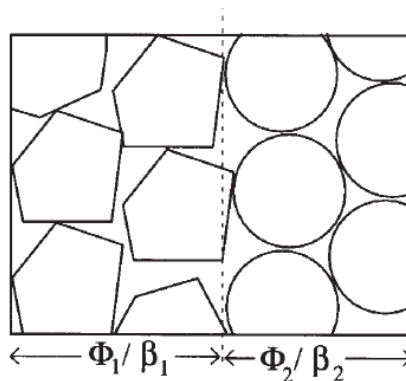


Figura 5 – Mistura binária com interação total

Portanto, pode-se afirmar que:

$$\frac{\Phi_1}{\beta_1} + \frac{\Phi_2}{\beta_2} = 1 \quad (9)$$

Desta forma, relacionando as equações (6) e (9), é possível obter as equações da compacidade virtual:

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - (1 - \frac{\beta_1}{\beta_2})y_2} \quad (10)$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - (1 - \frac{\beta_2}{\beta_1})y_1} \quad (11)$$

Como a soma das proporções em volume é igual a 1, é notável que este é um caso particular que  $\gamma = \gamma_1 = \gamma_2$ .

#### 2.1.2.5. Mistura binária com interação parcial – efeito parede e efeito de afastamento

Em uma mistura na qual a diferença entre as dimensões dos grãos das distintas classes não é muito grande, as partículas interagem entre si, aumentando os vazios da composição. Segundo De Larrard (1999) essa interação é composta por dois efeitos: o efeito de parede e o efeito de afastamento.

Quando tem-se  $d_1 > d_2$  e os grãos da classe 1 são dominantes, os grãos menores promovem um efeito de afastamento localizado nos grãos de dimensões superiores, pois esses não se limitam mais a preencher apenas os vazios deixados pelos grãos de maior granulometria, o que é mostrado na Figura 6



Figura 6 - Efeito de afastamento (DE LARRARD, 1999)

Igualmente, com  $d_1 > d_2$ , e com os grãos da classe 2 dominantes, os grãos da classe 1 provocam um aumento de vazios nas suas proximidades. Este comportamento é denominado efeito parede, ilustrado na Figura 7.



EFEITO DE PAREDE

Figura 7 - Efeito parede (DE LARRARD, 1999)

Para incluir esses efeitos no cálculo da compacidade virtual de uma mistura binária, foram propostas modificações nas equações (5) e (7), adicionando coeficientes que representam os efeitos de afastamento e parede. As equações com a adição destes efeitos são:

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - (1 - a_{12}\beta_1/\beta_2)y_2} \quad (12)$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - [1 - \beta_2 + b_{21}\beta_2 \left(1 - \frac{1}{\beta_1}\right)y_1]} \quad (13)$$

O termo  $a_{12}\beta_1/\beta_2$  inclui o efeito de afastamento e o termo  $b_{21}\beta_2(1 - 1/\beta_1)$  inclui o efeito parede. A condição da equação (8) continua válida.

O coeficiente  $a_{12}$  é chamado de coeficiente de afastamento, e quantifica o efeito que os grãos da classe 2 exercem nos da classe 1. O coeficiente  $b_{21}$  é equivalente ao efeito parede que os grãos da classe 1 exercem sobre os grãos da classe 2.

Ambos coeficientes podem variar de 0 a 1. Quando iguais a 0, a interação entre os grãos é nula ( $d_1 \gg d_2$ ), contudo, quando são iguais a 1, tem-se uma interação total ( $d_1 = d_2$ ). O gráfico da Figura 8 exemplifica os três casos gerais de interação para uma mistura binária, supondo partículas esféricas com  $\beta = 0,74$ .

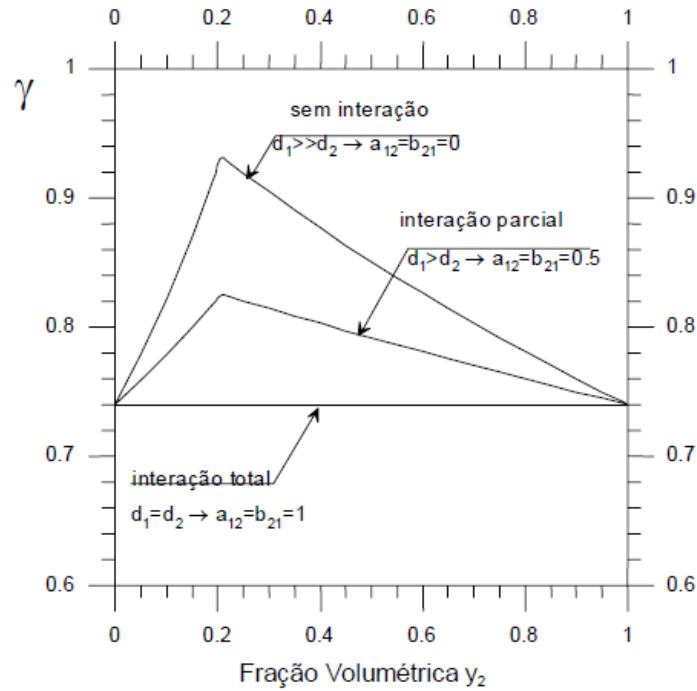


Figura 8 - Possíveis interações de uma mistura binária (FORMAGINI, 2004)

Nas partes ascendentes dos gráficos da Figura 8, o efeito de afastamento é mais relevante. A partir do ponto de compacidade máxima, no qual o efeito parede e o de afastamento são equivalentes, o efeito parede passa a dominar a relação. Na reta com interação total os efeitos parede e de afastamento correspondem ao mesmo efeito físico (SILVA, 2004).

A partir do gráfico da Figura 8, é perceptível que os coeficientes estão relacionados à inclinação da função  $\gamma(y_2)$ , em  $y_2=0$  para o efeito de afastamento, e  $y_2=1$  para o efeito parede. Assim, relacionando com a função índice de vazios  $e(y_2) = 1 - \phi(y_2)$ , pode-se chegar nas seguintes relações:

$$a_{12} = \beta_2 \left[ \left| \frac{\partial e}{\partial y_2} \right|_{y_2=0} + \frac{1}{\beta_1} \right] \quad (14)$$

$$b_{21} = \frac{\left[ \frac{1}{\beta_2} - 1 - \left| \frac{\partial e}{\partial y_2} \right|_{y_2=1} \right]}{\frac{1}{\beta_1} - 1} \quad (15)$$

De Larrard (1999) propôs, a partir de resultados experimentais, uma forma alternativa de calcular os coeficientes, utilizando-se as seguintes equações:

$$a_{ij} = \sqrt{1 - (1 - d_j/d_i)^{1.02}} \quad (16)$$

$$b_{ij} = 1 - (1 - d_i/d_j)^{1.5} \quad (17)$$

Sendo  $d_i$  o diâmetro da classe  $i$  e  $d_j$  é o diâmetro da classe imediatamente superior.

### 2.1.3. Cálculo da compacidade virtual em uma mistura polidispersa

Considerando uma mistura com  $n$  classes, na qual  $d_1 > d_2 > d_3 > d_n$ . Sabendo-se que a classe  $i$  é a classe dominante, pode-se considerar que essa sofre efeito parede de grãos com granulometria superior e efeito de afastamento de grãos mais finos, como ilustrado na Figura 9.

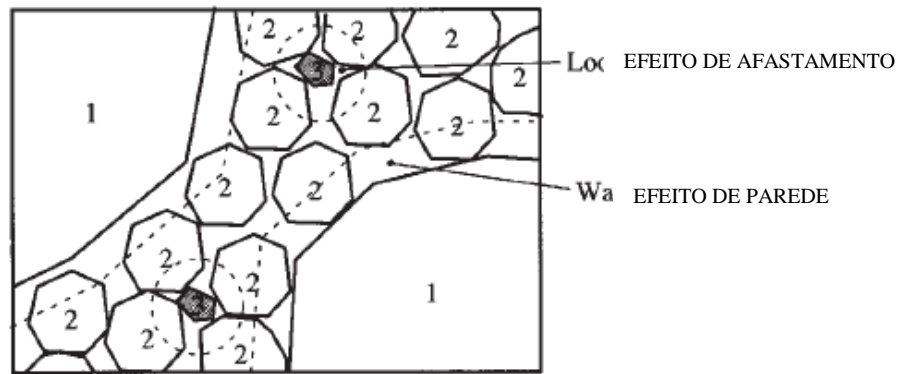


Figura 9 – Efeito parede e efeito de afastamento dos grãos (DE LARRARD, 1999)

Deste modo, De Larrard (1999) propôs a seguinte equação para calcular-se a compacidade virtual para uma mistura polidispersa:

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[ 1 - \beta_i + b_{ij}\beta_i \left( 1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j - \sum_{j=i+1}^n (1 - a_{ij}\beta_i/\beta_j)y_j} \quad (18)$$

Sendo:

$\gamma_i$  é a compacidade virtual da mistura quando a classe  $i$  é dominante

$\beta_i$  é a compacidade virtual da classe dominante

$a_{ij}$  Coeficiente correspondente ao efeito de afastamento

$b_{ij}$  Coeficiente correspondente ao efeito parede



$y_j$  é a proporção em volume da classe  $j$

A compacidade final da mistura será:

$$\gamma = \min_{1 \leq i \leq n} (\gamma_i) \quad (19)$$

Na prática, quando se utiliza uma mistura de grãos reais, é comum considerar que a mistura é constituída de um certo número de classes com diâmetros nominais, igual ao diâmetro médio dos grãos das classes. Neste caso, a compacidade da mistura é igual ao menor valor encontrado na equação (18).

#### 2.1.4. Compacidade Real

A compacidade real de uma mistura não depende apenas de parâmetros geométricos como no cálculo da compacidade virtual. A forma que a mistura é compactada tem grande influência nos arranjos dos grãos.

Para relacionar a compacidade real e a compacidade virtual, De Larrard (1999) propôs um coeficiente,  $K$ , por analogia em modelos de viscosidade de Mooney (1951) que caracteriza a energia de compactação utilizada. O modelo proposto foi:

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{y_i/\beta_i}{\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{\gamma_i}} \quad (20)$$

Como o coeficiente  $K$  foi determinado por De Larrard (1999) para diversos protocolos de empacotamento, a compacidade real pode ser determinada implicitamente na equação (20)

No caso de uma mistura monodispersa, tem-se:

$$K = \frac{1}{\frac{\beta}{\Phi} - 1} \quad (21)$$

Utilizando as equações mostradas, é possível determinar a compacidade virtual de materiais granulares. Realizando ensaios com uma energia de compactação conhecida, é possível encontrar a compacidade real e, portanto, a compacidade virtual pode ser determinada através das equações (20) e (21), pois o valor de  $K$  é, também, conhecido.

Alguns valores de  $K$  propostos por De Larrard (1999) em função do protocolo de empacotamento são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Índice  $K$  para os diversos protocolos de empacotamento (DE LARRARD, 1999)

<b>Protocolo de Empacotamento</b>	<b>Índice <math>K</math></b>
Lançamento simples	4,1
Apiloamento	4,5
Vibração	4,75
Demanda de Água	6,7
Vibração + compressão de 10 kPa	9

Assim, com a utilização da equação (21) é possível operar o MEC, pois com as compacidades virtuais encontradas, utilizam-se as equações explicitadas nos itens anteriores e obtém-se as frações volumétricas que otimizam o empacotamento de misturas.

#### 2.1.4.1. Ensaios para a determinação da compacidade real

##### a) Ensaio de demanda de água

O ensaio de demanda de água foi proposto por De Larrard (1999) e é necessário para a utilização do MEC, é utilizado para determinar a compacidade de materiais com diâmetros menores que  $100 \mu m$ . (LARRARD, 1999)

O ensaio consiste em adicionar a água no material e avaliar qual fase ele se encontra. O material pode apresentar 4 fases distintas, o que depende da quantidade de água na mistura. Tais fases são o estado de empacotamento seco, o estado de empacotamento pendular, o estado de empacotamento funicular e o estado de empacotamento capilar.

Na fase do empacotamento seco não é adicionado água à mistura e, portanto, os grãos estão com um arranjo desordenado, proporcionando um alto índice de vazios no material. (SILVA, 2004)

Na fase do empacotamento pendular tem-se uma pequena adição de água, essa se condensa e cria contato entre os grãos formando pequenas pontes líquidas. Tais pontes tendem a unir os grãos através da tensão superficial do líquido, empacotando-os. Adicionando mais água na mistura, é possível atingir um estado no qual todos os grãos estão molhados por completo, mas tem-se ainda a presença de bolhas de ar. Neste momento, o material se encontra na fase de empacotamento funicular. (SILVA, 2004)

A última fase é a de empacotamento capilar, está fase é alcançada quando se adiciona ainda mais água na mistura. A água preenche todos os espaços vazios deixados na fase funicular e assim esse é o ponto de saturação do material. A partir deste momento, um novo acréscimo de água causaria um afastamento dos grãos, e, portanto, nesse ponto tem-se o maior empacotamento. O esquema da Figura 10 caracteriza os quatro estados descritos. (SILVA, 2004)

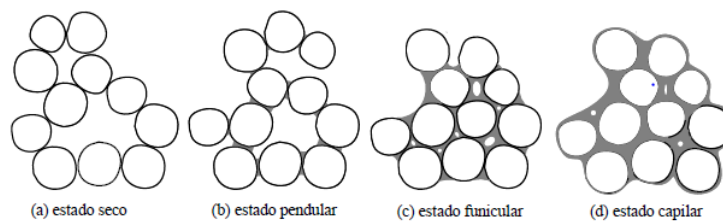


Figura 10 - Fases do material granular (SILVA, 2004)



(a) Estado seco



(b) Estado pendular



(c) Estado funicular



(d) Estado capilar

Figura 11 – Fases do empacotamento do cimento (SILVA, 2004)

O ensaio consiste na adição de água no material e na avaliação do estado que este se encontra, sendo necessário anotar o volume de água adicionado. Quando o estado capilar for atingido, a compacidade deve ser calculada a partir da equação:

$$\Phi = \frac{1}{1 + me \frac{M_{agua}}{M_1}} \quad (22)$$

Sendo  $me$  a massa específica do material ( $\text{g/cm}^3$ ),  $M_{agua}$  é a massa de água para atingir o ponto de saturação (g) e  $M_1$  é a massa do material (g).

Vale ressaltar que a determinação da massa de água dos materiais finos, tais como cimento e fíler, foram realizados a partir do ensaio experimental de demanda de água, que está descrito no item 4.2.1.1 (página 66). Para a determinação da compacidade desses materiais foi utilizada a equação (22).

#### b) Ensaio de vibração e compressão

O ensaio de vibração e compressão também foi proposto por De Larrard (1999) e é utilizado para a determinação da compacidade experimental de partículas com grãos maiores que  $100 \mu\text{m}$ . O índice de empacotamento do procedimento proposto por De Larrard (1999) é igual a 9,0.

O ensaio consiste na adição de um volume padrão do material dentro de um cilindro com dimensões conhecidas. Neste cilindro é colocado um pistão que proporcione uma pressão de compressão de 10 kPa no material. Em seguida, o cilindro e o pistão são levados a uma mesa vibratória com frequência e tempo determinados. Depois desse procedimento, a altura final da camada do material compactado deve ser medida e então a compacidade experimental pode ser calculada pela Eq. 20.

$$\Phi = \frac{4M_s}{\pi \cdot D_c^2 \cdot h \cdot p_s} \quad (23)$$

Sendo  $M_s$  a massa do material seco,  $D_c$  é o diâmetro interno do cilindro,  $h$  a altura do material compactado medida e  $p_s$  é a densidade do material. A Figura 12 esquematiza o início e o final do ensaio.

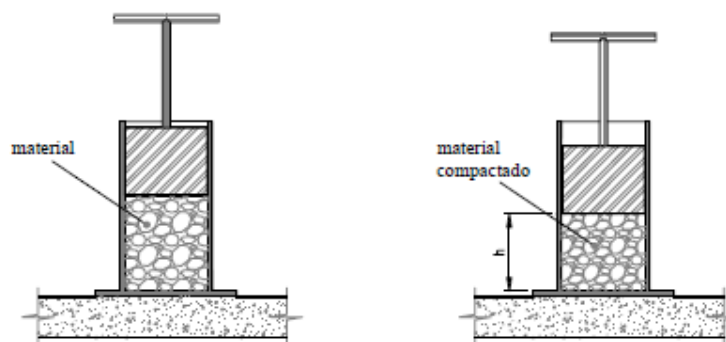


Figura 12 - Ensaio de determinação da compacidade experimental dos grãos. (SILVA,2004)

Vale ressaltar que a equação (23) foi utilizada para a determinação das compacidades dos agregados. A altura  $h$  do material compactado foi determinada experimentalmente a partir do procedimento adotado no item 4.2.1.2 (página 69).

#### 2.1.5. Efeito parede promovido pelas paredes do recipiente

O cálculo da compacidade virtual desenvolvido nos tópicos anteriores foi realizado considerando um volume infinito. Entretanto, essa condição pode não ser válida em determinadas situações, como, por exemplo, em formas de pilares e vigas e em cilindros utilizados na realização dos ensaios.

Os contornos dos recipientes exercerão efeito parede no agregado graúdo. A situação piora se a parede do recipiente for menor que cinco vezes o diâmetro do agregado, porque o empacotamento será prejudicado devido ao excessivo número de vazios nesta região (FORMAGINI, 2005).

A influência das paredes do recipiente é considerada no cálculo da compacidade virtual através do volume perturbado, proposto por Ben-Aïm (1970). Nesta metodologia, o efeito parede do recipiente é limitado a uma distância equivalente à metade do diâmetro. O volume perturbado é mostrado na figura abaixo:

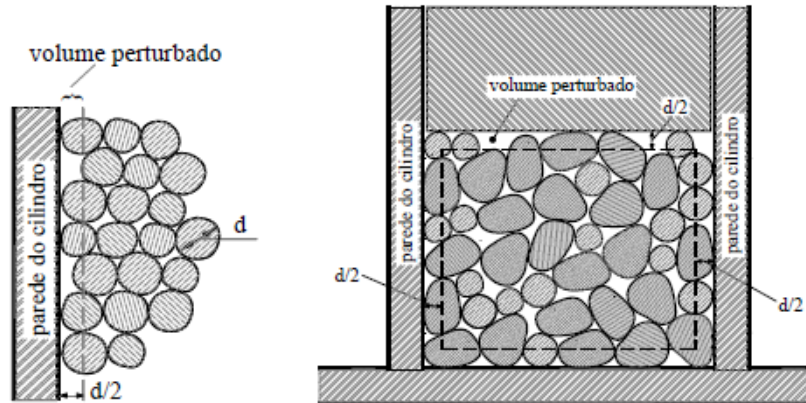


Figura 13 – Volume perturbado (SILVA, 2004)

A equação (24) descreve a compacidade virtual de misturas influenciadas pela parede do recipiente:

$$\bar{\beta}_l = [1 - (1 - k_w)V_p]\beta \quad (24)$$

Sendo o  $k_w$  um coeficiente que depende do tipo de agregado da mistura (igual a 0,88 para agregados arredondados e 0,73 para britados),  $V_p$  é o volume perturbado calculado de acordo com a Figura 13 e  $\beta$  é a compacidade virtual de uma classe de grãos. Essa equação pode ser também usada para compacidade real, pois, como mostrado na equação (21), a compacidade virtual e a real de uma classe de grãos são proporcionais.

Portanto, quando existe influência das paredes do recipiente, a compacidade virtual de uma classe de grãos encontrada na equação (21) deve ser corrigida pela equação (24).

#### 2.1.6. Inclusão das fibras no MEC

As fibras podem influenciar o empacotamento da mistura. A influência irá depender das propriedades geométricas da fibra e se ela é rígida ou flexível. As fibras podem ser curtas o suficiente para se encaixar nos espaços vazios e assim não prejudicar o empacotamento, ao contrário das fibras longas, que tendem a modificá-lo.

Pode-se notar na Figura 14 que fibras flexíveis tem a capacidade de se ajustar ao formato dos grãos, não perturbando o empacotamento da mistura (FORMAGINI, 2005).

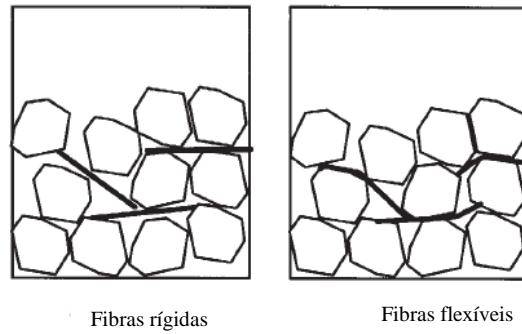


Figura 14 – Efeito das fibras rígidas e flexíveis, (DE LARRARD, 1999)

### 2.1.6.1. Conceito de zona perturbada proposta por De Larrard

A inclusão de fibras no MEC foi proposta por De Larrard (1999), fazendo uma análise similar ao efeito parede de recipientes. Porém, foi proposto um coeficiente  $k_F$  que relaciona o volume perturbado pela fibra e o diâmetro máximo do agregado. Bartos e Hoy (1996) calcularam, a partir de métodos experimentais, as compacidades de misturas de agregado mais fibras cilíndricas e retangulares. Em uma das conclusões, foi estimado que o melhor  $k_F$  encontrado foi de 0,062. O volume perturbado pode ser calculado como mostra a Figura 15.

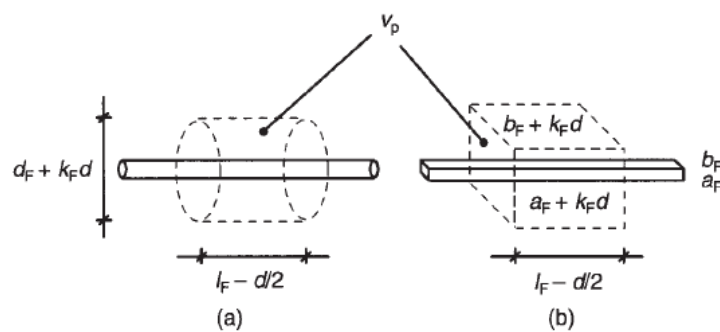


Figura 15 – Volume perturbado pela presença de fibras (DE LARRARD, 1999)

Assim, o valor da compacidade real média afetada pela inclusão das fibras pode ser obtido pela equação (25):

$$\bar{\beta}_t = (1 - \phi_f - N_{sf} \cdot v_p) \beta \quad (25)$$

Sendo:

$\bar{\beta}_t$ : Compacidade virtual média de  $\beta$ , numa mistura afetada pela parede do recipiente ou pela inclusão das fibras;

$\phi_f$ : Porcentagem de fibras no esqueleto granular;

$N_{sf}$ : Numero de fibras por unidade de volume;

$v_p$ : Volume perturbado de uma fibra;

$\beta$ : Compacidade virtual de uma classe de grãos, não perturbada;

#### 2.1.6.2. Conceito de diâmetro equivalente

Yu *et al.* (1993) propuseram um método para incluir partículas irregulares no cálculo da compacidade de uma mistura pela consideração de um diâmetro equivalente. Este método depende da forma, do tamanho dos grãos e da energia de compactação da mistura (YU e ZOU, 1998). A proposta foi encontrar um diâmetro de uma esfera fictícia que representasse as fibras na mistura. A equação proposta para uma partícula de forma cilíndrica como as fibras é:

$$d_p = \left( 3.1781 - 3.6821 \cdot \frac{1}{\Psi} + 1.5040 \cdot \frac{1}{\Psi^2} \right) d_v \quad (26)$$

Yu & Zu (1998) propuseram outra equação para o cálculo do diâmetro equivalente em uma partícula de forma convexa:

$$d_p = \frac{d_v}{\Psi^{2.785} e^{2.946(1-\Psi)}} \quad (27)$$

Nas equações (26) e (27) acima, a esfericidade ( $\Psi$ ) e o diâmetro da esfera equivalente ( $d_v$ ), podem ser encontrados pelas equações:

$$\Psi = 2.621 \cdot \frac{(L_f/d_f)^{2/3}}{1 + 2(L_f/d_f)} \quad (28)$$

$$d_v = 1.145 (L_f/d_f)^{1/3} d_f \quad (29)$$

Sendo  $L_f$  o comprimento da fibra e  $d_f$  o diâmetro da fibra.

A esfericidade pode ser definida como a área superficial de uma esfera que possui o mesmo volume da partícula. O diâmetro da esfera equivalente é definido como o diâmetro de uma esfera que contém o mesmo volume da partícula (GRÜNEWALD, 2004). Esta metodologia foi avaliada nessa pesquisa para incluir as fibras no MEC e no *Betonlab pro 3*.



Hoy (1998) aplicou o método de Yu *et al.* (1993) com uma versão anterior do MEC (DE LARRARD e SEDRAN, 1994). Posteriormente, Grunewald (2004) testou várias formas de incluir as fibras no MEC. Em sua pesquisa, o autor avaliou a compacidade experimental de misturas de agregado e fibras e comparou com os valores teóricos calculados a partir do MEC. O método foi simulado para 5 situações, nas quais os dois modelos de cálculo de Yu *et al.* (1993), Yu & Zu (1998) e o método de De Larrard (1999) foram testados. Os métodos foram ainda variados com a inclusão ou não do efeito parede causado pelo o recipiente. O autor concluiu que o método que mais se aproximou aos valores experimentais foi com o cálculo do diâmetro equivalente da fibra feito pelo método de Yu *et al.* (1993) para o formato cilíndrico e com a consideração do efeito parede.

## 2.2. RELAÇÕES ENTRE AS COMPOSIÇÕES DA MISTURA E AS PROPRIEDADES DO CONCRETO

### 2.2.1. Propriedades do concreto no estado fresco

A consideração das propriedades do concreto no estado fresco é de suma importância para realizar a dosagem de concretos, principalmente se tratando de concretos autoadensáveis. De Larrard (1999) aborda algumas características do concreto nesse estado, tais como a viscosidade plástica ( $\mu$ ), tensão de cisalhamento inicial ( $\tau_0$ ), colocabilidade ( $K'$ ), ar aprisionado, estabilidade e trabalhabilidade.

#### 2.2.1.1. Reologia do concreto no estado fresco

De acordo com De Larrard (1999), o concreto no estado fresco não se enquadra nas categorias de fluido nem de empacotamento úmido de partículas. Esse material é uma mistura granular que apresenta mudanças em seu volume quando sofre uma tensão de cisalhamento. Contudo, em baixas pressões, o concreto no estado fresco pode ser considerado como homogêneo e incompressível, desde que esse não segregue durante o escoamento e permaneça com o volume praticamente constante ao se aplicar uma tensão cisalhante.

Dessa forma, o modelo que melhor elucidada o comportamento do concreto no estado fresco é o *Hershel-Bulkley* (DE LARRARD *et al.*, 1998; FERRARIS e DE LARRARD, 1998), que relaciona a tensão cisalhante com o gradiente de deformação. Tal

modelo faz o uso de três parâmetros para o concreto no estado fresco, o que pode gerar certas complexidades e incertezas.

Diante disso, De Larrard (1999) considera o modelo Bingham como uma aproximação adequada para o concreto no estado fresco. Esse modelo é uma simplificação do modelo *Hershel-Bulkley*, e pode ser escrito como:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (30)$$

Onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento,  $\mu$  é a viscosidade plástica,  $\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação e  $\tau_0$  é a tensão de cisalhamento inicial.

#### 2.2.1.2. Viscosidade Plástica

A viscosidade plástica do modelo Bingham equipara-se com a viscosidade dos fluidos Newtonianos (De Larrard, 1999). Ferraris e De Larrard (1998) conseguiram, de forma experimental, relacionar a viscosidade plástica com os componentes da mistura do concreto, originando a seguinte equação empírica:

$$\mu = \exp \left[ 26,75 \left( \frac{\Phi}{\Phi^*} - 0,7448 \right) \right] \quad (31)$$

Onde  $\Phi/\Phi^*$  é chamado de concentração normalizada de sólidos,  $\Phi$  é a compacidade real da mistura e  $\Phi^*$  é a compacidade com o índice K igual a 9 (máximo volume que os grãos da classe  $i$  podem ocupar).

Em outro programa experimental, De Larrard *et al.* (1996b) encontraram a seguinte correlação:

$$\mu = \exp \left[ 38,38 \left( \frac{\Phi}{\Phi^*} - 0,8385 \right) \right] \quad (32)$$

A diferença entre os coeficientes das duas equações anteriores pode ser justificada pela diferença de procedimentos experimentais (DE LARRARD *et al.*, 1996). De acordo com o próprio autor, as fórmulas encontradas se adequam bem aos valores experimentais de viscosidade plástica, sendo que essas possuem erros médios de 61 e 28 Pa.s, respectivamente.

### 2.2.1.3. Tensão de cisalhamento inicial

A tensão de cisalhamento pode ser entendida como sendo o resultado da fricção entre as diversas frações granulares da mistura do concreto (DE LARRARD, 1999). Assume-se que a fricção entre as partículas de uma mistura depende do número de contatos entre os grãos. Para partículas de mesma geometria e diferentes diâmetros, grãos mais finos tendem possuir maior tensão de cisalhamento.

A partir do mesmo modelo experimental realizado para a viscosidade plástica (FERRARIS e DE LARRARD, 1998), foi obtida a seguinte equação empírica para misturas sem adição de superplastificante:

$$\tau_0 = \exp(2,537 + \sum_{i=1}^n [0,736 - 0,216 \cdot \log(d_i)] K_i) \quad (33)$$

$$K_i = \frac{\Phi_i / \Phi_i^*}{1 - \Phi_i / \Phi_i^*} \quad (34)$$

Onde  $d_i$  é o diâmetro do grão, em mm, e  $K_i$  é a contribuição da fração  $i$  para o índice de compactação.

A adição de superplastificante altera substancialmente a tensão de cisalhamento do concreto, tendo em vista que sua inclusão provoca os seguintes efeitos (Foissy, 1989):

- Cria uma melhor defloculação entre as partículas finas, aumentando a densidade de empacotamento do sistema;
- Lubrifica a superfície dos sólidos, diminuindo a fricção entre as partículas.

À vista disso, utilizando o mesmo procedimento experimental e através de uma interpolação cúbica, Ferraris e De Larrard (1998) obtiveram a equação geral da tensão inicial de escoamento para misturas com adição de superplastificante:

$$\tau_0 = \exp(2,537 + \sum_{i=1}^n [0,736 - 0,216 \cdot \log(d_i)] K_i' + \left[ 0,224 + 0,910 \left( 1 - \frac{P}{P^*} \right)^3 \right] K_c') \quad (35)$$

Onde  $K_c'$  é a contribuição do cimento para o índice de compactação da mistura,  $P$  é a porcentagem de superplastificante na mistura e  $P^*$  é a dose de saturação.

#### 2.2.1.4. Abatimento do tronco de Abrams (*Slump test*)

O *Slump test* é um ensaio amplamente utilizado que tem como principal finalidade caracterizar a consistência do concreto. Se torna interessante, portanto, criar um modelo que relacione essa propriedade com proporções da mistura do concreto (DE LARRARD, 1999).

A partir de uma base experimental, Ferraris e De Larrard (1998) determinaram, então, uma equação empírica que relaciona o abatimento do tronco de cone de Abrams com a tensão de cisalhamento:

$$s = 300 - \left( \frac{\tau_0 - 212}{\rho} \right) \quad (36)$$

Onde  $\rho$  é a densidade específica do concreto.

#### 2.2.1.5. Colocabilidade

Colocabilidade pode ser entendida como sendo a habilidade do material no estado fresco ser disposto numa forma, com um devido procedimento. Em outras palavras, a mistura assume a forma do molde com um adequado grau de consolidação (De Larrard, 1999).

Essa propriedade está ligada ao processo de compactação da mistura. O índice de compactação do concreto sem ar,  $K'$ , é um parâmetro que indica a colocabilidade da mistura. Esse índice especifica a quantidade de energia utilizada para compactar uma mistura na mesma grandeza de compactação de uma mistura teórica. Quanto maior o valor de  $K'$ , maior a dificuldade de dispor o material em uma forma, e, conseqüentemente, menor a colocabilidade da mistura. Dessa forma, para garantir a colocabilidade, é necessário atender a seguinte inequação:

$$K' \leq K^* \quad (37)$$

Sendo  $K^*$  o índice de compactação relacionado com o processo de lançamento e  $K'$  um índice determinado pela equação (20). A tabela 2 mostra alguns valores para  $K^*$  de acordo com métodos de compactação (DE LARRARD, 1999).

Tabela 2 - Colocabilidade para processos de compactação

Processo de compactação	$K^*$
Vibrado, sem plastificante	6
Vibrado, com plastificante	8
Compactado com rolo	9
Concreto projetado, sem plastificante	5,5
Concreto Projetado, com plastificante	7,5
Concreto Autoadensável	7

Desta forma, o  $K^*$  pode ser definido como sendo a energia necessária para uma mistura atingir uma determinada compacidade.

Em Sedran (2018) defini-se que a colocabilidade de uma mistura é igual à soma das colocabilidades de cada classe de material presente na mistura, como mostrado na equação (39).

$$K' = \sum_{i=1}^n K'_i \quad (38)$$

O índice  $K'_i$  traduz o estado de preenchimento do concreto pela classe  $i$ . Este conceito está ilustrado na Figura 16.

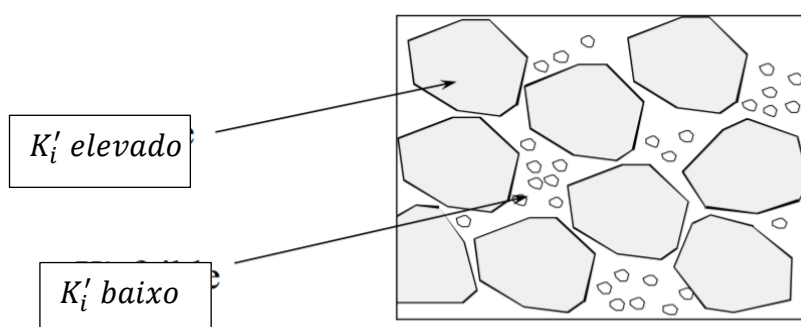


Figura 16 – Influência de cada material na colocabilidade. (SEDRAN, 2018)

O parâmetro  $K'_i$  é importante para a fabricação de um CAA no *Betonlab pro 3*, essa consideração será explicada no item 2.5.3.

### 2.2.1.6. Estabilidade

É de suma importância que o concreto no estado fresco possua uma adequada coesão, e uma limitada propensão à segregação, garantindo, dessa forma, sua estabilidade. Esta não pode ser mensurada quantitativamente mas pode ser relacionada diretamente com o diagrama de preenchimento e o potencial de segregação.

Numa mistura com  $n$  classes não dominantes, os grãos  $i$  podem se empacotar em um volume disponível permitido por outras frações. Assumindo que as partículas tendem a ficar na base do volume, a mistura terá um volume máximo de  $i$  grãos na base do volume com altura máxima igual a  $\Phi_i/\Phi_i^*$ , onde  $\Phi_i$  é o volume real que as partículas  $i$  ocupam e  $\Phi_i^*$  é o volume máximo que essas poderiam ocupar (Figura 17) (DE LARRARD, 1999).

Em vista disso, a proporção de volume segregado se dá pela seguinte expressão:

$$S = 1 - \Phi_i/\Phi_i^* \quad (39)$$

Sendo  $S$  o potencial de segregação.

