

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ALINE HERMANN

EMPACOTAMENTO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA CONCRETOS  
VIBROCOMPACTADOS

DISSERTAÇÃO

CURITIBA/PR  
2016

ALINE HERMANN

EMPACOTAMENTO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA CONCRETOS  
VIBROCOMPACTADOS

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Materiais e Componentes de Construção.

Orientador: Prof. Dr. José Alberto Cerri.

CURITIBA/PR  
2016

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**

---

H552e Hermann, Aline  
2016       Empacotamento de agregados reciclados para concretos  
          vibrocompactados / Aline Hermann.-- 2016.  
          170 f.: il.; 30 cm

      Texto em português com resumo em inglês.  
      Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica  
      Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
      civil. Área de Concentração: Materiais e Componentes  
      de Construção.

      Bibliografia: p. 138-149.

      1. Engenharia civil. 2. Partículas (Física, química,  
      etc.). 3. Agregados (Materiais de construção). 4.  
      Blocos de concreto. 5. Pavimentos. 6. Pavimentos de  
      concreto. I. Cerri, José Alberto. II. Universidade Tecnológica  
      Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia  
      Civil. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 624



**TERMO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO N.º 087

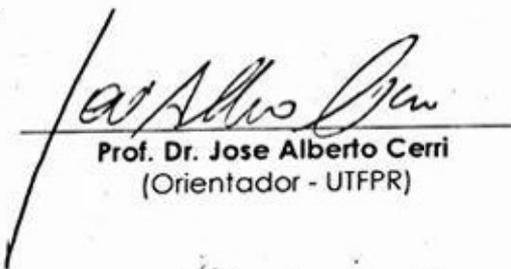
**EMPACOTAMENTO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA CONCRETOS  
VIBROCOMPACTADOS**

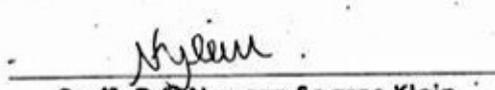
POR

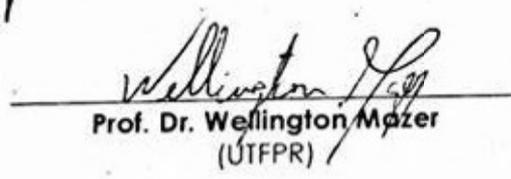
**ALINE HERMANN**

Esta dissertação foi apresentada às 14h00min do dia 23 de março de 2016, como requisito parcial para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**, área de Construção Civil, linha de pesquisa de Materiais E Componentes De Construção, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

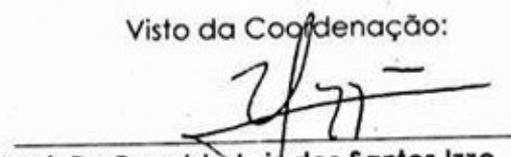
(aprovado / reprovado)

  
Prof. Dr. Jose Alberto Cerri  
(Orientador - UTFPR)

  
Prof. Dr. Nayara Soares Klein  
(UTFPR)

  
Prof. Dr. Wellington Mazer  
(UTFPR)

Visto da Coordenação:

  
Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo  
Coordenador do PPGE

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me permitir chegar ao fim de mais este trabalho.

Aos meus pais, Ivanete Marcolina Herman e Leonir A. Hermann, por todo o amor, incentivo e confiança, fundamentais para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao Willyan Antônio de Moraes, por todo amor, paciência e compreensão e por ser, acima de tudo, meu grande companheiro, sempre me apoiando nas decisões difíceis.

A todos os colegas de pós-graduação: M<sup>a</sup>. Fernanda Hackbart, M<sup>a</sup>. Viviane Pelissari, M<sup>a</sup>. Fernanda Feltrin e, em especial, a M<sup>a</sup>. Eloise Aparecida Langaro pela amizade sincera e pelos momentos que compartilhamos e trocamos experiências.

Aos amigos Gabriela e Nicholas Dicati pelo apoio nos momentos finais deste trabalho.

Ao colega Anderson Leviski, que dividiu comigo grande parte das tarefas deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Alberto Cerri, pela oportunidade e por sua valiosa orientação e contribuições durante o desenvolvimento do trabalho.

A Prof. Dra. Nayara S. Klein, sempre solícita e dedicada, por seu excelente trabalho nas correções e sugestões, principalmente ao que diz respeito ao empacotamento de partículas.

Ao Prof. Dr. Wellington Mazer, por seu auxílio nas incontáveis dúvidas que surgiram durante a realização deste trabalho e também por suas correções e sugestões.

Aos professores Dr. Leonardo F. R. Miranda, Dr. José Marques Filho e Dr. Adauto J. M. de Lima pelos conhecimentos compartilhados.

Aos técnicos de laboratório Gustavo Macioski e Felipe Perretto, pela ajuda e tempo disponibilizado na realização dos ensaios.

A Cia Itambé Ltda, pela doação do CP V ARI e a Impreart pela doação de blocos de concreto intertravado, CP II F 32 e agregados naturais necessários a realização deste trabalho.

Às usinas participantes da Associação das Empresas Paranaenses dos Resíduos Sólidos da Construção Civil (Aemparcc), pelo fornecimento dos agregados reciclados.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela bolsa de pesquisa, à UTFPR e ao PPGEC pelo ensino gratuito e de qualidade, sem os quais este trabalho dificilmente seria realizado.

Ao laboratorista Alexandre J. Gonçalves e ao professor Dr. Júlio C. K. das Neves do laboratório de MEV e DRX da UTFPR, campus Curitiba e a professora. Dra. Eliria M. de Jesus A. Pallone do Grupo de Construções e Ambiente da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da USP pelos ensaios de DRX e granulometria à laser.

## RESUMO

HERMANN, Aline. Empacotamento de Agregados Reciclados para Concretos Vibrocompactados. 170. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Os agregados reciclados vêm sendo amplamente estudados e utilizados em diversos campos da engenharia civil. Dentre suas aplicações mais comuns pode-se citar: argamassas de revestimento, bases, sub-bases e subleito de pavimentos, elementos pré-moldados de concreto, obras de contenção e aterros. O principal fator que dificulta a utilização do agregado reciclado em concretos está relacionado à capa de argamassa aderida à superfície. Esta capa tem elevada porosidade e conseqüentemente elevada absorção de água, o que proporciona ao concreto, menor trabalhabilidade, além do aumento do consumo de superplastificantes e de água, que por sua vez aumenta o consumo de cimento a fim de garantir a resistência mecânica à compressão. Estes fatores elevam o custo do concreto. O empacotamento de partículas, entre outros aspectos, estuda a adequada distribuição granulométrica e morfologia das partículas, bem como a incorporação de aditivos e adições minerais de modo que o índice de vazios seja o menor possível e a trabalhabilidade ideal para o concreto com determinada aplicação. O ajuste adequado desses parâmetros permite um aumento da resistência mecânica à compressão do concreto com o mesmo consumo de cimento ou, mantém a resistência com redução no consumo de cimento. Assim, o objetivo deste trabalho é aplicar técnicas de empacotamento em agregados reciclados de concreto, a fim de avaliar a efetividade dessa ferramenta na definição de traços de concretos secos utilizados em blocos para pavimentação com resistência mecânica à compressão maior que 35 MPa. Para isso, os agregados reciclados da construção civil, produzidos por diferentes equipamentos de 4 diferentes empresas localizadas em um raio de 100 km da cidade de Curitiba – PR, foram caracterizados quanto a: morfologia, distribuição granulométrica, massa específica, massa unitária, índice de vazios, composição mássica e visual, além de absorção de água. Em seguida, foi escolhido o agregado que apresentou características físicas mais propícias ao melhor empacotamento, com base na morfologia, na distribuição granulométrica e nos valores de: absorção de água, massa unitária e específica. Escolhido o agregado aplicou-se dois modelos de empacotamento de partículas: o de Funk e Dinger (Alfred) de 1980 e o de De Larrard de 1999, com e sem a introdução do cimento na análise granulométrica. Com as proporções ideais dos agregados foi então estudado, por meio do consistômetro “VeBe”, a quantidade de água para cada traço de concreto. As composições que apresentaram os melhores resultados foram testadas quanto à absorção de água, resistência mecânica à compressão axial e à tração por compressão diametral e análise microestrutural por Microscópio Eletrônico de Varredura. Os concretos foram moldados por meio da mesma vibrocompactadora de laboratório utilizada por Lima (2009), a qual consiste de uma mesa vibratória e cilindros de aço aplicados sobre os moldes, para simular a força de compactação de vibrocompactadoras industriais. Dentro do desvio padrão considerado, o modelo de empacotamento de Funk e Dinger com a introdução do cimento na análise granulométrica apresentou os melhores resultados em relação a resistência à compressão aos 28 dias e em relação a absorção de água. Um tempo de vibrocompactação em laboratório equivalente ao de máquinas industriais foi determinado. Além disso, com o mesmo consumo de cimento, concretos com agregados reciclados alcançaram resistências mecânicas dentro do desvio padrão de concretos produzidos com agregados naturais, utilizados por indústrias de pré-moldados.

**Palavras-chave:** Empacotamento de partículas, agregado reciclado, concreto vibrocompactado, paver, bloco de concreto, pavimentação.

## ABSTRACT

HERMANN, Aline. Particle Packing of Recycled Aggregates to Vibro-compression Concretes. 170. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Recycled aggregates have been widely studied and used in some areas of civil engineering. Among its most common applications can include: revetment mortar, bases, sub-bases, and subgrade pavements, precast concrete elements, containment works and landfills. The main factor that hinders the use of recycled aggregate in concrete is related to the mortar layer adhered to the surface. This layer has high porosity and therefore high water absorption, which gives the concrete, lower workability, and increased content of superplasticizers and water, which in turn increases the consumption of cement in order to ensure the compressive strength. These factors increase the cost of the concrete. The particles packing, among other things, studying the proper particle size distribution and particle morphology, as well as the incorporation of additives and mineral additions such that the voids content is minimized and optimum workability to concrete with particular application. Proper adjustment of these parameters allows an increase mechanical strength of the concrete with the same cement content or, maintains the strength with reduction in the cement content. Thus, the objective of this work is to apply particles packing techniques in recycled concrete aggregates in order to evaluate the effectiveness of this tool in the dry concrete compositions used in paving blocks with compression mechanical strength to greater than 35 MPa. For this, the recycled concrete aggregates produced by different equipment of 4 different companies located within a radius of 100 km from the city of Curitiba - PR, were characterized for: morphology, particle size distribution, density, bulk density, void ratio, mass and visual composition and water absorption. Then, it was chosen the aggregate more favorable physical characteristics to the best packing, on the basis of morphology and the particle size analysis and the values of: water absorption, density and bulk density. Chosen the aggregate particles was applied to two packing packing models: Funk and Dinger (Alfred) of 1980 and De Larrard of 1999, with and without the introduction of cement in particle size distribution. With the ideal proportions of aggregates were then studied by means of consistometer "VeBe", the amount of water for each concrete mix. The compositions that showed the best results were tested for water absorption, mechanical resistance to axial compression, tensile strength by diametrical compression and microstructural analysis by Scanning Electron Microscope. The concrete was cast by the same laboratory vibro-compression machine used by Lima (2009), which consists of a vibrating table and steel rollers applied on the molds, to simulate the compaction force of industrial vibro-compression machine. Within the standard deviation considered the packing packing model of Funk and Dinger with the introduction of cement particle size analysis showed the best results with respect to compression strength at 28 days and for the absorption of water. A lab equivalent time of vibro-compression to industrial machines can be found and this time becomes greater when using recycled aggregates. Moreover, with the same consumption of cement concrete with recycled aggregates achieved mechanical strength within the standard deviation of concretes produced with natural aggregates used by precast industries.

**Keywords:** particle packing, recycled concrete aggregate, concrete vibro-compression, paver, concrete block, paving.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos estágios de britagem .....	25
Tabela 2: Índice de compactação (K).....	56
Tabela 3: Características dos cimentos utilizados (média anual de 2014) .....	58
Tabela 4: Identificação dos agregados reciclados.....	59
Tabela 5: Características das empresas produtoras de agregados reciclados.....	61
Tabela 6: Métodos de caracterização dos materiais .....	63
Tabela 7: Método de mistura para o ensaio de abrasão .....	68
Tabela 8: Aplicação dos modelos de empacotamento de partículas .....	71
Tabela 9: Detalhamento dos ensaios em corpos de prova (CP's) .....	79
Tabela 10: Classificação dos agregados.....	83
Tabela 11: Classificação dos agregados miúdos segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009) .....	86
Tabela 12: Parâmetros dos agregados das empresas .....	97
Tabela 13: Traços obtidos por meio do modelo de De Larrard.....	109
Tabela 14: Traços desenvolvidos por meio do modelo de Funk e Dinger .....	114
Tabela 15: Traços selecionados para execução de concretos em laboratório .....	119
Tabela 16: Dados dos equipamentos de vibrocompactação .....	128

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Alimentador vibratório (a), grelha (b) e transportador de correias (c) .....	24
Figura 2: Britador de mandíbula de um eixo: projeção (a) e corte (b).....	25
Figura 3: Britador de mandíbula de dois eixos: projeção (a) e corte (b) .....	26
Figura 4: Britador de impacto de eixo vertical: projeção (a) e corte (b) .....	27
Figura 5: Britador de impacto de eixo horizontal: corte .....	27
Figura 6: Composição básica para diferentes tipos de concretos.....	28
Figura 7: Relação de vazios (a) e resistência mecânica à compressão (b) versos relação a/c .....	29
Figura 8: Seção típica de pavimento de concreto intertravado.....	31
Figura 9: Porcentagem de substituição x absorção de água .....	33
Figura 10: Efeitos dos agregados reciclados sobre a absorção de água.....	34
Figura 11: Resistência à compressão versos consumo de cimento, AR's graúdo (a) e miúdo (b) .....	34
Figura 12: Porcentagem de substituição x resistência mecânica à compressão axial .....	36
Figura 13: Resistência à compressão axial (MPa) com e sem adição de cimento e superplastificante .....	37
Figura 14: Relação entre porcentagens de substituição e resistência mecânica à tração na flexão.....	37
Figura 15: Efeito do ARC (a) graúdo (20% miúdos) e (b) miúdo (60% graúdos) na resistência à tração.....	38
Figura 16: Efeito do ARM (a) graúdo (20% miúdo) e (b) miúdo (60% graúdo), na resistência à tração.....	38
Figura 17: MEV da zona de transição de concretos com agregados reciclados e ampliação de 20.000x (a) e 8.000x (b) e de concreto com agregados naturais com ampliação de 33.000x (c) e 8.000x (d).....	39
Figura 18: Módulo de elasticidade x porcentagem de substituição por agregado reciclado (a) graúdo (ARg) e (b) miúdo (ARm) .....	40
Figura 19: Dependência da densidade relativa em função do formato das partículas .....	43
Figura 20: Formas de distribuição das partículas .....	44
Figura 21: Mistura sem interação entre partículas .....	44
Figura 22: Efeito parede .....	45
Figura 23: Efeito de afastamento .....	45
Figura 24: Representação esquemática das forças atuantes entre partículas .....	48
Figura 25: Partículas densas (a), com poros fechados (b) e com poros abertos (c).....	49

Figura 26: Comparação entre o volume ocupado pela estrutura de partículas estáveis (a), e volume ocupado pelas mesmas partículas em misturas fluidas (b).....	51
Figura 27: Viscosidade relativa x distância de separação entre partículas.....	51
Figura 28: Determinação da porcentagem de água em concretos secos (a) e plásticos (b).	52
Figura 29: Ângulo de contato entre uma superfície sólida e um líquido .....	53
Figura 30: Influência do coeficiente de distribuição na quantidade de pasta e na relação entre partículas graúdas (entre 4 e 16 mm) e miúdas (entre 0,01 e 125 $\mu$ m) .....	55
Figura 31: Agregados produzidos pelas empresas .....	60
Figura 32: Blocos intertravados (referência-empresa).....	61
Figura 33: Fluxograma das etapas da pesquisa: materiais (a); caracterização dos materiais (b); análise do empacotamento (c); determinação da relação água/cimento (d); caracterização do concreto (e).....	62
Figura 34: Pilhas de agregados reciclados .....	64
Figura 35: Quarteamento das amostras.....	64
Figura 36: Ensaio de morfologia por análise de imagens.....	67
Figura 37: Consistência de concretos secos.....	68
Figura 38: Balança hidrostática para monitoramento da absorção de água do agregado reciclado, vista lateral (a) e superior (b) .....	70
Figura 39: Peneirador vibratório, vista lateral (a) e superior (b).....	75
Figura 40: Consistômetro de “VeBe”: equipamento e procedimento .....	75
Figura 41: Vibrocompactadora de laboratório, vista lateral (a) e frontal (b) .....	77
Figura 42: Tempo equivalente de moldagem x massa específica do concreto no estado fresco.....	78
Figura 43: Coeficiente de transformação da resistência em função da relação $H/\phi$ .....	80
Figura 44: Composição dos agregados das empresas: A (a), B (b), C (c) e D (d).....	82
Figura 45: Teor de materiais pulverulentos dos agregados reciclados miúdos .....	84
Figura 46: Teor de materiais pulverulentos dos agregados reciclados graúdos .....	84
Figura 47: Curva granulométrica e desvio padrão dos agregados reciclados miúdos .....	85
Figura 48: Comparação entre a NBR 7211 (ABNT, 2009) e o modelo de Funk e Dinger ( $D_s=0,003$ mm; $D_L=9,5$ mm).....	86
Figura 49: Comparação entre a distribuição granulométrica do modelo de empacotamento de Funk e Dinger ( $D_s=0,003$ mm; $D_L=4,8$ mm), com valor de “q”=0,35 e as curvas granulométricas dos agregados reciclados miúdos.....	87
Figura 50: Curva granulométrica e desvio padrão dos agregados reciclados graúdos em relação ao modelo de Funk e Dinger ( $D_s=0,003$ mm; $D_L=9,5$ mm).....	88
Figura 51: Massa unitária no estado solto e compactado dos agregados reciclados miúdos	89
Figura 52: Massa unitária dos agregados reciclados graúdos.....	90