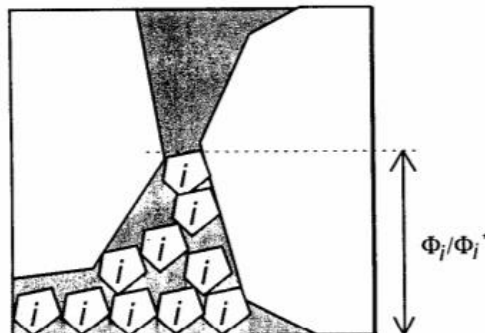


Figura 17 – Segregação de uma classe  $i$  em uma mistura (DE LARRARD, 1999)

O diagrama de preenchimento (Figura 18) é definido como sendo a relação  $\Phi_i/\Phi_i^*$  (chamado de relação de preenchimento de uma classe  $i$ ) contra o tamanho das frações de grãos na mistura (DE LARRARD, 1999). Para De Larrard (1999), entende-se por classe como sendo um grupo de grãos onde a máxima relação entre o maior e menor grão é igual a 2,5, valor associado à norma francesa, onde são utilizadas a série de tamanhos de peneiras *Renard*.

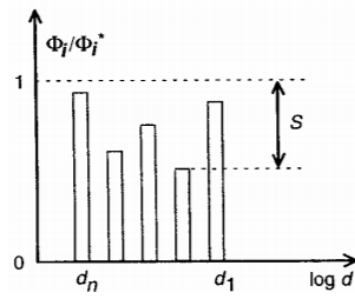


Figura 18 - Diagrama de preenchimento e segregação potencial (DE LARRARD,1999)

A partir do diagrama de preenchimento, é possível, então, determinar a segregação potencial, que corresponde ao maior volume heterogêneo na mistura. A segregação também pode ser escrita pela seguinte equação:

$$S = 1 - \text{Min} \left( \frac{K_i}{1 + K_i} \right) \quad (40)$$

Sendo  $K_i$  a contribuição da fração  $i$  para o índice de compactação.

Fazendo-se uma breve análise sobre a equação acima, percebe-se que quando o índice de compactação aumenta numa classe  $i$ ,  $\Phi_i$  se aproxima de  $\Phi_i^*$ , resultando numa menor segregação. Além disso, constatou-se que misturas bem graduadas apresentam menor segregação que misturas descontínuas (DE LARRARD, 1999).

#### 2.2.1.7. Trabalhabilidade

É de grande utilidade a simplificação de modelos para a abordagem analítica da dosagem do concreto. Dito isso, foram desenvolvidos dois modelos que avaliam a trabalhabilidade do concreto a partir da viscosidade aparente ( $\eta_a$ ). A viscosidade aparente é definida pela relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de deformação, como mostra a equação (41) (DE LARRARD, 1999):

$$\eta_a = \frac{\tau_0 + m \cdot \dot{\gamma}^n}{\dot{\gamma}} \quad (41)$$

Sendo  $\tau_0$ ,  $m$  e  $n$  parâmetros que caracterizam o comportamento do fluxo do material e  $\dot{\gamma}$  é o gradiente de deformação, nesse caso  $\dot{\gamma} = 3s^{-1}$ .

##### - Modelo de concentração de sólido

Esse modelo utiliza a abordagem de Bingham, onde o concreto é analisado como uma suspensão, onde existe a fase sólida composta por agregados e ligantes. Esse modelo

estabelece as seguintes equações, para misturas sem e com plastificantes, respectivamente:

$$\eta_a = \frac{41,1}{1 - \Phi_i/\Phi_i^*} \quad (42)$$

$$\eta_a = \frac{15,9}{1 - \Phi_i/\Phi_i^*} \quad (43)$$

- Modelo pasta/agregado

Tal modelo considera o concreto como sendo uma suspensão de agregados em uma pasta de cimento. O modelo gerou as equações, para misturas sem e com plastificantes, respectivamente:

$$\eta_a = \frac{36,2}{\left(1 - \frac{v_c}{\alpha_c}\right)^{1,08}} \cdot \frac{1}{1 - g/g^*} \quad (44)$$

$$\eta_a = \frac{19,8}{\left(1 - \frac{v_c}{\alpha_c}\right)^{1,08}} \cdot \frac{1}{1 - g/g^*} \quad (45)$$

Sendo  $v_c$  o volume de cimento em um volume unitário de pasta de cimento,  $\alpha_c$  o máximo volume de cimento em um volume unitário de pasta,  $g$  o volume dos agregados em um volume unitário de concreto e  $g^*$  a compactidade real dos agregados para um índice de compactação  $K$  igual a 9.

De Larrard (1999) considera os dois modelos simplificados adequados para a análise analítica da dosagem do concreto.

## 2.2.2. Propriedade do concreto no estado endurecido

### 2.2.2.1. Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão é realizada considerando-se o concreto como um material com uma fase inerte, composta pelos agregados, dispersa em uma matriz, composta de pasta de cimento (DE LARRARD, 1999).

Segundo De Larrard (1999), a resistência à compressão da pasta de cimento, aos 28 dias, pode ser determinada pela seguinte expressão:



$$f_{c_p} = 11,4Rc_{28} \left( \frac{v_c}{v_{cc} + v_w + v_a} \right)^{2,85} \quad (46)$$

Onde  $Rc_{28}$  é a resistência à compressão do cimento aos 28 dias,  $v_{cc}$ ,  $v_a$  e  $v_w$  são os volumes de cimento, ar e água, respectivamente, num dado volume unitário de concreto.

A equação utilizada por De Larrard (1999) para determinação da resistência à compressão da matriz do concreto é a seguinte:

$$f_{c_m} = f_{c_p} \cdot MEP^{-0,13} \quad (47)$$

Onde MEP é a máxima espessura de pasta, definida como a distância média entre os agregados dispersos na matriz (Figura 19), que segundo De Larrard (1999) pode ser estimada pela seguinte equação:

$$MEP = D \left( \sqrt[3]{\frac{g^*}{g} - 1} \right) \quad (48)$$

Onde D é o máximo tamanho do agregado,  $g^*$  é a compacidade real do agregado determinada com K igual a 9, e g é o volume dos agregados num dado volume de concreto.

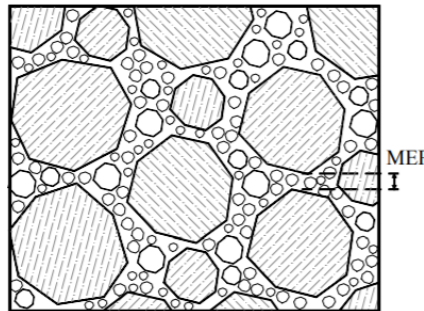


Figura 19 - Máxima espessura de pasta (SILVA, 2004)

Por fim, a partir da obtenção de todos os parâmetros apresentados acima, é possível calcular a resistência a compressão do concreto,  $fc$ , que é dada pela seguinte expressão:

$$fc = \frac{p \cdot f_{c_m}}{q \cdot f_{c_m} + 1} \quad (49)$$

Sendo  $p$  e  $q$  duas constantes empíricas que dependem do tipo de agregado e são calculadas pelas seguintes equações:

$$p = \frac{1}{f_{c_m} \left( \frac{1}{f_c} - \frac{1}{2,14 f_{c_g}} \right)} \quad (50)$$

$$q = \frac{p}{2,14 f_{c_g}} \quad (51)$$

Onde:

$f_{c_m}$  é a resistência à compressão da matriz (Equação 47)

$f_c$  é a resistência à compressão do concreto (Equação 49)

$f_{c_g}$  é a resistência à compressão do agregado graúdo

### 2.3. DOSAGEM DO CONCRETO

Com as equações das propriedades do concreto apresentadas, o problema da dosagem pode ser resolvido unindo os conceitos. A primeira condição é especificar as propriedades que o material dosado deve possuir, sendo essas dependentes do tipo da construção que o concreto vai ser utilizado. Pode-se citar, por exemplo, as seguintes especificações: abatimento do tronco de cone, tensão de escoamento, viscosidade plástica, colocabilidade, resistência à compressão e módulo de elasticidade. Essas propriedades devem ser relacionadas em uma análise matemática computacional contendo os conceitos elucidados nos itens 2.1 e 2.2, para obter um concreto otimizado.

Uma solução analítica e relações gerais foram propostas por De Larrard (1999) supondo uma mistura com os seguintes materiais:

- Agregado Graúdo
- Agregado miúdo
- Cimento
- Fíler inerte
- Água
- Plastificante

Desta forma pode-se considerar a mistura como na Figura 20.

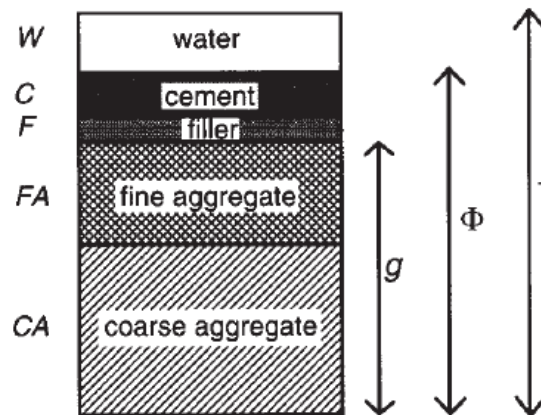


Figura 20 – Componentes da mistura de um concreto (DE LARRARD, 1999)

Como mostrado no item 2.2.2.1, o primeiro parâmetro a ser considerado na resistência à compressão de um concreto é a concentração de cimento na mistura, que se associa diretamente com a relação água/cimento ( $a/c$ ), como pode ser representado na equação:

$$f_c = \varphi(a/c) \quad (52)$$

Onde  $\varphi$  é uma função decrescente da relação água/cimento e  $f_c$  é a resistência à compressão do concreto.

Para analisar a trabalhabilidade, pode-se utilizar um dos modelos mostrados no item 2.2.1.7 onde foi especificado dois modelos para a viscosidade aparente. O primeiro, chamado modelo de concentração de sólido, é uma generalização da equação (42)(42), e pode ser escrito como: (DE LARRARD, 1999):

$$\eta_a = \Psi_3(P) \cdot \Psi_4\left(\frac{\Phi}{\Phi^*}\right) \quad (53)$$

Onde  $\Psi_3$  é uma função decrescente de superplastificante,  $\Psi_4$  é uma função crescente de  $\frac{\Phi}{\Phi^*}$ ,  $\Phi$  é o volume de sólidos em um volume unitário de concreto e  $\Phi^*$  é a compacidade dos materiais secos, incluindo cimento e fíler. (DE LARRARD, 1999)

Já o segundo, chamado modelo pasta/agregado pode ser escrito como:

$$\eta_a = \Psi_1\left(P, \frac{A}{C}\right) \cdot \Psi_2\left(\frac{g}{g^*}\right) \quad (54)$$

Que é uma expressão generalizada da equação (44).  $\Psi_1$  é uma função decrescente de superplastificante ( $P$ ) e da relação água cimento ( $\frac{A}{C}$ ), e  $\Psi_2$  é uma função crescente da relação entre o volume de agregados ( $g$ ) e a compactidade dos agregados ( $g^*$ ).

Dessa forma, a partir da consideração que a soma dos volumes dos materiais da Figura 20 é igual a 1 e de deduções a partir das equações (52), (53) e (54), determinam-se as relações que devem ser utilizadas para prever a dosagem de um concreto. Os parâmetros utilizados são as quantidades de cimento ( $C$ ), água ( $W$ ), agregado fino ( $FA$ ) e agregado graúdo ( $CA$ ), onde:

$$C = \frac{1 - g^*_{\text{máx}} \cdot \Psi_2^{-1}\left(\frac{\eta_a}{\Psi_1(P, \varphi^{-1}[f_c])}\right)}{1 + \varphi^{-1}[f_c]} \quad (55)$$

$$W = \frac{\varphi^{-1}[f_c]}{1 + \varphi^{-1}[f_c]} \cdot \left(1 - g^*_{\text{máx}} \cdot \Psi_2^{-1}\left(\frac{\eta_a}{\Psi_1(P, \varphi^{-1}[f_c])}\right)\right) \quad (56)$$

$$FA = \frac{g^*_{\text{máx}}}{(1 + x)} \cdot \Psi_2^{-1}\left(\frac{\eta_a}{\Psi_1(P, \varphi^{-1}[f_c])}\right) \quad (57)$$

$$CA = \frac{x \cdot g^*_{\text{máx}}}{(1 + x)} \cdot \Psi_2^{-1}\left(\frac{\eta_a}{\Psi_1(P, \varphi^{-1}[f_c])}\right) \quad (58)$$

As equações mostradas podem ser usadas para entender o funcionamento do “sistema do concreto”, pois essas relacionam as quantidades dos componentes com os conceitos do empacotamento compressível. A partir destas relações, De Larrard (1999) criou uma lista de regras, sendo a maioria já conhecida a partir da experiência, mas que, ao menos no conhecimento do autor, não haviam ainda sido demonstradas numericamente.

Tendo conhecimento do MEC e de como é realizada a dosagem a partir desse método, vê-se a necessidade de explicar sobre o concreto autoadensável (CAA) e

autoadensável reforçado com fibras (CAARF). Nos itens a seguir serão revisados conceitos como a propriedades, métodos de dosagem e ensaios desses materiais.

## 2.4. CONCRETO AUTOADENSÁVEL

### 2.4.1. Introdução

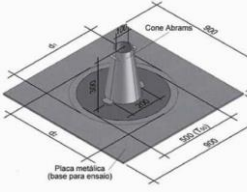
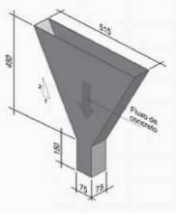
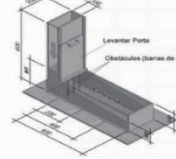
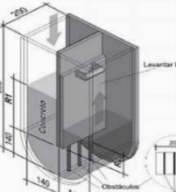
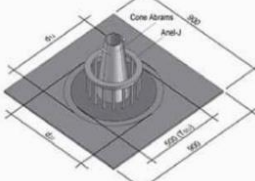
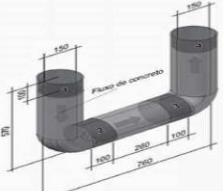
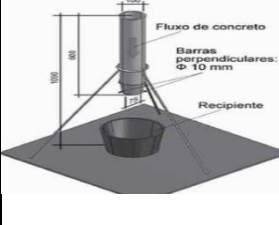
O concreto autoadensável é um concreto que pode preencher todos os espaços da forma simplesmente pelo seu peso próprio e sem necessidade de vibração (OKAMURA, 1997). Tal concreto surgiu na década de 1980, com o objetivo de solucionar a vibração em peças esbeltas com alta densidade de armadura. Porém com o desenvolvimento de novas técnicas e estudos mais aprofundados sobre o seu comportamento reológico, a autoadensabilidade passou a ser apenas uma de suas vantagens. Alguns dos principais benefícios são: eliminação de ruídos e consequente melhora no ambiente de trabalho, aumento da produtividade (da obra e da concretagem) e excelente acabamento superficial das peças (alta utilização na indústria de pré-moldados) (GOMES e BARROS, 2009).

Para que um concreto autoadensável possua todos esses benefícios, é necessário uma alta fluidez, coesão e viscosidade suficiente para garantir um fluxo contínuo e uniforme em toda a mistura (GOMES E BARROS, 2009). Desta forma, a fim de garantir a autoadensabilidade do concreto, três propriedades principais devem ser atendidas: capacidade de preenchimento, habilidade passante e resistência à segregação (EFNARC, 2002). Essas propriedades estão diretamente relacionadas à reologia do concreto, que de acordo com modelo de Bingham é relacionada à viscosidade plástica e a tensão de escoamento.

A reologia do concreto pode ser caracterizada através de um ensaio com o reômetro, onde a viscosidade plástica e a tensão de escoamento são determinadas. Sem a utilização do reômetro, existem ensaios que avaliam a autoadensabilidade através das características citadas e não a partir de parâmetros reológicos. Alguns destes ensaios são mostrados na Tabela 3. Todas as figuras da tabela foram retiradas de Gomes e Barros (2009).

Além desses, pode-se ainda citar outras metodologias como o ensaio GMT, a coluna de Rooney, o ensaio de resistência a segregação, teste de autoadensabilidade e o *fill box test* (EFNARC, 2002; GOMES e BARROS, 2009).

Tabela 3 – Ensaios para avaliação das propriedades do CAA no estado

Ensaio	Descrição	Imagem
Ensaio de espalhamento ( <i>Slump slow test</i> )	Utiliza o cone de Abrams para verificar a habilidade de preenchimento do CA. Consiste em verificar se o concreto sob uma força criada pelo seu peso próprio, consegue atingir determinada dimensão em um determinado tempo; (GOMES E BARROS, 2009)	 <p>Diagrama do ensaio de espalhamento. Um cone de Abrams (altura 300 mm, diâmetro superior 100 mm) repousa sobre uma placa metálica (base para ensaio) com dimensões 400 mm x 400 mm. O cone está sobre uma base de 100 mm de diâmetro.</p>
Ensaio do funil V ( <i>V Funnel test</i> )	É utilizado para medir a capacidade passante do CA através de um estreitamento de uma seção, sob ação apenas de seu peso próprio. O teste consiste em medir o tempo que uma amostra de 10 litros de concreto necessita para fluir totalmente através do orifício inferior do funil (OZAWA <i>et al.</i> , 1994).	 <p>Diagrama do ensaio do funil V. O funil tem uma altura total de 400 mm e um diâmetro superior de 100 mm. O diâmetro inferior do orifício é de 75 mm. A distância do topo do funil ao orifício inferior é de 100 mm.</p>
Ensaio da caixa – L ( <i>L – Box Test</i> )	Tem como objetivo avaliar a capacidade de passagem do CA, verificando se o concreto sob o seu peso próprio é capaz de passar por obstáculos, no caso armaduras. (GOMES E BARROS, 2009)	 <p>Diagrama do ensaio da caixa L. A caixa tem uma altura de 100 mm e uma largura de 100 mm. Há um obstáculo (barras de aço) no meio da caixa. O comprimento da caixa é de 100 mm.</p>
Ensaio da caixa U ( <i>U box test</i> )	Mede a capacidade de passagem e de preenchimento do CA. O concreto passa de um compartimento para outro, quanto mais íntegro e coeso passar, sem segregar, mais autoadensável será (TUTIKIAN, 2004).	 <p>Diagrama do ensaio da caixa U. A caixa tem uma altura de 100 mm e uma largura de 100 mm. Há um obstáculo (barras de aço) no meio da caixa. O comprimento da caixa é de 100 mm.</p>
Ensaio do anel J ( <i>J rings-test</i> )	Consiste em uma combinação do ensaio de espalhamento com um anel (obstáculo). E assim mede a capacidade passante e a de preenchimento. (GOMES E BARROS, 2009)	 <p>Diagrama do ensaio do anel J. Um cone de Abrams (altura 300 mm, diâmetro superior 100 mm) repousa sobre uma placa metálica (base para ensaio) com dimensões 400 mm x 400 mm. O cone está sobre uma base de 100 mm de diâmetro.</p>
Ensaio do tubo U ( <i>U – pipe test</i> )	Avalia a resistência a segregação do CA pela avaliação dos agregados graúdos após o concreto ter fluído em diferentes sentidos: de cima para baixo, na horizontal e de baixo para cima. (GOMES E BARROS, 2009)	 <p>Diagrama do ensaio do tubo U. O tubo tem uma altura de 100 mm e um diâmetro de 100 mm. O comprimento do tubo é de 100 mm.</p>
Orimet test ( <i>Orimet test</i> )	O ensaio consiste em determinar o tempo que 10 litros de concreto fluem por um tubo cilíndrico vertical com uma redução na saída. Para verificar a habilidade de passagem por obstáculos sem segregar pode ser colocado duas barras perpendiculares próximo a passagem inferior. (GOMES E BARROS, 2009)	 <p>Diagrama do ensaio Orimet test. Um tubo cilíndrico vertical com uma redução na saída. O tubo tem uma altura de 100 mm e um diâmetro de 100 mm. Há duas barras perpendiculares (diâmetro 10 mm) próximas à passagem inferior. O recipiente abaixo tem uma largura de 100 mm.</p>

É importante ressaltar que dos ensaios listados na tabela acima, serão realizados, no presente trabalho, somente os ensaios de espalhamento, funil V e caixa L.

#### 2.4.2. Métodos de Dosagem

A dosagem de um concreto autoadensável é baseada tanto nas características que proporcionam a alta fluidez como nas propriedades que garantem a passagem pelos obstáculos sem segregação (CAVALCANTI, 2006). Aliado à essas propriedades, o concreto ainda tem que obedecer a requisitos de desempenho e requisitos de durabilidade, e, portanto, é um material com uma dosagem mais complexa que o concreto convencional. Para atingir tais requisitos sem segregar, é necessário o uso de superplastificante e de uma grande quantidade de adições minerais. O superplastificante é um agente redutor de água e assim permite a confecção de concretos com grande trabalhabilidade e baixa relação a/c. As adições minerais são materiais finos que tem por finalidade melhorar a trabalhabilidade do CAA (GOMES E BARROS, 2009)

Assim, a dosagem de um concreto autoadensável apresenta diferenças consideráveis em relação às dosagens convencionais (CAVALCANTI, 2006). Atualmente, tem-se diversos métodos de dosagem para o CAA, tais como: Método de Okamura, Método EFNARC, Método de Gomes e o Método de Tutikian (EFNARC, 2002; GOMES e BARROS, 2009). Os três primeiros métodos estão serão resumidamente explicados na Tabela 6.

Outros exemplos de dosagens que podem ser citados são o da norma americana ACI 237R-07 (2007) e do RILEM TC 174-SCC (2000) que propõe valores indicativos para a dosagem do CAAA, conforme ilustrado na Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4 – Parâmetros indicativos para a dosagem conforme o (ACI 237R-07, 2007)

<b>Parâmetros</b>	<b>Limites</b>
Volume absoluto de agregado graúdo (%)	28 a 32
Fração de pasta (sobre o volume) (%)	34 a 40
Fração de argamassa (sobre o volume) (%)	68 a 72
Relação a/(c+f)	0,32 a 0,45
Consumo de cimento + finos (kg/m <sup>3</sup> )	386 a 475*

\* Menor com uso de aditivo modificador de viscosidade

Tabela 5 – Valores indicativos para dosagem conforme RILEM TC 174-SCC (2000)

<b>Parâmetros</b>	<b>Limites</b>
Volume de agregado graúdo (%)	30-34
Volume de pasta (%)	34-40
Volume de agregado miúdo no volume de argamassa (%)	40-50
Quantidade de água (l/m <sup>3</sup> )	155-200



Tabela 6 – Métodos de dosagem para CAA

Método de Dosagem	Descrição
Método de Okamura	Esse método é reconhecido como o primeiro para o CAA, foi criado na Universidade de Tóquio pelo professor Okamura. No método, é considerado que o concreto tem duas fases: a de argamassa e a de agregado graúdo, onde a relação água materiais finos e a quantidade de superplastificante são os fatores principais para a autoadensabilidade (GOMES E BARROS, 2009). Portanto o método pode ser definido nas seguintes etapas: 1 - Determinação do volume de ar incorporado no concreto; 2 - Determinar o volume de agregado graúdo igual a 50% do volume total de agregados; 3 - Determinar o volume de agregado miúdo igual a 40% do volume de argamassa; 4 - Fixar a relação água materiais finos entre 0,9 e 1; 5 - Dosagem do superplastificante; 6 - Testar a autoadensabilidade em um ensaio do tipo U, espalhamento e funil V (CAVALCANTI, 2006).
Método do EFNARC 2005	Este método, baseia-se principalmente na escolha dos materiais constituintes para que seja possível atingir as características desejadas. Dessa forma, deve-se cuidadosamente escolher os seguintes materiais: cimento, as adições, os agregados, o aditivo superplastificante e a água. Todos os materiais devem atender a critérios estabelecidos nas normas europeias. Com a escolha adequada, deve-se garantir as três propriedades do CAA seguindo alguns princípios de dosagem propostos. Por fim, devem ser realizados ensaios para que as seguintes características sejam atendidas: capacidade de passagem, capacidade de passar por obstáculos e a resistência a segregação. Os ensaios recomendados são <i>Slump flow</i> e funil V para a capacidade de passagem, Caixa L e tubo U para a passagem por obstáculos e Funil V e GMT para a resistência a segregação. (CAVALCANTI, 2006) (GOMES E BARROS, 2009)
Método de Gomes	Este método baseia-se na otimização do esqueleto granular e da pasta separadamente. A pasta deve ser otimizada a partir das relações água/cimento, superplastificante/cimento e fíler/cimento. Inicialmente, fixa-se uma relação a/c em função das características desejadas. Com essa relação definida a quantidade de superplastificante é determinada pelo ensaio do cone de March com quantidades de fíler definidas. Após estes ensaios, o ponto de saturação do superplastificante será definido e deve-se, então, avaliar a quantidade de fíler ideal a partir do ensaio do <i>mini - slump</i> . O esqueleto granular deve ser determinado misturando os agregados em quantidades variadas, colocando-os em um volume conhecido, sem compactação. Assim, é possível determinar a densidade aparente de diversas combinações, onde a escolhida será a maior possível. Desta forma, com a pasta e o esqueleto otimizados, deve-se realizar ensaios para determinar uma quantidade de pasta, que garanta os critérios de autoadensabilidade no esqueleto granular máximo encontrado. (GOMES E BARROS, 2009)

Vale ressaltar que os métodos elucidados acima foram inseridos a título de revisão, mas na presente pesquisa será adotado o MEC para a dosagem do concreto autoadensável reforçado com fibras. A seguir, serão apresentados importantes conceitos, propriedades e até outros métodos de dosagem para o CARF, material que será utilizado nessa pesquisa.

## 2.5. CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS

### 2.5.1. Introdução

O Concreto Autoadensável (CAA) possui como sua principal característica a habilidade de preencher um determinado volume com um baixo índice de vazios e sem a necessidade do processo de vibração. Diante disso, torna-se um material de suma importância na área de construção civil, tendo em vista sua maior praticidade, eliminando o processo de vibração, e com isto, possibilitando se obter uma maior produtividade no processo construtivo.

O Concreto Reforçado com Fibras (CRF) também possui fundamental relevância no contexto da Construção Civil, tendo em vista suas características de absorção de energia na pós-fissuração de materiais à base de cimento, garantindo maior ductilidade desse material (BARROS e FIGUEIRAS, 1998). Além disso, as fibras alteram as propriedades do concreto, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. As pesquisas mostram que o reforço do concreto com fibras melhora suas propriedades mecânicas no comportamento pós-fissuração, principalmente se o comportamento do compósito for *strain hardening* (KHUNTIA e STOJADINOVIC, 2001; CUCCHIARA *et al.*, 2004; KHALOO e AFSHARI, 2005; FRITIH *et al.*, 2013; KHALOO *et al.*, 2014)

Em um Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras (CARF), as vantagens associadas à inclusão de fibras numa mistura, principalmente no estado endurecido, se unem com os benefícios do concreto autoadensável no estado fresco (GRÜNEWALD, 2004), gerando um material inovador na tecnologia dos concretos. A ideia de se obter um concreto fibroso que pode ser lançado com uma adequada trabalhabilidade, sem a necessidade de vibração, torna esse material de grande utilidade para a Construção Civil, melhorando a eficiência na concretagem e promovendo benefícios tecnológicos e ambientais (MARANGON, 2006).

Contudo, esse material necessita de alguns cuidados. Primeiramente, a inclusão de fibras pode afetar a capacidade de fluxo do concreto no estado fresco (PEREIRA *et al.*, 2008). Além disso, a orientação e a distribuição das fibras pode ser afetada pelo fluxo da mistura, e o comportamento da ligação entre as fibras e o concreto autoadensável pode ser diferente, comparado com o concreto convencional (GRÜNEWALD, 2004).

De acordo com Khaloo e Afshari (2005), atualmente concretos reforçado com fibras são utilizados em diversas áreas da Construção Civil, tais como em obras rodoviárias, calçadas, pontes, revestimento em segmentos de túneis e em lajes. Groth (2000) relata algumas aplicações comuns de concretos reforçados com fibras, como concreto projetado, pisos industriais e elementos pré-fabricados.

## 2.5.2. Materiais Constituintes

As fibras podem ser usadas no CAA da mesma maneira que são usadas em um concreto convencional (EFNARC, 2005). Desta forma, os materiais que compõem o CARF devem possuir as mesmas diretrizes que os utilizados para o CAA. A seguir serão apresentados os principais materiais e as suas características necessárias para a produção do CARF.

### 2.5.2.1. Cimento

Todos os tipos de cimentos Portland podem ser utilizados para a fabricação do CARF (GOMES e BARROS, 2009). Porém, a EFNARC (2005) limita a quantidade de  $C_3A$  para que ocorra uma adsorção uniforme do superplastificante (CAVALCANTI, 2006).

Segundo Cavalcanti 2006, o tipo de cimento mais adequado é o CP II, pois é o mais utilizado no mercado brasileiro e atende a exigência da EFNARC (2005). Geralmente, a quantidade de cimento no CAA é em torno de 250 a 450 Kg/m<sup>3</sup>, dependendo das adições utilizadas (GOMES E BARROS, 2009)

### 2.5.2.2. Agregados

Os concretos autoadensáveis (CAA) e autoadensáveis com fibras (CARF) devem possuir uma maior quantidade de pasta em relação ao concreto convencional. Além disso, a dimensão máxima do agregado graúdo deve ser reduzida, e também seu volume (CAVALCANTI, 2006). A dimensão máxima do agregado graúdo normalmente utilizada

é de até 20 mm (EFNARC, 2005) e com um volume entre 28% e 35% (GOMES e BARROS, 2009).

Gomes e Barros (2009) ainda ressaltam a importância de se controlar a absorção de água, a quantidade de finos e a umidade dos agregados. Outra característica importante é os agregados possuírem uma curva granulométrica contínua, o que proporciona melhor resistência a segregação (MARAGON, 2006)

Seguindo essas recomendações, todos os tipos de agregados graúdos e miúdos podem ser utilizados na dosagem de um CA. (EFNARC 2005).

#### 2.5.2.3. Aditivos

Os aditivos mais comuns na fabricação do CAA são o superplastificante e o modificador de viscosidade. O superplastificante é indispensável para a obtenção da fluidez necessária (GOMES e BARROS, 2009). É utilizado para evitar a floculação das partículas de cimento e produzir uma mistura dispersa (MARAGON 2007). Segundo Rixom e Mailvaganam (1999) os aditivos superplastificantes reduzem o valor da tensão de escoamento inicial e da viscosidade plástica das pastas de cimento, melhorando assim a sua autoadensabilidade.

Os aditivos modificadores de viscosidade são utilizados para melhorar a coesão, a estabilidade e a mobilidade do concreto. São utilizados para cumprir a falta de finos e, segundo Felekoglu *et al.* (2003), caso seja utilizada a nova geração de superplastificantes, juntamente com uma quantidade adequada de adições minerais (finos), não é necessário a utilização de aditivos modificadores de viscosidade para se obter um concreto autoadensável.

#### 2.5.2.4. Adições

Devido as características reológicas do CAA, as adições são utilizadas para melhorar a trabalhabilidade e, também, para diminuir a quantidade de cimento e, por consequência, o calor de hidratação (EFNARC 2005).

O uso de adições reduz a fricção entre os agregados aumentando a viscosidade e a resistência à segregação pela formação de uma granulometria contínua em que a maioria dos espaços vazios são preenchidos. Desta forma, melhora a coesividade, o autoadensamento e a estabilidade do CAA (MARAGON 2007).

O diâmetro médio das partículas tem grande relevância na ação das adições. Segundo Khayat et al. (1999), diâmetros médios na faixa de 80  $\mu\text{m}$  acarretam numa melhor viscosidade. Entretanto, uma grande quantidade de autores indica que os finos devem possuir diâmetro médio menores que 125  $\mu\text{m}$  (GOMES e BARROS, 2009).

É possível utilizar diversos tipos de adições, desde que essas cumpram as exigências de diâmetro citadas. As adições são divididas em tipo 1 e tipo 2, sendo o primeiro materiais inertes ou semi inertes que melhoram as propriedades físicas da mistura. As adições do tipo 2 podem reagir e formar hidratos melhorando a resistência e a durabilidade do concreto (MARANGON, 2006; GOMES e BARROS, 2009).

Para as adições do tipo 1, pode-se citar: fíler calcário, quartzo moído e resíduo de serragem de mármore e granito. Do tipo 2 tem-se por exemplo as cinzas volantes, a sílica ativa, a escória de alto forno, cinza de casca de arroz e o metacaulim.

### 2.5.3. Métodos de Dosagem CAARF

O CAARF deve possuir propriedades similares ao CAA no estado fresco para que sua autoadensabilidade seja atendida, portanto os princípios dos métodos expostos na Tabela 6 podem ser utilizados. Atualmente, a maioria das metodologias de dosagens do CAARF são adaptações dos métodos criados para o CAA, essas adaptações estão relacionadas com a inclusão das fibras e seu efeito na trabalhabilidade do concreto no estado fresco.

Ferrara *et al.* (2007) propôs uma metodologia de dosagem do CAARF baseada no modelo reológico da pasta criado por Saak *et al.* (2002) para o CAA. Tal modelo baseia-se na otimização da pasta e do esqueleto granular separadamente, e sua união por um parâmetro, definido como o dobro da espessura média da camada de pasta que envolve os agregados ( $d_{ss}$ ). Esse parâmetro depende do diâmetro médio dos agregados, do volume de pasta e do volume de vazios.

O efeito das fibras é adicionado pelo cálculo de um diâmetro equivalente. Desta forma, foi possível adicionar o efeito das fibras no cálculo do diâmetro médio dos agregados e conseqüentemente no conceito do ( $d_{ss}$ ). Nas equações (59)-(61) são apresentadas as expressões propostas por Ferrara *et al.* (2007) e a do  $d_{ss}$ , proposta no método de Saak et al (2001).

$$d_{ss} = \sqrt[3]{1 + \frac{V_{pasta} - V_{vazios}}{V_{concreto} - V_{pasta}}} \quad (59)$$

$$d_{eq-fibras} = \frac{3L_f \cdot \gamma_{fibra}}{1 + 2 \frac{L_f}{d_f} \cdot \gamma_{agregado}} \quad (60)$$

$$d_{av} = \frac{\sum_i d_i m_i + d_{eq-fibras} m_{fibras}}{\sum_i m_i + m_{fibras}} \quad (61)$$

Onde  $V_{pasta}$  é o volume de pasta,  $V_{vazios}$  o volume de vazios,  $V_{concreto}$  o volume do concreto,  $d_{av}$  o volume médio dos agregados,  $L_f$  o comprimento da fibra,  $d_f$  o diâmetro da fibra,  $\gamma_{fibra}$  e  $\gamma_{agregado}$  as massas específicas de fibra e agregado,  $d_{eq-fibras}$  o diâmetro equivalente das fibra,  $d_i$  o diâmetro dos materiais e  $m_i$  e  $m_{fibras}$  representam as massas dos materiais constituintes e das fibras, respectivamente.

Baseado nesses conceitos, Ferrara *et al.* (2007) estudou a correlação entre as propriedades da pasta, do esqueleto granular e da relação entre o volume de pasta /agregado. Como tais parâmetros são relacionados pelo  $d_{ss}$ , após a otimização da pasta e do esqueleto granular, foram realizados ensaios em concretos com diferentes valores de  $d_{ss}$ , que foi modificado variando o volume de pasta. Com os resultados experimentais obtidos, foi construído um gráfico que relaciona as propriedades reológicas da pasta e o  $d_{ss}$ , onde existem zonas de baixa deformabilidade, de autoadensabilidade e de elevada segregação. Segundo o autor, tal gráfico resume os conceitos do método e garante que esses podem ser utilizados para a dosagem do CARF, seguindo a metodologia esquematizada na Figura 21.