Figura 53: Massa específica real e aparente dos agregados reciclados miúdos .....	92
Figura 54: Massa específica real e aparente dos agregados reciclados graúdos.....	93
Figura 55: Valores de absorção de água dos agregados reciclados miúdos .....	93
Figura 56: Valores de absorção de água dos agregados reciclados graúdos .....	94
Figura 57: Índice de vazios dos agregados reciclados miúdos.....	94
Figura 58: Índice de vazios dos agregados reciclados graúdos .....	95
Figura 59: Coeficiente de forma dos agregados das empresas .....	96
Figura 60: Comparação entre o teor de fragmentos do agregado reciclado do primeiro (a) com o segundo lote (b) .....	98
Figura 61: Teor de materiais pulverulentos em comparação com o novo lote .....	99
Figura 62: Distribuição granulométrica dos agregados miúdos em comparação com o novo lote.....	100
Figura 63: Distribuição granulométrica dos agregados graúdos em comparação com o novo lote.....	100
Figura 64: Desgaste por abrasão.....	101
Figura 65: Distribuição granulométrica ( $AR \leq 0,075$ mm).....	101
Figura 66: Distribuição granulométrica do cimento .....	102
Figura 67: Massa unitária, comparação com o novo lote .....	103
Figura 68: Massa específica real e aparente, comparação com o novo lote .....	103
Figura 69: Massa unitária, índice de vazios total e densidade de empacotamento por fração granulométrica do segundo lote;.....	104
Figura 70: Massa unitária, índice de vazios entre partículas e densidade de empacotamento por fração granulométrica do segundo lote .....	105
Figura 71: Valores de absorção de água em comparação com o novo lote .....	106
Figura 72: Índice de vazios em comparação com o novo lote .....	107
Figura 73: Curva de absorção de água do agregado reciclado miúdo escolhido (ACI) .....	107
Figura 74: Curva de absorção de água do agregado reciclado graúdo escolhido (PCI) .....	107
Figura 75: Densidade de empacotamento virtual pelo modelo de De Larrard em função do percentual em massa de cimento .....	112
Figura 76: Análise das curvas granulométricas dos traços do modelo de Funk e Dinger ...	116
Figura 77: Diferença percentual relativa sobre o modelo de Funk e Dinger .....	117
Figura 78: Resistência à compressão axial e massa específica saturada, comparação entre traços (tempo de moldagem de 20s).....	121
Figura 79: Resistência mecânica à tração por compressão diametral e absorção de água, comparação entre traços .....	123

Figura 80: MEV da zona de transição de concretos com agregados naturais com ampliação de 10.000X (a) e 5.000X (b) e com agregados reciclados com ampliação de 10.000X (c) e 5.000X (d).....	124
Figura 81: Panorâmica da superfície de fragmentos de concretos com agregados naturais (a) e reciclados (b), ampliação de 45X.....	124
Figura 82: Medidas de aceleração da mesa vibratória da vibrocompactadora de laboratório .....	125
Figura 83: Medidas de aceleração do consistômetro “VeBe” .....	126
Figura 84: Medidas de aceleração da vibrocompactadora industrial .....	127
Figura 85: Frequência de vibração da vibrocompactadora industrial na direção vertical ....	127
Figura 86: Variação da massa específica saturada de corpos de prova produzidos em diferentes tempos de vibrocompactação (Tempo “VeBe” de 24s e a/c = 0,61) .....	128
Figura 87: Variação da resistência à compressão axial aos sete dias de corpos de prova produzidos em diferentes tempos de vibrocompactação (Tempo “VeBe” de 24 s e a/c = 0,61) .....	129
Figura 88: Variação da massa específica aos sete dias de concretos com agregados reciclados produzidos em diferentes tempos de vibrocompactação (Tempo “VeBe” de 27 s e a/c = 0,95) .....	130
Figura 89: Variação da resistência à compressão axial aos sete dias de concretos com agregados reciclados produzidos em diferentes tempos de vibrocompactação (Tempo “VeBe” de 27 s e a/c = 0,95) .....	131
Figura 90: Valores teóricos de resistência à compressão axial e massa específica saturada de blocos com agregados reciclados .....	132
Figura 91: Valores teóricos de resistência à tração por compressão diametral e absorção de blocos com agregados reciclados .....	133

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
AA	Areia reciclada da empresa A
AB	Areia reciclada da empresa B
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Areia reciclada da empresa C
ACI	Areia reciclada escolhida da empresa C
AD	Areia reciclada da empresa D
AP	Areia e pedrisco
AR	Agregado reciclado
ARC	Agregado reciclado de concreto
ARg	Agregado reciclado graúdo
ARm	Agregado reciclado miúdo
ARM	Agregado reciclado misto
BA	Brita 0 (pedrisco) reciclada da empresa A
BC	Brita 0 (pedrisco) reciclada da empresa C
BD	Brita 0 (pedrisco) reciclada da empresa D
CAP	Cimento, areia e pedrisco
CPFT	Porcentagem acumulada de partículas menores que $D_p$
CP II F 32	Cimento Portland tipo II com adição de <i>filler</i> calcário e resistência característica à compressão de 32 MPa
CPM	<i>Compressible Packing Model</i> (Modelo de empacotamento compressível)
CP's	Corpos de prova
CP V ARI	Cimento Portland tipo V de alta resistência inicial
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
D10	Menor diâmetro correspondente a 10% do material analisado
D50	Diâmetro médio correspondente a 50% do material analisado
D90	Maior diâmetro correspondente a 90% do material analisado
DafSt	Comitê Alemão de Concreto Armado
DL	Modelo de empacotamento de De Larrard (1999)
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DP	Desvio padrão
DRX	Difratometria de raios X
FD	Modelo de empacotamento de Funk e Dinger (1980)
FRX	Espectroscopia de Fluorescência de raios X

Máx.	Máximo
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MF	Módulo de finura
min.	Minuto
Mín.	Mínimo
NBR	Norma Brasileira
PA	Pedrisco reciclado da empresa A
PC	Pedrisco reciclado da empresa C
PCI	Pedrisco reciclado escolhido da empresa C
PD	Pedrisco reciclado da empresa D
PR	Paraná
PVC	Policloreto de polivinila
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
USP	Universidade de São Paulo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SIMBOLOS

$a_{ij}$	Interação do modelo para o efeito de afastamento
$\beta_i$	Densidade de empacotamento da fração granulométrica i
$\beta_j$	Densidade de empacotamento da fração granulométrica j
$b_{ij}$	Interação do modelo para o efeito de parede
$C_{f_{agregado}}$	Coeficiente de forma da partícula
$C_{f_{fração}}$	Coeficiente de forma da fração
d	Dimensão da peneira da fração granulométrica
$d_i$	Dimensão das partículas da fração granulométrica i
$d_j$	Dimensão das partículas da fração granulométrica j
$D_L$	Diâmetro da maior partícula
$D_P$	Diâmetro da partícula
$D_S$	Diâmetro da menor partícula
$\phi$	Diâmetro
$\varphi$	Densidade de empacotamento real do conjunto de partículas.
$F_g$	Força da gravidade
$F_{vw}$	Força de Van Der Waals
$\gamma$	Densidade de empacotamento virtual do conjunto de partículas
$\gamma_i$	Densidade de empacotamento virtual do conjunto quando a fração i é dominante
$y_j$	Porção volumétrica da fração granulométrica j
h	Horas
H/ $\phi$	Relação altura/diâmetro
Hz	Hertz
k	Coeficiente de transformação para diferentes relações altura/diâmetro
K	Índice de compactação
kPa	QuiloPascal
kV	Quilovolts
L	Maior dimensão da partícula
$m_{\text{fração}}$	Massa de todas as partículas contidas na imagem
$\mu\text{m}$	Micrômetro ( $10^{-6}$ m)
MPa	Mega Pascal
q	Coeficiente de distribuição
$\rho_{\text{fração}}$	Massa específica da fração
$R^2$	Coeficiente estatístico de determinação
s	Segundos

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.1 PROBLEMÁTICA.....	19
1.2 OBJETIVO GERAL.....	20
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
1.4 JUSTIFICATIVA .....	21
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	23
2.1 PRODUÇÃO DE AGREGADO RECICLADO A PARTIR DO RCD.....	23
2.1.1 Britador de Mandíbulas .....	25
2.1.2 Britador de Impacto.....	26
2.2 CONCRETO SECO .....	27
2.2.1 Umidade de concretos secos .....	28
2.2.2 Agregados para concretos de consistência seca .....	30
2.2.3 Coesão e trabalhabilidade de concretos secos .....	30
2.2.4 Pavimentação com bloco de concreto intertravado .....	31
2.2.5 Vibrocompactação para fabricação de pré-moldados .....	32
2.3 AGREGADO RECICLADO EM CONCRETO SECO .....	32
2.3.1 Efeitos da absorção de água do agregado reciclado em concretos .....	33
2.3.2 Resistência mecânica à compressão axial.....	36
2.3.3 Resistência mecânica à tração na flexão .....	37
2.3.4 Zona de transição .....	39
2.3.5 Retração e Deformação .....	40
2.3.6 Fissuração e acabamento das peças.....	41
2.4 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	42
2.4.1 Efeitos da distribuição e tamanho das partículas .....	43
2.4.2 Forma das partículas .....	46
2.4.3 Textura das partículas.....	47
2.4.4 Aglomeração de partículas finas .....	48
2.4.5 Densidade de partículas .....	49
2.4.6 Estabilidade das partículas .....	49
2.4.7 Métodos de preparo das misturas.....	50
2.4.8 Efeito da capa d'água no empacotamento de partículas .....	50
2.4.9 Modelos de empacotamento de partículas.....	53
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	58
3.1 MATERIAIS.....	58
3.1.1 Cimentos .....	58

3.1.2 Aditivo plastificante .....	59
3.1.3 Agregados reciclados .....	59
3.1.4 Agregados naturais .....	61
<b>3.2 MÉTODOS .....</b>	<b>62</b>
3.2.1 Caracterização dos agregados reciclados.....	63
3.2.2 Caracterização dos blocos intertravados (referência-empresa).....	70
3.2.3 Aplicação dos modelos de empacotamento de partículas.....	70
3.2.4 Preparação dos materiais para produção dos concretos.....	74
3.2.5 Determinação do consumo de água.....	75
3.2.6 Vibrocompactação .....	76
3.2.7 Análise de desempenho do concreto .....	79
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>82</b>
<b>4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS .....</b>	<b>82</b>
4.1.1 Teor de fragmentos do agregado reciclado.....	82
4.1.2 Teor de materiais pulverulentos .....	83
4.1.3 Distribuição granulométrica.....	85
4.1.4 Massa unitária .....	88
4.1.5 Massa específica real e massa específica aparente .....	91
4.1.6 Absorção de água e índice de vazios.....	93
4.1.7 Morfologia .....	95
<b>4.2 SELEÇÃO DO AGREGADO IDEAL .....</b>	<b>96</b>
<b>4.3 CARACTERIZAÇÃO DO LOTE DE TRABALHO .....</b>	<b>98</b>
4.3.1 Teor de fragmentos do agregado reciclado.....	98
4.3.2 Teor de materiais pulverulentos .....	99
4.3.3 Distribuição granulométrica.....	99
4.3.4 Massa unitária, massa específica real e massa específica aparente .....	102
4.3.5 Absorção de água e índice de vazios.....	106
<b>4.4 DETERMINAÇÃO DOS TRAÇOS .....</b>	<b>108</b>
4.4.1 Aplicação dos modelos de empacotamento de partículas.....	108
4.4.2 Traços produzidos e determinação do consumo de água .....	118
<b>4.5 DETERMINAÇÃO DO MELHOR TRAÇO COM AGREGADOS RECLADOS .....</b>	<b>121</b>
<b>4.6 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE EQUIVALÊNCIA ENTRE OS EQUIPAMENTOS DE VIBROCOMPACTAÇÃO .....</b>	<b>125</b>
<b>4.7 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS COM O TEMPO EQUIVALENTE .....</b>	<b>132</b>
<b>4.8 DISCUSSÃO GERAL .....</b>	<b>133</b>

<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>135</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>137</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>138</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>150</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento econômico e populacional as cidades se desenvolveram, porém, esse crescimento trouxe uma preocupação sobre a destinação dos resíduos, especificamente os de construção e demolição (BEJA, 2014). A expansão dos espaços públicos e a ausência na previsão de locais para descarte e deposição destes resíduos, tem gerado um dos grandes problemas urbanos em cidades de todos os portes, no Brasil e no exterior. Em países como a Holanda e a Bélgica, a preocupação com a reciclagem deste tipo de entulho iniciou-se na década de 50, em função dos escombros da Segunda Guerra Mundial e restrição de espaços para descarte dos resíduos. Este fato acabou culminando na reciclagem de aproximadamente 95% dos resíduos gerados nesses países por volta da 1ª década do ano 2000 (GRADIN e COSTA, 2009).

Contudo, no Brasil a reciclagem do entulho da construção civil ainda não é compreendida como uma necessidade pela maioria da população e pelo poder público, embora existam usinas de reciclagem e espaços para estações de transbordo. Além disso, apesar do uso de locais autorizados ser uma medida positiva para evitar aterros clandestinos, somente esse procedimento não resolve a situação, uma vez que promove o acúmulo dos resíduos. O adequado é o atendimento às premissas do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, previsto no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no qual os municípios criam condições para que o gerenciamento desse resíduo seja completo e promova um ambiente para que a iniciativa privada instale centrais de triagem e usinas de reciclagem de entulho (SINDICATO, 2005; BRASIL, 2010).

Dos resíduos sólidos urbanos gerados no país, de 50% a 70% é caracterizado como resíduo da construção civil e destes, de 70 a 75% provêm de obras de construção, reformas e demolições realizadas pelos próprios usuários dos imóveis, os quais acabam destinando esses resíduos a locais inadequados (SINDICATO, 2005).

Assim, o descompromisso desses geradores acaba provocando impactos ambientais que vão desde a degradação das áreas de mananciais e de proteção permanente; passando pela proliferação de agentes transmissores de doenças; assoreamento de rios e córregos; obstrução dos sistemas de drenagem de vias e logradouros públicos até o acúmulo de resíduos que podem gerar risco a saúde por sua periculosidade (ÂNGULO, 2006; MOTTA, 2005).

Entretanto, pressões do mercado imobiliário e legislações ambientais nas três esferas de poder, associados a oportunidades de negócio tem motivado algumas construtoras a promover a reciclagem dos resíduos da construção civil, tanto no próprio canteiro de obras, como na separação e transporte até às poucas usinas de reciclagem estabelecidas, na maioria das vezes, nas grandes cidades. Além da preocupação ambiental, as empresas

adotam esta prática por trazer alguns benefícios como: a organização e limpeza do canteiro com a triagem dos resíduos, impedindo sua mistura com insumos; o reaproveitamento de resíduos, que gera economia e, a quantificação e qualificação dos resíduos descartados, possibilitando a identificação de possíveis focos de desperdício (SINDICATO, 2005). Pelos mesmos motivos, empresários e prefeituras, individuais ou em consórcio, têm investido na implantação de usinas fixas e móveis para reciclagem de entulho, contando inclusive com financiamento, entre outros, do BNDES. Os ganhos além de financeiros, inclusive para as prefeituras, incluem a melhoria na drenagem de córregos e rios, redução na contaminação da população por vetores de doenças e, ambientais, pela possibilidade de reduzir a pressão por agregados naturais.

Nas usinas de reciclagem os resíduos são selecionados e destinados à aterros controlados (resíduos de tinta, orgânicos), à reciclagem específica (papelão, metais, vidros, madeira) ou, em sua maioria, transformados em agregados reciclados (resíduos de argamassa, concreto e materiais cerâmicos) (SINDICATO, 2005; ULSEN, 2011).

As maneiras mais tradicionais de utilização do agregado reciclado da construção e demolição (RCD) são em materiais sem função estrutural, como em argamassas de assentamento e revestimento (MIRANDA, 2005), contrapisos, reforço de base, sub-base e subleito de pavimentos e, correção topográfica de terrenos (CARNEIRO *et al.*, 2001; MOTTA, 2005; POON e CHAN, 2006; LEITE, 2007; SILVA e MIRANDA, 2008; BEJA, 2014).