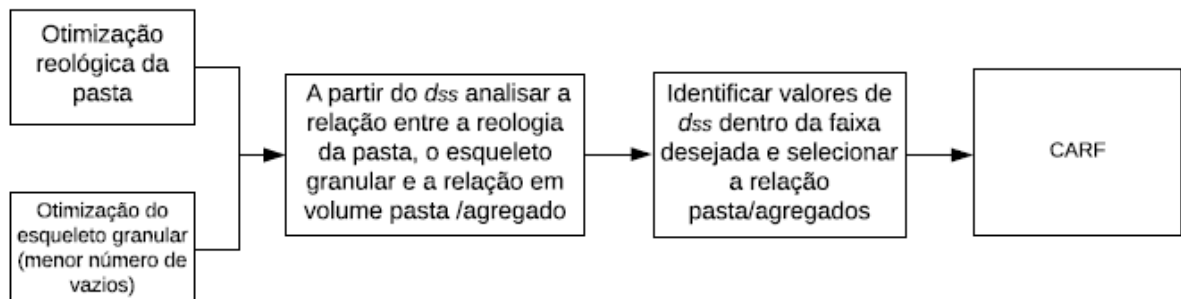


Figura 21 – Esquema do método de dosagem do CARF proposto por Ferrara et al (2007)

Outra metodologia que vem sendo aplicada na dosagem do CARF é o Método do Empacotamento Compressível (MEC), que foi explicado no item 1.1 e é explicada em detalhes no livro *Concrete Mixture Proportioning* de De Larrard (1999). Esta metodologia foi utilizada por exemplo, em Silva (2004), Grunewald (2004), Formagini (2005), Maragon (2006) e Velasco (2008).

Segundo De Larrard (1999), a principal diferença na dosagem do CAA é a utilização do superplastificante junto com uma grande quantidade de finos. Para que tais considerações sejam atendidas, o autor propõe limites para alguns dos parâmetros explicados no item 1.2, sendo esses necessários para garantir a autoadensabilidade. Tais parâmetros são mostrados na Tabela 7 e devem ser fixados quando o programa Bentolab Pro for utilizado.

Para incluir as fibras no método, De Larrard (1999) propôs a consideração de uma zona perturbada. Por meio deste conceito desenvolveu uma equação para o cálculo da compacidade de uma mistura contendo fibras, como explicado no item 2.1.6.1.

Tabela 7 – Parâmetros fixados por De Larrard para se garantir a autoadensabilidade de um concreto

<b>Critério</b>	<b>Valor</b>
Resistencia a segregação	$s \leq 0,8$
Tensão de escoamento	$\tau_0 \leq 400 Pa$
Viscosidade Plástica	$\mu \leq 200$
Contribuição dos Finos	$K'f \geq 3,3$
Contribuição dos Agregados Miúdos	$K'gg \leq 1,4$

Os parâmetros  $K'f$  e  $K'gg$  são parcelas da colocabilidade da mistura ( $K'$ ) explicada em detalhes no 2.2.1.5. Tais parâmetros são restringidos para evitar a segregação do concreto. O  $K'f$  é limitado para evitar a exsudação, ou seja, indicar que a quantidade de finos seja suficiente para que esse tipo de segregação não aconteça. Por outro lado, o  $K'gg$  é fixado para evitar a segregação provocada pelo bloqueio dos agregados graúdos.

Em Pereira (2008) foi utilizado um método de dosagem simplificado baseado em três etapas. A primeira consiste na escolha dos materiais constituintes da pasta a partir de ensaios para determinar a quantidade ideal de fíler. Na segunda, foi determinada a melhor proporção entre agregados graúdos e  $30\text{kg/m}^3$  de fibras, onde a mistura escolhida foi a mais compacta. A terceira e última etapa é avaliação da mistura de pasta e agregados. Nessa etapa, o autor variou a quantidade de pasta em cada mistura e avaliou o espalhamento e o tempo de escoamento, até atingir um diâmetro igual a 50cm ( $t_{50}$ ) para obter resultados pertinentes ao de um concreto autoadensável.

Outras metodologias ainda podem ser citadas, tais como as apresentadas por Grunewald (2004) e Pajk (2013). Pajk (2013) utilizou o Método de Okamura para obter CARF com diferentes adições de fibras, para isso, as quantidades de agregados graúdos e miúdos foram fixadas e apenas a quantidade de água e de superplastificante foram variadas. Já Grunewald (2004) utilizou o MEC com diferentes metodologias de inclusão das fibras no método. Diferentemente de De Larrard (1999), o Grunewald utilizou a metodologia de Yu et al (1993) que propõe a utilização das fibras como um agregado com um diâmetro equivalente calculado pela equação (26).

É importante ressaltar que no presente trabalho, serão analisadas as abordagens de diâmetro equivalente, exposta por Yu et al (1993), e de volume perturbado, conceito introduzido por De Larrard (1999), para a inclusão de fibras no MEC.

#### 2.5.4. Propriedades no Estado Fresco

Como visto na seção anterior (item 2.4), para se garantir uma adequada trabalhabilidade de um concreto autoadensável devem ser atendidas as propriedades de resistência a segregação, fluidez e capacidade de preenchimento (BARRAGÁN *et al.*, 2004). O mesmo se aplica para o CARF, entretanto, com o desafio de garantir a estabilidade do concreto com a inclusão das fibras.

De acordo com Swamy (1975), a trabalhabilidade do concreto é afetada pelo tamanho, formato e concentração de agregados graúdos, bem como pela geometria e o volume de fibra. Grünewald (2004) relata que as fibras alteram a trabalhabilidade do concreto devido aos seguintes motivos:



- A forma das fibras é mais alongada, comparada com os agregados, gerando uma maior área superficial num mesmo volume;
- Fibras rígidas costumam alterar a estrutura do corpo granular da mistura, gerando o efeito de afastamento, já citado anteriormente;
- A característica da superfície da fibra se difere com a superfície do cimento e dos agregados;

Groth (2000) realizou ensaios para verificar a influência das fibras na trabalhabilidade de concreto autoadensável. Foram ensaiadas diferentes misturas com distintos tamanhos e volumes de fibra, além da adição de filler e superplastificante. Foram realizados os ensaios de: espalhamento (*slump flow*), anel J (*J ring test*) e caixa L (*L-box test*) sem barras, foram obtidas as seguintes constatações:

- Algumas misturas apresentaram um menor valor de espalhamento com o aumento da quantidade de fibras ou com maior fator de forma das fibras ( $L_f/d_f$ ). Este é um parâmetro que relaciona o comprimento ( $L_f$ ) com o diâmetro ( $d_f$ ) das fibras.
- O tempo de escoamento para chegar a 50 cm de diâmetro no ensaio de espalhamento foi maior para o CAARF, quando comparado com o CAA.
- Dentro dos limites aplicáveis de teor e tipo de fibras, o efeito dessas na trabalhabilidade de um concreto autoadensável bem dosado é desprezível. Contudo, dependendo das proporções de materiais utilizados na dosagem do concreto, muitas misturas apresentaram grande perda na trabalhabilidade após a inclusão das fibras.

Ghanem e Obeid (2015) realizaram ensaio do anel J em misturas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço, usando, nas misturas, mesmos teores de fibras de diferentes tipos. Nos resultados obtidos não foram encontrados problemas expressivos quanto à fluidez, segregação, habilidade de preenchimento ou capacidade de escoamento. Entretanto, observou-se que a inclusão de fibras diminuiu a trabalhabilidade do concreto e sua capacidade de passagem, aumentando a possibilidade de ocorrer bloqueamento. Além disso, notou-se que a trabalhabilidade do concreto autoadensável diminuiu com o aumento do fator de fibra.

Bozkurt e Yazicioglu (2015) também estudaram as propriedades do CAARF no estado fresco. Eles observaram que, geralmente, o uso de fibras menores resulta em melhores propriedades no CAARF no estado fresco. Além disso, a partir do ensaio da caixa L, constatou-se que, se fibras longas forem utilizadas no concreto, a distância entre as barras de aço da estrutura deve ser maior que o comprimento das fibras, a fim de se evitar bloqueamento.

Grünewald e Walraven (2001) realizaram experimentos para determinar a influência das fibras de aço nas propriedades no estado fresco do CAARF, e chegaram nos seguintes resultados:

- Com relação ao ensaio de espalhamento, notou-se que quanto maior o fator de forma da fibra, menor o espalhamento do CAA.
- O comprimento da fibra, o fator de forma da fibra e o aumento da viscosidade são fatores que afetam a capacidade passante da mistura. Foi encontrada a distância mínima de 62 mm entre barras de aço para que não ocorra bloqueio na passagem do concreto. Esse valor encontrado foi para fibras Dramix 45/30 RL e 80 kg/m<sup>3</sup>. Comparado com o concreto autoadensável (CAA), os autores concluíram ser preciso um maior espaçamento entre barras de aço numa estrutura para não ocorrer o fenômeno de bloqueamento.
- Verificou-se que, uma considerável quantidade de fibras permitiu o comportamento autoadensável do concreto. O teor de fibra no concreto é influenciado pela composição da mistura.

Outro aspecto relevante a ser discutido é a influência do concreto autoadensável na distribuição e orientação das fibras. Petersson (1998) realizou um estudo sobre a distribuição das fibras no concreto e, a partir de imagens obtidas através da utilização de raios-X, notou-se que as fibras apresentaram uma boa distribuição no concreto, mesmo apresentando uma pequena sedimentação.

#### 2.5.5. Propriedades no estado endurecido

As fibras de aço melhoram várias características do concreto autoadensável no estado endurecido (GRÜNEWALD, 2004). O uso de fibras no concreto reduz o

comportamento frágil desse material, e, sob tensões de tração e compressão o comportamento do concreto reforçado com fibras se torna dúctil (KHALOO *et al.*, 2014).

Khaloo *et al.* (2014) realizaram estudos sobre o comportamento mecânico do CARF, utilizando misturas com diferentes teores de fibras (0,5%, 1%, 1,5% e 2%, em volume) e perceberam que a presença das fibras de aço aumenta a resistência à tração e à flexão do concreto autoadensável, bem como sua ductibilidade.

Fritih *et al.* (2013) estudaram sobre o comportamento à flexão e ao cisalhamento do CARF em vigas de seção retangular  $150 \times 280$  mm e vão de 2800 mm. As vigas se diferenciavam pela presença, ou não, de estribos e pelo reforço longitudinal. Os resultados mostraram que, de forma geral, a propagação das fissuras foi retardada pela inclusão das fibras, em termos de abertura e altura, comparado com a amostra de concreto autoadensável (CAA). De acordo com Fritih *et al.* (2013) isso pode ser justificado pela capacidade da fibra transferir tensões para o concreto ao longo da fissura.

Ghanem e Obeid (2015) realizaram ensaios para a análise do efeito das fibras nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável. No ensaio de compressão foram ensaiados corpos de prova  $100 \times 100 \times 100$  mm. Notou-se que a resistência à compressão do concreto autoadensável aumentou ligeiramente com a adição de fibras de aço. Já no ensaio de flexão, foram ensaiados corpos de prova de  $100 \times 100 \times 500$  mm, com vão de 450 mm. A partir desse ensaio, foi observado que um maior fator de forma (relação entre o comprimento e diâmetro da fibra) provoca melhores propriedades de flexão, visto que fibras mais longas tendem a colmatar mais as fissuras e absorver mais energia.

No trabalho de caracterização do CAARF, realizado por Maragon (2006), foram analisadas propriedades mecânicas desse concreto. Amostras com diferentes volumes de fibras foram ensaiadas, chegando às seguintes conclusões:

- No ensaio de compressão sob deformação axial controlada notou-se que o aumento da adição de fibras não promoveu alteração significativa na resistência à compressão do concreto autoadensável, mas sim proporcionou uma maior ductibilidade ao concreto;
- Amostras prismáticas de dimensões  $100 \times 100 \times 400$  mm foram utilizadas para o ensaio de flexão e cisalhamento. No primeiro, foi observado que a adição de fibras aumenta consideravelmente a tenacidade do concreto. Notou-

se que o aumento do volume das fibras de aço aumenta a tensão última, em relação à tensão referente à formação da primeira fissura, e, após a fissuração, os concretos ensaiados apresentaram aumento na ordem de 1,5 a 2,1 vezes na sua resistência última;

- Com relação a resistência de cisalhamento, notou-se que essa foi significativamente afetada pela adição de fibras, em consequência do aumento da tensão última, em relação ao concreto referência sem fibras. De acordo com os resultados do autor, as resistências últimas de cisalhamento dos concretos com fibras foram de 3,8 a 4,8 vezes superior a resistência última do concreto de referência.

Apesar de alguns autores encontrarem um discreto aumento na resistência à compressão do concreto reforçado com fibras, algumas referências (MAIDL, 1995; KONIG e KUTZING, 1999; SATO *et al.*, 2000) constataram que a adição de fibras no concreto não gera um aumento significativo na sua resistência à compressão. De acordo com ACI (ACI, 1996; ACI, 1998), a resistência à compressão do concreto é pouco afetada pela presença de fibras, podendo ocorrer um ligeiro acréscimo ou decréscimo na resistência, dependendo das características das próprias fibras e dos teores utilizados. (se está no comportamento *strain hardening*)

A partir do que foi explicitado na revisão bibliográfica é possível realizar o programa experimental do trabalho, tendo em vista que foram percorridos conceitos de suma importância para o entendimento do MEC, tais como a compacidade real e virtual classes de grãos, misturas binárias, efeito das fibras na compacidade dos grãos e a determinação da compacidade dos grãos a partir do ensaio de demanda de água e vibração e compressão, que serão estudados no presente trabalho. Além desses conceitos, houve a apresentação das propriedades do concreto no estado fresco, que será utilizado para a dosagem do concreto a partir do *software Betonlab Pro*, e das propriedades e outros métodos de dosagem de concretos autoadensáveis e autoadensáveis reforçado com fibras. Diante do exposto, é possível, então, prosseguir para metodologia.

### 3. METODOLOGIA

Nesta seção são descritos os estudos realizados e os materiais e métodos utilizados na pesquisa para atingir os objetivos propostos.

A pesquisa foi realizada através de sete estudos principais: (1) caracterização dos materiais constituintes; (2) determinar protocolos de ensaios de compacidade no LEM; (3) determinação do índice de compactação de uma mistura granular,  $K$ , característico do procedimento implementado; (4) avaliação dos procedimentos simplificados para consideração das fibras no MEC; (5) validação das dosagens realizadas fazendo-se uso do MEC; (6) realização de estudo de dosagem do CAARF, (7) comparação das dosagens obtidas para os CAARF com os limites recomendados pelo ACI 237R-07 (ACI, 2007) e pelo RILEM TC 174-SCC (RILEM, 2001) e (8) Estudo de sensibilidade na alteração do parâmetro  $K$ . Os estudos (1), (3), (4) e (5) são experimentais. O estudo (2) é teórico e os estudos (6) e (7) são estudos analíticos. O organograma da Figura 22 apresenta a ordem cronológica de como os estudos foram realizados.

Os estudos experimentais foram todos realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM/UnB).

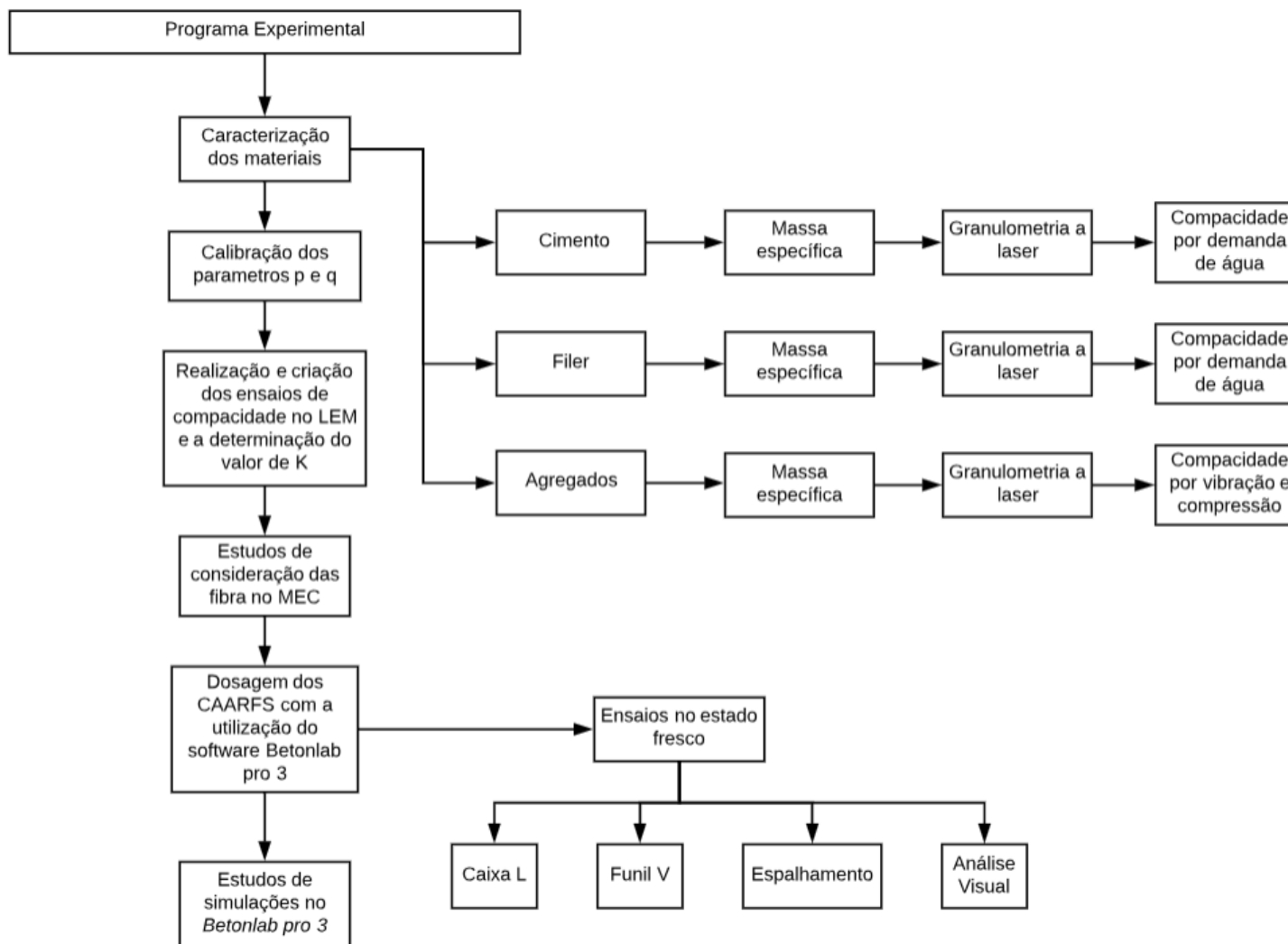


Figura 22 – Organograma dos estudos realizados

### 3.1. MATERIAIS CONSTITUINTES

Nos próximos tópicos desta seção serão apresentados os materiais empregados nos diversos estudos que compõem esta pesquisa. Os materiais utilizados foram: cimento *Portland*, fíler calcário, agregados miúdo e graúdo, aditivo superplastificante e fibras. Todos os materiais empregados são materiais disponíveis na região de Brasília – DF.

#### 3.1.1. Cimento

Foi utilizado o cimento *Portland* do tipo CP II – F – 40, segundo a classificação da NBR 5732 (1991). A razão para a escolha deste tipo de cimento está no fato de se ter grande disponibilidade e ser amplamente utilizado no mercado local.

#### 3.1.2. Agregados

##### 3.1.2.1. Agregado miúdo

Foram utilizados dois agregados miúdos: uma areia fina de quartzo rosa e uma área média lavada de rio , ambas facilmente disponíveis e comumente utilizadas no Distrito Federal. Na Figura 23 são mostradas as areias utilizadas. Também foi utilizada a areia grossa somente para o ensaio de vibração e compressão, com finalidade de realizar o estudo da determinação do índice de compactação ( $K$ ) para o LEM.



(a) areia fina rosa



(b) areia média quartzosa

Figura 23 - Aspecto das areias utilizadas nos estudos: (a) areia fina rosa; (b) areia média quartzosa.

### 3.1.2.2. Agregado Graúdo

Nos diferentes estudos realizados, foram utilizados dois agregados graúdos: uma brita 0 (B0), com diâmetro máximo característico igual a 9,5 mm e uma brita 1 (B1), com diâmetro máximo característico igual a 19 mm, ambos facilmente disponíveis e comumente utilizados no Distrito Federal. A brita 0 utilizada é de origem basáltica e a brita 1 de origem granítica. Na Figura 24 são mostrados os agregados graúdos utilizados.

É importante ressaltar que a brita 0 foi utilizada para o estudo da inclusão das fibras no MEC e para as dosagens realizadas no *Betonlab Pro 3*. Já a brita 1 foi utilizada somente em ensaios de compressão e vibração em misturas binárias.



(a) brita 0

(b) brita 1

Figura 24 - Aspecto dos agregados graúdos utilizados: (a) brita 0; (b) brita 1.

### 3.1.3. Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado foi o *Master Glenium 51*, fornecido pela BASF. Este superplastificante consiste num aditivo superplastificante de terceira geração, à base de éter policarboxilato modificado.

Segundo o fabricante (BASF, 2016), os polímeros de éter policarboxílico possuem largas cadeias laterais, que se depositam na superfície das partículas de cimento iniciando o mecanismo de dispersão eletrostática, porém as cadeias laterais são unidas à estrutura poliméricas gerando uma energia que estabiliza a capacidade de refração e dispersão das partículas de cimento. Com esse mecanismo, mesmo durante o início do processo de hidratação do cimento o polímero continua atuando promovendo a dispersão das partículas.



O fabricante indica que o *Master Glenium 51* deve ser utilizado nas dosagens de 0,2 a 1,0% sobre o peso de cimento. Testes experimentais realizados previamente por outros integrantes do mesmo grupo de pesquisa, indicaram que o teor de saturação do Master Glenium 51 realizado pelo cone de Marsh é igual a 0,4% (peso de sólidos do superplastificante sobre o peso de cimento) quando utilizado com o cimento CP II F empregado neste trabalho. Segundo o fabricante, a dosagem ótima pode levar a uma redução de água de até 40%, podendo variar de acordo com a temperatura ambiente, tipo de cimento, quantidade de finos na mistura, relação a/c, condições de mistura e tipos de agregados.

Os dados técnicos do aditivo superplastificante estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Dados técnicos do aditivo superplastificante

<b>Base química</b>	Éter policarboxílico
<b>pH</b>	5 a 7
<b>Aspecto</b>	Líquido
<b>Cor</b>	Branco turvo
<b>Densidade</b>	1,067 a 1,107 g/cm <sup>3</sup>
<b>Teor de sólidos</b>	28,5% a 31,5%

\*dados fornecidos pelo fabricante *Master Glenium 51*

#### 3.1.4. Fíler

Devido a necessidade do CARF apresentar uma maior coesão e resistência à segregação, é necessário incorporar uma grande quantidade de finos à mistura. Neste trabalho, optou-se por utilizar duas adições minerais como finos: um fíler A, calcítico, fornecido pela empresa Goiasfiller e um fíler B, também calcítico, utilizado no trabalho de Miranda (2018). O fíler B foi utilizado pois durante o desenvolvimento da pesquisa percebeu-se que o fíler A não seria adequado para fabricar um concreto autoadensável por ser um fíler grosso.

A composição química do fíler A, fornecida pelo fabricante, e do fíler B, apresentada no trabalho de Miranda (2018), são apresentadas na Tabela 9. É importante ressaltar que o fíler B é mais fino que o fíler A.

Tabela 9 - – Composição química dos fileres utilizados (Miranda, 2018)

<b>Composto Químico</b>	<b>Fíler A</b>	<b>Fíler B</b>
SiO <sub>2</sub>	-	6,63%
CaO	>36%	83,10%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	2,12%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	2,16%
TiO <sub>2</sub>	-	0,26%
K <sub>2</sub> O	-	0,94%
MgO	<3%	3,61%
SO <sub>3</sub>	-	0,23%

### 3.1.5. Fibras

Nos estudos realizados neste trabalho são considerados 4 tipos de fibras de aço, todas produzidas a partir de fios de aço treilados e com ancoragem nas dobras das suas extremidades, em forma de gancho.

As fibras escolhidas são produzidas pela empresa *Maccaferri*, e suas principais especificações são mostradas na Tabela 10. As fibras FF1 e FF3 foram escolhidas por possuir o mesmo comprimento e diferentes fatores de forma, possibilitando assim uma análise da variação deste parâmetro isolado. A fibra FF4 possui um comprimento e fator de forma maiores do que os das fibras FF1 e FF3. A fibra FS7 foi escolhida por possuir um comprimento menor e manter um elevado fator de forma, características que a torna mais adequada para a confecção de um concreto autoadensável a ser utilizado em elementos pré-fabricados. Segundo o fabricante, a massa específica do aço utilizado em todas essas fibras é igual a 7,85 g/cm<sup>3</sup>.

As fibras foram utilizadas com os teores de 30, 45, 60, 75 e 90 kg/m<sup>3</sup>. Tais teores foram utilizados nas simulações realizadas no *Betonlab pro 3*. Nos concretos fabricados foram utilizados teores de 45 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 10 – Características das fibras de aço a serem utilizadas (BASF, 2016)

<b>Tipo</b>	<b>Diâmetro – <math>d_f</math> (mm)</b>	<b>Comprimento – <math>L_f</math> (mm)</b>	<b>Fator de forma (<math>L_f/d_f</math>)</b>	<b>Número de fibras por kg</b>
Wirand FF1	1	50	50	3244
Wirand FF3	0,75	50	67	5767
Wirand FF4	0,75	60	80	4806
Wirand FS7	0,55	33	60	16100

### 3.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentadas, para os diversos ensaios realizados, os diferentes métodos utilizados. Inicialmente, serão apresentados os procedimentos utilizados para realizar a caracterização dos materiais constituintes empregados nesta pesquisa. Nas seções subsequentes, serão apresentados os métodos adotados para a realização de cada um dos estudos necessários para alcançar os objetivos do trabalho.

#### 3.2.1. Caracterização dos materiais constituintes

##### 3.2.1.1. Granulometria

Os ensaios de granulometria dos agregados graúdos (B0 e B1) e miúdos (areia fina e areia média) foram realizados de acordo os procedimentos preconizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT na norma NBR 7217 (ABNT, 1987).

As curvas granulométricas dos materiais finos (cimento Portland e fíler) foram obtidas através do granulômetro a laser do Laboratório de Materiais da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), situado em Foz do Iguaçu – PR.

##### 3.2.1.2. Massa específica

Os ensaios realizados para a determinação da massa específica da brita B0 e das areias foram baseados na norma NBR NM 52 (ABNT, 2009a), com a utilização do frasco de Chapman. No caso da brita B1, utilizou-se os procedimentos preconizados na norma NBR NM 53 (ABNT, 2009b). Já as massas específicas do cimento e do fíler foram determinadas de acordo

com a norma NBR 16605 (ABNT, 2017), fazendo-se uso de querosene e do frasco de Le Chatelier.

#### 3.2.1.3. Compacidade de materiais finos - Ensaio de demanda de água

Este procedimento foi realizado com o cimento *Portland* e os dois fíleres utilizados. O ensaio foi originalmente proposto por De Larrard (1999) e é descrito no item 2.1.4. O procedimento utilizado foi baseado na metodologia empregada por Silva (2004) e Formagini (2005), mas com algumas modificações explicadas em detalhes no capítulo de resultados.

Como um dos objetivos do trabalho é estabelecer um protocolo para execução deste ensaio no LEM, optou-se por apresentar a metodologia proposta no capítulo 4 de resultados.

#### 3.2.1.4. Compacidade de materiais granulares - Ensaio de vibração e compressão

Este ensaio foi realizado com os agregados graúdos e miúdos. Esses materiais foram divididos em classes de diâmetros similares e o ensaio foi realizado para cada uma das classes, separadamente. O procedimento realizado foi de forma semelhante ao ensaio descrito no item 2.1.4.1, que foi estabelecido por De Larrard (1999).

O procedimento utilizado se baseou na variante do ensaio proposta por Grunewald (2004). Grunewald propôs a utilização do equipamento de *Vebe test* para a vibração dos materiais. O índice de compactação característico ( $K$ ) encontrado por Grunewald para esta variante do ensaio foi diferente do valor proposto por De Larrard (1999). Nos estudos de Grunewald (2004) o valor de  $K$  encontrado foi de 3,6, enquanto De Larrard (1999) encontrou um valor de  $K$  igual a 9 para o ensaio de vibração e compactação proposto. Assim, se fez necessário realizar um estudo de determinação do índice de compactação característico ( $K$ ) para o ensaio implementado no LEM/UnB.

Como um dos objetivos específicos do trabalho era estabelecer um protocolo para execução dos ensaios de determinação da compacidade virtual de materiais granulares no LEM, optou-se por apresentar a metodologia proposta no capítulo 4, de resultados.

### 3.2.2. Estudo comparativo entre diferentes formas de consideração das fibras no MEC

Nesta etapa, foram realizados ensaios de vibração e compressão em misturas de agregado com fibra. Para a realização do estudo, foi utilizada uma classe de grãos da B0 com dimensões máximas entre 4,75 e 6,3 mm e fibras FS7. É importante ressaltar que foi realizado

ensaio de vibração e compressão somente com as fibras, a fim de encontrar uma compacidade experimental desse valor, que será utilizada na análise dos diferentes métodos de consideração das fibras no MEC.

Foram avaliados os métodos do diâmetro equivalente das fibras, proposto por Yu *et al.* (1993), e do volume perturbado, proposto por De Larrard (1999). Os valores experimentais encontrados foram comparados com valores teóricos calculados com as equações do MEC, sendo as fibras consideradas como se fossem grãos com diâmetros iguais ao diâmetro equivalente, ou considerando como um determinado volume perturbado pelas fibras modifica as compacidades dos materiais granulares.

Este estudo é similar ao feito por Grunewlad (2004), onde valores experimentais foram comparados com diversos métodos de inclusão das fibras no MEC. O autor concluiu que o método que mais se aproximou ao experimental foi a utilização do método de Yu *et al.* (1993) com a inclusão do efeito parede utilizado no ensaio. Por esse motivo, essa metodologia será avaliada neste trabalho para os materiais a serem utilizados.

### 3.2.3. Dosagem dos CAARF utilizando o *software Betonlab Pro 3*

Para a realização das dosagens dos concretos foi utilizado o software *Bentolab Pro 3*. Nesse *software*, o primeiro passo é a inserção dos dados de caracterização dos materiais, é importante ressaltar que algumas informações são obrigatórias para a realização das dosagens e outras são propriedades facultativas que não restringem a utilização do programa, mas limitam a previsão de certas propriedades dos concretos simulados. A Tabela 11 mostra quais são as informações mínimas para a simulação de concretos no *Betonlab*.

Observou-se que não é obrigatório a realização de ensaios de resistência a compressão no cimento em duas idades distintas. Com apenas um valor de resistência à compressão do cimento consegue-se realizar dosagens, entretanto desta forma não é possível prever a resistência compressão em diferentes idades. Portanto, decidiu-se considerar essa propriedade como obrigatória.

Tabela 11 – Parâmetros a serem inseridos no *Betonlab*

<b>Material</b>	<b>Parâmetros a serem inseridos</b>
Agregados	Massa específica Absorção Granulometria Compacidade Parâmetros <i>p e q</i> .
Cimento	Massa específica Absorção Granulometria Compacidade Composição do cimento Composição de Bogue Resistência à compressão em pelo menos 2 idades Teor de saturação do superplastificante.
Fíler	Massa específica Granulometria Compacidade Teor de saturação
Superplastificante	Teor de sólidos

Os ensaios de granulometria foram realizados com as peneiras das normas citadas no item 3.2.1.1, porém no *Betonlab* é exigido uma quantidade muito maior de diâmetros. Esses diâmetros foram encontrados com regressões lineares realizadas no *Excel*.

A parte de inserção dos dados de caracterização, bem como as ilustrações da calibração dos parâmetros *p e q* estão mostradas no Apêndice D.

A otimização do concreto seguiu a seguinte metodologia:

1º) Otimização do esqueleto granular, esta etapa é realizada fixando o teor de pasta e minimizando o índice de empacotamento (*indice de serrage du beton non confinè*).

2º) Realização de uma segunda otimização, fixando o esqueleto granular encontrado, inserindo os parâmetros necessários para o CAA e restringindo a resistência a compressão. O parâmetro escolhido para a otimização nesta etapa foi a minimização do preço (*prix*).

Esta metodologia adotada é semelhante à usada em Poyet *et al.* (2015) e está ilustrada em detalhes no anexo D. Os parâmetros fixados para a dosagem do concreto autoadensável foram especificados por De Larrard no manual de uso do *Betolab Pro 3* encontrado no site do software. Os parâmetros fixados na pesquisa estão mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros fixados na pesquisa para alcançar o CAA

<b>Parâmetros necessários para o CAA</b>	<b>Valores</b>
Tensão de Escoamento (MPa)	<400
Viscosidade Plástica (Pa.s)	<200
Influência dos finos - K'f	>3,3
Influência dos agregados graúdos - K'gg	<1,4
Resistência à compressão	A especificar

Além das propriedades do CAA fixou-se o teor de superplastificante no teor de saturação, seguindo recomendações de Sedran (2018). Como um dos objetivos do trabalho se trata de explorar as diferentes formas simplificadas de se considerar as fibras no MEC, a metodologia utilizada é explicada no item 4.3.1.

#### 3.2.4. Validação das dosagens

Seguindo os procedimentos descritos no item 3.2.3, foram realizadas duas dosagens para a produção e a realização da caracterização experimental no estado fresco. Este estudo foi realizado com um único tipo de fibra (FS7) e houve alteração somente no tipo de fíler utilizado, ou seja, foram utilizados fíler A, na primeira dosagem, e o fíler B na segunda.

Os ensaios realizados no estado fresco foram escolhidos para avaliar a autoadensabilidade do concreto de acordo com a norma NBR 15823 (2017b). Nesta norma, é definido que um concreto será autoadensável quando os parâmetros fluidez e escoamento, viscosidade plástica e aparente, habilidade passante, e resistência a segregação obedecerem a critérios mínimos que dependem da classe do concreto. Desta forma, os ensaios Funil V, Caixa L, espalhamento e análise visual foram realizados. Todos esses ensaios deverão atingir os resultados mínimos, mostrados nas tabelas A.2.1, A.2.2, A.2.3 e A.2.4 da norma para um concreto com vasta utilização.

#### 3.2.5. Estudo de dosagem dos CAARF

Algumas simulações foram rodadas no *software Bentolab Pro 3* com objetivo de analisar as mudanças nas composições das dosagens. Os concretos foram simulados com as

características dos materiais encontrados na parte de caracterização e variando-se os seguintes parâmetros:

- 1 tipo de fibra de aço: FS7
- 4 classes de resistência, com resistências à compressão característica aos 28 dias iguais a: 30,50, 70 e 90 MPa6 teores de fibras: 0, 30, 45, 60, 75 e 90 kg/m<sup>3</sup>

Assim, serão feitas 24 simulações, sendo 20 com fibras 4 sem fibras. É importante ressaltar que inicialmente pensa-se em utilizar os quatro tipos de fibras mas os resultados mostraram que as dosagens ficariam muito semelhantes e assim prosseguiu-se apenas com o tipo de fibra citado.



## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados de massa específica e granulometria encontrados para os materiais da pesquisa, bem como os dados necessários para a utilização do *Betonlab*. Exceto os resultados dos ensaios de compactidade, que serão mostrados no item 4.2.

#### 4.1.1. Cimento *Portland*

A massa específica do cimento CP II-F encontrada foi igual a 3,06 g/cm<sup>3</sup> e as curvas granulométricas obtidas através da granulometria a laser são mostradas na Figura 25.

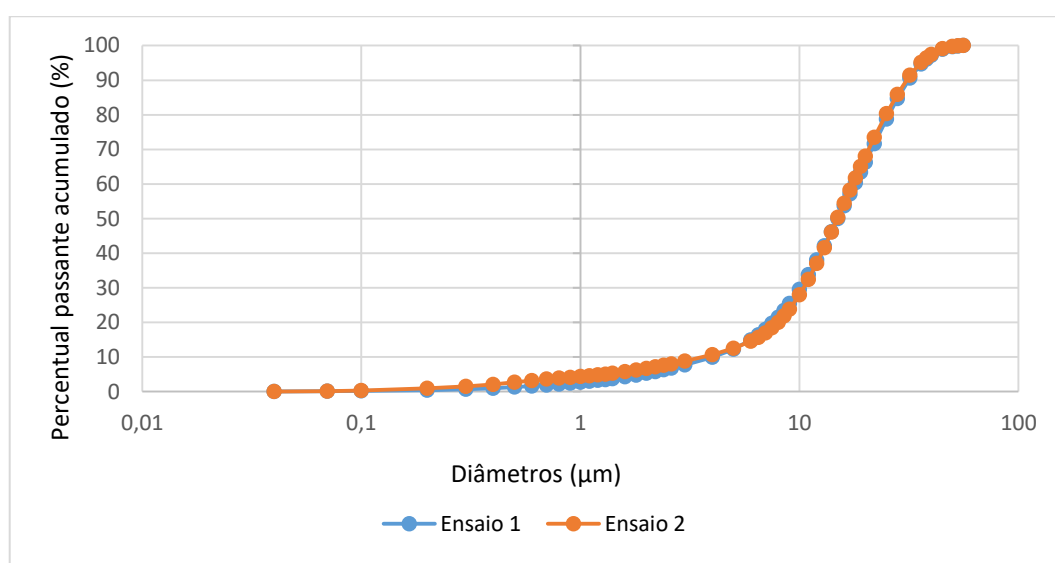


Figura 25 – Granulometria do cimento *Portland*.

Os valores de d10 e d90 são 4,26 µm e 31,5 µm, respectivamente.

Como exibido no item 3.2.3 da metodologia, são necessários dois valores de resistência a compressão do cimento para a utilização do *BetonLab*. Desta forma, a resistência a compressão do cimento aos 28 dias foi considerada igual à especificação do cimento, 40MPa. A resistência aos 7 dias foi estimada através da equação apresentada no item 12.3.3 da norma NBR 6118 (2014), obtendo um valor de 31,1 MPa para o cimento do tipo CP II F.

Como o *BetonLab* pede o teor de adição do cimento, optou-se por adotar um valor com base na norma vigente na data de fabricação do lote do cimento utilizado. Como a norma informa que um CP-II-F possui no máximo 10% de filler, esse foi o valor considerado, por ser a opção mais conservadora.

A composição de Bogue, também necessária para realizar a dosagem com o *BetonLab*, foi obtida através de dados médios do fabricante. Os valores estão exibidos na Tabela 13.

Tabela 13 – Composição de Bogue Adotada

C3S (%)	C2S (%)	C3A (%)	C4AF (%)	Outros compostos (%)
64,69	8,75	6,79	9,73	10,04

#### 4.1.2. Fíler

A massa específica média encontrada nos ensaios com o fíler A foi igual a 2,73 g/cm<sup>3</sup>. A curva granulométrica obtida através da granulometria a laser está mostrada na Figura 26.

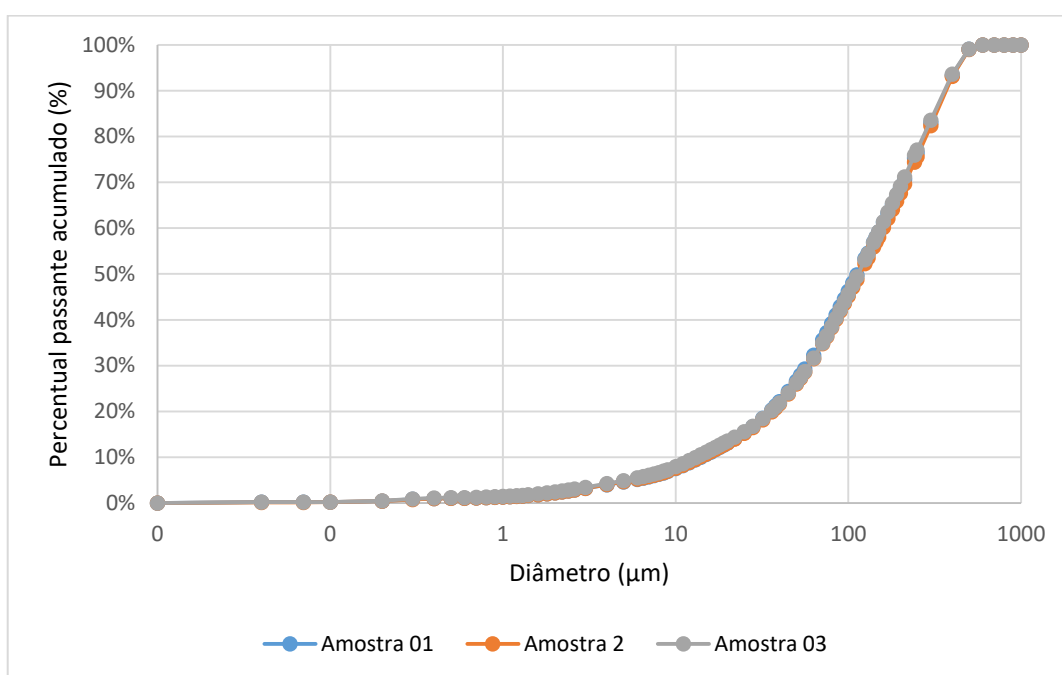


Figura 26 – Granulometria do fíler A.

Os valores de d<sub>10</sub> e d<sub>90</sub> são 13,72 µm e 362,8 µm, respectivamente.

É importante ressaltar que o fíler B é o mesmo utilizado no trabalho de Miranda (2018), que é mais fino do que o fíler A. A granulometria desse fíler está apresentado na figura 9 do trabalho da autora e está mostrado na Figura 25 deste trabalho. A massa específica deste fíler encontrada por Miranda (2018) foi de 2,7 g/cm<sup>3</sup>.

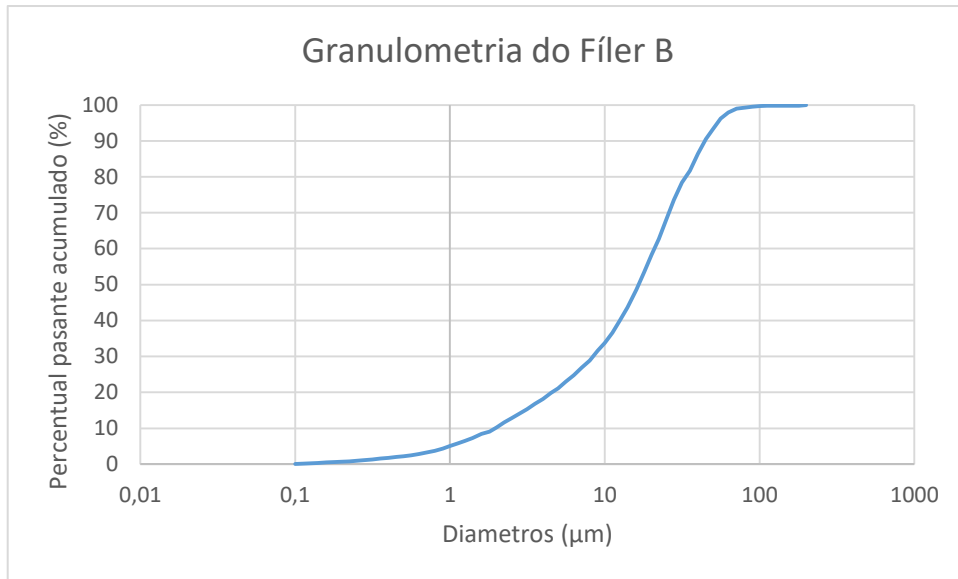


Figura 27 – Granulometria do Filer B (Miranda, 2018)

#### 4.1.3. Agregados Graúdos

A massa específica da brita 0 foi determinada pelo frasco de Chapman e o resultado obtido foi igual a  $2,79 \text{ g/cm}^3$ . A curva granulométrica obtida por peneiramento está mostrada na Figura 28.

A absorção do agregado graúdo foi considerada de 0,5% que é um valor típicos para os basaltos da região .

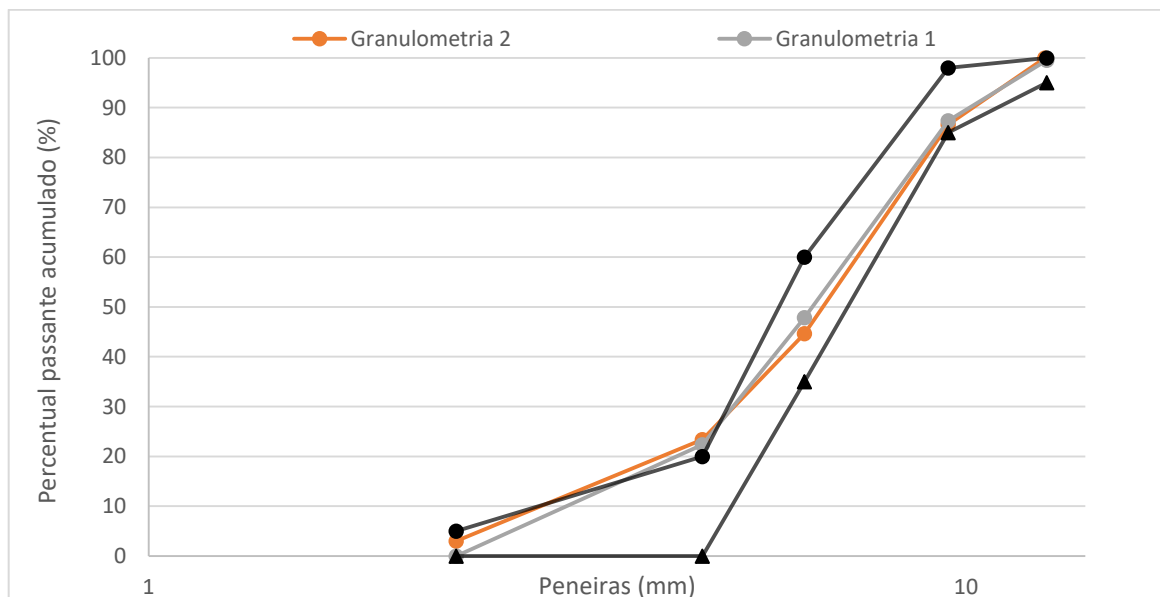


Figura 28 – Granulometria brita 0.

Além disso, é importante ressaltar que utilizou-se a Brita 1 para realização de ensaios de vibração e compressão. Foi necessário, portanto, determinação da massa específica para esse material, que foi de 2,77 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.4. Agregados Miúdos

Os valores médios obtidos para as massas específicas dos agregados miúdos são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Massa específica dos agregados miúdos

Material	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )
Areia Fina	2,66
Areia Média	2,60

As curvas granulométricas estão mostradas na Figura 29 e Figura 30. As absorções da areia média e da areia fina foram consideradas respectivamente 1% e 1,5%, respectivamente. Tais valores, são valores típicos para as características das areias utilizadas na pesquisa.

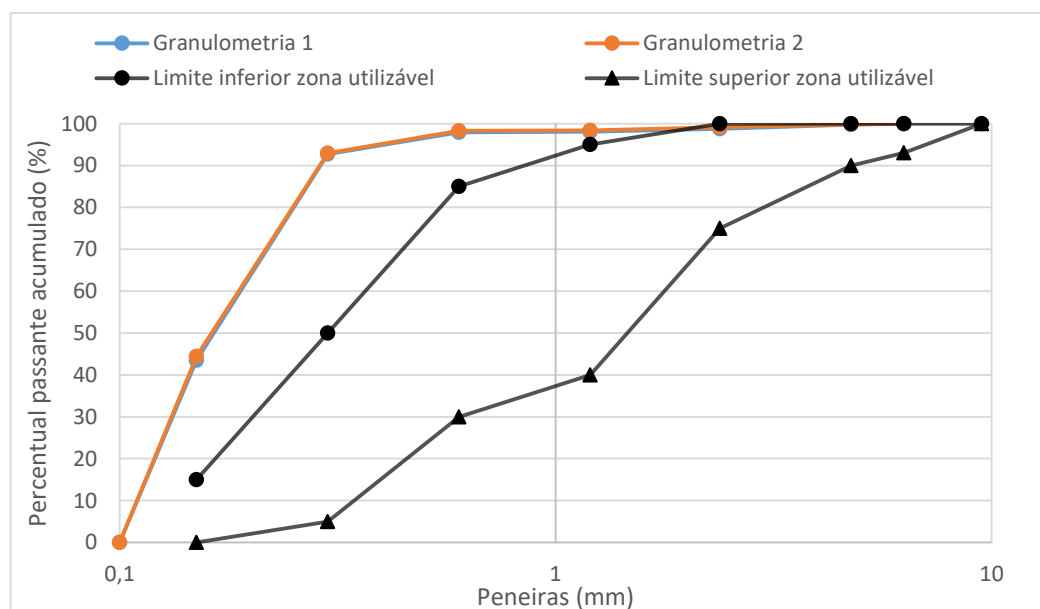


Figura 29 – Granulometria areia fina

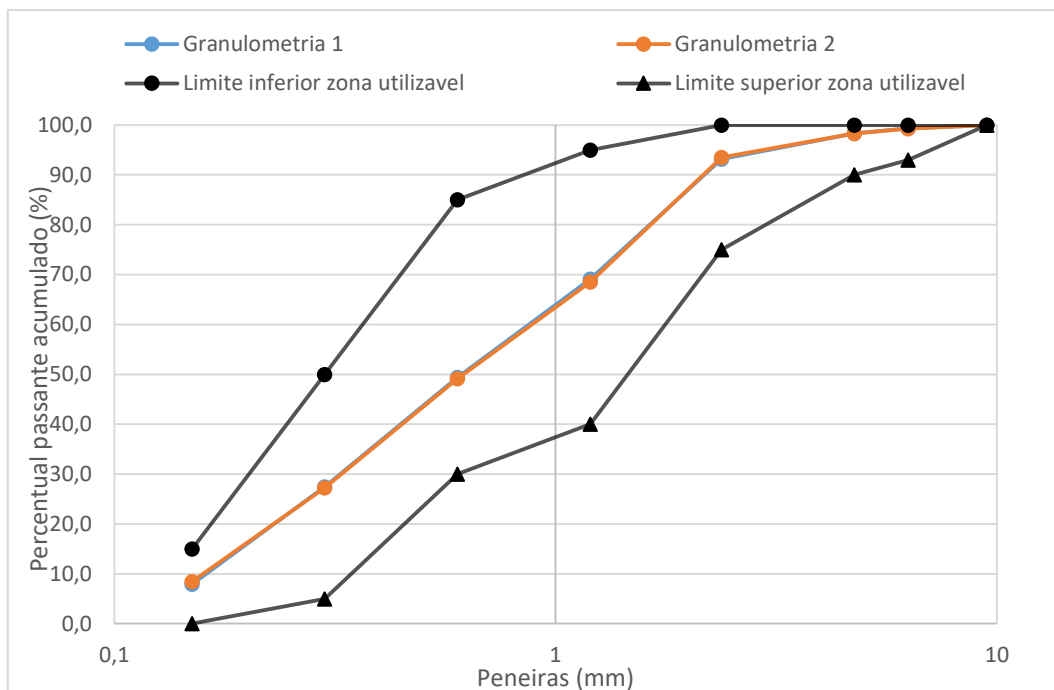


Figura 30 – Granulometria da areia média

É importante ressaltar que utilizou-se areia grossa para realização de ensaios de vibração e compressão. Foi necessário, portanto, determinação da massa específica para esse material, que foi de 2,62 g/cm<sup>3</sup>.

## 4.2. ENSAIOS DE COMPACIDADE

### 4.2.1. Protocolo dos ensaios

#### 4.2.1.1. Ensaio de demanda de água

A revisão da literatura para este ensaio encontra-se na página 17. O ensaio foi realizado tendo como base os procedimentos adotados por Silva (2004), porém foram feitas algumas modificações. A utilização de diferentes etapas, com velocidades distintas e os tempos de repouso, propostos por Silva (2014), foram respeitados.

Foi definido que, para a determinação do ponto de demanda de água seriam necessários realizar dois ensaios, com amostras distintas. O primeiro ensaio é realizado adicionando inicialmente a metade da água prevista para atingir o ponto de demanda de água. Em seguida, é adicionado água em intervalos de 10 em 10 gramas respeitando as velocidades de mistura proposta por Silva (2004). A adição de água acontece até que seja atingido o estado capilar. A cada intervalo, a mistura deve ser avaliada e a quantidade de água necessária para atingir o

estado funicular também deve ser anotada. O segundo ensaio deve ser realizado adicionando inicialmente a quantidade de água necessária para atingir o estado funicular. Os intervalos de adição de água nesse ensaio devem ser reduzidos a 5 gramas por vez para que seja possível averiguar se o ponto de demanda de água ficou imediatamente antes ou depois do ponto encontrado inicialmente. Caso os resultados dos dois ensaios não se distanciem, o ponto de demanda de água pode ser determinado e a compacidade da mistura é calculada com a equação (22). Tal procedimento foi adotado a fim de padronizar o ensaio, e assim, evitar possíveis erros.

Os ensaios com o superplastificante seguiram a mesma metodologia, sendo que o superplastificante foi adicionado após a mistura inicial de água em quantidade igual ao ponto de saturação do cimento. Os resultados estão mostrados na Tabela 15.

Tabela 15 – Compacidade por demanda de água

<b>Material</b>	<b>Amostra</b>	<b>Ponto de demanda de água (g)</b>	<b>Compacidade</b>
Cimento sem superplastificante	1	100	0,5339
	2	100	0,5339
Cimento com superplastificante	1	75	0,6043
	2	70	0,6207
Fíler A sem superplastificante	1	65,14	0,6633
	2	70	0,6471
Fíler B sem superplastificante	1	70	0,6471
	2	75	0,6311

É interessante salientar que a determinação visual do ponto de saturação é um pouco subjetiva, sendo assim suscetível a falhas. Contudo, quando são adicionadas pequenas frações de água até o ponto de saturação, percebe-se que, logo após a fase funicular a mistura cimento+água forma um aglomerado consistente e maciço, e logo após adicionar mais uma fração de água, a mistura se torna mais maleável e plástica (sem o superplastificante) ou até semelhante a fluida (com o superplastificante). Foram calculadas as compacidades para esses dois estados (consistente e plástico/fluido) e percebeu-se que a diferença entre as compacidades é mínima, resultando em um erro máximo de 5% entre os valores.

A Figura 31, Figura 32 e Figura 33 ilustram os ensaios de demanda de água realizados com o cimento, o fíler A e o fíler B, respectivamente.



(a) estado pendular



(b) estado furnicular



(c) início da massa homogênea



(d) ponto de demanda de água

Figura 31 – Ensaio de demanda de água do cimento



(a) estado pendular



(b) estado furnicular



(c) ponto de demanda de água

Figura 32 – Ensaio de demanda de água do filer A



(a) estado pendular



(b) estado furnicular



(c) ponto de demanda de água

Figura 33 – Ensaio de demanda de água do fíler B

#### 4.2.1.2. Ensaio de compressão e vibração

A revisão da literatura deste ensaio encontra-se na página 18. Os ensaios de vibração e compressão foram realizados na mesa de vibração do aparelho *Vebe test* com a adaptação do cilindro utilizado e a confecção de um peso para a realização da compressão. O cilindro utilizado tem 150 mm de diâmetro e 22,65 cm de altura, já o peso possui 19,71 kg e 149 mm de diâmetro, ambos estão mostrados na Figura 34, a seguir.

A frequência de vibração da mesa vibratória foi determinada, encontrando um valor de aproximadamente 60 Hz. Para medição da frequência de vibração, foi utilizado um microcontrolador Arduino Uno e um sensor IMU MPU 6050, do qual foi utilizado o eixo Z de seu acelerômetro para medição das acelerações provocadas pela mesa vibratória. O sensor foi posicionado no centro da mesa vibratória, que foi ligada por um total de 10 segundos. A taxa de amostragem utilizada foi de 800 Hz. Os resultados foram posteriormente tratados no *software Matlab*, consistindo na remoção da média, reamostragem com uma frequência de 600 Hz para correção de não-uniformidades durante o tempo de amostragem, e aplicação de um filtro Butterworth de 8ª ordem com um frequência passa-alta de 5 Hz, a fim de eliminar ruídos devido à manipulação do sensor, e passa-baixa de 290 Hz, para eliminar possíveis ruídos fora do espectro esperado para a mesa.

Vale ressaltar que o ensaio de compressão e vibração poderia ser executado como foi feito por De Larrard (1999). Contudo, seria necessário conseguir um recipiente com as mesmas dimensões e uma mesa vibratória capaz de vibrar com a mesma frequência de vibração da



utilizada por De Larrard (1999). Devido às dificuldades de se obter equipamentos iguais aos utilizados por De Larrard (1999), optou-se por criar um procedimento semelhante, mas não idêntico ao utilizado pelo autor.



(a) cilindro e mesa vibratória

(b) peso de aço

(c) conjunto do ensaio

Figura 34 – Equipamentos do ensaio de vibração e compressão

O protocolo adotado foi baseado nas metodologias propostas por Grunewald (2004) e Silva (2004), sofrendo algumas modificações. O protocolo adotado é explicado a seguir:

1. Pesar 2.500 g de material seco a ser ensaiado;
2. Com o cilindro devidamente fixado na mesa vibratória, insere-se o material no cilindro, de forma que todo o material tenha sido despejado no interior desse.
3. Nota-se que o material no cilindro fica um pouco desnivelado. Dito isso, sugere-se fazer um espalhamento manual desse material somente para que esse fique mais nivelado para o posterior emprego do peso de aço;
4. Coloca-se o peso de aço acima do material no cilindro;
5. Liga-se a mesa vibratória por um período de 3 minutos.
6. Após o desligamento do aparelho, realizam-se, com o auxílio do paquímetro, 4 medidas das alturas do peso de aço em relação à borda do cilindro. A média dessas alturas será utilizada para o cálculo da compactidade experimental;
7. Por fim, o cilindro é retirado da mesa vibratória e o material é descartado.

A altura final de material é encontrada subtraindo da altura total do cilindro a altura do peso e a média das 4 alturas medidas com o paquímetro (caso o peso esteja acima do cilindro, a média das medidas entrará somando com a altura total do cilindro), sendo possível, assim,

calcular a compactidade das misturas através da equação (23). O esquema do ensaio está representado nas imagens a seguir.



(a) Separação do material em classes de grãos



(b) Pesagem do material



(c) medição após vibração



(d) classe de areia empacotada



(e) classe de brita empacotada

Figura 35 – Ensaio de vibração e compressão

No presente trabalho, foram realizados ensaios de vibração e compressão com diferentes classes de grãos para caracterizar as compactidades virtuais ( $\beta$ ) de cada uma dessas classes. Estes ensaios foram realizados com os agregados a serem utilizados na dosagem dos concretos. Para esses agregados, a areia fina foi separada em somente uma classe, assim como a brita 0. Já a areia média foi separada em 4 classes. Os resultados das compactidades experimentais destes materiais encontram-se na Tabela 16 a seguir.

Essas divisões foram escolhidas pois em Silva (2004) , Formagini (2005) e Maragon (2006) foi observado que a divisão das britas geraram resultados muito similares e as areias apresentaram resultados diferentes para cada classe de grãos. Dessa forma, escolheu-se prosseguir a pesquisa dividindo apenas a areia média. A areia fina não foi dividida pelo resultado de granulometria, o qual mostrou que o material é descontínuo e com a maioria dos grãos pertencentes à duas classes, não sendo necessário realizar a divisão no ensaio de compactidade.

Tabela 16 – Compactidade experimental dos agregados

Brita 0	0,622
Areia Fina	0,603
Areia Média abaixo de 0,6	0,631
Areia Média entre 0,6-1,2	0,642
Areia Média entre 1,2-2,4	0,683
Areia Média acima da 2,4	0,682

Também foram realizados ensaios de compressão e vibração em misturas binárias, como forma de determinar o índice de compactação característico do procedimento de ensaio ( $K$ ), conforme é elucidado no item a seguir.

#### 4.2.2. Misturas Binárias

Nesta etapa foi avaliado o comportamento de misturas binárias com a utilização das equações propostas no MEC. Para isso, foram realizados ensaios com misturas de classes diferentes de grãos, variando a fração volumétrica dessas classes ( $y_1$  e  $y_2$ ), a fim de se obter uma curva de compactidade real ( $\Phi$ ) *versus* a fração volumétrica da classe 2 dos grãos ( $y_2$ ). A partir dessas misturas, foi possível determinar do protocolo de empacotamento  $K$  do ensaio proposto para o LEM.

##### 4.2.2.1. Construção da planilha

Uma planilha eletrônica foi construída para o cálculo das compactidades experimentais teóricas de misturas binárias, com o intuito de comparar essa compactidade com os valores encontrados nos ensaios de compactidade realizados em laboratório. Para isso, seguiu-se a seguinte metodologia:

1. Conhecendo-se o valor de  $K$  e das compacidades reais de cada classe de grãos da mistura determinadas no laboratório, pode-se calcular a compacidade virtual  $\beta$  de cada classe estudada através da equação (21).
2. A partir do diâmetro médio de cada classe de grãos, utilizam-se as equações (16) e (17) para determinar o efeito de afastamento ( $a_{12}$ ) e o efeito parede entre os grãos ( $b_{21}$ ).
3. Com esses parâmetros ( $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $a_{12}$ ,  $b_{21}$ ,  $y_1$  e  $y_2$ ) é possível, então, calcular as compacidades virtuais  $\gamma^1$  e  $\gamma^2$  para uma mistura binária, a partir da equação (12) e (13).
4. Com esses valores determinados encontra-se uma compacidade real calculada através de uma análise numérica da equação (20). Para esse passo, foi executada uma Macro no Excel utilizando a ferramenta *Solver*, que está apresentada no Anexo A.

#### 4.2.2.2. Validação da Planilha

Após a criação da planilha eletrônica, foi realizada a sua validação. Para isto, a partir de resultados experimentais de uma mistura binária (com as classes de grãos de 1,0/2,0 mm e 0,5/1,0 mm) obtida por Grunewald (2004), e utilizando o mesmo  $K$  empregado pelo autor ( $K=3,6$ ), foram calculadas as compacidades reais dos teores das misturas, possibilitando, por fim, a comparação com as compacidades calculadas obtidas pelo autor.

A Tabela 17 mostra os resultados calculados pela planilha eletrônica e por Grunewald (2004) – presentes no Apêndice B do trabalho do autor.

Tabela 17 – Resultados das compacidades calculadas pela planilha eletrônica e por Grunewald (2004)

<b>Volume da classe 1,0 - 2,0 mm (<math>y_1</math>)</b>	<b>Compacidade Experimental</b>	<b>Compacidade Calculada – Planilha Eletrônica</b>	<b>Compacidade Calculada por Grunewald</b>
1	0,644	0,644	0,644
0,9	0,665	0,661	0,661
0,8	0,676	0,675	0,675
0,7	0,686	0,685	0,685
0,6	0,686	0,689	0,690
0,5	0,684	0,690	0,690
0,4	0,679	0,686	0,686
0,3	0,674	0,680	0,680
0,2	0,667	0,672	0,672
0,1	0,661	0,663	0,663
0	0,653	0,653	0,653

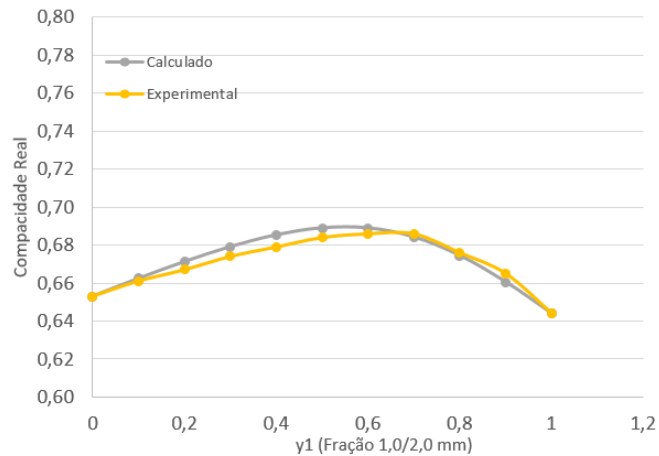


Figura 36 – Compacidades experimentais obtidas através de ensaios por Grunewald (2004) e calculadas pela planilha construída

Das comparações feitas na Tabela 17 e na Figura 36, percebe-se que os resultados determinados pela planilha eletrônica corresponderam aos valores calculados de compacidade realizado por Grunewald (2004). Isso é um indicativo de que a planilha eletrônica criada foi dimensionada corretamente.

#### 4.2.2.3. Determinação das compacidades experimentais de misturas binárias

Foram realizados ensaios de compacidade em algumas misturas binárias. Uma das finalidades desse ensaio é de obter resultados para a posterior determinação do índice de compactação ( $K$ ).

Foram realizados ensaios com os materiais e classes contidos na Tabela 18. É importante ressaltar que inicialmente foram realizados ensaios com a misturas M05-M06. Contudo, notou-se, após a análise dos resultados para essa mistura binária, que ela não seria adequada para a determinação do índice de compactação ( $K$ ) por conta da grande interação entre as classes de grãos. Dito isso, posteriormente, foram ensaiadas as misturas M01-M03 e M02-M04, que são misturas que possuem diâmetros distantes entre si, havendo menor interação entre os grãos, e, conseqüentemente, gerando resultados com maior confiança para a determinação do  $K$ .

Tabela 18 – Classes e materiais utilizados para ensaios com misturas binárias

<b>Agregado</b>	<b>Material</b>	<b><math>d_{\min}</math>(mm)</b>	<b><math>d_{\max}</math>(mm)</b>
M01	Brita 1	9,5	12,5
M02	Brita 1	12,5	16,0
M03	Areia Grossa	0,6	1,2
M04	Areia Grossa	1,2	2,4
M05	Areia Média	0,6	1,2
M06	Areia Média	1,2	2,4

Utilizando o procedimento descrito no item 4.2.1.24.2.1.2, foram realizados ensaios de compactação das misturas binárias, por fim, calculando os valores das compactações experimentais com auxílio da equação (23). Foram realizados dois ensaios idênticos para cada mistura. Os resultados podem ser observados na Tabela 20, Tabela 21 e Tabela 19, e a Figura 37, Figura 38 e Figura 39.

Tabela 19 – Resultado das compactações experimentais da mistura binária M05-M06

<b><math>y_1</math></b>	<b><math>y_2</math></b>	<b><math>\Phi_{1^\circ \text{ ensaio}}</math></b>	<b><math>\Phi_{2^\circ \text{ ensaio}}</math></b>	<b><math>\Phi_{\text{média}}</math></b>	<b>CV (%)</b>
0,00	1,00	0,6367	0,6467	0,6417	0,78%
0,24	0,76	0,6726	0,6748	0,6737	0,16%
0,49	0,51	0,6967	0,6988	0,6978	0,15%
0,74	0,26	0,7090	0,7080	0,7085	0,07%
1,00	0,00	0,6849	0,6801	0,6825	0,36%

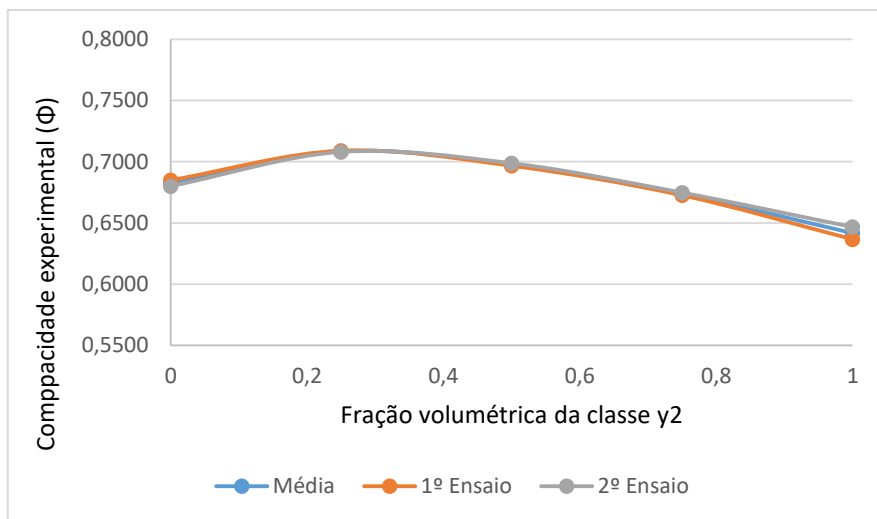


Figura 37 – Curva de compacidades experimentais da mistura M05-M06

Tabela 20 – Resultado das compacidades experimentais da mistura binária M02-M04

$y_1$	$y_2$	$\Phi_{1^\circ \text{ ensaio}}$	$\Phi_{2^\circ \text{ ensaio}}$	$\Phi_{\text{média}}$	CV (%)
0,00	1,00	0,6547	0,6574	0,656	0,20%
0,24	0,76	0,7297	0,7177	0,724	0,83%
0,49	0,51	0,7422	0,7598	0,751	1,17%
0,74	0,26	0,7026	0,6980	0,700	0,33%
1,00	0,00	0,5876	0,5833	0,585	0,37%

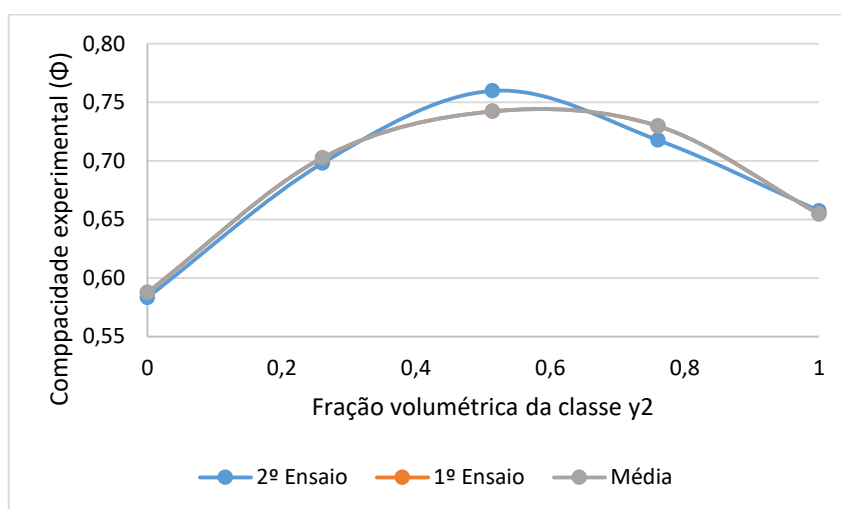


Figura 38 – Curva de compacidades experimentais da mistura M02-M04

Tabela 21 – Resultado das compacidades experimentais da mistura binária M01-M03

$y_1$	$y_2$	$\Phi_{1^\circ \text{ ensaio}}$	$\Phi_{2^\circ \text{ ensaio}}$	$\Phi_{\text{média}}$	CV (%)
0,00	1,00	0,6480	0,6400	0,6440	0,63%
0,24	0,76	0,7113	0,7167	0,7140	0,38%
0,49	0,51	0,7552	0,7496	0,7524	0,37%
0,74	0,26	0,7013	0,7076	0,7044	0,45%
1,00	0,00	0,5903	0,5877	0,5890	0,23%

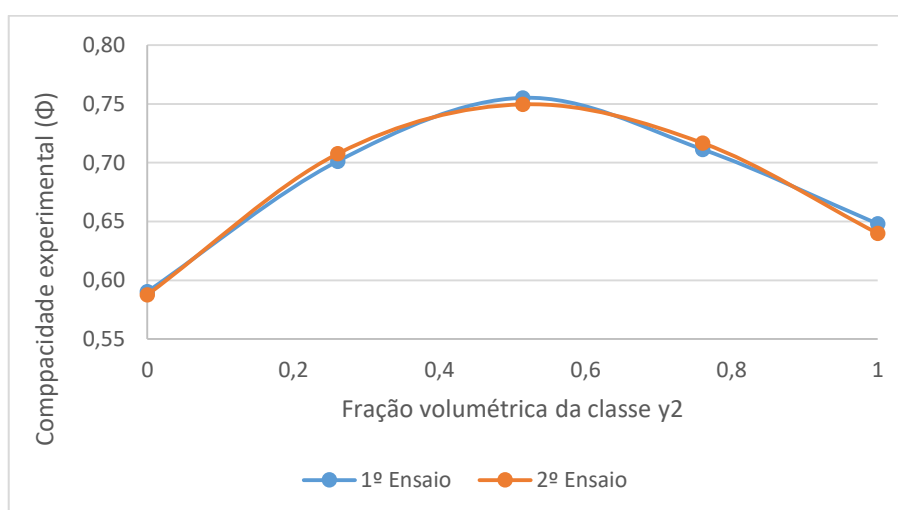


Figura 39 – Curva de compacidades experimentais da mistura M01-M03

A memória de cálculo contendo as medidas das alturas de material desses ensaios se encontram no Anexo B, Tabelas B.1 a B.6. Vale ressaltar que foram realizados 2 conjuntos de ensaios para cada mistura binária para se ter mais confiança nos dados obtidos. Tendo em vista a proximidade dos resultados que foram alcançados em laboratório, será utilizada a média desses valores para a determinação do  $K$ . Nota-se que o maior Coeficiente de Variação (CV) desses valores em relação à média foi de 1,17%, o que indica uma boa repetibilidade do protocolo de ensaio realizado.