Algumas indústrias ou mesmo as usinas de reciclagem, também produzem com os agregados reciclados artefatos como: blocos de vedação, contramarcos e vergas para janelas, vigas para lajes pré-moldadas e elementos decorativos (LEVY, 2001; CAPELLO, 2006; BUTTLER, 2007).

Os agregados reciclados podem ser produzidos por diferentes tipos de equipamentos de cominuição. Entre eles estão os britadores de impacto, de mandíbula e cônico e, os moinhos de martelo, rolos, disco e cilíndricos, entre outros. Estes equipamentos geram agregados com distribuições granulométricas e morfológicas diversificadas, que ao serem adicionadas ao concreto mudam as características e propriedades (GONÇALVES, 2001; LEITE, 2001; BUTTLER, 2003; TENÓRIO, 2007; BEJA, 2014).

## 1.1 PROBLEMÁTICA

O agregado reciclado de concreto apresenta algumas características que o tornam favorável a algumas utilizações e desfavorável a outras, o que acaba por reduzir o interesse de alguns investidores por este material. Quando ligados à produção de concretos, os agregados reciclados acarretam elevado consumo de cimento, que acaba por encarecer o produto e assim reduzir os lucros. O elevado consumo de cimento se deve a capa de

argamassa aderida ao agregado natural, à porosidade interna do agregado devido ao impacto da rebitagem e às características intrínsecas quando o material de origem é cerâmico, além do maior teor de finos resultante da britagem de materiais frágeis (argamassa e cerâmicos). Estes fatores conferem ao concreto maior porosidade e maior absorção de água, resultando em reduzidos valores de resistência mecânica à compressão, razão pela qual são indicados somente para aplicações não estruturais (LATTERZA, 1998; SOUTSOS *et al.*, 2011b; AMADEI, 2011 e MATAR e DALATI, 2012).

No estado fresco, a maior absorção de água do agregado reciclado leva à obtenção de concretos mais secos, sendo necessário maior adição de água e aditivos superplastificantes para alcançar a trabalhabilidade necessária. Isso faz com que haja necessidade da adição de maior quantidade de cimento, a fim de manter a mesma relação água/cimento e conseqüentemente a resistência mecânica indispensável ao concreto, encarecendo o produto (LATTERZA, 1998; SOUTSOS *et al.*, 2011b; AMADEI, 2011 e MATAR e DALATI, 2012).

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Produzir um traço de concreto, por meio de métodos de empacotamento de partículas, destinado a produção de blocos de concreto intertravados vibrocompactados com o uso de agregados reciclados da construção civil, o qual possua resistência à compressão e consumo de cimento equivalentes ao de blocos produzidos com agregados naturais.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Entre os objetivos específicos estão:

- Determinar, entre quatro diferentes usinas produtoras de agregados reciclados de RCD, qual deles apresenta características físicas que propiciem o melhor empacotamento;
- Determinar qual dos modelos de empacotamento de partículas, Funk e Dinger (1980) ou De Larrard (1999), é mais eficiente para a produção de concretos secos com agregados reciclados;
- Definir qual condição, com ou sem o cimento introduzido na análise granulométrica, é mais favorável à produção de concretos secos com agregados reciclados;
- Definir um tempo equivalente entre diferentes equipamentos de vibrocompactação, para o concreto de referência com agregados naturais e para o concreto com agregados reciclados.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

As técnicas de empacotamento de partículas têm a função de preservar a resistência mecânica à compressão de concretos, ao mesmo tempo em que reduzem o consumo de cimento por meio da máxima redução do índice de vazios entre partículas. De outro modo, para um determinado consumo de cimento, o empacotamento de partículas permite aumentar a resistência mecânica à compressão. Contudo, deve-se manter uma espessura mínima de pasta para interligação entre todos os agregados e, para isso, dentro do estudo de empacotamento também existem diferentes técnicas (NEVILLE, 1997 e OLIVEIRA *et al.*, 2000).

O menor índice de vazios é obtido, entre outros fatores, pela correta distribuição do tamanho das partículas e pelo estudo do índice de forma e textura superficial das mesmas, de forma que os vazios das partículas maiores sejam preenchidos por partículas menores (OLIVEIRA *et al.*, 2000; CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

Uma vez que os modelos de empacotamento estão bem ajustados para os agregados naturais, resultando em grandes aumentos de resistência mecânica à compressão (FENNIS, 2011), para agregados reciclados não foram encontrados estudos que comprovassem ou não a eficiência destes métodos neste tipo de partícula.

Os primeiros modelos de empacotamento de partículas foram elaborados considerando estruturas de partículas esféricas e lisas, o que para agregados naturais e, especificamente para os reciclados, torna-se um fator limitante, uma vez que estes apresentam morfologia irregular com superfície rugosa e porosa. Em modelo mais recente é considerado também a forma da partícula por meio das proporções mássicas e volumétricas do material, como o modelo de De Larrard (1999). Apesar de se adequarem muito bem aos agregados naturais, para partículas com porosidade aberta, como os agregados reciclados, ainda faltam estudos que descrevam como este tipo de partícula pode se adequar a modelos teóricos de empacotamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000; FENNIS, 2011).

Como os agregados reciclados elevam o consumo de cimento por sua elevada porosidade e o aumento do empacotamento dos agregados o reduz, a possibilidade de equilibrar este consumo poderia tornar o uso intensivo de agregados reciclados viável para produção de peças pré-moldadas de concreto vibrocompactado.

O concreto vibrocompactado foi escolhido por ser, além de misturado e depositado em forma, vibrado e compactado. As operações de vibração e compactação auxiliam ainda mais o empacotamento das partículas, ao passo que melhora a disposição das partículas dentro da forma.

Dessa forma, o uso intensivo de agregados reciclados em concretos pode amenizar os impactos causados ao meio ambiente, principalmente com a redução da demanda por

áreas de descarte deste material e o impacto ambiental da lavra de rochas para fabricação de agregados. Da mesma forma, como já citado, as técnicas de empacotamento de partículas podem tanto reduzir o consumo de cimento por meio da redução dos vazios como aumentar a resistência mecânica à compressão, mantendo o consumo de cimento. A redução do consumo de cimento em qualquer área da construção civil implica em ganho ambiental, principalmente por que sua produção tem como consequência a liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera, além do elevado consumo de energia e de recursos naturais (ULSEN, 2011; MALTA *et al.*, 2014).

Por outro lado, isso também pode acarretar em maior interesse de grupos econômicos e prefeituras na produção de agregados reciclados. Dependendo da localização da usina e do custo benefício destes agregados em relação aos agregados convencionais, pode haver uma redução dos custos de produção e transporte de entulho e de artefatos de concreto. Normalmente, as empresas fabricantes de pré-moldados ficam próximas ou mesmo no local da pedreira de origem das matérias-primas, devido ao elevado custo do transporte dos agregados às fábricas. Em contrapartida, existe um número significativo também de fábricas que estão localizadas em regiões urbanas, devido ao custo do transporte das peças produzidas até o consumidor (SOUTSOS *et al.*, 2004; ULSEN, 2011).

Logo, a utilização de agregados reciclados em substituição total ou parcial dos agregados naturais, por ser fornecido a partir de fontes próximas ao consumidor, seria uma alternativa para a redução dos custos de transporte. Além do ganho ambiental e da valorização do material produzido pelas usinas de reciclagem (GRADWELL *et al.*, 2004).

Assim, justifica-se a necessidade de manipulação das curvas granulométricas de agregados reciclados por meio da elaboração de composições a partir de areias e britas recicladas com diferentes granulometrias para resultar em produtos com desempenho similar aos que utilizam agregados naturais.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será apresentada uma breve descrição sobre os agregados reciclados, como são produzidos e quais as suas principais características. Como o intuito do trabalho é estudar o empacotamento de agregados reciclados em concretos secos, também serão apresentadas as características desse tipo de concreto e as técnicas atualmente mais utilizadas para análise do empacotamento dos agregados.

### 2.1 PRODUÇÃO DE AGREGADO RECICLADO A PARTIR DO RCD

A Resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONSELHO, 2002), descreve o resíduo de construção e demolição (RCD) como sendo aquele procedente de construções, reformas, reparos, demolições e o decorrente da preparação e escavação de terrenos. Paralelamente a NBR 10004 (ABNT, 2004a) também cita os resíduos do processo de preparo e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto, como blocos, tubos, meios-fios e outros.

Apesar da natureza inerte predominante desse produto, ele pode causar diversos problemas em aterros devido à contaminação destes por materiais como: tintas, óleos, asfaltos, madeira, amianto, ferro e manganês, classificados como de Classe B, C ou D, segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004b) que atende aos mesmos quesitos da Resolução CONAMA 307 (CONSELHO, 2002). Isto pode causar problemas de saúde aos funcionários e a população no entorno dos aterros.

Contudo, a fração inerte constituída por agregados reciclados de concreto ou mistos é considerada como Classe A, segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004b) e a Resolução CONAMA 307 (CONSELHO, 2002). Isto se deve a composição química e mineralógica composta principalmente por silicatos, aluminatos e carbonatos, semelhantes aos agregados naturais e ao solo, o que não acarreta em riscos ambientais (ANGULO e JOHN, 2006).

Os agregados reciclados geralmente apresentam uma capa de argamassa aderida à superfície. Essa argamassa, juntamente com o resíduo de origem cerâmica, por serem materiais porosos, são os componentes que conferem ao agregado reciclado a maior capacidade de absorção de água em relação ao agregado natural (MOREIRA, 2010).

Contudo, segundo estudo realizado por Malta *et al.* (2014), o agregado reciclado apresenta uma distribuição granulométrica contínua, o que se constitui um fator positivo para o aumento da densidade de empacotamento de misturas e conseqüentemente a resistência mecânica à compressão axial. Entretanto, a distribuição granulométrica pode variar de um agregado reciclado para o outro, dependendo do processo de britagem em que é produzido.

Além disso, o RCD apresenta uma textura mais rugosa e uma morfologia mais angular que o agregado natural. Essas características corroboram para a melhoria da aderência pasta/agregado, promovendo uma maior absorção da pasta pelos seus vazios superficiais. Com isso, há um maior fechamento da zona de transição entre o agregado e a pasta, melhorando o desempenho do produto (LEITE, 2001).

Existem diversos processos para produção de agregados reciclados. O mais comum deles consiste em transportar o material a ser britado, normalmente por pá carregadeira ou retroescavadeira, até um alimentador vibratório, no qual uma grelha retira os materiais indesejáveis e que, por sua vez são removidos por um transportador de correia, formando uma pilha de material chamada escalpe (Figura 1). Esse processo inicial evita o desgaste desnecessário do britador (MAPRE, 2014).

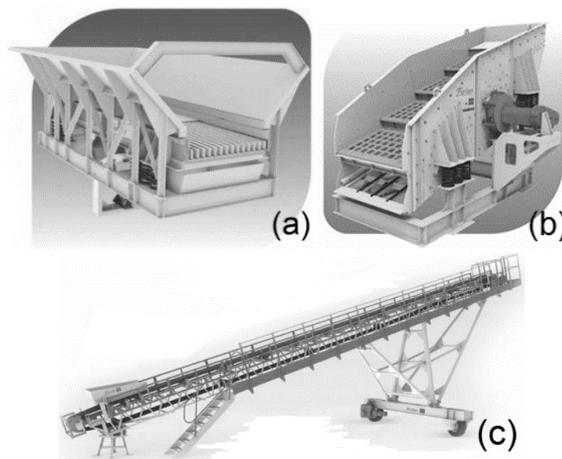


Figura 1: Alimentador vibratório (a), grelha (b) e transportador de correias (c)  
Fonte: Furlan (2014a), Furlan (2014b), Furlan (2014c).

Assim, o material retido na grelha é transportado até um britador primário, de onde outro transportador de correia distribui o agregado na pilha adequada ou na peneira vibratória. Da peneira vibratória saem agregados com diversas faixas granulométricas e cada um é direcionado por um transportador de correia até uma pilha específica (MAPRE, 2014).

Caso haja necessidade de maior redução das partículas podem ser utilizados outros equipamentos de cominuição. Assim, além do britador primário, existem britadores secundário, terciários e até quaternários. Contudo, os mais comuns são os britadores primários e secundários. Dentre os britadores primários pode-se citar: o de mandíbulas, o giratório, o de impacto e o de rolo dentado. Dentre os britadores secundários estão: o giratório secundário; o de mandíbulas secundário; o cônico; o de martelos e o de rolos (FIGUEIRA *et al.*, 2004).

Para entender melhor os estágios de britagem, pode-se observar a Tabela 1, na qual é mostrado que cada estágio de britagem é caracterizado pelo tamanho máximo do material a ser britado e pelo tamanho máximo do material britado.

Tabela 1: Classificação dos estágios de britagem

Estágio de britagem	Tamanho máximo do material a ser britado (mm)	Tamanho máximo do material britado (mm)
Britagem primária	1000	100,0
Britagem secundária	100	10,0
Britagem terciária	10	1,0
Britagem quaternária	2	0,8

Fonte: Luz *et al.*, 2010.

Os britadores podem ser tanto de planta móvel, podendo ser transportados a qualquer lugar, como de planta fixa (FIGUEIRA *et al.*, 2004). Entretanto, serão discutidos neste trabalho apenas os britadores primários e secundários de planta fixa utilizados nas usinas estudadas.

### 2.1.1 Britador de Mandíbulas

O princípio de funcionamento do britador de mandíbulas consiste na quebra do material pela ação de uma força de compressão, aplicada por meio de movimentos periódicos de aproximação e afastamento de uma superfície (mandíbula) móvel contra outra fixa. O material britado desce por gravidade, sendo possível fazer a alimentação com blocos de elevadas dimensões/dureza e com grandes variações de tamanho. A granulometria final do agregado é definida por meio do ajuste do equipamento e a razão da redução está em torno de 5:1. Estes podem ser classificados como sendo de um ou de dois eixos (LUZ *et al.*, 1998; LUZ *et al.*, 2010). Devido a esse processo, britadores de mandíbulas geram partículas mais angulosas (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

O britador de mandíbula de um eixo apresenta movimento pendular e foi projetado para britagem de rochas mais duras mantendo seu desempenho com mínima necessidade de manutenção, ver Figura 2 (LUZ *et al.*, 1998 e METSO, 2014).

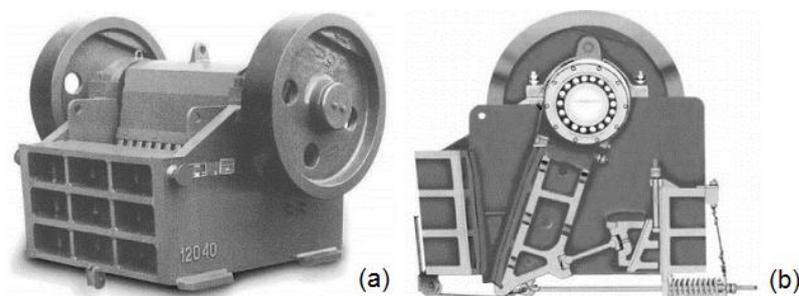


Figura 2: Britador de mandíbula de um eixo: projeção (a) e corte (b)

Fonte: Metso, 2014h.

O britador de mandíbula de dois eixos, tipo Blake apresentado na Figura 3, apresenta movimento pendular e é indicado para britagem primária também de materiais extremamente resistentes. É caracterizado pela facilidade de operação e têm baixo índice de desgaste, menor ainda que os britadores de mandíbula de um eixo (LUZ *et al.*, 1998 e METSO, 2014).

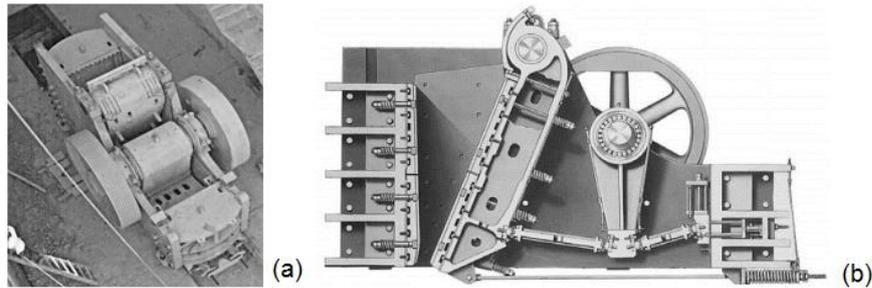


Figura 3: Britador de mandíbula de dois eixos: projeção (a) e corte (b)  
 Fonte: Metso, 2014.

A principal peça sujeita ao desgaste por abrasão ocasionada pelo material britado é a mandíbula e por isso é constantemente trocada. Sua vida útil pode variar de semanas a meses, em função da regulagem da abertura de saída do britador e da granulometria, umidade e natureza abrasiva do material. A mandíbula fixa tem vida útil menor que a móvel, pois o material desliza continuamente sobre sua superfície (METALURGICA..., 2014).

De acordo com o material e a regulagem do britador, escolhe-se o tipo de mandíbula a ser utilizada. Dentre elas podem-se citar as mandíbulas lisas (com pequenas ondulações), as de dentes grossos e as de dentes finos. As mandíbulas lisas produzem um material mais lamelar. De acordo com o tipo, tamanho e ajuste do britador de mandíbulas, pode-se determinar a curva granulométrica do material britado e a capacidade de produção do mesmo (METALURGICA..., 2014).

O britador de mandíbulas pode chegar a uma capacidade de até 1.000 toneladas/hora, sendo recomendado quando se deseja uma baixa quantidade de finos. Pode ser utilizado para britagem de qualquer rocha ou material abrasivo, entretanto é menos indicado que o britador de impacto para materiais úmidos e/ou com alto teor de argila (LUZ *et al.*, 1998).

### 2.1.2 Britador de Impacto

Os britadores de impacto foram projetados para atender grandes capacidades de produção e/ou altas taxas de cominuição. A produtividade pode atingir aproximadamente 2.500 toneladas/hora. Além disso, este britador tem menor geração de materiais pulverulentos que o britador de mandíbulas (LUZ *et al.*, 1998).

Neste equipamento, os materiais a serem britados são atingidos pelo impacto do rotor, sendo lançados contra o revestimento, onde sofrem o fraturamento. Em geral, os materiais recebem de um a dois impactos e tendem a atravessar o percurso de moagem rapidamente. O efeito do impacto é desprezível para partículas menores que 0,15 mm. Dentro de certas limitações mecânicas, aumentando a velocidade do rotor, diminui-se a granulometria de saída (CHAVES e PERES, 2003).

Existem no mercado britadores de impacto de eixo vertical e de eixo horizontal. Os britadores de eixo vertical (Figura 4) podem servir como britadores secundários ou terciários, uma vez que sua capacidade de cominuição é bem maior, assim como a remoção da capa de argamassa aderida na superfície do agregado natural, o que melhora a qualidade do produto (CHAVES e PERES, 2003; FABRO *et al.*, 2011).

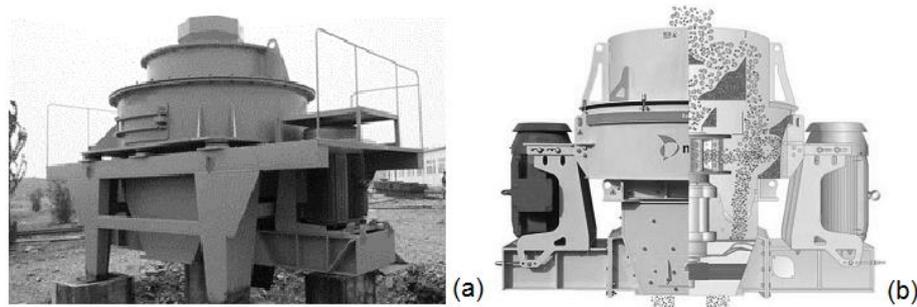


Figura 4: Britador de impacto de eixo vertical: projeção (a) e corte (b)  
Fonte: Metso, 2014 e Henan..., 2014.

Adicionalmente, britadores de impacto resultam em partículas menos lamelares. O formato mais arredondado das partículas é obtido pelo impacto dos fragmentos que entram no britador com os fragmentos que formam um “colchão” nas laterais internas do britador.

Os britadores de eixo horizontal (Figura 5) formam partículas mais cúbicas e tem melhor distribuição granulométrica de partículas (CHAVES e PERES, 2003 e MAPRE, 2014).



Figura 5: Britador de impacto de eixo horizontal: corte  
Fonte: Thyssenkrupp... (2014).

Entretanto, a utilização deste britador gera elevado custo de manutenção e grande desgaste, não sendo aconselhável no caso de rochas abrasivas e de materiais com mais de 15% de sílica (CHAVES e PERES, 2003 e LUZ *et al.*, 1998).

## 2.2 CONCRETO SECO

O concreto seco é caracterizado por não apresentar abatimento (*no-slump*). Este tipo de concreto é utilizado principalmente na produção de artefatos à base de cimento Portland (pré-moldados por vibrocompactação), como por exemplo, em blocos de concreto intertravado

para pavimentação de ruas e calçadas, blocos para alvenaria e tubos de concreto (MARCHIONI, 2012). Na Figura 6 podem ser observadas as diferentes composições para diferentes tipos de concreto.

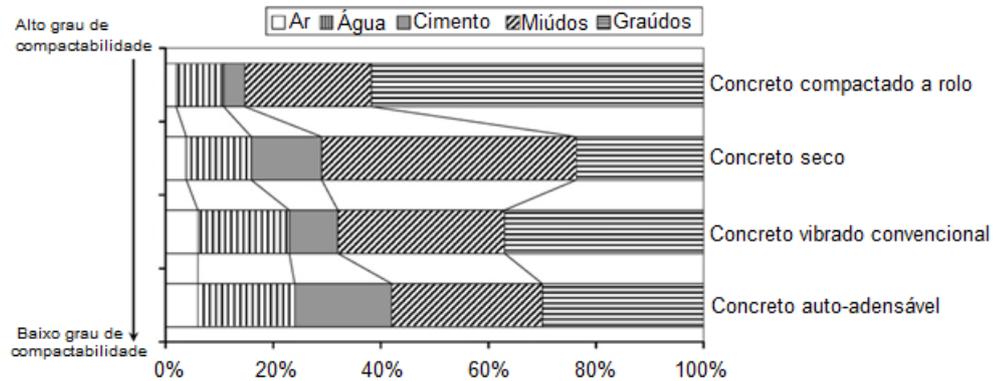


Figura 6: Composição básica para diferentes tipos de concretos  
Fonte: HÜSKEN e BROUWERS, 2008.

O concreto seco apresenta maior índice de vazios quando comparado ao concreto compactado a rolo e menor quando comparado a concretos convencionais e concretos auto-adensáveis. Em relação ao cimento, o concreto seco apresenta maior consumo quando comparado a concretos convencionais e concretos compactados a rolo, porém menor consumo quando comparado a concretos auto-adensáveis. Em relação ao volume de agregados miúdos e graúdos, o concreto seco apresenta maior percentual de agregados miúdos e menor percentual de agregados graúdos quando comparado a todos os outros tipos de concreto (HÜSKEN e BROUWERS, 2008).

### 2.2.1 Umidade de concretos secos

A umidade do concreto vibrocompactado no estado fresco deve ser a maior possível, entre 6% a 8% (umidade ótima), para que as unidades de artefatos não se desagreguem ou sofram exsudação. Isto significa que, diferentemente de concretos plásticos, concretos secos não seguem a “Lei de Abrams”, em que a resistência mecânica do concreto é inversamente proporcional à relação água/cimento (OLIVEIRA, 2004; PIROLA, 2011).

Por meio da Figura 7 (a), pode-se perceber que, para maiores relações água/cimento, a relação de vazios é alta. Isso ocorre porque as partículas sólidas estão afastadas umas das outras por estarem cobertas por água, o que ocorre em concretos fluidos. Ao diminuir-se a relação água/cimento, as partículas aproximam-se umas das outras, de modo que a relação de vazios vai diminuindo até alcançar um ponto crítico ou umidade ótima, na qual a relação de vazios é mínima. Nesta situação, as partículas já não estão totalmente cobertas por água mas conectadas por água somente nos pontos de contato entre partículas. A partir desta

umidade, caso a relação água/cimento seja novamente reduzida, não haverá água suficiente na mistura, sendo a ligação entre partículas quebrada, o que acaba por gerar um afastamento das mesmas, aumentando a relação de vazios da mistura (KLEIN, 2012; LI e KWAN, 2014).

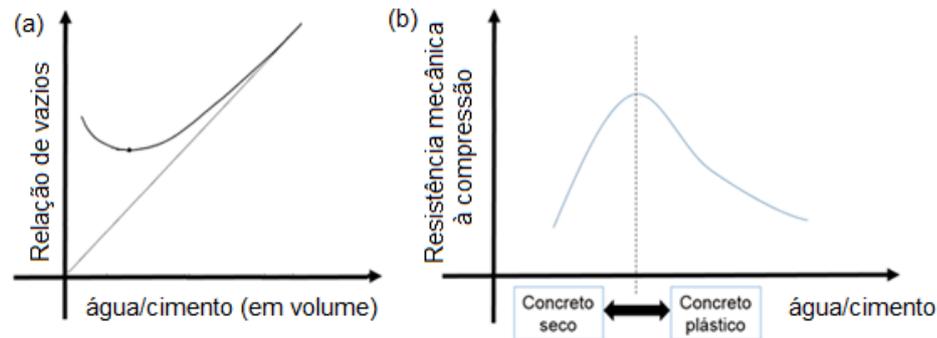


Figura 7: Relação de vazios (a) e resistência mecânica à compressão (b) versus relação a/c  
 FONTE: Adaptado de Wong e Kwan, 2008a e Oliveira, 2004.

Então, para concretos secos, quanto mais água puder ser incorporada à mistura, dentro do limite apresentado, menor será o índice de vazios, o que resultará em maior resistência mecânica à compressão, Figura 7 (b), e maior compacidade. Uma mistura com quantidade de água insuficiente pode perder até 60% da resistência mecânica à compressão pela dificuldade de compactação e, além disso, o desgaste do molde pode ser acelerado pelo atrito excessivo com os agregados (MARCHIONI, 2012). Contudo, caso a quantidade de água seja demasiada, haverá um aumento da distância de separação entre as partículas de agregados, com conseqüente aumento da porosidade interna do concreto, diminuindo a resistência mecânica à compressão (OLIVEIRA, 2004; PIROLA, 2011).

Geralmente a relação água/cimento utilizada em concretos secos fica em torno de 0,4. Para relações água/cimento entre 0,3 e 0,35 é observado baixo grau de hidratação do cimento (HÜSKEN e BROUWERS, 2008).

Segundo Oliveira (2004), a quantidade de água ideal do concreto seco é aquela que permite moldar uma pelota de concreto com as mãos, sem que essa se desmanche (falta de água) ou suje excessivamente a mão (excesso de água). Contudo, este teste é relativamente questionável e excessivamente empírico, pois irá depender da percepção de quem produz o concreto e da força exercida pela mão para a formação da pelota de concreto.

O tipo de equipamento de vibrocompactação também tem grande influência no teor de água do concreto. Quando são utilizados equipamentos de grande porte exige-se um teor de água menor para compactar a peças. Isso ocorre porque nestes equipamentos há uma energia de compactação maior que reduz o espaço disponível para a água livre dentro da mistura de concreto. Assim, equipamentos de menor porte, necessitam de misturas com mais água para atingir a compacidade adequada e não deixar fendas ou falhas na estrutura das peças (FERNANDES, 2008).

### 2.2.2 Agregados para concretos de consistência seca

Outro fator que influencia na resistência mecânica à compressão de concretos secos é a resistência mecânica à compressão dos próprios agregados e/ou presença de microfissuras internas nos mesmos. Isso ocorre porque os agregados ocupam em torno de 60 a 80% do volume de concreto. Em função desta elevada quantidade, as características dos agregados também têm relação direta com a resistência à compressão do concreto pois, influenciam em maior ou menor grau a compacidade, de acordo com a distribuição granulométrica, com a forma da partícula e, com a porosidade, como será explicado posteriormente (MEHTA e MONTEIRO, 2008; BLEECK, 2011; PIROLA, 2011; NEVILLE e BROOKS, 2013).

Segundo Pirola (2011), a dimensão máxima característica deve ser no máximo quatro vezes menor que a menor dimensão da peça. Entretanto, a fim de evitar danos as vibrocompactadoras e obter uma melhor textura superficial da peça, geralmente se utiliza dimensões máximas características de no máximo 9,5 mm (brita "0"). No caso de um paver com 60 mm de espessura, a brita 0 é cerca de seis vezes menor.

Assim, o estudo do empacotamento dos agregados deveria ser um dos primeiros passos para a dosagem de concretos secos. A diminuição do índice de vazios resulta em uma mistura mais compacta e tem relação direta com a resistência mecânica à compressão axial e durabilidade (FRASSON JÚNIOR, 2000 *apud* BUTTLER, 2007).

Neville e Brooks (2013) afirmam que, um agregado de qualidade aparentemente inferior também pode gerar concretos de qualidade. Por isso, ensaios de caracterização dos agregados são necessários para verificar o quão adequados são ao uso em concretos.

### 2.2.3 Coesão e trabalhabilidade de concretos secos

A relação pasta/agregado do concreto seco vibrocompactado deve ser otimizada para obter uma coesão e trabalhabilidade adequadas para conformação (FURNAS, 1997 *apud* BUTTLER, 2007). Essa otimização está relacionada a fatores como a capacidade de escoamento do sistema para o interior da fôrma e ao atrito entre as partículas (MARCHIONI, 2012).

A trabalhabilidade é determinada pelo mínimo esforço exigido para manipular um determinado volume de concreto, enquanto a coesão está relacionada à resistência do concreto a segregação e a exsudação (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Uma boa coesão em concretos secos é importante para garantir que as peças produzidas não apresentem fissuras, não quebrem e não apresentem segregação dos agregados. A coesão pode ser melhorada por meio do aumento do teor de finos e pelo uso

de partículas mais arredondadas e com bordas suaves (DOWNSON, 1981). A redução do índice de vazios, devido ao elevado número de pontos de contato entre as partículas também reduz a segregação (FENNIS *et al.*, 2013b).

#### 2.2.4 Pavimentação com bloco de concreto intertravado

Blocos de concreto intertravado para pavimentação formam um pavimento do tipo flexível. Sobre o subleito (camada mais profunda da fundação a qual dará suporte as camadas seguintes e ao revestimento do pavimento) é executada uma camada de base (ou base e sub-base), dependendo da necessidade do local, além do volume e frequência de cargas que serão aplicadas ao pavimento. Para finalização do pavimento, é executada uma camada de assentamento e por fim, o revestimento com blocos de concreto intertravado. Geralmente, as juntas entre as peças são preenchidas com material de intertravamento, como areia ou pó de pedra. O intertravamento também é garantido pela contenção lateral conforme demonstrado na Figura 8 (ABCP, 2010).

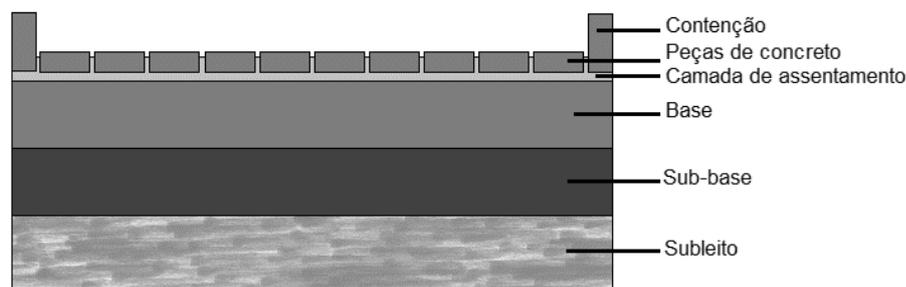


Figura 8: Seção típica de pavimento de concreto intertravado  
Fonte: Adaptado da ABCP (2010).

O pavimento de concreto intertravado tem como características: superfície antiderrapante proporcionada pelo concreto mesmo em condições úmidas; conforto térmico proporcionado pela menor absorção de calor; liberação ao tráfego imediatamente após a compactação final do pavimento; reciclagem e reutilização dos blocos de concreto na produção de novos materiais, além de grande diversidade de cores e formas. A produção dos blocos de concreto é realizada industrialmente com a utilização de vibrocompactadoras, o que proporciona maior compactação das peças e, por isso, maior resistência mecânica à compressão, bem como maior durabilidade. A cura das peças é realizada em câmaras com umidade acima dos 95%. O período de cura gira em torno de 24 horas e a cura final no pátio ocorre em torno de 7 e 28 dias (ABCP, 2010).

No Brasil, os blocos de concreto devem seguir as especificações da NBR 9781 (ABNT, 2013) a qual especifica que: a resistência mecânica à compressão axial deve ser

maior ou igual a 35 MPa e a absorção de água menor que 6%, para aplicação em calçadas e vias de tráfego leve (ABNT, 2013).

#### 2.2.5 Vibrocompactação para fabricação de pré-moldados

Para fabricação de pré-moldados de concreto (blocos de vedação ou pavers para pavimentação) é utilizada uma vibrocompactadora para retirada do ar aprisionado e a eficiência deste equipamento é uma das responsáveis pela qualidade do produto. A resistência mecânica à compressão dos blocos é proporcional a energia de compactação utilizada na vibração, ocasionada pela melhor disposição dos agregados dentro da mistura. Assim, com um mesmo traço pode-se produzir peças com diferentes resistências mecânicas, variando apenas o tempo de vibração da máquina (OLIVEIRA, 2004).

As vibrocompactadoras podem ser: automáticas, hidráulicas, mecânicas, pneumáticas ou manuais (ALBUQUERQUE, 2005 *apud* BUTTLER, 2007). Esta técnica permite a desforma imediata, garantindo elevada produtividade e diminuição dos custos de produção devido ao menor consumo de cimento, uma vez que o teor utilizado também está interligado à eficiência de compactação do equipamento (MARCHIONI, 2012).

Recomenda-se que o consumo de cimento para concretos com resistência mecânica característica à compressão de 35 MPa esteja entre 300 e 400 kg de cimento por m<sup>3</sup> de concreto (HÜSKEN e BROUWERS, 2008; PIROLA, 2011).