#### 4.2.2.4. Determinação do Índice de Compactação ( $K$ )

Após a obtenção das compacidades experimentais das misturas, foi possível determinar o índice de compactação ( $K$ ). O procedimento para o cálculo desse índice é basicamente o que foi explicitado no item 4.2.2.1, com algumas mudanças:

1. Primeiramente, estima-se um valor inicial de  $K = K_{tentativa}$ .
2. Com os resultados das compacidades experimentais das misturas ( $\Phi_{média}$ ) quando  $y_2 = 0$  e  $y_2 = 1$ , calculam-se os valores de  $\beta_1$  e  $\beta_2$ , a partir da equação (21).
3. Seguindo os procedimentos de cálculo do item 4.2.2.1 determinam-se as compacidades reais calculadas para o  $K$  estimado inicialmente.
4. Estima-se um novo  $K_{tentativa}$  e repetem-se esses procedimentos até o erro da compacidade real calculada ficar o menor possível com relação à compacidade obtida experimentalmente, ou seja, até as curvas das compacidades calculadas ( $\Phi_{calc}$ ) e das compacidades experimentais ( $\Phi_{exp}$ ) se aproximarem.

Desta forma, foi possível realizar simulações estimando valores de  $K$  até encontrar um valor de compacidade calculada que se adeque aos resultados obtidos de compacidade experimentais das misturas binárias apresentadas no item anterior.

As primeiras simulações foram feitas com a mistura M05-M06, de duas areias médias com classes de diâmetros próximos. Os resultados das simulações encontram-se na Tabela 22 e Figura 40. Vale ressaltar que o erro é calculado fazendo-se a subtração entre o valor calculado e o valor experimental, sobre a compacidade experimental.

Tabela 22 – Compacidades calculadas das misturas binárias M05-M06

Compacidade Experimental - Média	Compacidade Calculada							
	K=3	Erro	K=5	Erro	K=7	Erro	K=9	Erro
0,642	0,642	0,00%	0,642	0,00%	0,642	0,00%	0,642	0,00%
0,674	0,672	0,28%	0,675	-0,12%	0,675	-0,18%	0,675	-0,16%
0,698	0,697	0,16%	0,704	-0,87%	0,707	-1,25%	0,707	-1,38%
0,709	0,704	0,70%	0,712	-0,44%	0,716	-1,03%	0,718	-1,38%
0,683	0,683	0,00%	0,683	0,00%	0,683	0,00%	0,683	0,00%
Erro médio		0,38%		0,48%		0,82%		0,97%

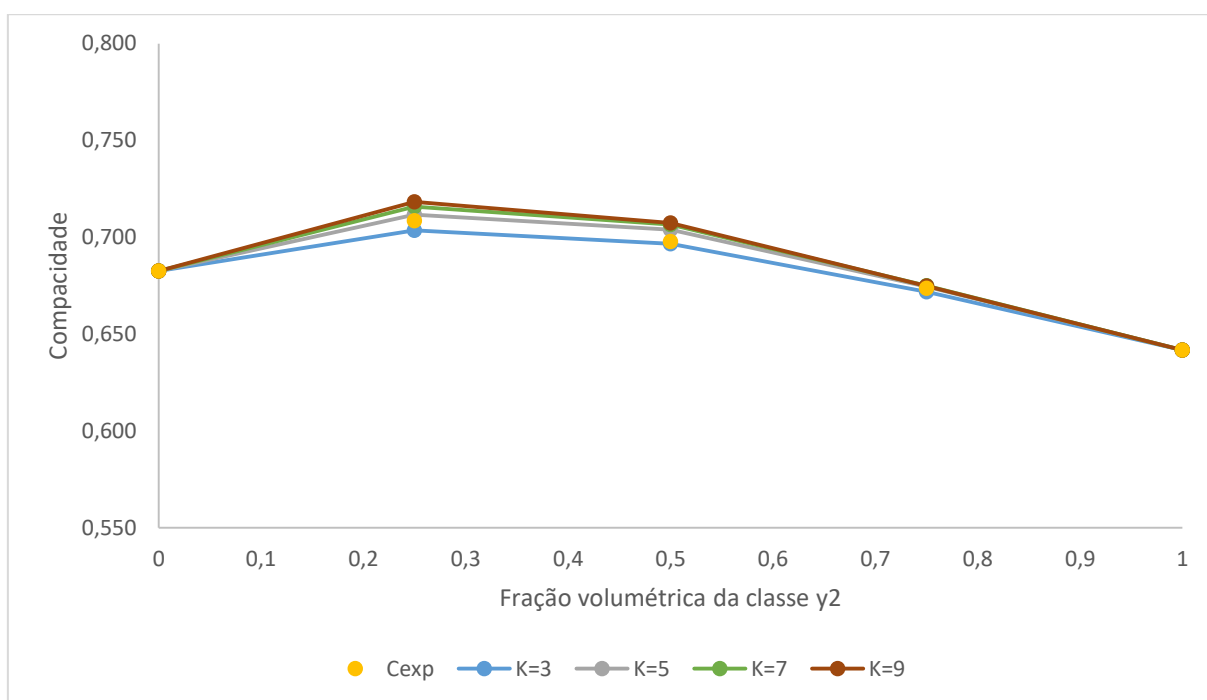


Figura 40 – Curva da mistura binária M05-M06 variando-se o  $K$

Ao analisar os resultados obtidos, notou-se que quando se alterava o  $K$ , a compacidade calculada variava muito pouco. Desta forma, notou-se, para essa mistura, uma pequena sensibilidade da compacidade calculada com relação à variação do  $K$ . Tal fato dificulta a determinação do índice de compactação ( $K$ ), tendo em vista que os próprios erros experimentais podem ser maiores que o erro encontrado entre os valores calculados em relação à compacidade experimental. Optou-se, então, por realizar simulações com outras classes de grãos.

Os resultados das simulações realizadas para os materiais M02-M04 e M01-M03, que são materiais com classes de diâmetros distantes entre si, encontram-se na Tabela 23, Tabela 24, Figura 41 e Figura 42.

Tabela 23 – Compacidades calculadas das misturas binárias M02-M04

Compacidade Experimental - Média	Compacidade Calculada							
	K=3	Erro	K=5	Erro	K=7	Erro	K=9	Erro
0,656	0,656	0,00%	0,656	0,00%	0,656	0,00%	0,656	0,00%
0,724	0,689	-4,81%	0,696	-3,82%	0,699	-3,48%	0,700	3,34%
0,751	0,711	-5,29%	0,732	-2,59%	0,740	-1,41%	0,745	0,81%
0,700	0,678	-3,14%	0,695	-0,73%	0,703	0,34%	0,707	0,89%
0,585	0,585	0,00%	0,585	0,00%	0,585	0,00%	0,585	0,00%
Erro Médio	-	4,41%	-	2,38%	-	1,74%	-	1,68%

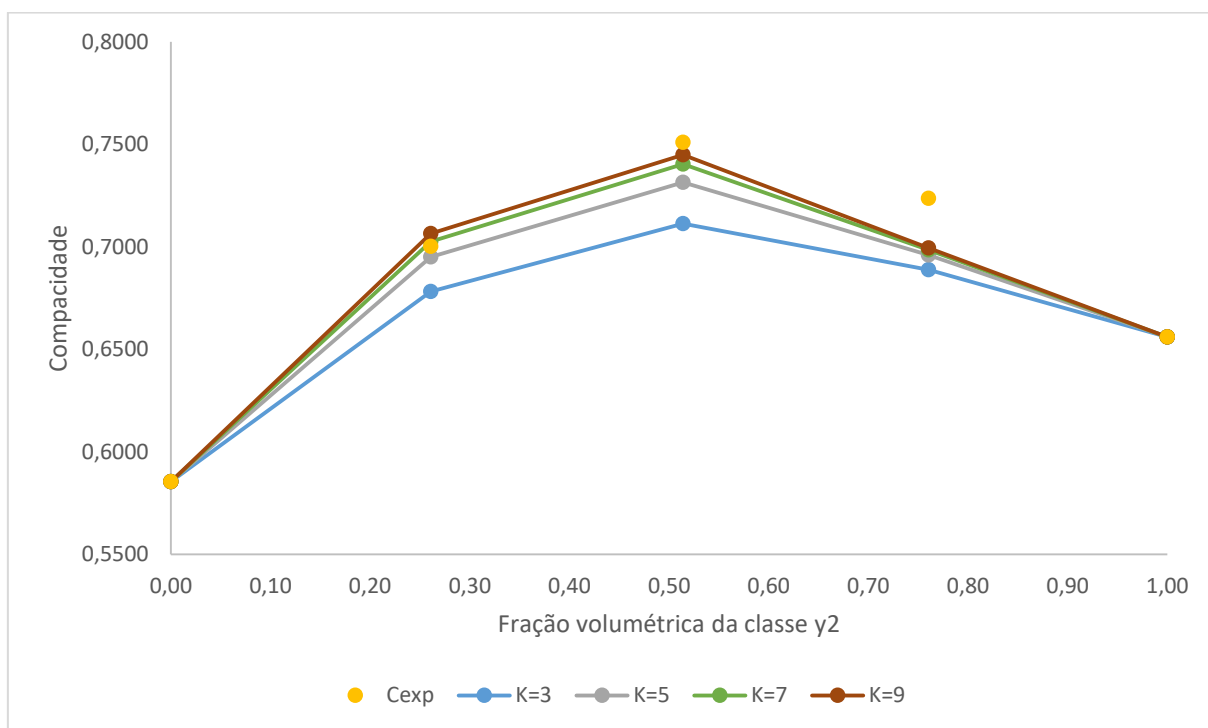


Figura 41 - Curva da mistura binária M02-M04 variando-se o  $K$

Tabela 24 – Compacidades calculadas das misturas binárias M01-M03

Compacidade Experimental - Média	Compacidade Calculada							
	K=3	Erro	K=5	Erro	K=7	Erro	K=9	Erro
0,644	0,644	0,00%	0,644	0,00%	0,644	0,00%	0,644	0,00%
0,714	0,682	-4,44%	0,690	-3,40%	0,692	-3,04%	0,693	2,88%
0,752	0,713	-5,20%	0,735	-2,38%	0,744	-1,17%	0,748	0,56%
0,704	0,688	-2,37%	0,708	0,45%	0,717	1,72%	0,721	2,40%
0,589	0,589	0,00%	0,589	0,00%	0,589	0,00%	0,589	0,00%
Erro Médio	-	4,00%	-	2,08%	-	1,98%	-	1,95%

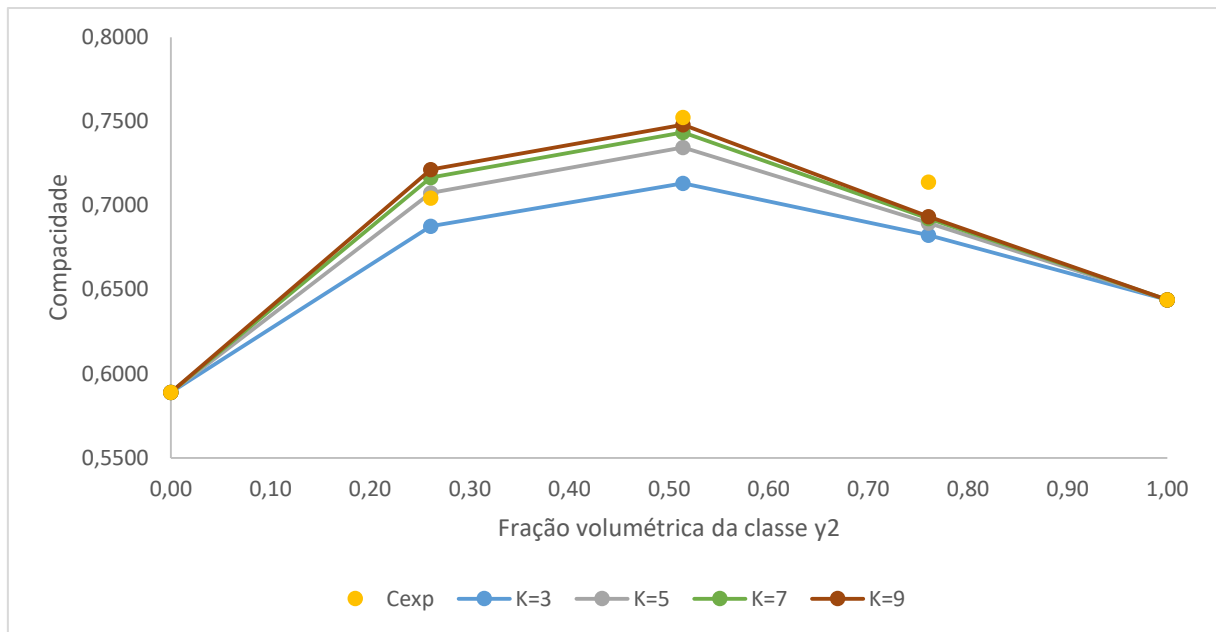


Figura 42 - Curva da mistura binária M01-M03 variando-se o  $K$

Nota-se, observando a Figura 41 e a Figura 42, que as curvas obtidas para as misturas M02-M04 e M01-M03 possuem maior sensibilidade com a mudança do  $K$  comparado com a mistura M05-M06 (Figura 40). Isso pode ser justificado pelo fato de que essas misturas possuem diâmetros mais distantes entre si ( $d_1 \gg d_2$ ), ou seja, existe uma menor interação entre as partículas - gerando um menor efeito de afastamento e efeito parede.

Diante disso, foram utilizados os resultados das misturas M02-M04 e M01-M03 para a determinação do índice de compactação ( $K$ ), haja vista que as compacidades calculadas possuem maior sensibilidade com a mudança do  $K$ , fazendo com que a alteração do  $K$  distancie as compacidades calculadas entre si. A mistura M05-M06 foi excluída dessa análise tendo em vista a grande interação entre as classes de grãos, provocando menor sensibilidade dos resultados com a mudança do  $K$  e maior imprecisão na determinação do índice de compactação.

Os resultados obtidos mostram que o  $K$  apresenta um menor erro quando se aproxima do valor 9 – 1,68% para a mistura M02-M04 e 1,95% para a mistura M01-M03 - que foi o número de índice de compactação encontrado no ensaio de vibração e compressão por De Larrard (1999). Foi realizado, então, uma análise dos erros médios das compacidades calculadas a partir desse valor, a fim de observar o comportamento dos resultados com o  $K$  acima de 9 (Tabelas C.1, C.2 e C.3 do Apêndice C, e Figura 43 e Figura 44).

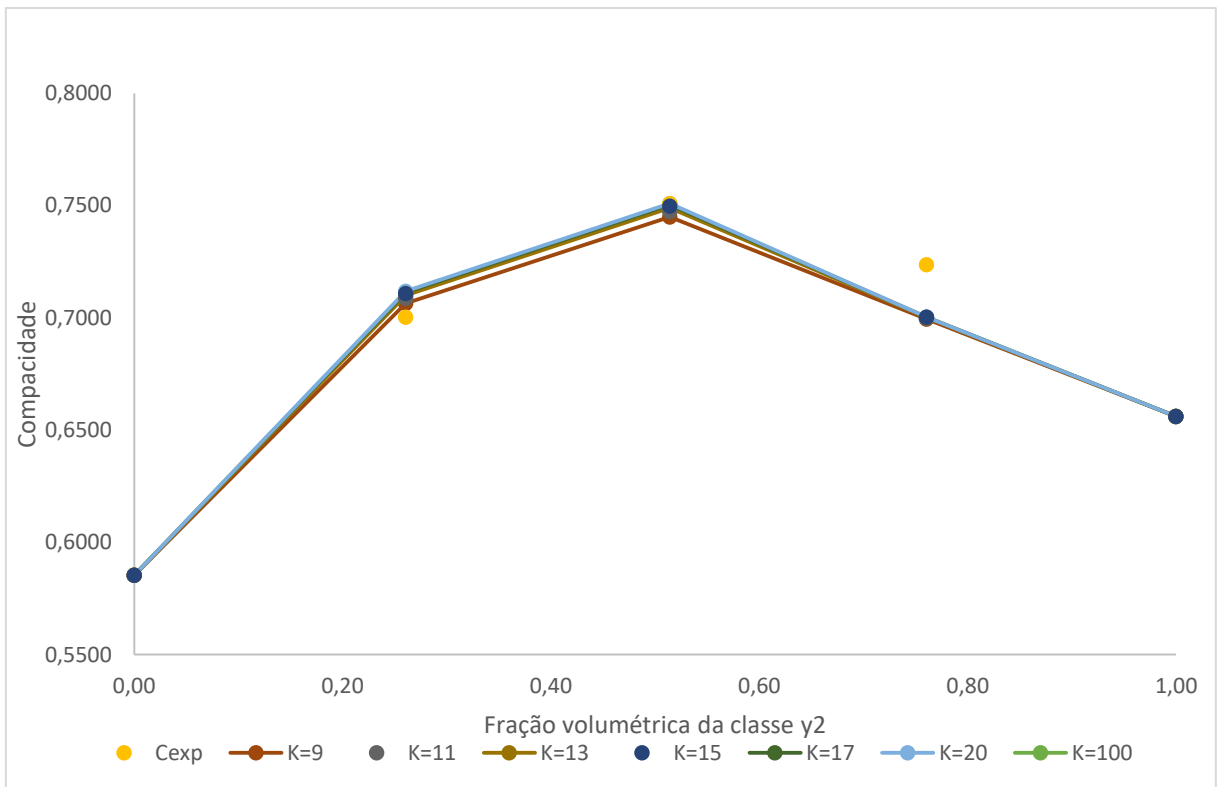


Figura 43 – Curva da mistura M02-M04 com  $K$  a partir de 9

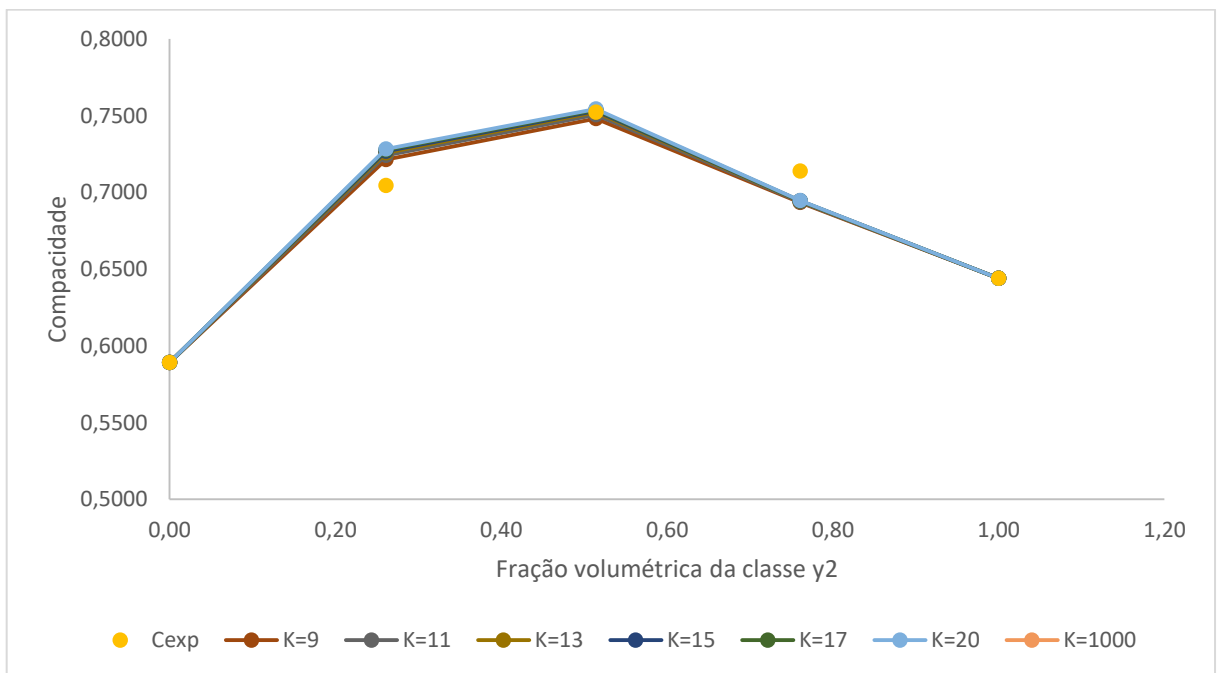


Figura 44 – Curva da mistura M01-M03 com  $K$  a partir de 9

Nota-se, pelos gráficos acima, que quando o  $K$  começa a ter valores mais altos, a compacidade calculada varia muito pouco.

Desta forma, para a determinação do  $K$ , os erros médios das curvas das misturas M02-M04 e M01-M03 foram somados, e o menor valor da soma desses erros foi o  $K$  escolhido para o ensaio no LEM.

Tabela 25 – Soma dos erros médios das compacidades calculadas das misturas com a mudança do  $K$

Mistura	K=9	K=10	K=11	K=12	K=13	K=14	K=15	K=16	K=17	K=18	K=19	K=20
M02-M04	1,68%	1,67%	1,65%	1,65%	1,64%	1,64%	1,64%	1,63%	1,63%	1,63%	1,63%	1,63%
M01-M03	1,95%	1,94%	1,94%	1,94%	1,94%	1,97%	2,01%	2,04%	2,07%	2,09%	2,11%	2,12%
Erro Total	<u>3,63%</u>	<u>3,61%</u>	<u>3,59%</u>	<u>3,59%</u>	<u>3,58%</u>	<u>3,61%</u>	<u>3,65%</u>	<u>3,68%</u>	<u>3,70%</u>	<u>3,72%</u>	<u>3,74%</u>	<u>3,76%</u>

A partir dos resultados obtidos na Tabela 25 percebe-se que o menor valor da soma dos erros médios foi com o índice de compactação ( $K$ ) igual a 13, valor que foi escolhido como o  $K$  do ensaio de vibração e compressão do LEM da UnB. O valor encontrado está um pouco acima do  $K$  encontrado por De Larrard, o que é de se esperar, pois a energia de compactação aplicada no ensaio de vibração e compressão no LEM é maior que a energia aplicada no procedimento descrito por De Larrard (1999).

O erro médio encontrado para este  $K$  na mistura M05-M06 foi de 1,08%. Percebe-se que os erros médios das compacidades das misturas para  $K=13$  são baixos, sendo inferiores a 2%. De Larrard encontrou um erro máximo de 1,77% para os valores das compacidades calculadas encontradas, valores de erro próximos aos valores encontrados neste trabalho.

É importante ressaltar que, para se ter um índice de compactação com mais precisão e confiança seria necessário realizar experimentos de compactação de misturas binárias com mais classes de grãos, preferencialmente com menor interação possível, a fim de obter mais dados de outras misturas para o tratamento dos resultados.

#### 4.2.3. Efeito da inclusão das fibras no MEC

O estudo da inclusão das fibras no MEC foi realizado fazendo ensaios de vibração e compressão em uma classe de grãos (Brita 0, classe 4,75/6,3mm), inserindo teores de fibra FS7 a cada ensaio (1%, 3% e 5% do volume de material granular). Além disto, foi realizado o ensaio de vibração e compressão somente com fibras. Estes ensaios foram realizados com a finalidade de observar a influência das fibras na compactação dos materiais.

Vale ressaltar que, para estes ensaios, foi fixado um volume total de sólidos de brita de 900 cm<sup>3</sup>, ou 2511 g, e, a partir disso, foi possível definir a massa de fibras a ser inserida em cada teor, utilizando a massa específica do aço de 7,85 g/cm<sup>3</sup>. Os resultados dos ensaios estão ilustrados na Tabela 26 e Figura 45, abaixo.

Tabela 26 – Influência das fibras na compactidade do material

Teor de Fibra	Massa de Brita (g)	Massa de Fibra (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Altura final do material - mm	Compacidade Experimental
0,00%	2511	0	900	8,612	0,59136
1,00%	2511	70,65	900	8,941	0,57531
3,00%	2511	211,95	900	9,406	0,55769
5,00%	2511	353,25	900	9,794	0,54602

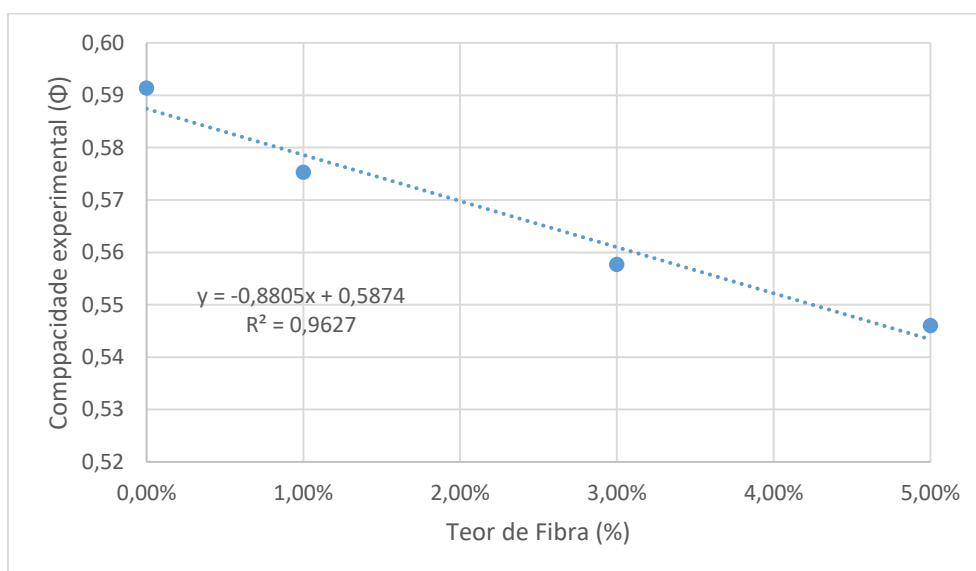


Figura 45 – Curva de compacidade experimental *versus* teor de fibra

Como esperado, observa-se que a compacidade diminui com o aumento do teor de fibras. O mesmo foi constatado por Grunewald (2004), que verificou o efeito de diferentes tipos de fibra na compacidade de agregado graúdo.

Para o ensaio somente com as fibras, a média das duas compacidades experimentais encontradas – 0,09913 e 0,10019 – resultou em um valor médio de compacidade experimental igual a 0,0997.

Como mostrado na revisão da literatura, existem 2 formas de considerar a inclusão das fibras no MEC: o conceito de diâmetro equivalente proposto por Yu *et al.* (1993), o conceito

de volume perturbado proposto por De Larrard (1999). Além dessas duas considerações, Ferrara et al. (2007) propõe um método de dosagem de CAARF que considera, também, um diâmetro equivalente, como mostra a equação (60). Foi realizado o cálculo das compacidades por estas três considerações, a fim de avaliar qual se aproxima mais dos valores obtidos experimentalmente.

Para o cálculo do diâmetro equivalente, foram utilizadas as fórmulas (26), (28) e (29), propostas por Yu *et al.* (1993). Para a fibra FS7, que possui diâmetro de 0,55 mm e comprimento de 33mm, foi encontrado um valor de 14,15 mm. A partir desse diâmetro foram calculadas compacidades fazendo-se uso de 2 diferentes análises: (1) a primeira consiste em calcular as compacidades com o diâmetro equivalente e a compacidade experimental das fibras encontradas, (2) a segunda consiste no cálculo das compacidades com o diâmetro equivalente encontrado e considerando a fibra como sendo uma esfera perfeita. Essa segunda análise foi realizada pois a proposta de Yu *et al.* (1993) é de considerar as fibras como esferas e desta forma, considerou-se interessante realizar simulações com a compacidade igual à de uma esfera perfeita.

Utilizando a planilha eletrônica, foram calculadas as compacidades de uma mistura binária de brita (classe 4,75/6,3) e fibras, considerando o diâmetro equivalente calculado das fibras, a compacidade experimental somente das fibras, o diâmetro médio e a compacidade experimental do agregado e o índice de compactação  $K=13$ . Com esses dados, foi possível calcular compacidades dessa mistura binária com fração granulométrica de agregados ( $y_2$ ) igual a 1, 0,99, 0,97 e 0,95. Os resultados obtidos estão na Tabela 27 e no Figura 46.

Tabela 27 – Compacidade calculada considerando o diâmetro equivalente das fibras

<b>Fração volumétrica da classe <math>y_2</math> (Brita 0)</b>	<b>Teor de Fibra</b>	<b>Compacidade Calculada</b>	<b>Erro</b>
1	0,00%	0,591	0,00%
0,99	1,00%	0,578	0,53%
0,97	3,00%	0,554	0,70%
0,95	5,00%	0,531	2,78%
Erro médio em relação à $\Phi_{exp}$			1,33%



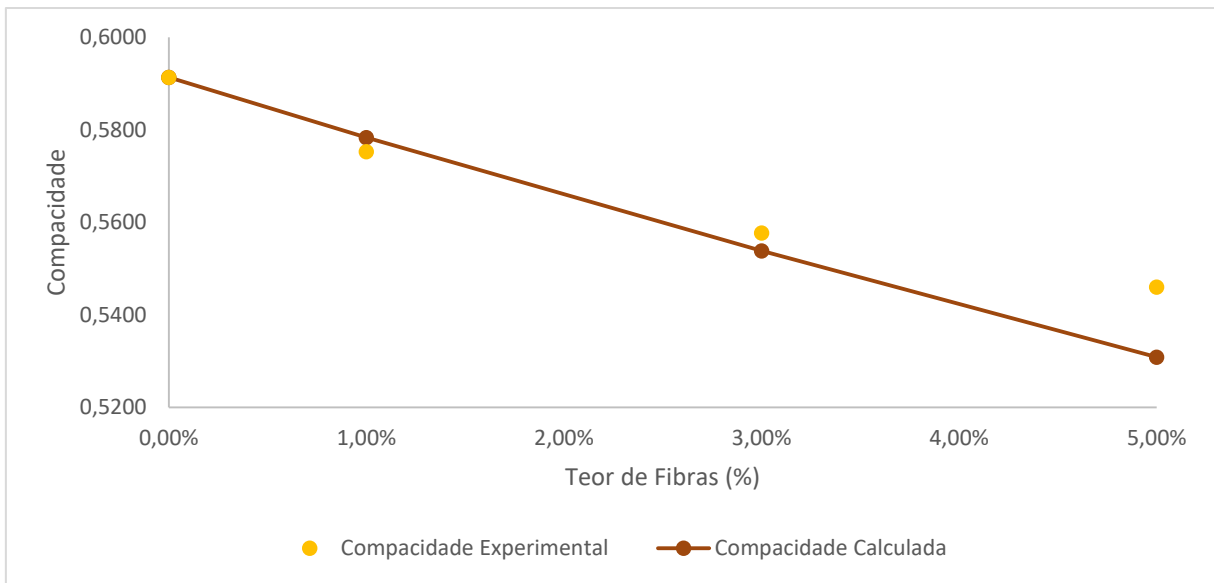


Figura 46 – Curva de compacidade versus teor de fibras com consideração do diâmetro equivalente

Nota-se que, com essas considerações, as compacidades calculadas se aproximaram das compacidades experimentais, mostrando que a consideração do diâmetro equivalente das fibras e a compacidade experimental dessas possuem valores coerentes.

Realizando, com a mesma planilha eletrônica, simulações com valores arbitrários de diâmetros equivalentes de fibras, observou-se que o erro médio possui dois mínimos locais de diâmetro, como ilustra a Figura 47. Isto é, existem 2 pontos nos quais a compacidade calculada se aproxima da compacidade experimental.