O método de dosagem Columbia, de 1986, citado por Oliveira (2004), estabelece o limite de 14 a 15% de cimento, o que resulta em traços de 1:5,5 até 1:6 (cimento: agregados secos). O método de dosagem proposto por Dowson (1980) *apud* Oliveira (2004), sugere uma faixa de 1:3 a 1:6.

Dessa forma, um fator que favorece a utilização de agregados reciclados em pré-moldados são as técnicas de vibrocompactação que auxiliam no empacotamento dos agregados reciclados devido à redução do índice de vazios.

### 2.3 AGREGADO RECICLADO EM CONCRETO SECO

O principal obstáculo da introdução de agregados reciclados em concretos está no elevado consumo de cimento quando comparado a concretos de agregados naturais. Essa exigência é baseada nas características e propriedades dos agregados reciclados. Nos itens seguintes serão analisadas as características e propriedades dos agregados reciclados que influenciam nas propriedades do concreto seco, destinado à produção de peças pré-moldadas.

### 2.3.1 Efeitos da absorção de água do agregado reciclado em concretos

Agregados naturais normalmente utilizados em concretos apresentam valores de absorção de água muito baixo e sua influência na produção de concretos não é considerada. Contudo, quando se utiliza agregados mais porosos, como é o caso dos reciclados, deve-se considerar a quantidade de água adicionada a fim de minimizar os efeitos dessa absorção. Esse parâmetro pode gerar expansão no umedecimento e retração na secagem do concreto (LEITE, 2001).

Como o agregado reciclado apresenta alta absorção de água, substituições acima de 50% dos agregados naturais em concretos, são as mais críticas, tanto para agregados reciclados de concreto (ARC), e ainda mais, para agregados reciclados mistos (ARM). Na Figura 9 é mostrada uma relação linear entre as porcentagens de substituição de ARM e a absorção de água na preparação do concreto, sendo que quanto maior o nível de substituição maior a absorção de água (POON e CHAN, 2006 e GAYARRE *et al.*, 2013).

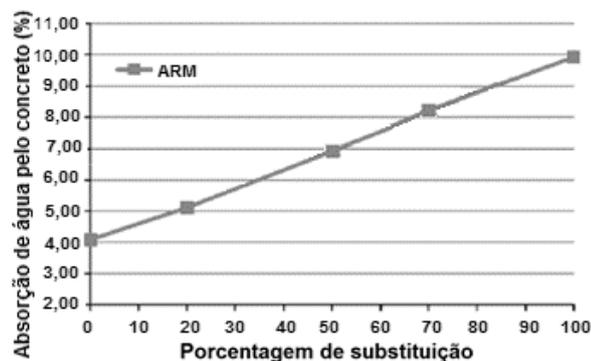


Figura 9: Porcentagem de substituição x absorção de água  
Fonte: Adaptado de Gayarre *et al.*, 2013.

O aumento da absorção de água sugere que a durabilidade do concreto será negativamente afetada (AMADEI, 2011 e GAYARRE *et al.*, 2013). Segundo estudo realizado por Amadei (2011), substituições entre 45% e 50% de agregados naturais por agregados reciclados apresentaram aumento do desgaste de 2 a 4 mm em relação à amostra com nenhum tipo de substituição. Isto impede que sejam produzidos concretos expostos a intempéries, como em blocos destinados a paredes ou pisos externos.

Soltsos *et al.* (2011) mostra que os agregados reciclados miúdos têm uma influência ainda maior na absorção de água de peças pré-moldadas, apresentando uma absorção maior que dos agregados reciclados graúdos, devido a maior superfície específica, Figura 10. O autor mostra que agregados reciclados de concreto miúdos (ARCm) proporcionam as peças um pequeno, mas ainda assim maior acréscimo à absorção de água do que agregados reciclados mistos (ARM), o que também pode ser visto nos resultados obtidos por Gayarre *et al.* (2013).

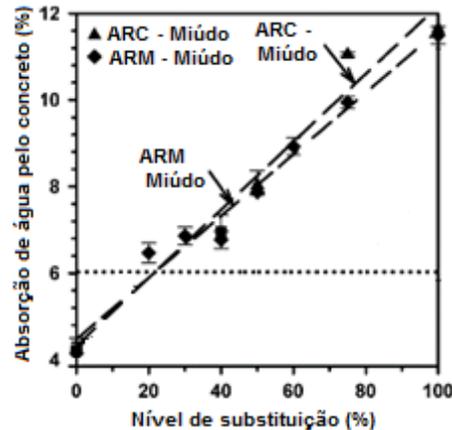


Figura 10: Efeitos dos agregados reciclados sobre a absorção de água  
 Fonte: Adaptado de Soutsos *et al.*, 2011b.

Segundo Soutsos *et al.* (2011a), os níveis de substituição ideais para agregados reciclados em blocos de vedação são de 60% para a fração de 6 mm e 20% para fração abaixo de 4 mm. Essa recomendação é para que não haja qualquer redução significativa da resistência mecânica à compressão axial e, para que não haja necessidade de aumentar o teor de cimento. Analisando a Figura 11 (a) observa-se que os maiores teores de substituição de agregado graúdo reciclado, com menor consumo de cimento e maior resistência mecânica à compressão axial, são de 30% e 60%, semelhante ao concreto de agregados naturais.

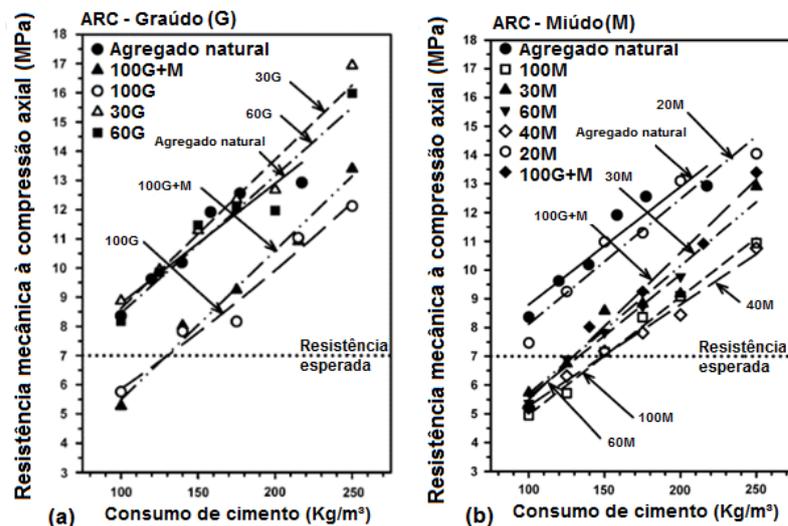


Figura 11: Resistência à compressão versus consumo de cimento, AR's graúdo (a) e miúdo (b)  
 Fonte: Adaptado de SOUTSOS *et al.*, 2011a.

Na Figura 11 (b), o teor de substituição com menor consumo de cimento e maior resistência mecânica à compressão axial é a substituição de 20%, também muito próxima do concreto sem substituição.

Outros pesquisadores como Hansen e Boegh (1985) e Sousa (2001) também não recomendam o emprego da fração miúda reciclada, pela elevada absorção de água e por mostrarem grande influência nas deficiências mecânicas apresentadas pelos blocos.

Buttler (2007) recomenda ainda que a quantidade mínima de partículas menores que 0,3 mm deve estar entre 12% a 15%, em volume, incluindo o cimento. Essa limitação proporcionará boa trabalhabilidade, facilidade de compactação e coesão. Em contrapartida, porcentagens menores ou maiores aumentarão a porosidade, absorção de água, permeabilidade e diminuirão a estabilidade do bloco, podendo ainda afetar a resistência mecânica à compressão.

Em 1998 foi lançado o Código Alemão “Concreto com agregado reciclado de concreto” (*Beton mit rezykliertem Zuschlag* – título em alemão) publicado pelo Comitê Alemão do Concreto Armado (*DafSt*). Neste código, recomenda-se uma compensação ao valor da absorção de água referente a 10 minutos de contato do material com a água, tempo suficiente para o agregado reciclado absorver cerca de 90% do total de água absorvida em 24 horas. Devido a este fato, desde o momento da mistura até a utilização do concreto, a consistência pode variar, sendo que não se recomenda adicionar água para melhorar esta propriedade e sim, compensar estas mudanças com o uso de superplastificantes (LEITE, 2001).

Da mesma forma, Maultzsch e Mellmann (1998) e Knights (1998) apud Leite (2001), também recomendam a pré-umidificação. Contudo, estes autores afirmam que os valores de absorção de água podem variar de 70 a 95% do total de água absorvido, bem como o tempo de pré-umidificação, dependendo do material e de sua granulometria.

O tempo de contato do agregado reciclado com a água determina a quantidade que o material poderá absorver. No caso de uso no concreto, depende também se o agregado entra em contato somente com a água, ou com a pasta de cimento. Quando o material reciclado é adicionado diretamente à pasta de cimento a absorção não ocorre de forma uniforme e se dá principalmente na zona de contato entre a pasta e o agregado. Isto faz com que a relação água/cimento da mistura de concreto apresente um gradiente. Quanto menor e mais poroso for o agregado reciclado e, quanto maior a fluidez da pasta, maior será a quantidade de pasta e/ou água absorvida. No entanto, se o agregado reciclado for saturado com água (pré-umedecido), ocorrerá o maior percentual de absorção de água pelo agregado antes da mistura no concreto e a probabilidade do agregado absorver água da pasta é menor. Nesse caso é possível que ocorra o fenômeno inverso, ou seja, o agregado pode devolver parte da água absorvida para a mistura (BARRA, 1996).

Esse fenômeno, decorrente da alta absorção de água dos agregados reciclados promove um efeito chamado de “cura úmida interna”, no qual, a água absorvida pelos agregados durante o pré-umedecimento e a mistura ajudará, posteriormente, na cura do concreto (MACHADO Jr. e AGNESINI, 2000).

Esta é uma propriedade inerente aos agregados leves de alta absorção de água como, por exemplo, a argila expandida (NEVILLE, 1997).

### 2.3.2 Resistência mecânica à compressão axial

Para concretos com mesma relação água/cimento e mesmo consumo de cimento, a resistência mecânica à compressão axial diminui à medida que se aumenta o teor de substituição de agregados naturais por reciclados, Figura 12 (AMADEI, 2011).

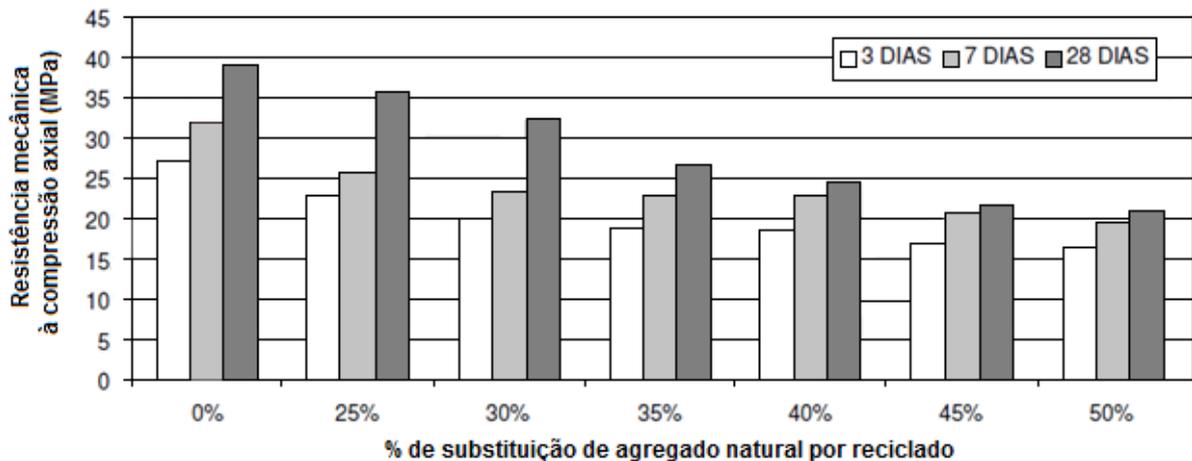


Figura 12: Porcentagem de substituição x resistência mecânica à compressão axial  
Fonte: Adaptado de Amadei, 2011.

A diferença de ganho de resistência mecânica de 3 para 28 dias em função do teor de substituição de agregado natural por reciclado pode estar relacionada ao aumento da porosidade do concreto, proporcionada pelo agregado reciclado. O tempo em contato com intempéries, transcorrido entre 3 e 28 dias para substituições em maiores teores, tende a ter um efeito mais significativo na resistência mecânica alcançada à compressão axial.

Para blocos de vedação com substituições de 100% de agregados naturais por reciclados, há um efeito prejudicial sobre a resistência à compressão axial. Estudos comprovam que deve-se aumentar o teor de cimento a fim de equiparar a resistência deste concreto ao de um convencional. Contudo, isso não é aceitável para indústrias, já que eleva o custo do produto (SOUTSOS *et al.*, 2011b). Este aumento pode ser de até 30%, conforme estudos realizados por SOUTSOS *et al.* (2011b). Outro estudo, como o de Amadei (2011), registrou aumento de 38% no consumo de cimento para substituições de 50% de agregados naturais por reciclados.

Ensaio realizados por Matar e Dalati (2012) também confirmam que o aumento de cimento é necessário. Blocos vazados de concreto com até 50% de adição de resíduos, atingiram resistência à compressão semelhante aos blocos com agregados naturais. Porém, o consumo de cimento foi 10% superior ao traço original, além de mais água e superplastificante (S.P.), para obter a trabalhabilidade necessária, conforme pode ser observado na Figura 13.

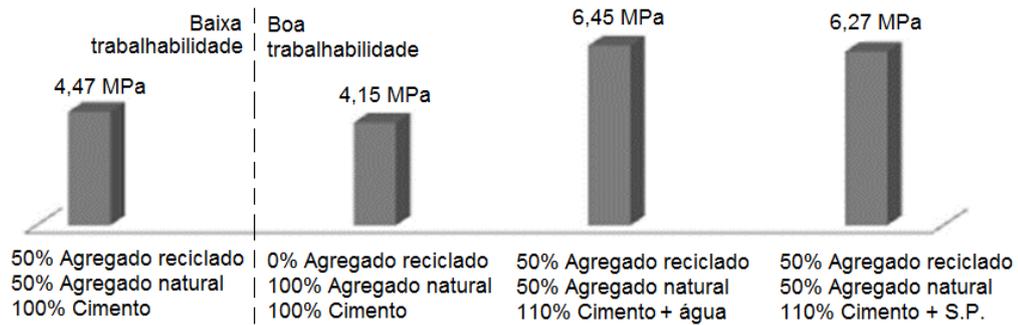


Figura 13: Resistência à compressão axial (MPa) com e sem adição de cimento e superplastificante  
Fonte: Adaptado de Matar e Dalati (2012).

Entretanto, este fenômeno apesar de diminuir o custo benefício dos blocos, diminuiu a água livre da mistura, proporcionando aumento na resistência mecânica à compressão axial da pasta, devido a redução da relação água/cimento e ao melhoramento da zona de transição entre pasta e agregado (LATTERZA, 1998).

### 2.3.3 Resistência mecânica à tração na flexão

No geral, a resistência mecânica à tração de pré-moldados com agregados reciclados diminui. Na Figura 14 vê-se a influência desses agregados de maior (ARM 1) e menor (ARM 2) percentual de concreto, sobre essa resistência (GAYARRE *et al.*, 2013). Sendo a porcentagem de substituição de agregado natural por reciclado de 50% um ponto de otimização dessa resistência, ou seja, um divisor entre a elevação da resistência mecânica à tração com o aumento de substituição de agregados reciclados e a redução dessa mesma resistência com o aumento de substituição de agregados reciclados.

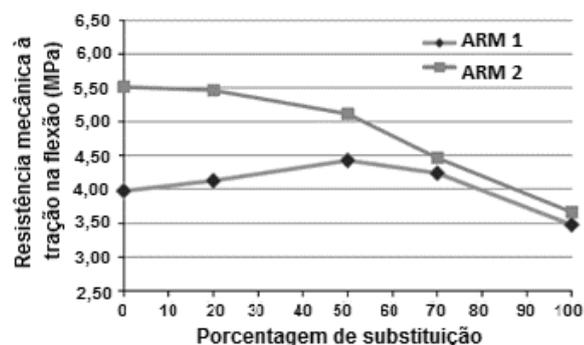


Figura 14: Relação entre porcentagens de substituição e resistência mecânica à tração na flexão  
Fonte: Adaptado de Gayarre *et al.*, 2013.

Assim como a fração de agregados reciclado miúdos tem forte influência negativa na resistência mecânica à compressão, o mesmo ocorre em relação a resistência mecânica à flexão. A Figura 15 e a Figura 16, fazem parte do estudo realizado por Soutsos *et al.*, (2012), envolvendo concretos com agregados reciclados de concreto (ARC) e agregados reciclados mistos (ARM). A fração miúda (Figura 15 (b) e Figura 16 (b)) foi a que mais influenciou na

redução da resistência à tração aos 28 dias. Na Figura 15 (a), para agregados reciclados de concreto, com aumento da substituição de agregados grãos reciclados, a resistência à flexão reduziu aproximadamente 2,2 MPa aos 28 dias. Na Figura 15 (b), com a fixação da porcentagem de agregado grão reciclado em 60% e incremento da porcentagem de agregado miúdo, a resistência à flexão caiu aproximadamente 2,8 MPa aos 28 dias.

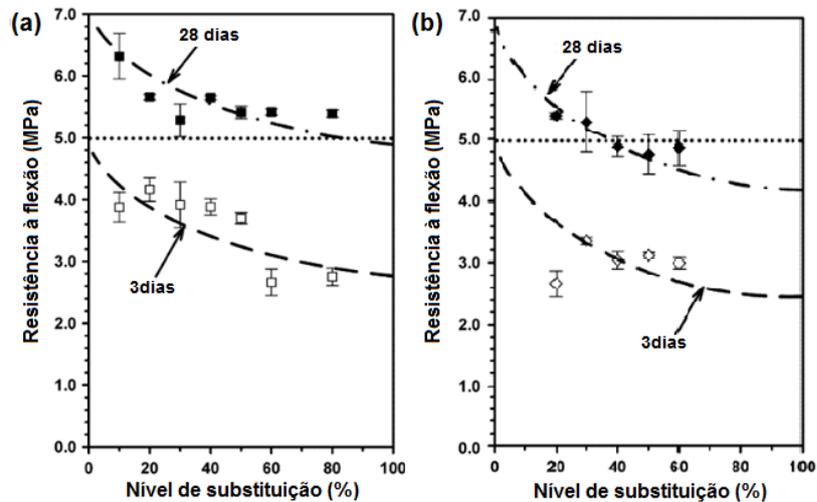


Figura 15: Efeito do ARC (a) grão (20% miúdos) e (b) miúdo (60% grãos) na resistência à tração  
Fonte: Adaptado de Soutsos *et al.*, 2012.

Na Figura 16 (a), para agregados reciclados mistos, com aumento da substituição de agregados grãos reciclados, a resistência à flexão reduziu aproximadamente 2,6 MPa, aos 28 dias.

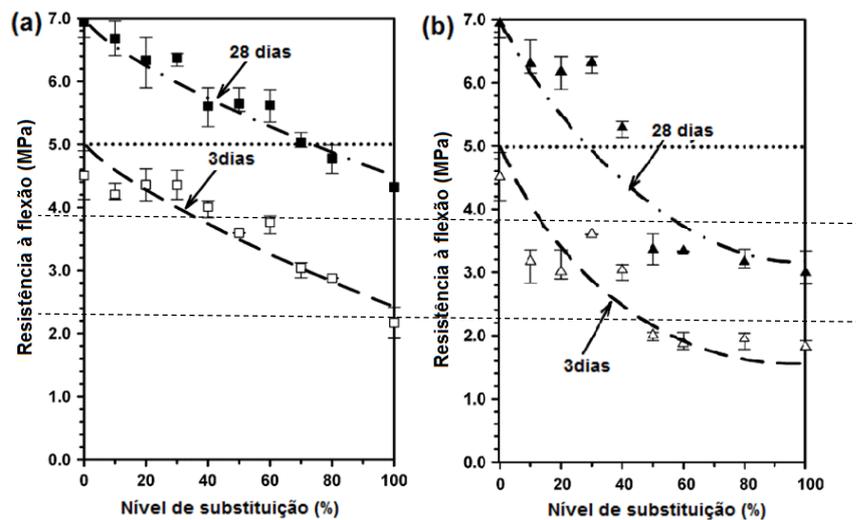


Figura 16: Efeito do ARM (a) grão (20% miúdo) e (b) miúdo (60% grão), na resistência à tração  
Fonte: Adaptado de Soutsos *et al.*, 2012.

Na Figura 16 (b), com a fixação da porcentagem de agregado grão reciclado em 60% e incremento da porcentagem de agregado miúdo, a resistência à flexão caiu aproximadamente 4,0 MPa, aos 28 dias.

Em todos os casos a resistência à flexão apresentou uma queda maior quando houve um incremento maior de agregados miúdos.

### 2.3.4 Zona de transição

Os produtos de hidratação do cimento cobrem a superfície porosa e rugosa dos agregados reciclados aumentando a densidade da zona de transição e conseqüentemente a aderência pasta/agregado. Isso acontece pela absorção da pasta de cimento pelo agregado reciclado. Na Figura 17 pode-se analisar nas micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura, a diferença entre a zona de transição de concretos com agregados naturais e reciclados (LEITE, 2001).

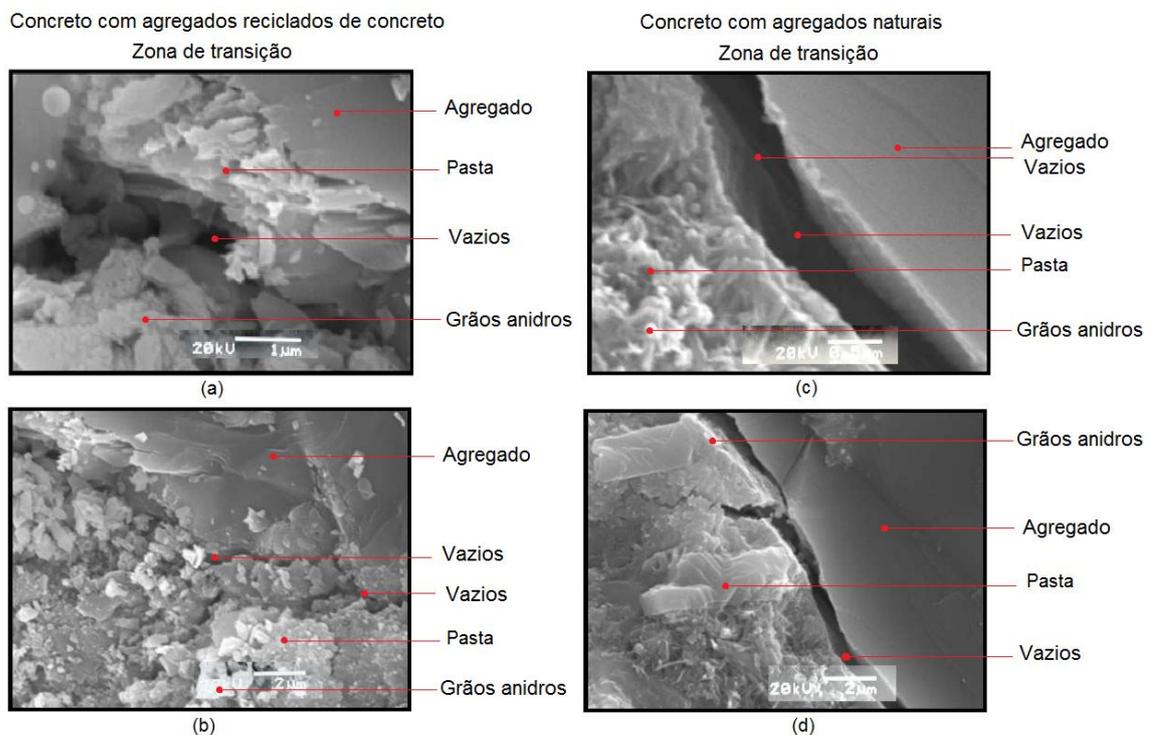


Figura 17: MEV da zona de transição de concretos com agregados reciclados e ampliação de 20.000x (a) e 8.000x (b) e de concreto com agregados naturais com ampliação de 33.000x (c) e 8.000x (d)  
Fonte: Leite, 2001.

Os grãos anidros de cimento aparecem mais claros, o hidróxido de cálcio em cinza claro, o C-S-H em cinza escuro e os vazios pretos. Pode-se observar que a zona de transição em concretos com agregados naturais aparece mais definida com descontinuidade entre a pasta e o agregado, enquanto que a zona de transição de concretos com agregados reciclados aparece mais compacta e difusa. No concreto com agregados naturais, não há nenhum tipo de ligação da pasta com a superfície do agregado natural. No concreto reciclado, a zona de transição, interliga a pasta ao agregado por produtos de hidratação, resultando em fissuras menores e assim prejudicando menos as resistências do concreto (LEITE, 2001).

### 2.3.5 Retração e Deformação

Quando comparados, concretos com agregados reciclados e com naturais de mesma trabalhabilidade, os primeiros apresentam maior retração por secagem (retração hidráulica). Isto ocorre devido à capa de argamassa aderida que eleva o consumo de água e consequentemente, a relação água/cimento. Outra consequência é a redução do módulo de elasticidade (BUTTLER, 2007). Isso indica que, quando comparados, concretos com e sem agregados reciclados, submetidos a uma mesma tensão, a presença de agregados reciclados aumenta a deformação elástica, constituindo-se como um concreto menos rígido, podendo ser comparado a concretos com agregados leves.

Em relação à redução do módulo de elasticidade, resultados apontam a diminuição em cerca de 15% a 30% para o concreto com agregados reciclados e que, a retração aumenta 40% a 60% em relação ao concreto com agregados naturais. Caso os agregados reciclados contenham grande quantidade de argamassa aderida, a retração desses concretos pode ser ainda maior (70% maior em alguns casos) e a redução do módulo de elasticidade pode chegar a 50% (HANSEN e BOEGH, 1985).

Entretanto, de acordo com a Figura 18 apresentada por Leite (2001), para substituições de agregados reciclados graúdos (ARg) menores que 50%, o módulo de elasticidade dos concretos aumenta à medida que aumenta o teor de agregados miúdos (ARm).

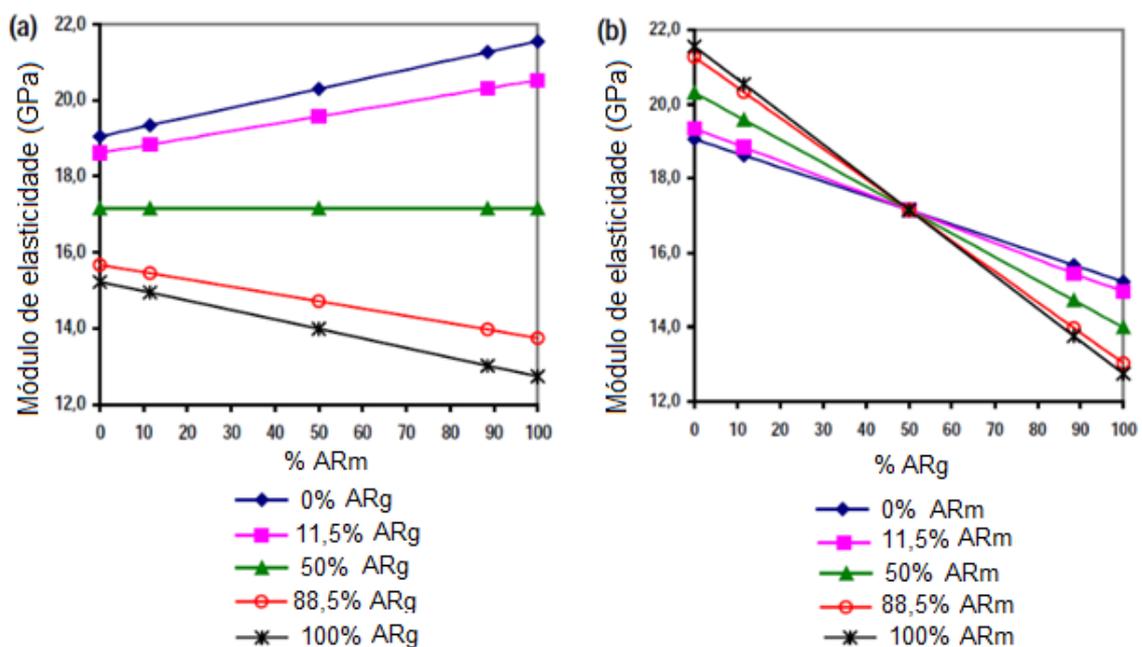


Figura 18: Módulo de elasticidade x porcentagem de substituição por agregado reciclado (a) graúdo (ARg) e (b) miúdo (ARm)

Fonte: LEITE, 2001.

Para substituições de agregados graúdos maiores que 50% existe uma inversão nesse comportamento. Assim, quanto maior o teor de agregados miúdos, menor será o módulo de elasticidade obtido, Figura 18 (a). Este fato também pode ser atribuído a alteração do empacotamento das partículas, uma vez que o excesso de agregado reciclado fino promovem o afastamento das partículas maiores, aumentando assim a porosidade do concreto e reduzindo o módulo de elasticidade (LEITE, 2001).

Portanto, ao diminuir a proporção de materiais finos as partículas graúdas são aproximadas umas das outras, de modo que o índice de vazios diminui e a concentração de sólidos e o módulo de elasticidade aumenta.

Isso ocorre até que se alcance um ponto crítico (ponto central da Figura 18 (b)), em que a relação de vazios é mínima e a concentração de sólidos é máxima. A partir deste ponto, se a quantidade de materiais finos for reduzida, não haverá partículas finas suficientes para preencher os espaços vazios entre as partículas graúdas, o que aumentará o índice de vazios e diminuirá tanto a concentração de sólidos, como o módulo de elasticidade (LATTERZA, 1998; LEITE, 2001; ARAGÃO, 2007; WONG e KWAN, 2008a).

Em estudos realizados por Latterza (1998) e Aragão (2007) este fato se confirma. Agregados reciclados com dimensões máximas maiores, apresentaram um aumento na deformação axial de concretos. Neste caso, a dimensão do agregado tem uma influência muito forte nos resultados, ou seja, existe uma maior quantidade de vazios nas misturas de concreto e o prejuízo, em virtude do seu tamanho, é maior que qualquer melhoria que possa existir na zona de transição ou na matriz do concreto (LEITE, 2001).

Assim, a distribuição granulométrica, textura, forma e taxa de absorção de água do agregado reciclado tem sua importância aumentada (ARAGÃO, 2007).

### 2.3.6 Fissuração e acabamento das peças

Aragão (2007) analisando o desenvolvimento das fissuras após o rompimento de lajes compostas de agregados reciclados percebeu que, quanto maior a porcentagem de substituição mais fissuras aparecem e menor o espaçamento entre elas.

Teranishi *et al.* (1998) *apud* Buttler (2007) estudaram a introdução de 15% agregados reciclados miúdos e 30% de agregados reciclados graúdos em painéis pré-moldados de concretos. Da mesma forma que Aragão (2007), quanto maior o nível de substituição, maior número de fissuras foi observado. Como solução para esse problema, os autores recomendaram ajustes na dosagem da mistura ou a colocação de barras adicionais nos painéis (BUTTLER, 2007), o que encarece o produto.

Contudo, segundo Tavakoli e Soroushian (1996b) *apud* Cabral (2007) a capa de argamassa é a maior responsável pela fissuração do concreto com agregados reciclados. Isso

acontece pelo fato do agregado reciclado absorver mais água da mistura, favorecendo a retração por secagem, grande responsável pelo aparecimento de fissuras (LEVY, 2001; BUTTLER, 2003; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Por isso, segundo Cabral (2007), deve-se priorizar o uso de agregados reciclados em concretos com baixo teor de água, por produzir concretos com menor retração e por isso menor número de fissuras.

Devido à elevada porosidade do agregado reciclado é mais difícil obter superfícies com bom acabamento. Entretanto, segundo Gayarre *et al.* (2013) é possível obter peças de meio-fio pré-moldado com bom acabamento final, com porcentagens menores que 50% (GAYARRE *et al.*, 2013).

## 2.4 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

A densidade de empacotamento é dada pela porcentagem de sólidos presentes em uma unidade de volume, partículas incluindo a porosidade (KWAN e MORA, 2001; DE LARRARD, 2009; MANGULKAR e JAMKAR, 2013). Na prática, em monodispersões de partículas esféricas, ou seja, quando há apenas um tamanho de partícula totalmente esférica, a densidade de empacotamento pode variar entre 0,6 e 0,64; apesar de ser teoricamente possível obter densidades de até 0,7404 em estruturas totalmente ordenadas (OLIVEIRA *et al.*, 2000). O valor máximo de 0,7404 foi proposto por Johannes Kepler em 1611 (conjectura de Kepler) e foi provado numericamente em 2005 (FERGUSON, 1997; HALES, 2005).

A elevação da densidade de empacotamento ocorre pelo preenchimento de vazios entre partículas maiores por partículas menores, que por sua vez são preenchidas por partículas ainda menores e assim sucessivamente (KWAN *et al.*, 2010; MANGULKAR e JAMKAR, 2013).

Em concretos, a seleção e combinação dos agregados apresenta influência dominante na qualidade do mesmo (JONES *et al.*, 2002; GOLTERMANN *et al.*, 1997). Isto ocorre, pois, os agregados representam de 60% a 80% do volume total de concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008; HE *et al.*, 2012).

Dentre os benefícios do empacotamento de agregados em concretos pode-se citar: a elevação da resistência mecânica, do módulo de elasticidade, redução da exsudação, redução da fluência, redução da retração e maior durabilidade (GOLTERMANN *et al.*, 1997; NEVILLE, 1997; KWAN e MORA, 2001; CASTRO e PANDOLFELLI, 2009; MOHAMMED *et al.*, 2012). Além disso, o elevado empacotamento dos agregados permite a redução do consumo de cimento, o que gera lucros e benefícios ao meio ambiente, uma vez que a produção de cimento libera altos níveis de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>, na atmosfera (HÜSKEN e BROUWERS, 2008).