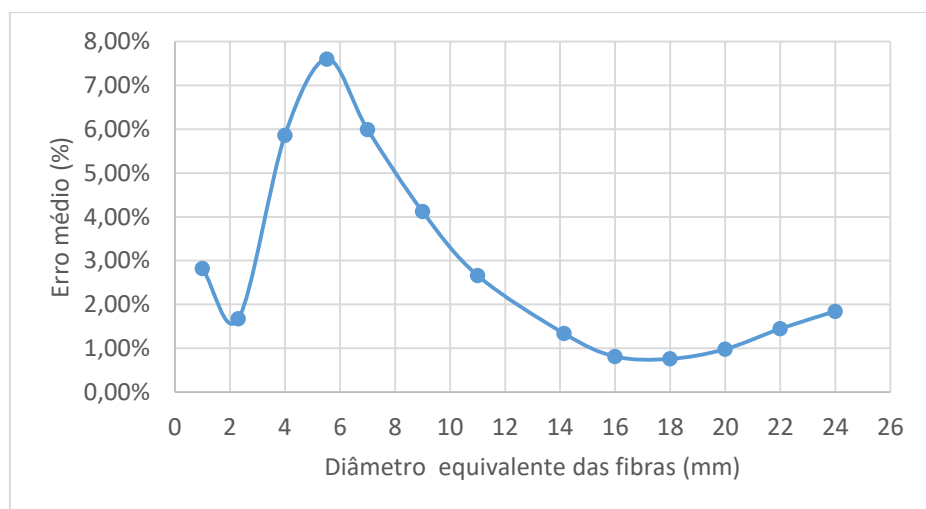


Figura 47 – Curva de Erro médio versus Diâmetro equivalente das fibras

Percebe-se, também, que, mesmo com 2 pontos convergindo para um valor mínimo de erro médio, o menor erro está próximo do valor encontrado de diâmetro equivalente no método de Yu *et al.* (1993). Notou-se, também, que o outro ponto onde o erro é mínimo (com o diâmetro próximo de 2 mm), aproxima do valor de diâmetro equivalente proposto por Ferrara *et al.* (2007), que foi calculado a partir da equação (60), e foi encontrado um valor de 2,31 mm – valor que apresentou erro médio de 1,66%. É necessário, entretanto, realizar mais ensaios e um estudo mais detalhado sobre esses resultados obtidos, a fim de ter conhecimento de quais valores de diâmetro equivalente estariam mais coerentes para a inclusão das fibras no MEC.

Mesmo apresentando resultados razoáveis, essa análise não é válida para a dosagem do concreto, tendo em vista que a proposta de Yu & Zu (1998) é encontrar um diâmetro equivalente para uma esfera fictícia. Em se tratando de esfera, é importante salientar que a compacidade virtual  $\beta$  de uma esfera é igual a 0,74. Dito isto, foi realizada uma análise das compacidades calculadas pela planilha eletrônica utilizando-se o diâmetro equivalente (14,15 mm) da fibra e a compacidade virtual de um conjunto de esferas ( $\beta_1 = 0,74$ ). Os resultados obtidos se encontram na Tabela 28 e no Figura 48.

Tabela 28 - Compacidade calculada considerando o diâmetro equivalente das fibras e  $\beta_1 = 0,74$

<b>Fração volumétrica da classe <math>y_2</math> (Brita 0)</b>	<b>Teor de Fibra</b>	<b>Compacidade Calculada</b>	<b>Erro</b>
1	0,00%	0,591	0,00%
0,99	1,00%	0,593	3,09%
0,97	3,00%	0,597	6,97%
0,95	5,00%	0,600	9,89%
Erro médio em relação à $\Phi_{exp}$			6,65%

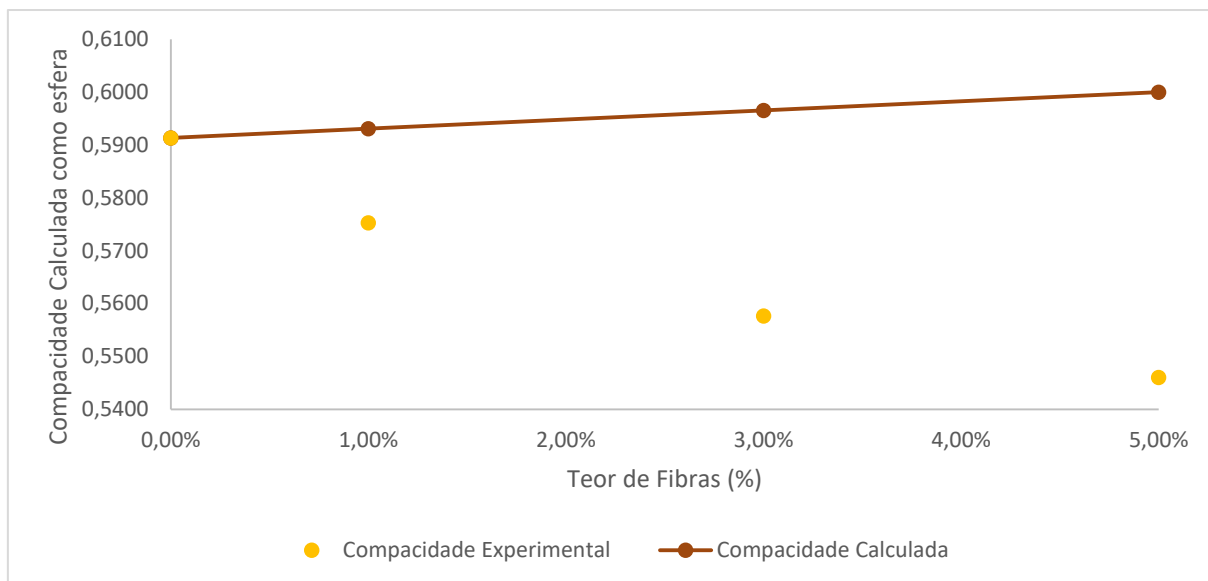


Figura 48 – Curva de compacidade versus teor de fibras com diâmetro equivalente e  $\beta_1 = 0,74$

Percebe-se, com os resultados obtidos, que as compacidades calculadas divergem muito das compacidades experimentais. Além disto, nota-se que a compacidade aumenta com o incremento de teor de fibra, algo que não faz muito sentido, haja vista que, de acordo com De Larrard (1999), a inclusão das fibras gera efeito de perturbação na compacidade do material, fazendo com que a compacidade desse diminua.

O conceito proposto por De Larrard (1999) de volume perturbado também foi analisado e comparado com os resultados experimentais. O cálculo das compacidades pelo volume perturbado foi realizado a partir da equação (25) e dos dados apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Dados para o cálculo da compacidade considerando o volume perturbado

<b>VOLUME PERTURBADO</b>	
Diâmetro da Fibra	0,055 cm
Largura da Fibra	3,3 cm
Nº de Fibras por g	16,1 un./g
Densidade	7,85 g/cm <sup>3</sup>
Diâmetro médio do agregado	0,553 cm
$k_f$	0,065
$v_p$	0,02 cm <sup>2</sup>

A partir disso, foi possível calcular as compacidades considerando o volume perturbado pelas fibras. Os resultados estão presentes na Tabela 30 e Figura 49.

Tabela 30 – Compacidades calculadas considerando o volume perturbado

Teor de Fibra ( $\Phi_f$ )	$N_f$	$v_p$	Compacidade Calculada	Erro
0,00%	0	0	0,59136	0,00%
1,00%	1,26	0,02	0,57078	0,79%
3,00%	3,79	0,02	0,52961	5,03%
5,00%	6,32	0,02	0,48844	10,55%
Erro médio em relação à $\Phi_{exp}$				5,46%

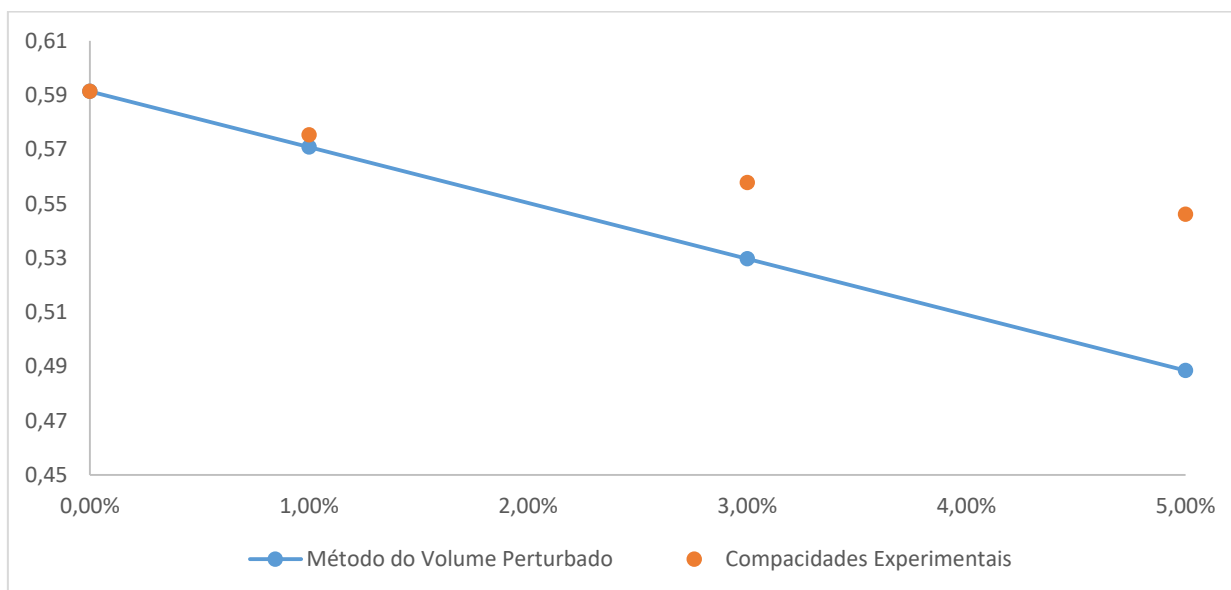


Figura 49 – Curva de compacidade versus teor de fibra com o conceito de volume perturbado

A partir dos resultados obtidos, notou-se que o erro ampliou conforme o aumento do teor de fibras. O erro máximo encontrado, de 10,55%, é consideravelmente alto. Contudo, a curva se comportou de forma razoável, tendo em vista que a compacidade abaixou com o incremento das fibras.

Pode-se concluir, a partir do explicitado, que o conceito de volume perturbado, proposto por De Larrard (1999) seria coerente para a inclusão das fibras no MEC para uma dosagem de concreto com fibras, devendo-se atentar somente ao fato de que o erro aumenta com o incremento do teor de fibras na mistura granular. Contudo, o conceito de diâmetro equivalente também mostrou excelentes resultados, quando analisado com a compacidade experimental das fibras, mostrando resultados até mais precisos que os encontrados com a análise de volume perturbado.

Para efeitos de dosagem, que será explicada no item seguinte, foram simuladas situações considerando o conceito de volume perturbado e de diâmetro equivalente considerando a fibra como sendo uma esfera. A conclusão sobre a melhor situação escolhida será apresentada no próximo item.

### 4.3. ESTUDOS DAS DOSAGENS DO *BETONLAB PRO*

#### 4.3.1. Inclusão das fibras no *Betonlab Pro 3*

Nesta etapa, comparou-se quatro simulações contendo fibras, duas pelo método proposto por De Larrad (1999), o qual considera que as compacidades dos materiais são perturbadas pela inserção das fibras e duas pelo método de Yu *et al.* (1993) do diâmetro equivalente. Para inserir este último no *BetonLab*, considerou-se a fibra um agregado gráudo com granulometria igual ao diâmetro equivalente.

A compacidade experimental inserida foi a encontrada no ensaio de vibração e compressão realizado somente com fibras (0,099). O *K* inserido foi o mesmo dos outros materiais (13) e com esse valor o software calculou a compacidade virtual (0,115). A Tabela 31, a seguir, mostra a compacidade dos agregados perturbados pela inclusão da fibra FS7.

Tabela 31 - Compacidades pertubas pela fibra FS7

Material	$v_p$	Inclusão das Fibras ( Volume Perturbado)				
		0,40%	0,60%	0,80%	1,00%	1,15%
Brita	0,021	0,613	0,609	0,604	0,600	0,596
Areia Fina	0,010	0,598	0,595	0,592	0,589	0,587
Areia Média abaixo de 0,6	0,008	0,626	0,623	0,621	0,618	0,616
Areia Média entre 0,6-1,2	0,009	0,636	0,633	0,630	0,628	0,625
Areia Média entre 1,2-2,4	0,011	0,676	0,673	0,669	0,666	0,664
Areia Média acima da 2,4	0,015	0,674	0,670	0,666	0,662	0,659

Esse valores foram inseridos no *Betonlab* para a dosagem pelo método do De Larrard (1999) e os valores finais das simulações estão exibidos na Tabela 32.

Tabela 32 – Simulações método de De Larrard (1998) e Yu et al (1993)

<b>Propriedades</b>	<b>De Larrard 0,4%</b>	<b>De Larrard 1,15%</b>	<b>Yu 0,4%</b>	<b>Yu 1,15%</b>
Fibras (kg/m <sup>3</sup> )	---	---	30,5	90
Brita (kg/m <sup>3</sup> )	781,4	752,7	775,4	734
Areia Média (kg/m <sup>3</sup> )	620,5	621,3	614,9	599,1
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	342,2	354,4	347,5	358,6
Fíler (kg/m <sup>3</sup> )	355,7	366,1	360,2	370,4
Superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	4,62	4,73	4,63	4,78
água (kg/m <sup>3</sup> )	232,5	237,3	232,7	238,5
Brita (%)	97	53,27	53,62	52,1
Areia média (%)	45,5	46,73	45,63	45,63
Teor de superplastificante (%)	0,4	0,4	0,4	0,4
Tensão de escoamento (Pa)	400	400	400	400
Viscosidade plástica (Pa.S)	97	92	95	92
Fc7 (MPa)	22,7	22,7	22,8	22
Fc28 (MPa)	30	30	30	30
Índice de compactação - K	5,653	5,654	5,679	5,735
Contribuição dos finos - K'f	3,3	3,3	3,3	3,3
Contribuição dos agregados graúdos - K'gg	0,948	0,936	1,007	1,139

A partir dos resultados das simulações, é possível perceber que as dosagens foram muito próximas, mostrando que o método do diâmetro equivalente de Yu et al (1993) pode ser uma alternativa para a inserção das fibras no *Betonlab*. É, também, importante ressaltar que o método de Yu et al (1993) obteve erros menores nas comparações com os estudos experimentais do item 4.2.3. Porém, pelo fato desta pesquisa ser a primeira a utilizar a dosagem pelo MEC com os materiais da região e por ser a primeira a utilizar os protocolos e equipamentos do LEM, decidiu-se prosseguir os estudos com o método de De Larrard(1999) por ser o sugerido pelo criador do programa e desta forma não adicionar uma possível fonte de erro nas dosagens. Entretanto, ressalta-se que os resultados das simulações pelo método de Yu et al (1993) foram interessantes e podem ser estudados em pesquisas futuras.

### 4.3.2. Verificação da dosagem do software

#### 4.3.2.1. Calibração dos parâmetros $p$ e $q$

Para a calibração dos parâmetros  $p$  e  $q$  foram fabricados dois concretos, com o objetivo de se obter valores de resistências bem distintas. Ambos os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 5739 (ABNT,2007). As quantidades utilizadas e as resistências obtidas na dosagem estão mostradas na Tabela 33.

Tabela 33 – Dosagens das calibrações dos parâmetros  $p$  e  $q$

<b>Propriedades</b>	<b>Menor resistência</b>	<b>Maior resistência</b>
Brita (kg/m <sup>3</sup> )	25	25
Areia Média (kg/m <sup>3</sup> )	20,29	17,27
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	9,06	12,27
Superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	0	71,4 g
Água (kg/m <sup>3</sup> )	4,62	3,24
Fc7 (MPa)	18,10	40,04
Fc28 (MPa)	21,04	42,34

Analisando os resultados, pode-se constatar que era esperado resistências maiores para ambos os concretos. Nota-se, ainda, que o crescimento de resistência de 7 para 28 dias foi muito pequeno. Desta forma, optou-se por utilizar a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) para estimar as resistências dos concretos, pois considerou-se não confiável os valores de 28 dias. Os valores de resistência estimados pela norma para os 28 dias foram 23,2 MPa e 51,412 MPa para o concreto de menor e maior resistência, respectivamente.

Os valores de  $p$  e  $q$  foram obtidos, então, através da calibração mostrada em detalhes no Apêndice D. Os resultados obtidos foram iguais a 0,6578 e 0,00466 para o  $p$  e o  $q$ , respectivamente.

O valor de  $q$  encontrado foi adequado com os valores observados na literatura. Por outro lado, observou-se que o valor de  $p$  foi bem inferior ao encontrado por Silva (2004) e Maragon (2006), e dos materiais disponíveis no *Betonlab*. Em todos os trabalhos e no programa o  $p$  é maior que 1. Esse resultado pode ser consequência dos valores baixos das resistências obtidas, que deveriam ser mais altas para os consumos de cimento utilizados. Porém, optou-se por fazer as análises iniciais com esses valores.

A Figura 50 ilustra a realização da concretagem e ensaios para a calibração do  $p$  e  $q$ .



(a) concretagem



(b) ensaio de abatimento de tronco de cone



(c) moldagem e vibração dos corpos de prova



(d) ensaio de compressão

Figura 50 – Procedimentos para determinação dos parâmetros de  $p$  e  $q$

#### 4.3.2.2. Avaliação das dosagens do programa

A partir da inserção dos resultados de caracterização, foram realizadas as primeiras simulações no software. As primeiras dosagens foram realizadas sem as fibras, os resultados estão mostrados na Tabela 34, na qual 1 representa a otimização do esqueleto granular, 2 um CAA de 30 MPa e 3 um CAA de 40MPa.



Tabela 34 – Dosagem inicial no BetonLab

<b>Propriedades</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Brita 0 (kg/m <sup>3</sup> )	1131,3	803,3	937,7
Areia Média (kg/m <sup>3</sup> )	756,5	537,2	627,1
Areia Fina (kg/m <sup>3</sup> )	0	0	0
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	300	584,5	637,4
Fíler A (kg/m <sup>3</sup> )	100	245,2	27,1
Superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	4	7,79	8,5
água (kg/m <sup>3</sup> )	160,4	219,8	199,2
Brita (%)	58,22	58,22	58,22
Areia média (%)	41,78	41,78	41,78
Areia fina (%)	0	0	0
Teor de superplastificante (%)	0,4	0,4	0,4
Relação p/a	1,11	1,495	1,495
Tensão de escoamento (Pa)	28002	400	400
Viscosidade plástica (Pa.S)	1228	137	200
Fc7 (MPa)	17,1	27,4	35,4
Fc28 (MPa)	20,7	30	37,9
Índice de compactação - K	10,941	6,094	6,612
Contribuição dos finos - K'f	2,305	3,3	3,487
Contribuição dos agregados graúdos – K'gg	1,636	0,959	1,333
Preço	212,44	353,96	381,51

Apesar da resistência para a dosagem 3 ter sido especificada em 40 MPa, o software não conseguiu gerar uma dosagem que atinja tal resistência. Foi constatado, ainda, que os consumos de cimento para as duas resistências foram muito elevados. Além disso, a quantidade de fíler para a maior resistência foi baixa e a quantidade de areia fina para ambos os concretos foi zerada.

Para avaliar os resultados não esperados no fíler e no cimento, foram realizadas uma série de simulações, nas quais analisou-se o comportamento dos materiais utilizados. Já para a areia fina, considerou-se que o provável motivo para o *software* zerar a quantidade é a não uniformidade do material (mostrado no gráfico da Figura 29, página 65)).

As simulações foram realizadas através da substituição dos materiais da pesquisa por materiais referência disponibilizados no *Betonlab*, os quais têm a eficiência comprovada em Sedran (2018). Em todas as simulações, tentou-se alcançar um concreto autoadensável com resistência de 30MPa. As dosagens realizadas e as conclusões são apresentadas abaixo:

**Traço 1:** Cimento e superplastificante da pesquisa e utilização dos agregados e Fíler do Betonlab: Foi obtido um consumo de cimento de 460 Kg/m<sup>3</sup>, e consumo de fíler próximo de

200 Kg/m<sup>3</sup>. Desta forma, o concreto obteve valores compatíveis com um CAA, levantado a hipótese que o problema estaria nos dados dos agregados.

**Traço 2:** Cimento, superplastificante e fíler da pesquisa e agregados do *Betonlab*: Apresentou um consumo de cimento muito elevado. Como a única diferença do traço 1 para o 2 foi a mudança do fíler, conclui-se que possivelmente o fíler inicialmente proposto não era adequado.

**Traço 3:** Fíler do *Betonlab* e o restante dos materiais da pesquisa: Obteve-se um consumo de cimento elevado comprovando que o problema das dosagens iniciais não eram apenas no fíler.

**Traço 4:** Cimento, superplastificante e fíler do *Betonlab* e agregados da pesquisa: O consumo de cimento também foi elevado, fortalecendo a hipótese do problema estar nos agregados.

**Traço 5:** Cimento da pesquisa e os outros materiais do *Betonlab*: Obteve-se um adequado consumo de cimento, apontando que o problema não estava no cimento.

**Traço 6:** Como as hipóteses apontavam para os agregados e a maior probabilidade de erro nesses materiais era nos parâmetros  $p$  e  $q$ , como discutido no item 4.3.2.1. Decidiu-se substituir os valores de  $p$  e  $q$  dos agregados do *Betonlab* pelos valores encontrados na calibração da pesquisa e realizou-se uma simulação. Nesta simulação, o consumo de cimento foi elevado dando fortes indícios que os valores de  $p$  e  $q$  encontrados na calibração não estavam adequados.

Apesar do problema no consumo de cimento e da possibilidade do fíler não ser adequado, decidiu-se realizar uma das dosagens encontradas para averiguar o comportamento do concreto. A dosagem escolhida foi para um concreto autoadensável, de 30MPa e 0,6% de fibras, os resultados estão mostrados na Tabela 35, na qual 1 é a otimização do esqueleto e 2 é o traço com as propriedades do CAA.

Tabela 35 – Segunda dosagem no Betonlab

<b>Propriedades</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Brita 0 (kg/m <sup>3</sup> )	1116,9	781,6
Areia Média (kg/m <sup>3</sup> )	768,3	537,7
Areia Fina (kg/m <sup>3</sup> )	0	0
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	300	594,4
Fíler B (kg/m <sup>3</sup> )	100	246,9
Superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	4	7,93
Água (kg/m <sup>3</sup> )	160,5	223,1
Brita (%)	57,53	57,53
Areia média (%)	42,47	42,47
Areia fina (%)	0	0
Teor de superplastificante (%)	0,4	0,4
Relação p/a	1,454	1,454
Tensão de escoamento (Pa)	9396	400
Viscosidade plástica (Pa.S)	1075	134
Fc7 (MPa)	18,2	27,4
Fc28 (MPa)	21,9	30
Índice de compactação - K	10,22	6,096
Contribuição dos finos - K'f	2,131	3,3
Contribuição dos agregados graúdos – K'gg	2,544	0,955

O concreto encontrado obteve um valor adequado para a caixa L, porém no ensaio de espalhamento e do funil V foi evidenciado que ocorreu segregação. Após o ensaio do funil V realizou-se a aferição da massa específica do concreto. Os valores de tais ensaios estão mostrados na Tabela 36 e as fotos na Figura 51.

Tabela 36 – Resultados dos ensaios no estado fresco do primeiro concreto

<b>Ensaio</b>	<b>Resultados</b>	<b>Valores da norma para um concreto de ampla utilização</b>
Espalhamento	822,5	660 a 750 cm
T500	3,13	>2
Funil V	26,35	9 a 25 s
Caixa L	0,9	>0,8



Figura 51 – Concretagem do primeiro traço e ensaios no estado fresco

Atribuiu-se duas possíveis causas para a segregação do concreto: (1) o fíler não ser adequado, confirmando a previsão da simulação 2 e (2) ter ocorrido algum problema na calibração dos parâmetros  $p$  e  $q$ , confirmando as previsões das simulações e ratificando o possível erro no valor de  $p$  citado no item 4.3.2.1.

A partir das conclusões acima, decidiu-se substituir o fíler da pesquisa e estimar os parâmetros  $p$  e  $q$ . O novo fíler utilizado foi o Fíler B definido no item 3.1.4 da metodologia, este material é semelhante em massa específica e compacidade com o proposto inicialmente mas possui um diâmetro máximo bem menor.

A estimativa dos parâmetros  $p$  e  $q$  foi realizada fixando-se o valor de  $q$  no valor encontrado na calibração e calculando-se o valor de  $p$  a partir de uma resistência estimada para o agregado graúdo. Desta forma, é possível calcular o  $p$  a partir da equação 50. A resistência da brita zero foi considerada de 150 MPa, que é um valor típico para um basalto, granito e calcário. Os novos valores de  $p$  e  $q$  foram 1,49 e 0,00466, respectivamente. É possível perceber que o valor de  $p$  está mais coerente com os valores encontrados nos trabalhos citados no item 4.3.2.1

Com os novos valores de  $p$  e  $q$  e o novo fíler, foi gerado uma nova dosagem com propriedades iguais ao concreto fabricado, um CAA de 30MPa com 0,6% de fibras. Os resultados da nova dosagem estão ilustrados, na qual 1 é a otimização do esqueleto e 2 o CAA otimizado.

Tabela 37 – Dosagem com os novos valores de  $p$  e  $q$  e o novo fíler

<b>Propriedades</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Brita (kg/m <sup>3</sup> )	1039,1	775,4
Areia Média (kg/m <sup>3</sup> )	831,1	620,2
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	300	348,4
Fíler (kg/m <sup>3</sup> )	100	361
Superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	4	4,65
Água (kg/m <sup>3</sup> )	160,7	233,7
Brita (%)	53,81	53,81
Areia média (%)	46,19	46,19
Teor de superplastificante (%)	0,4	0,4
Relação p/a	1,25	226,9
Tensão de escoamento (Pa)	4130	400
Viscosidade plástica (Pa.S)	740	94
Fc7 (MPa)	40	22,7
Fc28 (MPa)	48,3	30
Índice de compactação - K	9,316	5,654
Contribuição dos finos - K'f	2,697	3,3
Contribuição dos agregados graúdos – K'gg	2,081	0,943

Observou-se que o consumo de cimento foi coerente, confirmando os problemas nos primeiros valores dos parâmetros  $p$  e  $q$  e no fíler inicial. Percebeu-se, também, que o valor do índice de compactação foi menor que em todas as dosagens anteriores, o que é consequência de um fíler mais fino. Pode ser, ainda, ser constatado que o programa não utilizou novamente a areia fina, ratificando a hipótese inicial que o material é descontínuo.

Como os resultados da dosagem foram coerentes e de acordo com o esperado, decidiu-se fabricar o concreto para verificar a dosagem proposta pelo *software*. O resultado foi um concreto coeso e com características de um CAA, porém no ensaio de espalhamento e no ensaio de caixa L o concreto não atingiu os valores necessários, o que é evidenciado na Tabela 38 e na Figura 52.

Tabela 38 – Resultados da nova dosagem

Ensaio	Resultados	Valores da norma para um concreto de ampla utilização
Espalhamento	472,5	660 a 750 cm
T500	6,3	>2
Funil V	12,6	9 a 25 s
Caixa L	0,66	>0,8



(a) aparência do concreto



(b) espalhamento do concreto



(c) ensaio de espalhamento



(d) caixa L

Figura 52 – Concretagem do segundo traço e ensaios no estado fresco

Percebe-se, entretanto, que os valores foram próximos ao recomendado pela norma NBR 15823 (2017b), e desta forma um pequeno ajuste na água ou na quantidade de superplastificante seria o suficiente para atingir todas as exigências normativas. Sendo assim, a provável causa de o concreto não possuir todas as características necessárias está na correção da água de absorção dos agregados, que devem estar na condição saturada superfície seca. Durante o ensaio tentou-se adicionar a água de absorção, mas foram obtidos resultados semelhantes aos exibidos na Tabela 38, o que se deve ao fato de naquele momento o superplastificante já ter perdido parte da sua eficácia.

A partir dos resultados concluiu-se, então, que a última dosagem do *Betonlab* teve sucesso na dosagem do CAA, onde acredita-se que um melhor ajuste na água de absorção já seria o suficiente para melhorar as propriedades de espalhamento. Desta forma, decidiu-se prosseguir o estudo paramétrico com os últimos resultados de  $p$  e  $q$  e com o último filer estudado.

#### 4.3.3. Estudo de dosagem do CAARF, fazendo-se uso de software baseado no MEC, *Betonlab Pro 3*

##### 4.3.3.1. Simulações de diversas dosagens

Para avaliar diversas dosagens, foram realizadas algumas simulações no *Betonlab*, nas quais o teor de fibras e a resistência a compressão foram variadas. O teor de fibras foi modificado no programa alterando a compactidade dos agregados que são afetadas pelas fibras como explicado em detalhes no item 4.2.3.

Inicialmente pensou-se em realizar dosagens com outros tipos de fibra, porém quando as compactidades influenciadas pelas fibras foram calculadas, foi possível perceber que os valores foram muito próximos aos calculados para a fibra FS7 (Tabela 10) como mostrado na Tabela 39, Tabela 40 e Tabela 41, a seguir.

Tabela 39 – Valores da compacidade perturbada pelas fibras FF1

Material	v <sub>p</sub>	Inclusão das Fibras FF1				
		0,40%	0,60%	0,80%	1,00%	1,15%
Brita	0,071	0,615	0,612	0,608	0,605	0,602
Areia Fina	0,045	0,5980	0,595	0,593	0,590	0,588
Areia Média abaixo de 0,6	0,041	0,626	0,623	0,621	0,618	0,616
Areia Média entre 0,6-1,2	0,044	0,636	0,634	0,631	0,628	0,626
Areia Média entre 1,2-2,4	0,048	0,676	0,673	0,670	0,667	0,665
Areia Média acima da 2,4	0,058	0,675	0,672	0,668	0,665	0,663

Tabela 40 – Valores da compacidade perturbada pelas fibras FF3

Material	v <sub>p</sub>	Inclusão das Fibras FF3				
		0,40%	0,60%	0,80%	1,00%	1,15%
Brita	0,048	0,614	0,610	0,607	0,603	0,600
Areia Fina	0,027	0,5978	0,595	0,592	0,590	0,588
Areia Média abaixo de 0,6	0,023	0,626	0,623	0,621	0,618	0,616
Areia Média entre 0,6-1,2	0,025	0,636	0,633	0,631	0,628	0,626
Areia Média entre 1,2-2,4	0,029	0,676	0,673	0,670	0,667	0,664
Areia Média acima da 2,4	0,037	0,675	0,671	0,667	0,664	0,661

Tabela 41 – Valores da compacidade perturbada pelas fibras FF4

Material	v <sub>p</sub>	Inclusão das Fibras FF4				
		0,40%	0,60%	0,80%	1,00%	1,15%
Brita	0,058	0,614	0,610	0,606	0,602	0,600
Areia Fina	0,032	0,598	0,595	0,592	0,590	0,588
Areia Média abaixo de 0,6	0,028	0,626	0,623	0,621	0,618	0,616
Areia Média entre 0,6-1,2	0,031	0,636	0,633	0,631	0,628	0,626
Areia Média entre 1,2-2,4	0,035	0,676	0,673	0,670	0,667	0,664
Areia Média acima da 2,4	0,044	0,675	0,671	0,667	0,664	0,661

Percebe-se que os valores do volume perturbado são diferentes, porém no cálculo da compacidade o valor do volume é compensado pelo número de fibras por quilo, que é maior quando a fibra tem dimensões menores como mostra a Tabela 10. Com esses valores, concluiu-se que as dosagens seriam muito próximas e desta forma não foi necessário realizar as simulações.

As simulações foram, então, realizadas somente para a fibra FS7 variando os teores de fibra e a resistência à compressão, a metodologia utilizada na otimização foi a explicada no



item 3.2.3, os resultados estão ilustrados na Tabela 43. É importante ressaltar que todas as simulações foram realizadas com a inclusão da areia fina, porém o programa não utilizou, novamente, o material. Esse fato foi também observado nas dosagens do item 4.3.2 e possivelmente é causado pela descontinuidade do material.

Tabela 42 – Simulações com a fibra FS7

Consumo / Propriedade	30 MPa						50 MPa						70 MPa						90 MPa					
	0,00%	0,40%	0,60%	0,80%	1,00%	1,15%	0,00%	0,40%	0,60%	0,80%	1,00%	1,15%	0,00%	0,40%	0,60%	0,80%	1,00%	1,15%	0,00%	0,40%	0,60%	0,80%	1,00%	1,15%
Brita B0 (kg/m³)	797,5	781,4	775,4	765,9	759,6	752,7	858,3	841,2	834,8	824,7	818	810,7	889	871,3	864,7	854,3	847,4	839,6	839,2	823,6	818	808,7	802,7	795,9
Areia Média (kg/m³)	620,5	621,3	620,2	621,6	620,9	621,3	667,8	668,9	667,8	669,3	668,7	669,1	691,7	692,8	691,7	693,4	692,7	693,2	652,9	654,9	654,4	656,3	656,2	657
Cimento (kg/m³)	342,2	346,4	348,4	350,6	352,6	354,4	430	436	438,9	442,1	444,9	447,6	528,3	536,4	540,3	544,5	548,3	551,8	715,9	723,6	727,2	731,3	734,9	738,3
Filer B (kg/m³)	355,7	359,3	361	362,9	364,5	366,1	216	218,2	219,3	220,5	221,5	222,5	96,2	96,8	97,2	97,5	97,8	98	0	0	0	0	0	0
Superplastificante (kg/m³)	4,56	4,62	4,65	4,68	4,7	4,73	5,73	5,81	5,85	5,89	5,93	5,97	7,04	7,15	7,2	7,26	7,31	7,36	9,55	9,65	9,7	9,75	9,8	9,84
Água (kg/m³)	230	232,5	233,7	235	236,2	237,3	211,8	214,5	215,7	217,1	218,3	219,4	202,3	205	206,3	207,7	208,9	210,1	206,4	208,4	209,3	210,3	211,2	212,1
Brita (%)	54,5	53,96	53,81	53,45	53,27	53,03	54,5	53,96	53,81	53,45	53,27	53,03	54,5	53,96	53,81	53,45	53,27	53,03	54,5	53,96	53,81	53,45	53,27	53,03
Areia média (%)	45,5	46,04	46,19	46,55	46,73	46,97	45,5	46,04	46,19	46,55	46,73	46,97	45,5	46,04	46,19	46,55	46,73	46,97	45,5	46,04	46,19	46,55	46,73	46,97
Teor de superplastificante (%)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Tensão de escoamento (Pa)	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	346	351	353	355	358	360
Viscosidade plástica (Pa.s)	97	95	94	93	92	92	141	138	137	136	135	134	173	170	169	167	166	165	200	200	200	200	200	200
Fc7 (MPa)	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	43	43	43	43	46	43	63,6	63,6	63,6	63,6	63,6	63,6	84,6	84,6	84,6	84,6	84,6	84,6
Fc28 (MPa)	30	30	30	30	30	30	50	50	50	50	50	50	70	70	70	70	70	70	90	90	90	90	90	90
Índice de compactação	5,653	5,653	5,654	5,654	5,654	5,654	6,14	6,14	6,14	6,14	6,14	6,14	6,43	6,429	6,43	6,429	6,429	6,429	6,51	6,531	6,542	6,552	6,562	6,571
Contribuição dos finos - K'f	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,838	3,848	3,851	3,857	3,861	3,865
Contribuição das pedras - K'gg	0,948	0,943	0,943	0,939	0,938	0,936	1,123	1,117	1,117	1,113	1,112	1,11	1,22	1,22	1,22	1,215	1,214	1,212	1,069	1,067	1,069	1,067	1,068	1,067

Os resultados mostraram que o consumo de cimento aumenta ligeiramente com a inserção de fibras. Este comportamento ocorreu para todas as resistências e pode ser explicado pela diminuição da compactação dos materiais. Com a compactação reduzida é necessário mais pasta para atingir a mesma resistência. Na mudança da resistência à compressão, o consumo de cimento seguiu o comportamento esperado aumentando com a elevação da resistência.