Fennis *et al.* (2013b), conseguiram reduzir 57% do consumo de cimento, o que corresponde a uma redução de 25% de emissões de CO<sub>2</sub> na produção do concreto.

Nas próximas seções serão descritos os fatores que afetam o empacotamento das partículas.

#### 2.4.1 Efeitos da distribuição e tamanho das partículas

Os picos de máximo empacotamento ocorrem em uma determinada proporção de partículas grossas e finas, independente do formato das mesmas (FURNAS, 1931). Entretanto, este efeito é maior em combinações de partículas não esféricas, apesar de proporcionarem valores inferiores de empacotamento, Figura 19 (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

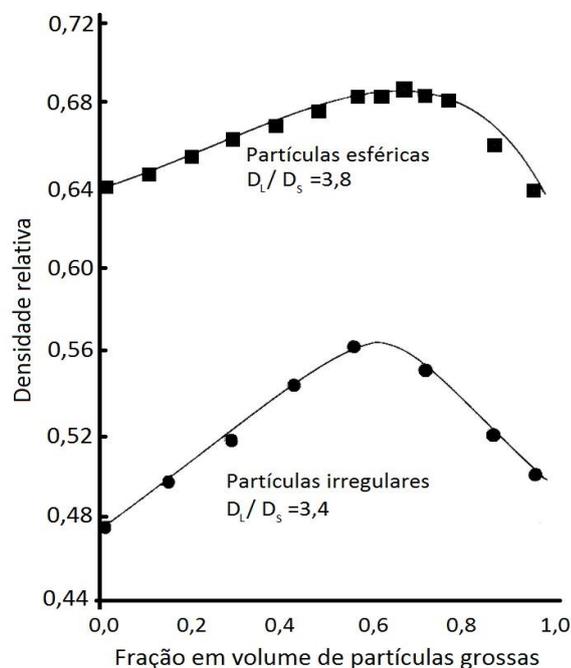


Figura 19: Dependência da densidade relativa em função do formato das partículas  
Fonte: OLIVEIRA *et al.*, 2000.

As distribuições de partículas se subdividem em: distribuição granulométrica uniforme na qual todas as partículas pertencem a apenas uma faixa granulométrica; distribuição granulométrica contínua: na qual o tamanho das partículas aumenta continuamente e de forma proporcional e; distribuição granulométrica descontínua: na qual ocorre a ausência de determinado tamanho de partículas. Uma representação destes três tipos de distribuição pode ser observada na Figura 20 (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009). No caso de distriuições descontínuas, quanto menor a razão entre os diâmetros das partículas, maior tende a ser o empacotamento da dispersão (FENNIS *et al.*, 2009; FENNIS e WALRAVEN, 2012).

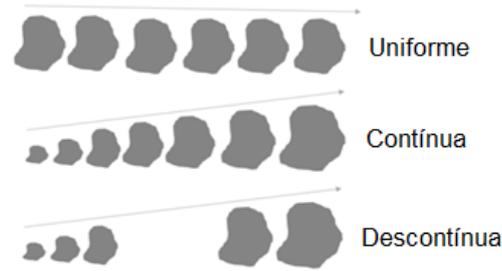


Figura 20: Formas de distribuição das partículas

No geral, a inclusão de partículas cada vez menores ou a elevação do diâmetro máximo das partículas, favorece o empacotamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000; SILVA *et al.*, 2004; BROUWERS E RADIX, 2005b). Assim, a distribuição granulométrica contínua apresenta melhor empacotamento, melhor trabalhabilidade e melhor estabilidade para o concreto (BROUWERS E RADIX, 2005b) do que as distribuições uniforme e descontínua.

Quando uma mistura apresenta uma faixa granulométrica descontínua, em que há uma diferença muito grande entre as dimensões dos diâmetros das partículas e, além disso, o teor de partículas graúdas é superior ao de partículas miúdas, não haverá interação entre elas (Figura 21).

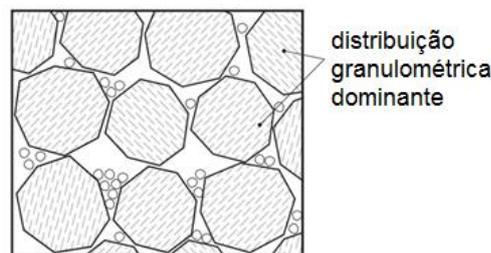


Figura 21: Mistura sem interação entre partículas  
Fonte: Adaptado de Formadini, 2005.

Se o teor de partículas miúdas for inferior ao de partículas graúdas (fração graúda dominante), não haverá volume suficiente dessas partículas para preencher os vazios das maiores, formando assim empacotamentos independentes nas várias frações de partículas. Da mesma forma, se os diâmetros forem próximos, haverá interação (DE LARRARD, 1999; FORMADINI, 2005; KWAN *et al.*, 2013). Quando o volume de partículas miúdas for maior que o índice de vazios do agregado graúdo ou, o tamanho do agregado miúdo for maior que o tamanho dos vazios entre as partículas de maior tamanho, então o agregado miúdo estará interagindo com o agregado graúdo modificando o empacotamento deste último (DE LARRARD, 1999; FORMADINI, 2005).

Assim, quando a diferença entre os diâmetros das faixas granulométricas não é tão elevada, pode-se considerar a existência de interação entre as frações granulométricas por meio de dois efeitos que influenciam negativamente na densidade de empacotamento: Efeito parede e Efeito de afastamento (DE LARRARD, 1999; KWAN *et al.*, 2013).

### 2.4.1.1 Efeito parede

Quando partículas de maior tamanho são imersas isoladamente em um conjunto dominante de partículas de menor diâmetro, a densidade de empacotamento na região de interface, próxima à superfície das partículas grossas será menor que no restante do volume. Isso ocorre nos locais em que a diferença entre os diâmetros permite à partícula miúda considerar a superfície de contato com a partícula graúda como praticamente plana (DE LARRARD, 1999; FORMADINI, 2005; DE LARRARD, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2000; KWAN *et al.*, 2013). Este efeito denomina-se Efeito Parede (Figura 22).

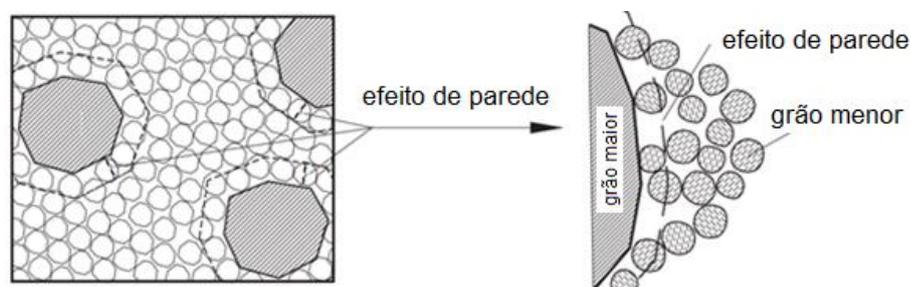


Figura 22: Efeito parede  
Fonte: Adaptado de Formadini, 2005.

### 2.4.1.2 Efeito de afastamento

Empacotamentos com menor porosidade são obtidos quando os vazios existentes entre as partículas dominantes de uma dispersão são preenchidos por partículas menores (Figura 23).

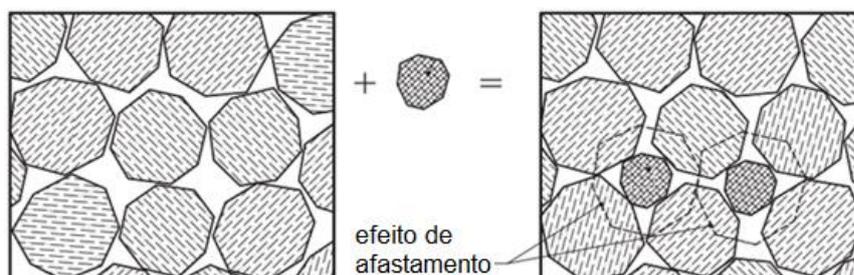


Figura 23: Efeito de afastamento  
Fonte: Formadini, 2005.

Quando as partículas introduzidas são maiores que o vazio existente ou a quantidade adicionada apresenta volume maior que o índice de vazios existentes, essas promoverão o surgimento de novos vazios, levando a um aumento na porosidade. Isso ocorre, em função do afastamento das partículas de maior tamanho, conforme pode ser observado na Figura 23 (DE LARRARD, 1999; FORMADINI, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2000; KWAN *et al.*, 2013).

#### 2.4.2 Forma das partículas

A forma e a textura das partículas podem afetar a consistência, coesão e o empacotamento de concretos e argamassas (ALVES, 1978; KWAN e MORA, 2001; BENEZET *et al.*, 2007; FABRO *et al.*, 2011).

Em relação à forma da partícula, esta pode ser dividida, quanto aos vértices e arestas em partículas arredondadas e partículas angulosas (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Partículas mais arredondadas proporcionam a compostos cimentícios, maior fluidez, melhor coesão, melhor textura superficial e menor área específica. Além de proporcionarem melhor empacotamento das partículas contribuindo para a elevação da resistência, redução do coeficiente de Poisson e elevação do módulo de elasticidade (Young) devido à redução do volume de pasta necessário ao preenchimento dos vazios (HE *et al.*, 2012; MOHAMMED *et al.*, 2012).

Partículas lamelares necessitam de mais pasta de cimento para cobrir a superfície das partículas e produzir misturas de concreto mais trabalháveis, exigindo maior quantidade de água para uma mesma consistência. Fato este que pode reduzir a resistência do concreto ou aumentar o consumo de cimento. Entretanto, partículas lamelares apresentam melhor travamento da estrutura, o que eleva a resistência ao cisalhamento (FABRO *et al.*, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2008; WEIDMANN, 2008).

Para as misturas que contêm partículas mais angulares, o índice de compressibilidade depende essencialmente da proporção desses componentes (BENEZET *et al.*, 2007).

Existem diversas metodologias para avaliação da forma das partículas de agregados, sendo que a maioria depende da medição manual das suas dimensões (FABRO *et al.*, 2011). Dentre os modelos bidimensionais pode-se citar o diâmetro de Feret, o diâmetro médio de Chang, o diâmetro de Martin, (CAETANO, 2011), a circularidade e a esfericidade de Hewlett (2004) e, as análises digitais de imagens de: Mora *et al.* (1998), D'Agostinho (2004), Gonçalves *et al.* (2007), Cortes *et al.* (2008) e Westerholm *et al.* (2008) *apud* Fabro *et al.* (2011).

A análise de imagens consiste no processamento computadorizado por meio da microscopia óptica ou eletrônica de varredura. Entretanto, a aquisição das imagens por meio deste sistema, consiste em uma atividade morosa e de baixa eficiência, o que dificulta a caracterização de um volume representativo de partículas (ULSEN, 2011).

A NBR 7809 (ABNT, 2008) estabelece o procedimento de determinação do índice de forma de agregados. Porém, a norma abrange somente agregados com dimensões maiores que 9,5 mm, desconsiderando os agregados miúdos. A definição do índice de forma ocorre pela determinação do maior e menor diâmetro de cada partícula. Apesar desta norma ainda

estar em vigor, este método demanda tempo, tem influência do operador e considera um número muito limitado de partículas (ULSEN, 2011).

Além disso, os parâmetros bidimensionais podem não ser suficientes, podendo avaliar erroneamente a forma de uma partícula por não considerar a sua terceira dimensão. Alternativamente, as análises tridimensionais, dentre elas os métodos de Kwan *et al.* (1999) e o de Weidmann (2008) permitem uma avaliação mais completa da forma das partículas.

Kwan *et al.* (1999) propuseram um indicador de lamelaridade para avaliar a forma das partículas dos agregados. Este considera que as partículas de agregados de uma mesma amostra têm mais ou menos a mesma característica de forma. A partir deste critério a espessura da partícula de agregado é estimada a partir das informações obtidas na imagem bidimensional. Da mesma forma, Weidmann (2008) utilizou a análise digital de imagens para encontrar a maior dimensão de cada partícula e calcular o coeficiente de forma do mesmo. Para isso, primeiro determina-se o coeficiente de forma para cada fração, segundo a Equação 1 e após o coeficiente de forma do agregado, segundo a Equação 2.

$$Cf_{\text{fração}} = \frac{m_{\text{fração}}}{\frac{\rho_{\text{fração}}}{\pi} x \sum L^3} \quad \text{Equação 1}$$

em que:

$m_{\text{fração}}$  = massa de todas as partículas contidas na imagem;

$\rho_{\text{fração}}$  = massa específica da fração;

L = maior dimensão da partícula.

$$Cf_{\text{agregado}} = \frac{\sum_{i=1}^n Cf \text{ de cada fração } x \text{ respectiva \% retida em cada peneira}}{\sum \% \text{ retida em cada peneira}} \quad \text{Equação 2}$$

em que:

$Cf_{\text{agregado}}$  = coeficiente de forma do agregado.

Quanto maior o coeficiente de forma mais arredondado é a partícula. Para uma esfera esse coeficiente é 1. Areias naturais, apresentam coeficiente de forma próximos a 0,2 (FABRO *et al.*, 2011).

#### 2.4.3 Textura das partículas

Em relação à textura superficial das partículas, este é um fator de difícil medição e por isso muitas vezes negligenciado, principalmente em especificações normativas (HEWLETT, 2004). Pode ser dividida em: muito áspera, áspera, lisa ou polida e depende de

fatores como porosidade, dureza e exposição da partícula a subseqüentes forças de atrito (MEHTA e MONTEIRO; FENNIS, 2011).

Entretanto, este é um parâmetro importante para a avaliação do empacotamento granulométrico, pois afeta principalmente a demanda de água do concreto e a aderência entre a pasta e as partículas. Superfícies mais rugosas apresentam também, maior travamento mecânico, o que geralmente conduz a maiores resistências do que partículas lisas (WEIDMANN, 2008).

No entanto, segundo Mehta e Monteiro (2008), normalmente partículas de textura rugosa conduzem a maior superfície específica, aumentando a demanda de água para um mesmo abatimento e o consumo de cimento, podendo assim se perder trabalhabilidade e elevar o custo do produto.

Diversos métodos de medição da textura das partículas são sugeridos como os propostos por Brown (1990), Wright (1955) e Porter (1962) *apud* Hewlett (2004). Czarnecka e Gillott (1980) *apud* Hewlett (2004) e Li *et al.* (1993) *apud* Hewlett (2004) utilizam Fourier e fractais para o monitoramento da forma e textura superficial das partículas em termos quantitativos.

#### 2.4.4 Aglomeração de partículas finas

Partículas finas tendem a ser submetidas a forças coesivas interparticulares (forças de Van Der Waals) formando pequenos aglomerados de partículas (FLATT, 1999; FORMADINI, 2005; KLEIN, 2012). O aumento da proporção destes finos pode reduzir a densidade de empacotamento pois esses aglomerados equivalem a partículas porosas (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Além disso, podem dificultar a obtenção de modelos de empacotamento mais precisos por não haver um empacotamento ordenado das partículas (HÜSKEN e BROUWERS, 2008).

Para partículas maiores com superfície específica menor, predominam as forças de natureza gravitacional ou cisalhantes. Misturas com distribuições granulométricas extensas apresentam manifestações de ambos os domínios de forças. Caso a força da gravidade ou cisalhante seja maior que a força de atração entre as partículas não haverá aglomeração, ver Figura 24 (FLATT, 1999; FENNIS *et al.*, 2013a).

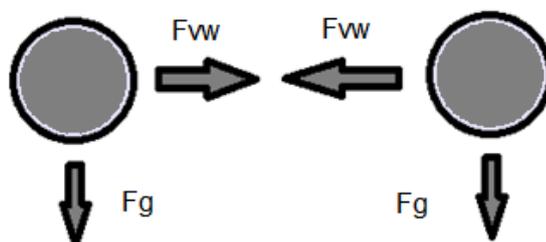


Figura 24: Representação esquemática das forças atuantes entre partículas

Sob condições úmidas as partículas não têm mudança em relação às forças de Van Der Waals, porém as forças eletrostáticas em geral são menores (FUNG *et al.*, 2009). A utilização de dispersantes (plastificantes, superplastificantes e hiperplastificantes) ajuda a inibir essas forças atrativas interparticulares (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

#### 2.4.5 Densidade de partículas

Existem três espécies de partículas, totalmente densas, com poros fechados e com com poros abertos, conforme é mostrado na Figura 25.

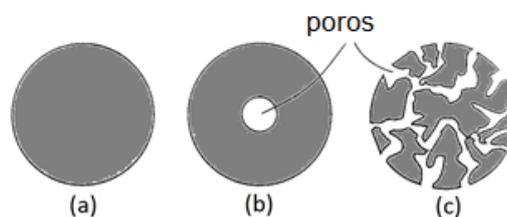


Figura 25: Partículas densas (a), com poros fechados (b) e com poros abertos (c)  
Fonte: OLIVEIRA *et al.*, 2000.

Para obter o máximo empacotamento também é necessário que sejam utilizadas partículas densas com a menor porosidade possível. Partículas com porosidade aberta afetam a trabalhabilidade, pois possuem capacidade de absorção de água pelos poros. Partículas com poros fechados levam apenas a menor densidade da mistura (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Se em uma distribuição granulométrica há uma acentuada diferença de densidade entre seus componentes, a segregação pode ocorrer, levando a mistura a apresentar diferentes densidades de empacotamento (HEWLETT, 2004).