Em relação ao consumo de fíler, pode-se observar que a quantidade deste material aumentou com a elevação do teor de fibras. Este era o comportamento esperado, já que as fibras diminuem a trabalhabilidade do concreto, sendo necessário mais finos para corrigir. A quantidade de fíler diminuiu com o aumento da resistência a compressão. Esta redução pode ser explicada pelos altos teores de cimento nos concretos de alta resistência, o que aumenta substancialmente o teor de finos, reduzindo a necessidade de fíler para ajustar a reologia do concreto no estado fresco.

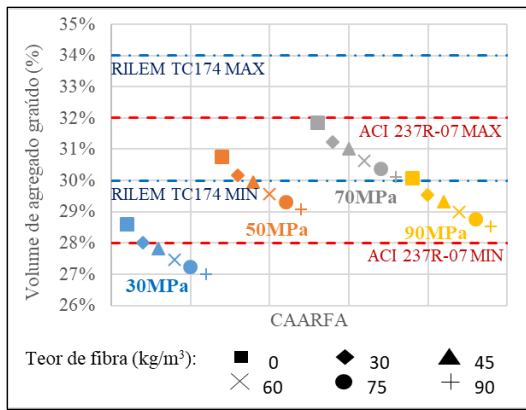
Para a mesma resistência, as quantidades de água aumentaram levemente com o aumento do teor de fibras, este acréscimo foi necessário para que a relação a/c do concreto se mantivesse constante, já que o consumo de cimento também foi acrescido. A quantidade de água manteve-se entre 205 e 237kg/m<sup>3</sup> para todas as resistências, mostrando que para aumentar a resistência o programa priorizou o aumento da quantidade de cimento.

As porcentagens de agregados foram iguais em todas as dosagens, pois as simulações foram realizadas de acordo com o método explicado no item 3.2.3 da metodologia, no qual o primeiro passo é a otimização do esqueleto granular.

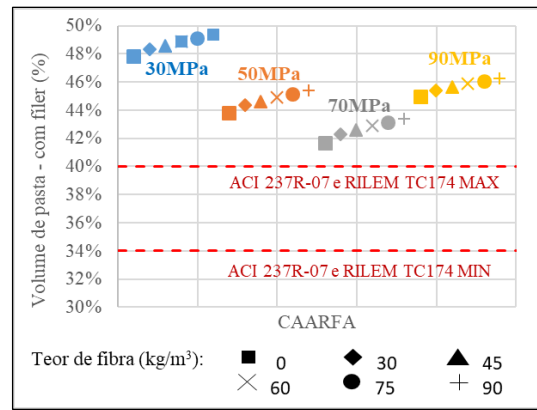
A tensão de escoamento não variou com o aumento dos teores de fibras nas resistências de 30, 50 e 70MPa, porém na resistência de 90MPa a tensão de escoamento aumentou gradativamente com o aumento do teor de fibras, tendo variado de 350 a 356 MPa. Por outro lado, a viscosidade plástica cresceu com o aumento da resistência a compressão e diminuiu com o a elevação no teor de fibras das resistências 30,50 e 70MPa. Na resistência de 90MPa a viscosidade plástica ficou constante e igual a 200 MPa.

As dosagens realizadas pelo *Betonlab* foram comparadas com as recomendações do ACI (Tabela 4) página 37 e do RILEM (

Tabela 5) para um CAA página 37. Estes estudos estão exibidos na Figura 53, Figura 54, Figura 55 e Figura 54.

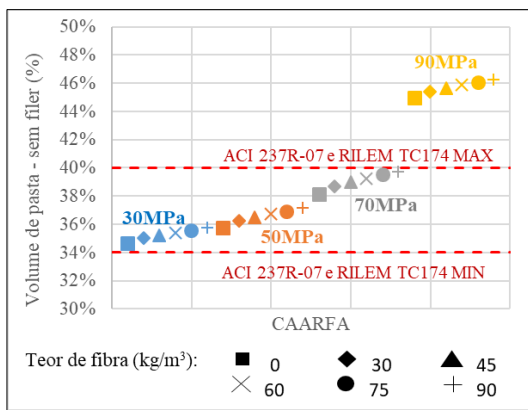


(a) volume de agregado graúdo

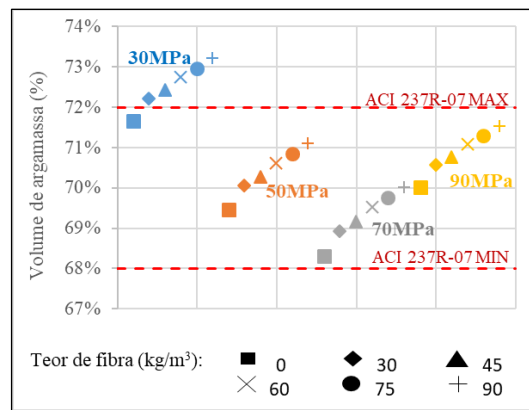


(b) volume de pasta com fíler

Figura 53 – Comparações com relação ao a) volume de agregado graúdo e b) volume de pasta com fíler

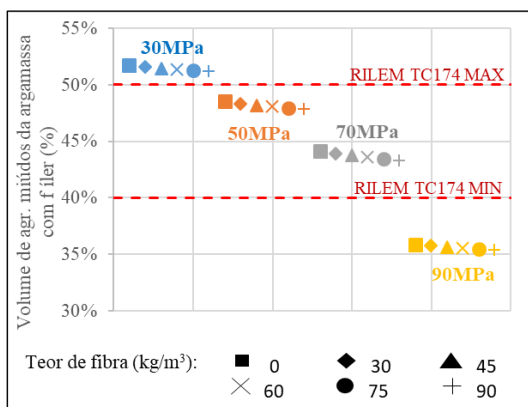


(a) volume de pasta sem fíler

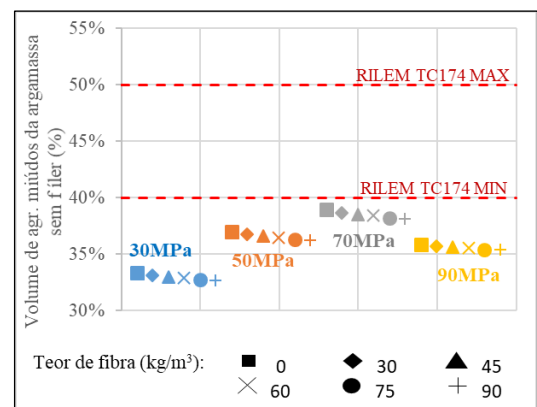


(b) volume de argamassa

Figura 54 – Comparações com relação ao a) volume de pasta sem fíler e b) volume de argamassa



a) Volume de agr. miúdos da argamassa com fíler



a) Volume de agr. miúdos da argamassa sem fíler

Figura 55 – Comparação com relação ao a) Volume de água sobre volume de finos e b) volume de agregado miúdos da argamassa

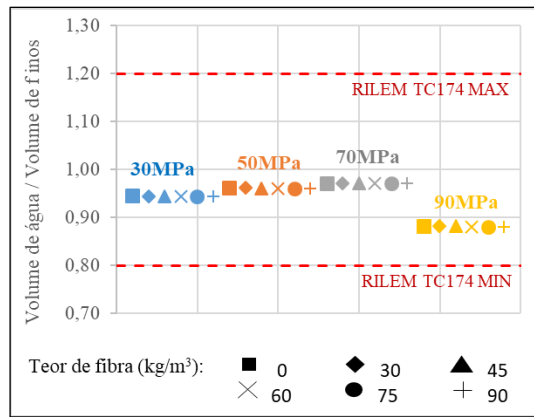


Figura 56 – Volume de água sobre volume de finos

Percebe-se que os teores de agregado graúdo ficaram dentro ou muito próximos dos limites impostos tanto pelo ACI quanto pelo RILEM. É possível notar, também, que o volume de pasta com o fíler diferenciou-se consideravelmente dos limites das associações. Entretanto, a maioria dos volumes de pasta sem o fíler ficaram dentro dos limites, o que mostra uma utilização de fíler elevada pelo MEC usando o *BetonLab*. Uma possível explicação para este fato, é a não utilização de uma areia fina. Pensa-se que a utilização deste material poderia corrigir esses teores. Os altos volumes de pasta para o concreto de 90MPa podem ser efeitos da alta quantidade de cimento, que é explicada pela não utilização de materiais reativos como a micro sílica e materiais pozolânicos.

Analisando a figura 52-b, nota-se que a maioria das quantidades de argamassa ficaram entre os limites do ACI. Já na figura 53-a, as quantidades de agregados miúdos na argamassa das resistências de 50 e 70 MPa ficaram dentro dos limites e as de 30 e 90 MPa fora. Esta observação mostra que em comparação com os limites do RILEM, a resistência de 30 MPa teve, provavelmente, um consumo de fíler alto e a resistência de 90 MPa obteve um consumo de cimento elevado. Porém, quando se verifica os valores de quantidade de agregado miúdo na pasta sem o fíler (figura 53-b), nenhum ponto ficou entres os limites do RILEM. Fazendo conexões com a figura 53-a, percebe-se novamente os altos teores de fíler utilizados pelo *Betonlab* que podem ser consequência da não utilização de uma areia fina. Pensa-se que o fíler foi utilizado para compensar a falta deste material.

Em relação ao teor de fibras, percebe-se que o aumento na quantidade desse material, ocasiona um aumento no teor de pasta e conseqüentemente um aumento no teor de argamassa. Este comportamento mostra que o *Betonlab* considerou mais econômico aumentar o os teores de pasta para manter as propriedades reológicas requeridas do CAARF.

Os gráficos das figuras 57 e 58 mostram a comparação entre os consumos propostos pela RILEM e os consumos no *Betonlab*.

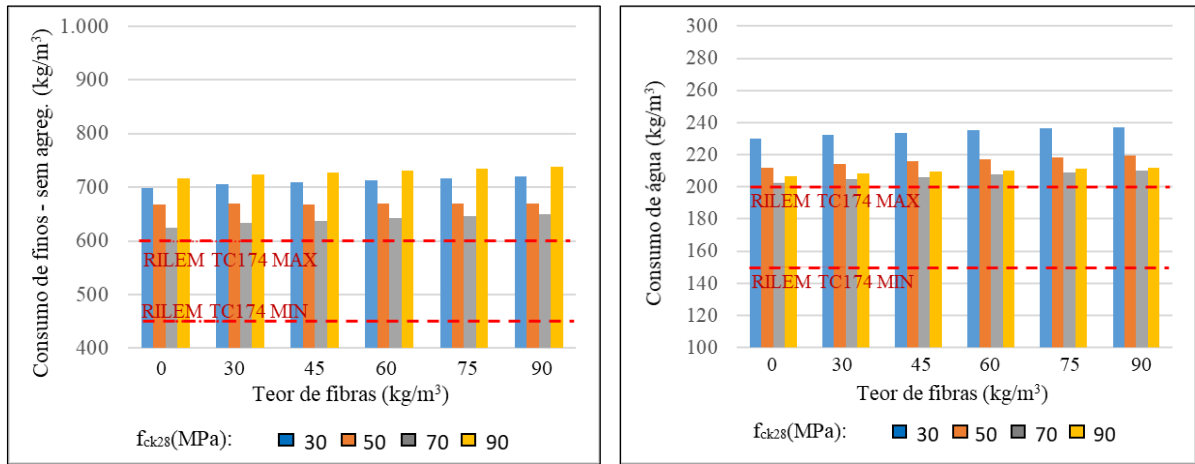


Figura 57 – a) Consumo de finos em kg/m³ (cimento + filer) b) consumo de água em kg/m³

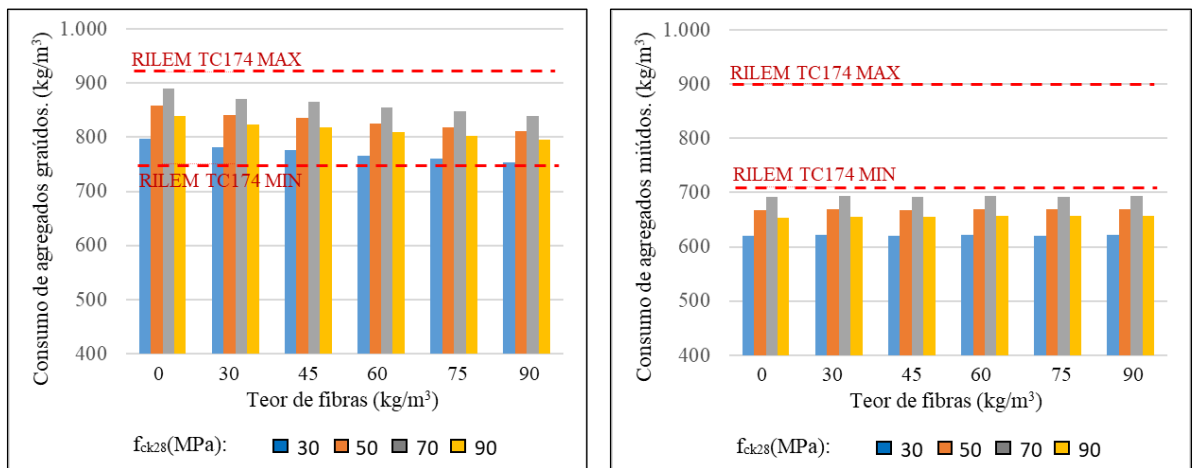


Figura 58 – a) Consumo de agregado graúdo em kg/m³ e b) consumo de agregados miúdos em kg/m³

Nota-se que o consumo de finos e de água foi superior aos limites propostos pela RILEM, o que pode ser explicado, novamente, pelos altos teores de fíler dos concretos de 30 e 50 MPa, que é consequência da não utilização de uma areia fina. Para as resistências de 70 e 90 MPa os motivos prováveis são os altos teores de cimento dos concretos de 70 e 90 MPa.

O consumo de agregado graúdo ficou dentro dos limites propostos pela RILEM e os consumos de agregados miúdos ficaram todos inferiores, indicando novamente que as quantidades de fíler e de cimento no *Betonlab* foram elevados.

A partir dos dois estudos, em volume e em consumo, pode-se concluir que, em alguns pontos os métodos de dosagem se assemelharam muito. Entretanto, os pontos de divergência mostram que um CAA pode ser obtido de diferentes formas. Além disso, é possível dizer que apesar de ser trabalhoso alimentar o programa, pode-se fazer diversas simulações numéricas dependendo do que se quer minimizar quando o programa estiver com todas as caracterizações necessárias. Sendo que essas simulações são certas de primeira ou com apenas um leve ajuste no laboratório.

#### 4.3.3.2. Estudo de sensibilidade na mudança do $K$

Para avaliar a diferença no valor de  $K$  nas dosagens dos concretos, foram simulados dois concretos de 30 e 50 MPa, nos quais os valores de  $K$  foram iguais a 9 que é o valor encontrado por De Larrard (1999). Essas simulações foram comparadas às dosagens realizadas com o valor de  $K$  igual a 13 e os resultados estão exibidos na Tabela 43.

Tabela 43 – Dosagens com variação do parâmetro  $K$

Propriedades	30 MPa		50 MPa	
	K=13	K=9	K=13	K=9
Brita (kg/m <sup>3</sup> )	775,4	791,9	834,8	852,1
Areia Média (kg/m <sup>3</sup> )	620,2	641,4	667,8	690,2
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	348,4	337,8	438,9	423,6
Fler (kg/m <sup>3</sup> )	361	350,6	219,3	212,1
Superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	4,65	4,5	5,85	5,65
Água (kg/m <sup>3</sup> )	233,7	227,1	215,7	208,8
Brita (%)	53,81	53,5	53,81	53,5
Areia média (%)	46,19	46,5	46,19	46,5
Teor de superplastificante (%)	0,4	0,4	0,4	0,4
Relação p/a	1,25	1,235	1,25	1,235
Tensão de escoamento (Pa)	400	400	400	400
Viscosidade plástica (Pa.S)	94	99	137	143
Fck7 (MPa)	22,7	22,7	43	43
Fck28 (MPa)	30	30	50	50
Índice de compactação - K	5,654	5,644	6,14	6,128
Contribuição dos finos - K'f	3,3	3,3	3,3	3,3
Contribuição dos agregados graúdos – K'gg	0,943	0,921	1,117	1,088

Analisando os dados das simulações, é possível perceber que o consumo de cimento foi menor para ambas as dosagens com  $K=9$ , o que era esperado pois um  $K$  maior para as mesmas compacidades experimentais gera compacidades virtuais menores, diminuindo a compacidade da mistura.

A principal razão para esta avaliação, foi a dificuldade na determinação do valor do  $K$  no item 4.2.2.4, onde vários valores de  $K$  apresentaram erros pequenos em comparação com os estudos experimentais. Desta forma, esse estudo visa dar sensibilidade para facilitar a escolha do parâmetro. Percebe-se que um aumento de 44,44% no valor de  $K$  causou um aumento de 3,14% no valor do consumo de cimento para o concreto de 30 MPa e de 3,62% para o de 50 MPa. Logo, conclui-se que um grande aumento no valor de  $K$  causou pequenas variações no consumo de cimento. Isto talvez ocorra pois, como notou-se nos estudos feitos no item 4.2.2, uma elevação do  $K$  para valores superiores a 9 não impacta muito na compacidade da mistura granular.

As quantidades de água e de fíler foram reduzidas com o aumento do  $K$ , sendo consequência da redução do consumo de cimento. A proporção de agregados teve alteração na primeira casa decimal e, portanto, as modificações foram muito pequenas.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foram apresentados estudos sobre Método do Empacotamento Compressível, bem como sua aplicação para a dosagem de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço, a partir da utilização do *software Betonlab Pro 3*.

Foi possível, baseando-se em referências nacionais (SILVA, 2004; FORMAGINI, 2005; MARAGON, 2006; VELASCO, 2008) e internacionais (DE LARRARD, 1999; GRUNEWALD, 2004), implementar o ensaio determinação da compacidade de misturas granulares monodispersas no Laboratório de Ensaios em Materiais (LEM), da UnB. Para isso, foi definido um procedimento e utilizados equipamentos específicos do laboratório, tais como a mesa vibratória do aparelho de *vebe test*, um cilindro de 150 mm de diâmetro e 22,65 cm de altura, e um peso de aço de 19,71 kg e 149 mm de diâmetro. A partir do procedimento adotado, foi possível, dessa forma, determinar a compacidade experimental de misturas binárias para a determinação do índice de compactação  $K$  do procedimento implementado.

Com a elaboração de uma planilha eletrônica que, a partir de determinado valor de  $K$ , calcula compacidades – e com sua devida validação, observando que os resultados das compacidades calculadas dessa planilha foram iguais aos obtidos nos resultados de Grunewald (2004), quando utilizados os mesmos dados – foi possível proceder com a determinação do índice de compactação  $K$  do ensaio adotado. Dito isso, a partir dos resultados de compacidade experimental de misturas binárias M01-M03, M02-M04 e M05-M06 e com auxílio da planilha eletrônica, foi possível observar a aproximação das compacidades calculadas com as experimentais estimando valores de  $K$  e observando o erro médio dos resultados.

Observou-se, com os resultados obtidos, que misturas binárias com classes de grãos com diâmetros próximos, isto é, misturas que possuem maior efeito parede e efeito de afastamento entre os grãos, geram uma menor sensibilidade nos resultados de compacidade calculada com a mudança de valores de  $K$ , ou seja, as compacidades calculadas variavam muito pouco quando se alterava o valor de  $K$ , diferentemente do que ocorre com misturas com classes de diâmetros mais distantes entre si, que possuem maior sensibilidade no cálculo das compacidades com a alteração do  $K$ . Dessa forma, para a determinação do  $K$ , foram utilizadas somente as misturas de Brita com Areia, que possuem menor interação entre os grãos. Para essas misturas, o  $K$  definido foi o que apresentava menor soma de erro médio dessas duas misturas, resultando no valor de 13.

Ao explorar diferentes formas simplificadas de se considerar o efeito das fibras na estrutura granular do MEC, notou-se que a aproximação realizada por Yu et al (1993), utilizando a compacidade experimental das fibras, apresentou melhores resultados, tendo em vista sua aproximação com os resultados experimentais. Concluiu-se ,também, que as simulações com as diferentes formas de inserção das fibra no *Betonlab* mostraram que as dosagens ficaram muito próximas. Desta forma, o método do diâmetro equivalente de Yu et al (1993) pode ser promissor para a inclusão das fibras.

Em relação aos estudos no *Betonlab*, pode-se concluir que a segunda dosagem se aproximou das características de um CAA. Nesta tentativa, o concreto obtido teve a coesão adequada, mostrando que com maiores cuidados em relação à água de absorção poder-se-ia atingir um concreto autoadensável. Além disso, alguns parâmetros desta pesquisa foram estimados, o que pode trazer aproximações nas dosagens do programa. Desta forma, o software mostrou eficiência na dosagem desse concreto, pois apesar de alguns fatores imprecisos, o concreto teve características muito próximas a um CAA.

As simulações com as diferentes formas de inserção das fibra no *Betonlab* mostraram que as dosagens ficaram muito próximas. Desta forma, o método do diâmetro equivalente de Yu pode ser uma promissor para a inclusão das fibras, já que o método obteve erros menores em comparação com os valores experimentais e assim é um método mais econômico.

Com as simulações, foi possível perceber as variações nas quantidades dos materiais à medida que as fibras foram incluídas. Notou-se que o principal fator de mudança com a inclusão desses materiais foi o aumento do consumo de cimento. Já para os consumos de fíler, houve um decréscimo, pois, quando a quantidade de cimento cresce mais finos são incorporados. As quantidades de água aumentaram para que a relação a/c se mantivesse.

Além dessas conclusões, percebeu-se que os 4 tipos de fibras teriam resultados muito próximos na dosagem, devido à proximidade do valor das compacidades afetadas. O motivo provável desse comportamento foi o aumento da quantidade de fibras por grama quando se diminui o tamanho da fibra.

As comparações das dosagens realizadas pelo *Betonlab* mostraram que houve um possível aumento na quantidade do fíler para suprir a ausência de areia fina nas dosagens. Esse comportamento exhibe uma flexibilidade que o uso de um programa computacional otimizado

pode oferecer, mostrando que um concreto autoadensável com fibras pode ser realizado de diferentes formas.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Complementar estudo da determinação do índice de compactação ( $K$ ) no ensaio de vibração e compressão adotado no LEM, utilizando outras misturas binárias de grãos de diâmetros distantes entre si.
- Avaliar mais misturas de agregado com diferentes tipos de fibras, a fim de observar a influência do tamanho das fibras e do teor de fibra na estrutura granular.
- Realizar dosagem do CAARF pelo *Betonlab Pro 3* com maiores teores de fibras e maiores classes de resistência, avaliando suas características no estado fresco e endurecido.
- Correlacionar, a partir dos resultados experimentais, a composição dos materiais constituintes com as propriedades mecânicas do CAARF no estado endurecido que estão relacionadas com o seu comportamento pós-fissuração.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ACI 237R-07, C. (2007). "Concrete, Self-Consolidating." American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA: 30.

ACI (1996). "Committee 544.1 R-96. 1996." State Of The Art Report On Fiber Reinforced Concrete. Farmington Hills: American Concrete Institute.

ACI, C. (1998). "544.3 R-93 1998." Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete.

AHMAD, H., et al. (2016). Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFRSC) performance in slab application: A review. AIP Conference Proceedings, AIP Publishing.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR 7217: Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1991). NBR 5732: Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1996). NBR 7215: Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2007). NBR 5739: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009a). NBR NM 52: Agregado miúdo—Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009b). NBR NM 53: Agregado graúdo—Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2017). NBR 15823: Concreto autoadensável. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2017). NBR 15823: Concreto auto-adensável. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16605:2017: Cimento Portland e outros materiais em pó -Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017. 8 p.

BARRAGÁN, B. et al. Development and application of steel fibre reinforced self-compacting concrete. 6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)–BEFIB, 2004. p.457-466.

BARROS, A. R. D.; GOMES, P. C. C.; BARBOZA, A. D. S. R. Avaliação do comportamento de vigas de concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço. 2009. Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

BARROS, J. A.; FIGUEIRAS, J. A. Experimental behaviour of fiber concrete slabs on soil. Journal Mechanics of Cohesive-frictional Materials, v. 3, n. 3, p. 277-290, 1998. ISSN 1099-1484.

BARTOS, P.; HOY, C. Interaction of particles in fibre reinforced concrete. RILEM PROCEEDINGS, 1996. p.451-462.

BASF, Ficha técnica  
2016.([https://assets.masterbuilderssolutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/Portuguese%20\(Brazil\)/Ficha\\_Tecnica\\_Mas erGlenium.pdf](https://assets.masterbuilderssolutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/Portuguese%20(Brazil)/Ficha_Tecnica_Mas%20erGlenium.pdf))

BEN-AÏM, R. Study of the texture of packings of grains. Applications to the determination of the permeability of binary mixtures in the molecular, intermediate, laminar regime. State Thesis, University of Nancy (in French), 1970.

BOZKURT, N.; YAZICIOĞLU, S. The design of fibre reinforced self compacting concrete and determination of fresh properties. 2015. 2nd International Sustainable Buildings Symposium, 2015.

CAVALCANTI, DIOGO JATOBÁ DE HOLANDA. Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

COLLIS, Laurence; SMITH, Michael Richard (Ed.). Aggregates: sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes. Geological Society, 1993.

CUCCHIARA, C.; LA MENDOLA, L.; PAPIA, M. (2004). Effectiveness of stirrups and steel fibres as shear reinforcement. CEMENT & CONCRETE COMPOSITES, vol. 26, 777-786.

DE LARRARD, F. Concrete mixture proportioning: a scientific approach. CRC Press, 1999. ISBN 1482272059.

DE LARRARD, F. et al. Formulations de référence. II: Propriétés mécaniques jusqu'à l'âge de 90 jours. Rapport du projet national BHP, 1996.

DE LARRARD, F.; FERRARIS, C. F.; SEDRAN, T. Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material. *Materials and structures*, v. 31, n. 7, p. 494-498, 1998.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*, v. 24, n. 6, p. 997-1009, 1994. ISSN 0008-8846.

EFNARC. The European guidelines for self-compacting concrete. Specification, Production and Use, 2005.

EFNARC, S. Guidelines for self-compacting concrete. London, UK: Association House, v. 32, p. 34, 2002.

FELEKOGLU, B.; YARDIMCI, M. Y.; BARADAN, B. A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete. *Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33)*, Reykjavik, Iceland, 2003. p.446-456.

FERRARA, L.; MEDA, A. Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements. *Materials and Structures*, v. 39, n. 4, p. 411-420, 2006. ISSN 1359-5997.

FERRARA, L.; PARK, Y.-D.; SHAH, S. P. A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 6, p. 957-971, 2007. ISSN 0008-8846.

FERRARIS, C. F.; DE LARRARD, F. Testing and modeling of fresh concrete rheology. 1998. NISTIR 6094, National Institute of Standards and Technology, 1998.

FORMAGINI, S. Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho, 2005. 2005. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil)–COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ

FRITIH, Y. et al. Flexural and shear behavior of steel fiber reinforced SCC beams. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 17, n. 6, p. 1383-1393, 2013. ISSN 1226-7988.

GHANEM, H.; OBEID, Y. The effect of steel fibers on the rheological and mechanical properties of self compacting concrete. *European Scientific Journal, ESJ*, v. 11, n. 21, 2015. ISSN 1857-7431.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. D. Métodos de dosagem de concreto autoadensável. São Paulo: PINI, v. 172, 2009.

GROTH, P. Fibre reinforced concrete: fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders. 2000. PhD-thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Luleå University of Technology.

GRÜNEWALD, S. Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete. 2004. TU Delft, Delft University of Technology

GRÜNEWALD, S.; WALRAVEN, J. C. Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 12, p. 1793-1798, 2001/12/01/ 2001. ISSN 0008-8846. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884601005555> >.

HOY, C. W. Mixing and mix proportioning of fibre reinforced concrete. 1998. University of Paisley

KHALOO, A. et al. Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*, v. 51, p. 179-186, 2014. ISSN 0950-0618.

KHALOO, A. R.; AFSHARI, M. Flexural behaviour of small steel fibre reinforced concrete slabs. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, n. 1, p. 141-149, 2005/01/01/ 2005. ISSN 0958-9465. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946504000733> >.

KHUNTIA, M.; STOJADINOVIC, B. Shear strength of reinforced concrete beams without transverse reinforcement. *Structural Journal*, v. 98, n. 5, p. 648-656, 2001. ISSN 0889-3241.

KONIG, G.; KUTZING, L. Modelling the increase of ductility of HPC under compressive forces-a fracture mechanics approach. *High performance fiber reinforced cement composites*, 1999. p.251-259.

LAMEIRAS, R. et al. Development of sandwich panels combining fibre reinforced concrete layers and fibre reinforced polymer connectors. Part I: Conception and pull-out tests. *Composite Structures*, v. 105, p. 446-459, 2013. ISSN 0263-8223.

MAIDL, B. *Steel Fibre Reinforced Concrete*, Ernest&Sohn 1995.



MARANGON, E. Desenvolvimento e caracterização de concretos auto-adensáveis reforçados com fibras de aço. 2006. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil, Rio de Janeiro

MIRANDA, L. R. M. (2018). Carbonatação em concretos autoadensáveis com substituições de cimento Portland por adições minerais. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-02A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 115p.

MOONEY, M. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. *Journal of colloid science*, v. 6, n. 2, p. 162-170, 1951. ISSN 0095-8522.

OKAMURA, H. Self-compacting high-performance concrete. *Concrete international*, v. 19, n. 7, p. 50-54, 1997. ISSN 0162-4075.

OZAWA, K.; SAKATA, N.; OKAMURA, H. Evaluation of Self-Compactability of Fresh Concrete Using the Funnel Test. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, v. 1994, n. 490, p. 61-70, 1994. ISSN 0289-7806.

PEREIRA, E. N.; BARROS, J. A.; CAMÕES, A. Steel fiber-reinforced self-compacting concrete: experimental research and numerical simulation. *Journal of structural engineering*, v. 134, n. 8, p. 1310-1321, 2008. ISSN 0733-9445.

PETERSSON, Ö. Preliminary Mix Design - Final Report of Task 1. Brite Euram project (BE 96-3801) - Rational production and improved working environment through using SCC, v. 2, 1998.

POYET, S., LE BESCOP, P., Touze, G., Moth, J., & Cau Dit Coumes, C. (2015). Formulating a low-alkalinity and self-consolidating concrete for the DOPASS-FSS experiment. NUWCEM 2014 - 2 International Symposium on Cement-based Materials for Nuclear Waste, France

RILEM TC 174-SCC. Skarendahl A, Petersson O, editors. Self-compacting Concrete. State-of-the-art of RILEM Technical Committee 174-SCC. RILEM Publications SARL; 2001.

RIXOM, R.; MAILVAGANAM, N. Chemical admixtures for cement: E&FN Spon Press, London 1999.

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. P. New methodology for designing self-compacting concrete. *ACI Materials Journal*, v. 99, n. 5, p. 509-512, 2002. ISSN 0889-325X.

SALEHIAN, H.; BARROS, J. A. Assessment of the performance of steel fibre reinforced self-compacting concrete in elevated slabs. *Cement and Concrete Composites*, v. 55, p. 268-280, 2015. ISSN 0958-9465.

SATO, Y.; VAN MIER, J. G.; WALRAVEN, J. C. Mechanical characteristics of multi-modal fiber reinforced cement based composites. *Fifth International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete (FRC)*, 2000, RILEM Publications SARL. p.791-800.

SEDRAN. Slides de apresentação, Leçon N° 15. 2018. <http://betonlabpro.ifsttar.fr/betonlabpro/formation-a-betonlabpro-3-didacticiel/>

SILVA, A. D. Dosagem de concreto pelos métodos de empacotamento compressível e Aitcin-Faury modificado. 2004. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

SWAMY, R. Fibre reinforcement of cement and concrete. *Matériaux et Construction*, v. 8, n. 3, p. 235-254, 1975. ISSN 0025-5432.

TUTIKIAN, B. F. Método para dosagem de concretos auto-adensáveis. 2004.

VELASCO, R. V. Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas. 2008. Tese de doutorado, Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE.

YU, A.; ZOU, R. Prediction of the porosity of particle mixtures. *KONA Powder and Particle Journal*, v. 16, n. 0, p. 68-81, 1998. ISSN 0288-4534.

YU, A. B.; STANDISH, N.; MCLEAN, A. Porosity calculation of binary mixtures of nonspherical particles. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 76, n. 11, p. 2813-2816, 1993. ISSN 1551-2916.

## ANEXO A – Planilha Eletrônica

A planilha eletrônica elaborada para o presente trabalho está apresentada na figura abaixo, assim como a macro desenvolvida para a determinação das compacidades calculadas.

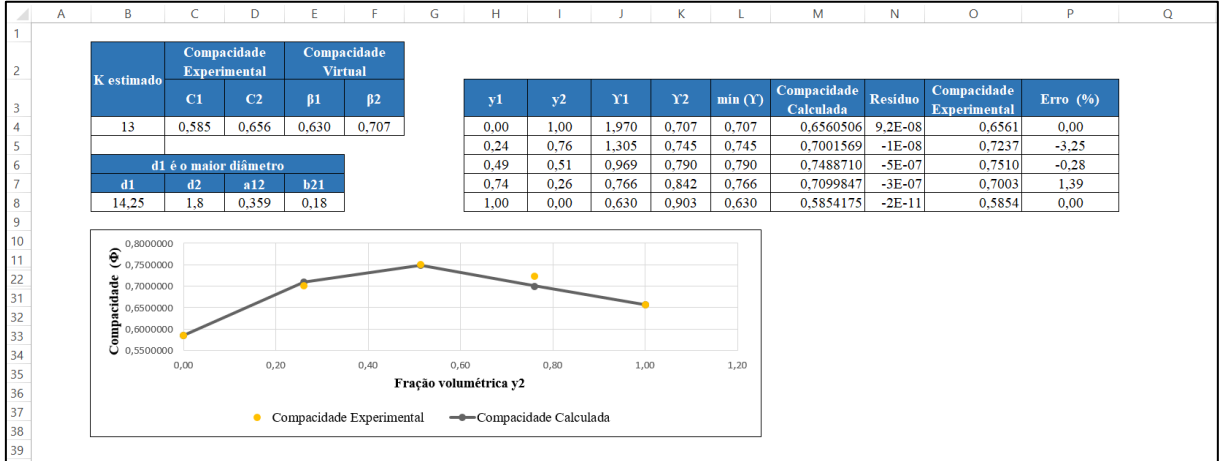


Figura A. 1 - Planilha eletrônica para determinação das compacidades calculadas

Sub Solver\_Planilha\_Eletrônica\_Compacidade\_Calculada()

' A macro consiste, basicamente, na utilização do Solver para resolver a inequação da equação ((20):

$$0 = \frac{y_1/\beta_1}{\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{\gamma_1}} + \frac{y_2/\beta_2}{\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{\gamma_2}} - K$$

'Essa equação foi aplicada na Coluna N, chamada de resíduo. O solver resolverá a inequação, calculando um valor de compacidade ( $\Phi_{calculada}$ ) na coluna M, chamada de compacidade calculada, que irá fazer com que o resíduo seja o menor possível.

' Atalho do teclado: *Ctrl+Shift+E*

*'Apertando a Tecla do atalho, as compacidade da coluna M serão calculadas (de M04 a M08).*

```
Range("M4").Select
```

```
SolverOk SetCell:="$N$4", MaxMinVal:=3, ValueOf:=0, ByChange:="$M$4",  
Engine:=1 _
```

```
, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
```

```
SolverOk SetCell:="$N$4", MaxMinVal:=3, ValueOf:=0, ByChange:="$M$4",  
Engine:=1 _
```

```
, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
```

```
SolverSolve
```

```
Range("M5").Select
```

```
SolverOk SetCell:="$N$5", MaxMinVal:=3, ValueOf:=0, ByChange:="$M$5",  
Engine:=1 _
```

```
, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
```

```
SolverOk SetCell:="$N$5", MaxMinVal:=3, ValueOf:=0, ByChange:="$M$5",  
Engine:=1 _
```

```
, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
```

```
SolverSolve
```

```
Range("M6").Select
```

```
SolverOk SetCell:="$N$6", MaxMinVal:=3, ValueOf:=0, ByChange:="$M$6",  
Engine:=1 _
```

```
, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
```

```

SolverOk SetCell:="$N$6", MaxMinVal:=3, ValueOf:=0, ByChange:="$M$6",
Engine:=1 _
    , EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve

Range("M7").Select
    SolverOk SetCell:="$N$7", MaxMinVal:=3, ValueOf:=0, ByChange:="$M$7",
Engine:=1 _
    , EngineDesc:="GRG Nonlinear"
    SolverOk SetCell:="$N$7", MaxMinVal:=3, ValueOf:=0, ByChange:="$M$7",
Engine:=1 _
    , EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve

Range("M8").Select
    SolverOk SetCell:="$N$5", MaxMinVal:=3, ValueOf:=0, ByChange:="$M$8",
Engine:=1 _
    , EngineDesc:="GRG Nonlinear"
    SolverOk SetCell:="$N$8", MaxMinVal:=3, ValueOf:=0, ByChange:="$M$8",
Engine:=1 _
    , EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve

End Sub

```

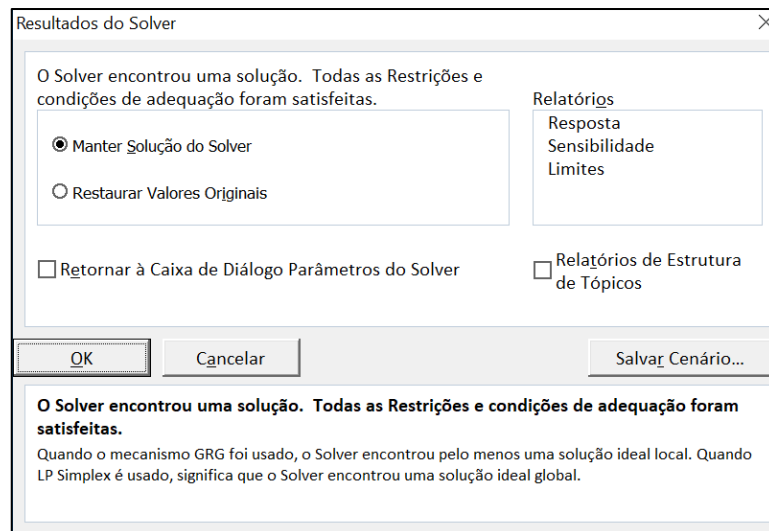


Figura A. 2 – Execução do *Solver* no Excel

## ANEXO B – Resultados experimentais das misturas binárias

$y_1$	$y_2$	$y_1$ em massa (g)	$y_2$ em massa (g)	Massa Total (g)	Altura final do material - h (cm)	Compacidade Experimental
0,00	1,00	0	2500	2500	8,532	0,637
0,25	0,75	625	1875	2500	8,077	0,673
0,50	0,50	1250	1250	2500	7,797	0,697
0,75	0,25	1875	625	2500	7,657	0,709
1,00	0,00	2500	0	2500	7,931	0,685

Tabela B. 1 - Resultados experimentais do 1º ensaio da mistura binária M05-M06

$y_1$	$y_2$	$y_1$ em massa (g)	$y_2$ em massa (g)	Massa Total (g)	Altura final do material - h (cm)	Compacidade Experimental
0,00	1,00	0	2500	2500	8,401	0,647
0,25	0,75	625	1875	2500	8,051	0,675
0,50	0,50	1250	1250	2500	7,774	0,699
0,75	0,25	1875	625	2498,3	7,667	0,708
1,00	0,00	2500	0	2500	7,988	0,680

Tabela B. 2 - Resultados experimentais do 2º ensaio da mistura binária M05-M06

$y_1$	$y_2$	$y_1$ em massa (g)	$y_2$ em massa (g)	Massa Total (g)	Altura final do material - h (cm)	Compacidade Experimental
0,00	1,00	0	2500	2500	8,254	0,655
0,24	0,76	625	1875	2500	7,304	0,730
0,49	0,51	1250	1250	2500	7,081	0,742
0,74	0,26	1875	625	2500	7,375	0,703
1,00	0,00	2500	0	2500	8,692	0,588

Tabela B. 3 - Resultados experimentais do 1º ensaio da mistura binária M02-M04

$y_1$	$y_2$	$y_1$ em massa (g)	$y_2$ em massa (g)	Massa Total (g)	Altura final do material - h (cm)	Compacidade Experimental
0,00	1,00	0	2500	2500	8,221	0,657
0,24	0,76	625	1875	2500	7,427	0,718
0,49	0,51	1250	1250	2500	6,918	0,760
0,74	0,26	1875	625	2500	7,424	0,698

1,00	0,00	2500	0	2500	8,757	0,583
------	------	------	---	------	-------	-------

Tabela B. 4 - Resultados experimentais do 2º ensaio da mistura binária M02-M04

$y_1$	$y_2$	$y_1$ em massa (g)	$y_2$ em massa (g)	Massa Total (g)	Altura final do material - h (cm)	Compacidade Experimental
0,00	1,00	0	2500	2500	8,339	0,648
0,24	0,76	625	1875	2500	7,493	0,711
0,49	0,51	1250	1250	2500	6,960	0,755
0,74	0,26	1875	625	2500	7,389	0,701
1,00	0,00	2500	0	2500	8,651	0,590

Tabela B. 5 - Resultados experimentais do 2º ensaio da mistura binária M01-M03

$y_1$	$y_2$	$y_1$ em massa (g)	$y_2$ em massa (g)	Massa Total (g)	Altura final do material - h (cm)	Compacidade Experimental
0,00	1,00	0	2500	2500	8,445	0,640
0,24	0,76	625	1875	2500	7,437	0,717
0,49	0,51	1250	1250	2500	7,012	0,750
0,74	0,26	1875	625	2500	7,323	0,708
1,00	0,00	2500	0	2500	8,691	0,588

Tabela B. 6 - Resultados experimentais do 2º ensaio da mistura binária M01-M03



## ANEXO C – Compacidades calculadas para K maior que 9

$\Phi_{experimental}$	K=9	Erro	K=11	Erro	K=13	Erro	K=15	Erro	K=17	Erro	K=20	Erro
0,642	0,6561	0,00%	0,6561	0,00%	0,6417	0,00%	0,6417	0,00%	0,6417	0,00%	0,6417	0,00%
0,674	0,6995	-3,34%	0,6999	0,11%	0,6741	0,06%	0,6738	0,01%	0,6735	-0,03%	0,6731	-0,09%
0,698	0,7449	-0,81%	0,7474	1,42%	0,7076	1,40%	0,7073	1,37%	0,7070	1,33%	0,7065	1,26%
0,709	0,7065	0,89%	0,7087	1,61%	0,7212	1,78%	0,7220	1,91%	0,7227	2,00%	0,7235	2,11%
0,683	0,5854	0,00%	0,5854	0,00%	0,6825	0,00%	0,6825	0,00%	0,6825	0,00%	0,6825	0,00%
Erro Médio		1,68%	-	1,05%	-	1,08%	-	1,10%	-	1,12%	-	1,15%

Tabela C. 1 - Compacidades calculadas para K maior que 9 para mistura M05-M06

$\Phi_{experimental}$	K=9	Erro	K=11	Erro	K=13	Erro	K=15	Erro	K=17	Erro	K=20	Erro
0,656	0,6417	0,00%	0,6561	0,00%	0,6561	0,00%	0,6561	0,00%	0,6561	0,00%	0,6561	0,00%
0,724	0,6748	0,14%	0,6999	-3,28%	0,7002	-3,25%	0,7003	-3,24%	0,7003	-3,23%	0,7003	-3,23%
0,751	0,7074	1,41%	0,7474	-0,48%	0,7489	-0,28%	0,7498	-0,16%	0,7504	-0,08%	0,7509	-0,01%
0,700	0,7183	1,51%	0,7087	1,20%	0,7100	1,39%	0,7108	1,51%	0,7114	1,59%	0,7119	1,66%
0,585	0,6825	0,00%	0,5854	0,00%	0,5854	0,00%	0,5854	0,00%	0,5854	0,00%	0,5854	0,00%
Erro Médio		1,02%	-	1,65%	-	1,64%	-	1,64%	-	1,63%	-	1,63%

Tabela C. 2 - Compacidades calculadas para K maior que 9 para mistura M02-M04

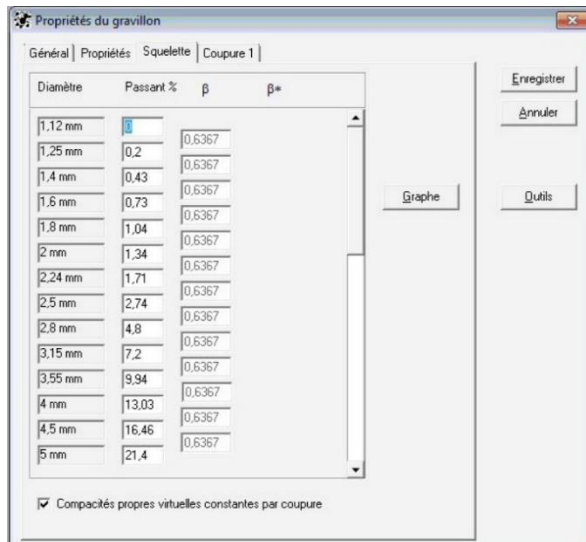
$\Phi_{experimental}$	K=9	Erro	K=11	Erro	K=13	Erro	K=15	Erro	K=17	Erro	K=20	Erro
0,656	0,6440	0,00%	0,6440	0,00%	0,6440	0,00%	0,6440	0,00%	0,6440	0,00%	0,6440	0,00%
0,724	0,6934	-2,88%	0,6940	-2,81%	0,6943	-2,76%	0,6944	-2,74%	0,6945	-2,73%	0,6946	-2,71%
0,751	0,7481	-0,56%	0,7507	-0,23%	0,7522	-0,02%	0,7532	0,11%	0,7538	0,19%	0,7544	0,27%
0,700	0,7213	2,40%	0,7241	2,79%	0,7258	3,03%	0,7269	3,18%	0,7276	3,29%	0,7283	3,39%
0,585	0,5890	0,00%	0,5890	0,00%	0,5890	0,00%	0,5890	0,00%	0,5890	0,00%	0,5890	0,00%
Erro Médio		1,95%	-	1,94%	-	1,94%	-	2,01%	-	2,07%	-	2,12%

Tabela C. 3 - Compacidades calculadas para K maior que 9 para mistura M01-M03

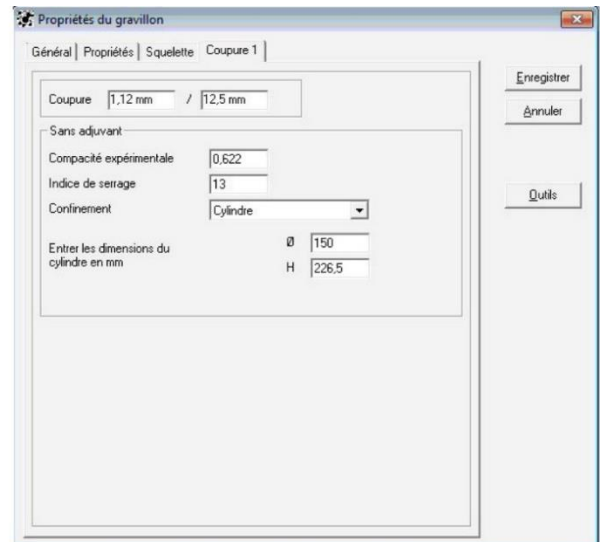
## ANEXO D – Modo de utilização do *Bentolab pro 3*

Este anexo tem como objetivo mostrar a utilização do *Bentolab* na pesquisa, os passos foram colocados na ordem de utilização do programa. Primeiramente, foi feita a inserção das características dos materiais, em seguida a calibração dos parâmetros  $p$  e  $q$  e por fim as partes de seleção e otimização dos materiais.

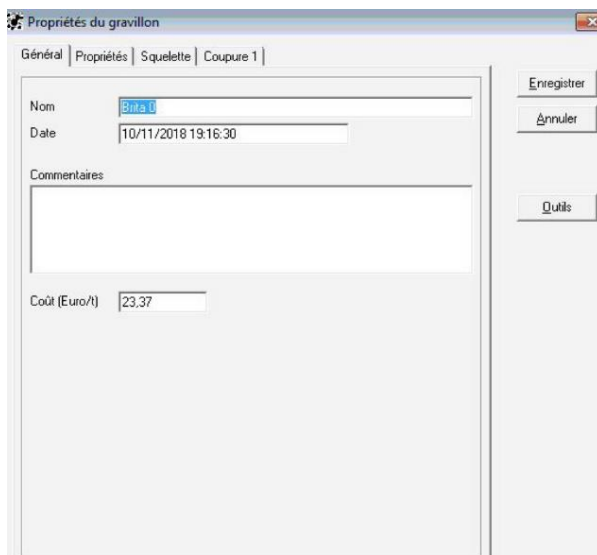
### A) Caracterização da brita 0



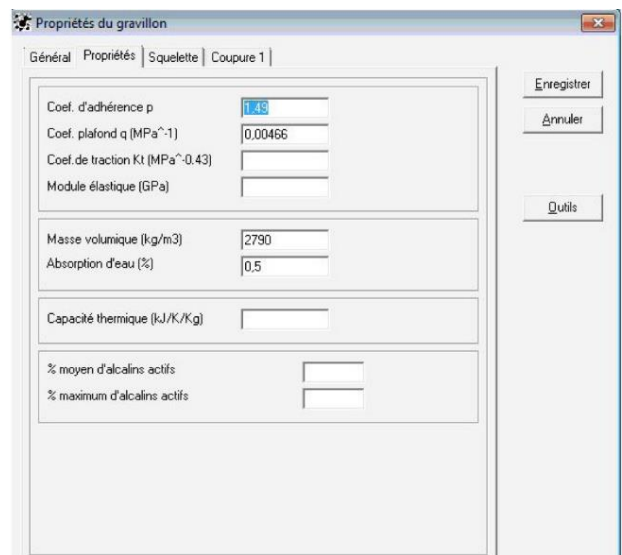
c) Granulometria do material



d) Inserção da compacidade da classe dos materiais



a) Definição do material



b) Inserção das propriedades

## B) Caracterização da areia média

A caracterização da areia fina é semelhante à areia média, porém com apenas uma classe de agregado, não sendo necessário exibir as telas neste anexo.

Propriétés du sable

Général | Propriétés | Squelette | Coupure 1 | Coupure 2 | Coupure 3 | Coupure 4

Nom: Areia Média

Date: 10/11/2018 19:16:30

Commentaires

Coût (Euro/t): 30

Buttons: Enregistrer, Annuler, Outils

a) Definição do material

Propriétés du sable

Général | Propriétés | Squelette | Coupure 1 | Coupure 2 | Coupure 3 | Coupure 4

Coef. d'adhérence p: 0.43

Coef. plafond q (MPa<sup>-1</sup>): 0.00466

Coef. de traction Kt (MPa<sup>-0.43</sup>):

Module élastique (GPa):

Masse volumique (kg/m<sup>3</sup>): 2600

Absorption d'eau (%): 1

Capacité thermique (kJ/K/kg):

% moyen d'alcalins actifs:

% maximum d'alcalins actifs:

Buttons: Enregistrer, Annuler, Outils

b) Propriedades

Propriétés du sable

Général | Propriétés | Squelette | Coupure 1 | Coupure 2 | Coupure 3 | Coupure 4

Diamètre	Passant %	$\beta$	$\beta^*$
100 $\mu$	0	0.5767	
112 $\mu$	5.8	0.5767	
125 $\mu$	6.53	0.5767	
140 $\mu$	7.38	0.5767	
160 $\mu$	9.24	0.5767	
180 $\mu$	11.84	0.5767	
200 $\mu$	14.44	0.5767	
224 $\mu$	17.56	0.5767	
250 $\mu$	20.94	0.5767	
280 $\mu$	24.84	0.5767	
315 $\mu$	28.54	0.5767	
355 $\mu$	31.47	0.5767	
400 $\mu$	34.77	0.5767	
450 $\mu$	38.43	0.5767	

Compacités propres virtuelles constantes par coupure

Buttons: Enregistrer, Annuler, Outils, Graphe

c) Granulometria

Propriétés du sable

Général | Propriétés | Squelette | Coupure 1 | Coupure 2 | Coupure 3 | Coupure 4

Coupure: 100  $\mu$  / 630  $\mu$

Sans adjuvant

Compacité expérimentale: 0.631

Indice de serrage: 13

Confinement: Cylindre

Entrer les dimensions du cylindre en mm: Ø 150, H 226.5

Buttons: Enregistrer, Annuler, Outils

d) Compacidade da classe 1

Propriétés du sable

Général | Propriétés | Squelette | Coupure 1 | Coupure 2 | Coupure 3 | Coupure 4

Coupure 630  $\mu$  / 1,25 mm

Sans adjuvant

Compacité expérimentale 0,642

Indice de serrage 13

Confinement Cylindre

Enter les dimensions du cylindre en mm

$\emptyset$  150

H 226,5

Enregistrer

Annuler

Outils

e) Compacidade da classe 2

Propriétés du sable

Général | Propriétés | Squelette | Coupure 1 | Coupure 2 | Coupure 3 | Coupure 4

Coupure 1,25 mm / 2,5 mm

Sans adjuvant

Compacité expérimentale 0,682

Indice de serrage 13

Confinement Cylindre

Enter les dimensions du cylindre en mm

$\emptyset$  150

H 226,5

Enregistrer

Annuler

Outils

f) Compacidade da classe 3

Propriétés du sable

Général | Propriétés | Squelette | Coupure 1 | Coupure 2 | Coupure 3 | Coupure 4

Coupure 2,5 mm / 9 mm

Sans adjuvant

Compacité expérimentale 0,682

Indice de serrage 13

Confinement Cylindre

Enter les dimensions du cylindre en mm

$\emptyset$  150

H 226,5

Enregistrer

Annuler

Outils

g) Compacidade da classe 4

## C) Caracterização do Cimento

Propriétés du ciment

Général | Composition | Propriétés | Squelette | Coupure 1

Nom: Cimento

Date: 10/11/2018 09:42:06

Commentaires: Superplastifiant utilisé: Master granium 51

Coût (Euro/t): 400

Enregistrer

Annuler

Outils

a) Définition du material

Propriétés du ciment

Général | Composition | Propriétés | Squelette | Coupure 1

Constituants

% Clinker (K): 50

% Cendre volante (V): 0

% Filler calcaire (L): 10

% Pouzzolane naturelle (Z): 0

% Laitier (S): 0

% Fumée de silice (D): 0

% Divers: 0

Composition de Boue

% C3S: 64,69

% C2S: 8,75

% C3A: 6,79

% C4AF: 9,73

% Divers: 10,04

% moyen d'alcalins actifs

% maximum d'alcalins actifs

Enregistrer

Annuler

Outils

b) Composition do cimento

Propriétés du ciment

Général | Composition | Propriétés | Squelette | Coupure 1

Classe vraie à 1 jour

Classe vraie à 2 jours

Classe vraie à 3 jours

Classe vraie à 7 jours: 31,16

Classe vraie à 20 jours: 40

Classe vraie à 90 jours

Classe vraie à 360 jours

Masse volumique (kg/m<sup>3</sup>): 3060

Capacité thermique (kJ/K.Kg): 0,76

Dosage de saturation (%): 0,4

Retrait endogène

Kc (MPa)

Enregistrer

Annuler

Outils

c) Propriedades do cimento

Propriétés du ciment

Général | Composition | Propriétés | Squelette | Coupure 1

Diamètre	Passant %	$\beta$	$\beta^*$
0,04 $\mu$	0	0,5639	0,5639
0,045 $\mu$	0,03	0,5639	0,5639
0,05 $\mu$	0,05	0,5639	0,5639
0,056 $\mu$	0,09	0,5639	0,5639
0,063 $\mu$	0,13	0,5639	0,5639
0,071 $\mu$	0,17	0,5639	0,5639
0,08 $\mu$	0,22	0,5639	0,5639
0,09 $\mu$	0,28	0,5639	0,5639
0,1 $\mu$	0,34	0,5639	0,5639
0,112 $\mu$	0,41	0,5639	0,5639
0,125 $\mu$	0,49	0,5639	0,5639
0,14 $\mu$	0,58	0,5639	0,5639
0,16 $\mu$	0,71	0,5639	0,5639
0,18 $\mu$	0,83	0,5639	0,5639

Graphe

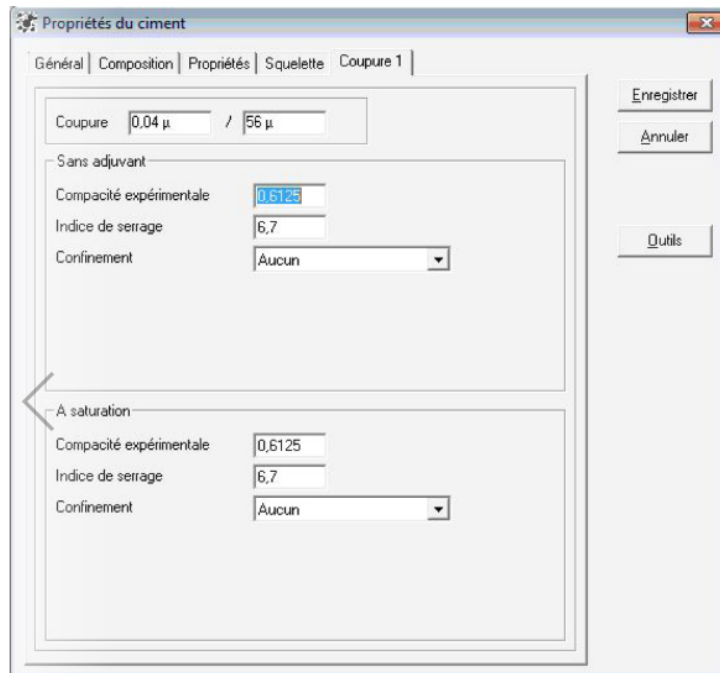
Outils

Enregistrer

Annuler

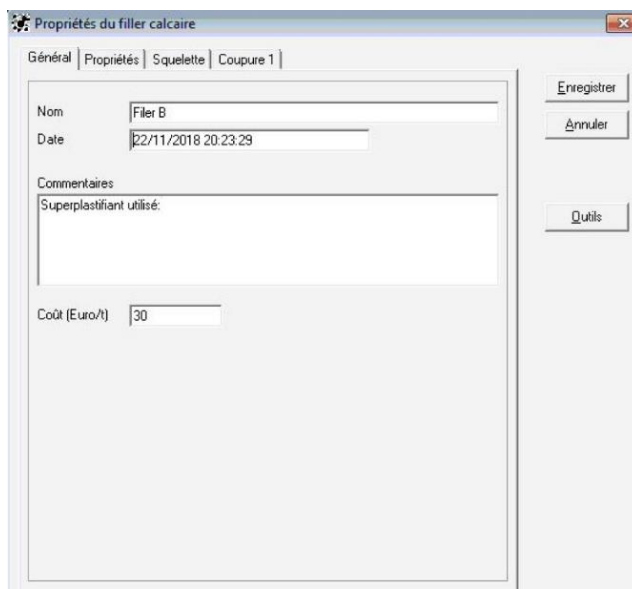
Compacités propres virtuelles constantes par coupure

d) Granulometria

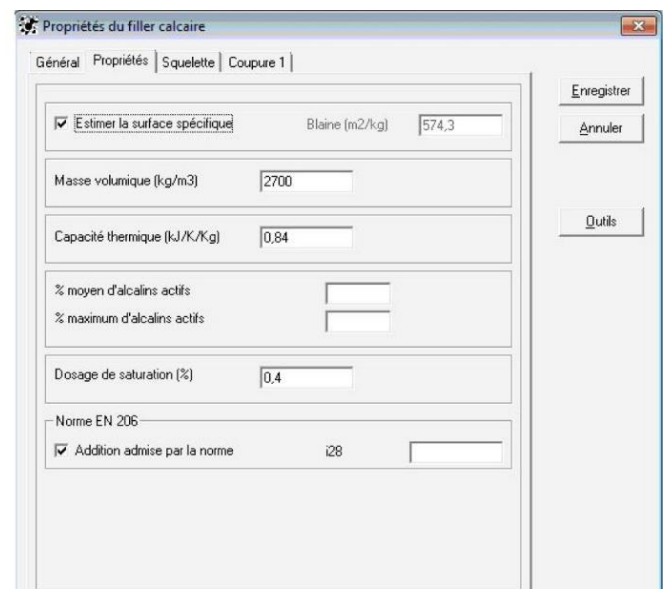


e) Compacidade do cimento

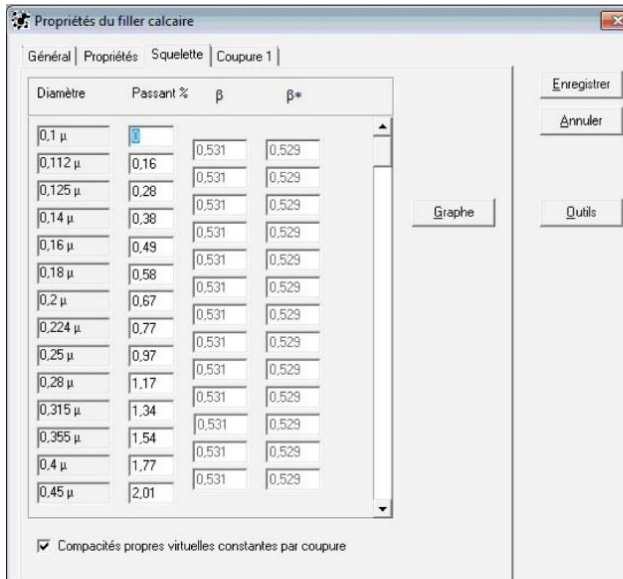
## D) Caracterização do Fíler



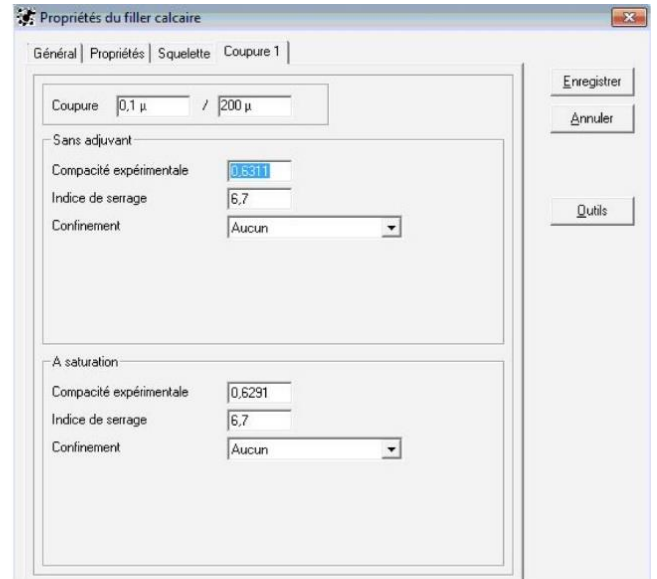
a) Definição do material



b) Propriedades

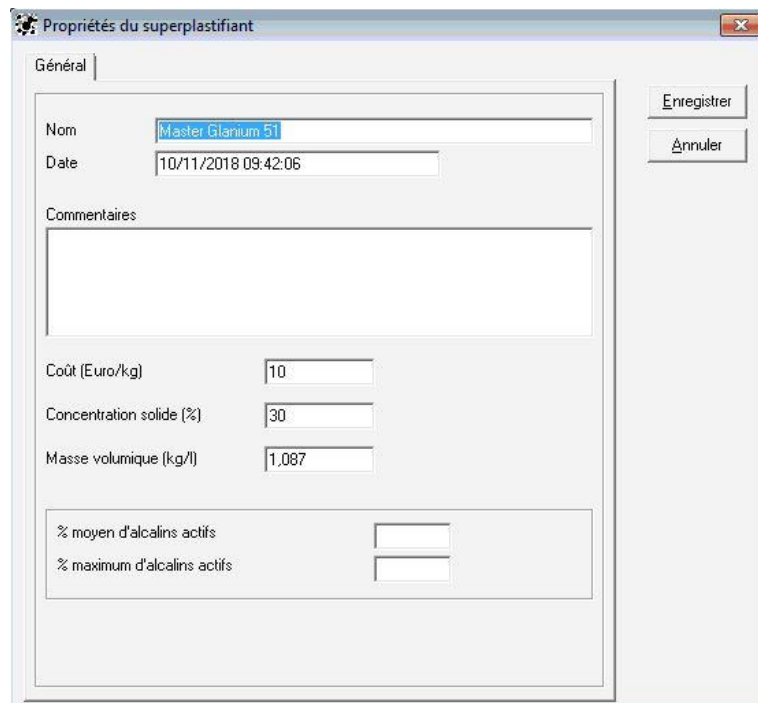


c) Granulometria



d) Compacidade

## E) Caracterização do superplastificante



## F) Calibração dos parâmetros $p$ e $q$

Calibration

Constituants

G1	réouverture temporaire.cst\Bllta 0
S1	réouverture temporaire.cst\Areia Media
C1	réouverture temporaire.cst\Cimento
SP1	réouverture temporaire.cst\Master Glanium 51

Calibrer  
Annuler

Composition

G1 (kg)	25
S1 (kg)	17,27
C1 (kg)	12,27
SP1 (kg)	0,0714
Eau (kg)	3,24

Entrer  
Modifier n° 2  
Gâchée n° 2  
Supprimer  
Exporter

Agent entraîneur d'air?  
 Non  
 Oui

Résistance

fc1 (MPa)	
fc2 (MPa)	
fc3 (MPa)	

Beton n°	1	2			
G1 (kg)	25	25			
S1 (kg)	20,29	17,27			
C1 (kg)	9,06	12,27			
SP1 (kg)	0	0,0714			
Eau (kg)	4,62	3,24			
Air total (%)					
AEA	Non	Non			
fc1 (MPa)					
fc2 (MPa)					
fc3 (MPa)					
fc7 (MPa)	18,1	40,04			
fc28 (MPa)	23,24	51,412			
fc90 (MPa)					
fc360 (MPa)					

## G) Seleção dos materiais

Sélection

Dossiers disponibles

Granulats.cst
Matériaux génériques.cst
pesquisa umb.cst
réouverture temporaire.cst

OK  
Annuler

Constituants disponibles

Areia fina
areia fina0,4
areia fina0,6%
areia fina0,8
areia fina1%
areia fina1,15%
Areia Media
areia media 1%

Constituants sélectionnés pour les mélanges

--

Ajouter  
Enlever



## H) Escolha das propriedades

**Options de calculs**

Coût fixe (Euro/m3)

Alcalins dans l'eau

% moyen en alcalins actifs

% maximum en alcalins actifs

Confinement

Type

Sélectionnez les propriétés que vous souhaitez afficher

C + kA

Eeff / (C + kA)

Densité

Temps de stabilisation du wattmètre (s)

Seuil de cisaillement (Pa)

Viscosité plastique(Pa.s)

Affaissement (cm)

Vitesse initiale de ressuage (10-5 m.min-1)

Propriétés non disponibles par manque de données

f28 (MPa)

E128 (GPa)

Capacité thermique(kJ/Kg)

Exothermie (°C)

Retrait endogène (10-6)

Retrait total (10-6)

OK

Annuler

Tout sélectionner

Tout désélectionner

Info

## I) Inserção do traço inicial

**delarrard0,6%.bt1**

Composition

G1 (%)

S1 (%)

S2 (%)

C1 (kg/m3)

FCalc1 (kg/m3)

SP1 (%)

Eau eff (kg/m3)

Agent entraîneur d'air?

Non

Oui

Environnement

Coût fixe

% moyen en alcalins actifs dans l'eau

% maximum en alcalins actifs dans l'eau

Confinement: Aucun

Gâchée n°

G1 (kg/m3) 981,3

S1 (kg/m3) 537,9

S2 (kg/m3) 348,5

C1 (kg/m3) 300

FCalc1 (kg/m3) 100

SP1 (kg/m3) 4

Eau (kg/m3) 162,7

G1 (%) 51

S1 (%) 30

S2 (%) 19

Taux de saturation (%) 0,53

Taux de superplastifiant (%) 0,4

Eau eff 150

Air total (%) 2,5

AEA Non

Rapport G/S 1,107

Eeff/C 0,5

Environnement x0

Seuil de cisaillement (Pa) 551567

Viscosité plastique(Pa.s) 2241

fc7 (MPa) 17,4

fc28 (MPa) 21,1

Contribution des fines Kf 2,462

Contribution des gros gravillons K'gg 1,669

Compacité du squelette non confiné Ø\* 0,8138

Prix 730,89

Gâcher

Optimiser

Granularité

Remplissage

## J) Définition des propriétés à serem alcançadas e otimização

**Contraintes**

Propriétés | Composition

Contraintes sur les propriétés

	Seuil de cisaillement (Pa)	≤	400
	Viscosité plastique (Pa.s)	≤	200
	fc7 (MPa)		
30	fc28 (MPa)		
	Indice de serrage du béton non confiné		
3.3	Contribution des fines K'f		
	Contribution des gros gravillons K'gg	≤	1.4
	Prix		

Propriétés à optimiser

Prix  Minimiser  Maximiser

Sans agent entraîneur d'air

Tout effacer

Pâte constante

Granulats constants

OK

Annuler

## K) Apresentação do Traço otimizado

**delarrard0,6%.bt**

Composition

Gâcher

Optimiser

Beton n°1

Granularité

Remplissage

Agent entraîneur d'air?

Non  Oui

Environnement >0

Coût fixe 0

% moyen en alcalins actifs dans l'eau 0

% maximum en alcalins actifs dans l'eau 0

Confinement: Aucun

Gâchée n°	1	4
G1 (kg/m3)	981.3	993.1
S1 (kg/m3)	537.9	403.8
S2 (kg/m3)	348.5	0
C1 (kg/m3)	300	551.3
FCalc1 (kg/m3)	100	260
SP1 (kg/m3)	4	7.35
Eau (kg/m3)	162.7	210.6
G1 (%)	51	69.63
S1 (%)	30	30.37
S2 (%)	19	0
Taux de saturation (%)	0.53	0.59
Taux de superplastifiant (%)	0.4	0.4
Eau eff	150	206.8
Air total (%)	2.5	0.5
AEA	Non	Non
Rapport G/S	1.107	2.46
Eeff/C	0.5	0.375
Environnement	>0	>0
Seuil de cisaillement (Pa)	551567	500
Viscosité plastique (Pa.s)	2241	171
fc7 (MPa)	17.4	27.4
fc28 (MPa)	21.1	30
Contribution des fines K'f	2.462	3.3
Contribution des gros gravillons K'gg	1.669	1.4
Compacité du squelette non confiné Ø*	0.8138	0.8271
Prix	730.89	1247.02