#### 2.4.6 Estabilidade das partículas

A densidade de empacotamento também é influenciada pela capacidade da partícula em manter sua forma e pela elasticidade, durabilidade, resiliência e propriedades térmicas da mesma (FENNIS, 2011).

Partículas mais elásticas tem maior facilidade de empacotamento, pois podem alterar sua forma melhorando a compactação, porém produzem estruturas pouco rígidas. A durabilidade diz respeito à capacidade da partícula em resistir à trituração, degradação e dano, expansão ou desintegração pelo ciclo de congelamento e descongelamento, aquecimento ou por outras ações (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Partículas mais resistentes produzem estruturas mais rígidas, porém mais porosas. A resiliência (a capacidade de deformação elástica de um material) pode afetar o empacotamento dependendo da forma como as partículas são posicionadas na mistura.

Quanto mais resiliente for o material maior elasticidade ele apresentará e maior será a facilidade de empacotamento.

#### 2.4.7 Métodos de preparo das misturas

Um agregado com determinada distribuição granulométrica e com determinada textura e forma, dependendo do processo em que é introduzido ao concreto, poderá resultar em valores de empacotamento distintos. Isso ocorre, pois, a disposição das partículas na mistura é de fundamental importância para um melhor empacotamento dos materiais no concreto. Alguns dos equipamentos que podem auxiliar na melhor disposição das partículas dentro do concreto são, por exemplo, soquetes, vibrocompactadores ou vibradores (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Contudo, o aumento da densidade de empacotamento devido, por exemplo, à compactação é geralmente mais significativo para frações de partículas menores do que para partículas maiores. Quando não compactadas, partículas finas têm maior propensão à aglomeração e por isso menor densidade de empacotamento (FUNG *et al.*, 2009; KWAN e FUNG, 2009).

#### 2.4.8 Efeito da capa d'água no empacotamento de partículas

As propriedades reológicas e de fluidez da pasta de cimento e das argamassas no estado fresco são governadas pelo volume de água, pela densidade de empacotamento e pela superfície específica das partículas (KWAN *et al.*, 2010; LI e KWAN, 2011).

Conforme a Figura 26, o volume total de água é constituído pelo volume de água suficiente para preenchimento dos vazios entre as partículas e pelo volume de “excesso de água” necessário ao recobrimento das partículas. Quanto maior o volume de água em excesso, mais espessa será a capa de água e, por isso, mais separadas estarão as partículas. Isso leva a redução na fricção e na interação entre as partículas e a uma mistura com maior trabalhabilidade. A espessura da película de água é calculada por meio da relação entre o volume total de água em excesso e a superfície específica total dos sólidos (WONG e KWAN, 2008b; FUNG *et al.*, 2009; KWAN *et al.*, 2010; LI e KWAN, 2011; KLEIN, 2012; FENNIS *et al.*, 2013b).

O aumento da densidade de empacotamento resulta da redução da distância de separação entre as partículas. Com a redução do espaço entre as partículas, menos água é necessária para preenchimento dos vazios (BROUWERS E RADIX, 2005b; WONG e KWAN, 2008b; FENNIS *et al.*, 2013b).

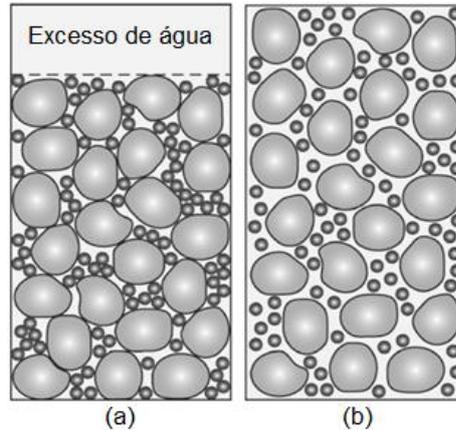


Figura 26: Volume ocupado por partículas estáveis (a), e por partículas em misturas fluidas (b)  
 Fonte: FENNIS *et al.*, 2013b.

Porém, granulometrias distintas, que resultam em porosidades similares, podem apresentar uma diferença significativa na superfície específica. Misturas com partículas de maior superfície específica requisitam maior teor de água para recobrimento das mesmas, ocasionando uma redução no volume de água disponível para o afastamento das partículas, o que por sua vez reduz a espessura da capa de água (OLIVEIRA *et al.*, 2000; WONG e KWAN, 2008b).

Assim, quanto maior a superfície específica da partícula e menor a densidade de empacotamento, maior a demanda de água. Quando a superfície específica é mantida constante, quanto mais estreita for a curva de distribuição granulométrica das partículas, maior será a demanda de água para se obter uma mistura com trabalhabilidade adequada (MEHTA e MONTEIRO, 2008; AIQIN *et al.*, 1999).

A influência das partículas finas na reologia do concreto está relacionada com a dificuldade de movimentação das mesmas devido ao atrito, Figura 27. O concreto irá escoar somente quando a tensão de cisalhamento for suficiente para vencer os a massa das partículas maiores e os efeitos de superfície das partículas menores (tensão de escoamento) (OLIVEIRA *et al.*, 2000; KLEIN, 2012).

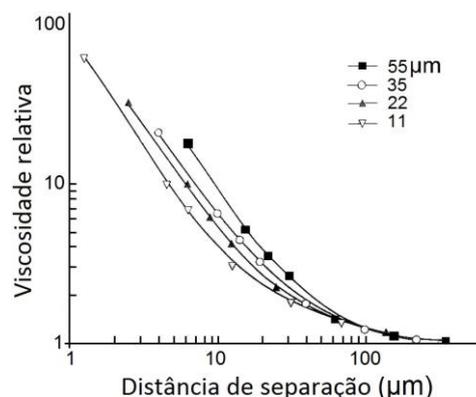


Figura 27: Viscosidade relativa x distância de separação entre partículas  
 Fonte: OLIVEIRA *et al.*, 2000.

Para concretos existem três diferentes possibilidades de se considerar a separação entre partículas a fim de encontrar a distância média ideal de separação entre elas: 1º) considerar a matriz como sendo a argamassa e as partículas como os agregados graúdos; 2º) considerar a matriz como sendo a pasta e as partículas como sendo os agregados graúdos e miúdos; e 3º) considerar a matriz como sendo a água e as partículas como sendo os agregados graúdos, miúdos e os finos (cimento e adições minerais).

A matriz dispersa e lubrifica as partículas de agregado. O volume contido e a reologia da pasta governam as propriedades do concreto úmido (BONADIA *et al.*, 1999). Assim, a matriz deve ser mais que suficiente para preencher os vazios entre as partículas de agregado, ou seja, deve haver excesso de matriz para obter uma fina capa de pasta para cobrir cada partícula e lubrificar o concreto (KENNEDY, 1940 apud WONG e KWAN, 2008b).

Com baixo teor de matriz, irão predominar os contatos entre partículas. Com alto teor de matriz, o contato entre as partículas diminui e a fluidez é determinada pela viscosidade da matriz (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Fennis *et al.* (2013b) elaborou os gráficos da Figura 28 determinando a relação entre a densidade de empacotamento de concretos secos e plásticos em função do volume de água por m<sup>3</sup> de concreto.

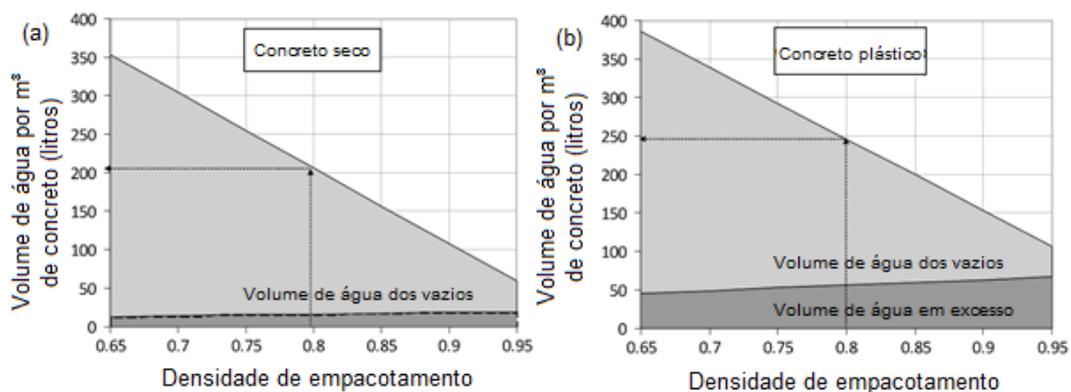


Figura 28: Determinação da porcentagem de água em concretos secos (a) e plásticos (b)  
Fonte: FENNIS *et al.*, 2013b

Apesar do volume de água em excesso ser um fator fundamental, deve-se atentar ao tipo de agregado utilizado, isso porque, a capacidade de absorção de água tem efeito direto com a trabalhabilidade das pastas de cimento. Quando o volume de água dos vazios é quantificado deve-se considerar também o volume de água absorvido pelas partículas. Da mesma forma, quando se quantifica o volume de água em excesso, deve-se levar em consideração a molhabilidade ou umectação das partículas.

O grau de umectação de uma partícula representa a capacidade de sua superfície em manter contato com a água (superfície sólida). Este pode ser determinado por um equilíbrio de forças de aderência e coesão e pelo ângulo de contato que a água forma na

superfície de contato com o sólido (Figura 29). O grau de umectação irá influenciar na espessura da capa de água sobre as partículas (KLEIN *et al.*, 2012 e KLEIN, 2012).

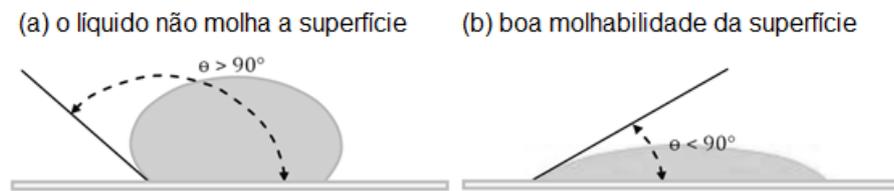


Figura 29: Ângulo de contato entre uma superfície sólida e um líquido  
Fonte: KLEIN *et al.*, 2012 e KLEIN, 2012.

#### 2.4.9 Modelos de empacotamento de partículas

Um dos primeiros artigos sobre empacotamento de partículas para produção de concreto foi publicado por Feret em 1892. Mais tarde surgiram os trabalhos de Fuller e Thompson, em 1907 na América do Norte e de Bolomey em 1935, Faury em 1953 e Caquot em 1937, na França. Fuller e Thompson, em 1907, e Andreasen e Andersen, em 1930, propuseram métodos para desenhar uma curva de distribuição ideal de tamanho de partículas. Ao mesmo tempo, surgiram modelos analíticos de empacotamento concebidos para prever o índice de vazios de uma mistura de dois grupos de partículas, como o trabalho de Furnas em 1929. Porém as interações entre os grupos de partículas como, por exemplo, o efeito parede e o efeito afastamento, mencionados anteriormente, ainda não eram levados em consideração (FENNIS, 2011).

Pesquisas realizadas por Powers, em 1968, contribuíram para o conhecimento mais profundo sobre a interação entre os diferentes componentes. O próximo passo foi o desenvolvimento de modelos com multicomponentes, incluindo a interação entre as partículas, como o modelo de empacotamento proposto por De Larrard em 1999. Desde a introdução do computador foram gerados vários modelos computacionais baseados nos modelos analíticos, como por exemplo: Europack, Mix Sim 98, Betonlab.Pro, René-LCPC (lcpc.fr) e 4C-Packing (dti.dk) (JONES *et al.*, 2002; FENNIS, 2011).

Métodos experimentais de empacotamento úmido, como o de Wong e Kwan (2008a) e Kwan e Wong (2008), para partículas finas sujeitos a aglomeração, consideram a ação do superplastificante, da água e da aglomeração entre as partículas. No geral, métodos úmidos apresentam densidades de empacotamento mais realísticas e maiores (FUNG *et al.*, 2009; KWAN e FUNG, 2009; LI e KWAN, 2014).

A escolha do modelo de empacotamento mais adequado deve levar em consideração características como: a existência ou não de um fluxo de água; o nível e o tipo de pressão aplicada, no caso de prensagem a seco; o grau de mobilidade das partículas no decorrer do processo e, suscetibilidade das partículas a aglomeração (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Nos

próximos subcapítulos serão apresentados com maior nível de detalhes os modelos de empacotamento utilizados neste trabalho: o de Funk e Dinger (1980) e o de De Larrard (1999).

#### 2.4.9.1 Modelo de Funk e Dinger (modelo de Alfred)

Mais conhecido como modelo de Alfred, o modelo de Funk e Dinger é um aperfeiçoamento dos modelos de Furnas (1929) e de Andreasen e Andersen (1930) e mostra que, na realidade, os dois são duas formas distintas de se expressar o mesmo resultado (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

A proposta do modelo de Funk e Dinger foi introduzir o conceito do tamanho mínimo de partículas na equação de Andreasen e Andersen e revisar matematicamente o modelo de Furnas (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Após uma análise comparativa entre dois modelos de abordagens distintas (discreta e contínua), Funk e Dinger provaram, em 1980, que matematicamente as equações dos dois modelos convergem para a Equação 3 (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

$$CPFT = 100 \times \left( \frac{D_p^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \quad \text{Equação 3}$$

em que:

$CPFT$ : é porcentagem acumulada de partículas menores que  $D_p$ ;

$D_p$ : é o diâmetro da partícula;

$D_s$ : é o diâmetro da menor partícula (do inglês, Small);

$D_L$ : é o diâmetro da maior partícula (do inglês, Large);

$q$ : é o coeficiente de distribuição.

Assim, Funk e Dinger, por meio de simulações computacionais determinaram que, para maximizar o empacotamento o valor do coeficiente da distribuição ( $q$ ) deve ser 0,37 (OLIVEIRA *et al.*, 2000; SILVA *et al.*, 2004; BROUWERS E RADIX, 2005b). Porém, este valor é bastante questionável quanto a representar o empacotamento máximo, uma vez que o conceito de maximização deve estar correlacionado com o processo de conformação.

No geral, quanto menor o valor que “ $q$ ”, menor a relação entre agregados graúdos e miúdos e maior a quantidade de pasta para preenchimento do vazio entre as partículas, Figura 30 (BONADIA *et al.*, 1999; OLIVEIRA *et al.*, 2000; HÜSKEN e BROUWERS, 2008; BLEECK, 2011). De certo modo é possível afirmar que o coeficiente de distribuição define a trabalhabilidade do concreto (BLEECK, 2011).

Segundo Oliveira *et al.* (2000) valores de “ $q$ ” menores que 0,37 aumentam a fluidez dos concretos por permitir maior distanciamento entre as partículas de agregado, aumentando

a quantidade de matriz. Coeficientes próximos a 0,20 proporcionam maior fluidez para faixas granulométrica de partículas finas e favorecem a ocorrência do comportamento pseudoplástico, com ou sem tixotropia. Coeficientes inferiores a 0,2 podem diminuir a fluidez devido ao incremento excessivo na superfície específica do sistema (volume de partículas menores excede o índice de vazios entre partículas maiores).

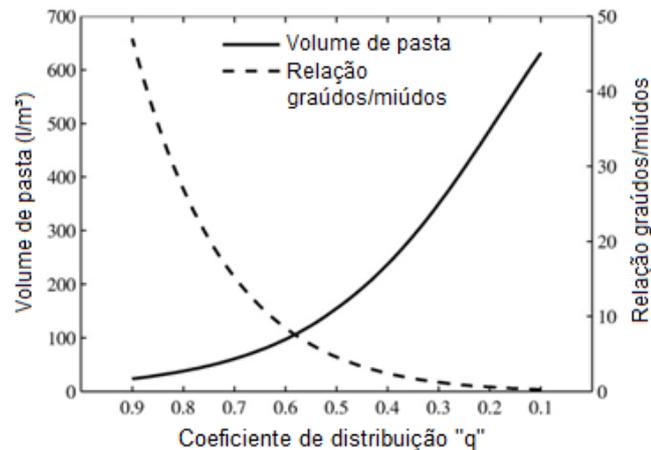


Figura 30: Influência do coeficiente de distribuição no volume de pasta e na relação grãos (entre 4 e 16 mm) e miúdos (entre 0,01 e 125  $\mu\text{m}$ )  
 Fonte: HÜSKEN e BROUWERS, 2008.

Brouwers e Radix (2005a) e Hunger e Brouwers (2006) recomendam um "q" entre 0,22 e 0,25 para concretos auto-adensáveis. Para concretos secos, Schmidt *et al.* (2005) e Stutech (2005) apud Hüsken e Brouwers (2008) recomendam um "q" entre 0,35 e 0,4. Hüsken e Brouwers (2008) atingiram resistências entre 95,7 MPa e 100,3 MPa para concretos com relação a/c = 0,33, porcentagem de pasta de 0,246  $\text{m}^3/\text{m}^3$  de concreto e densidade de empacotamento de 84 a 85% com  $q=0,35$ . O estudo de Alfred, experimentalmente é mais eficiente que o de Andreasen e Andersen que por sua vez é mais eficiente que o de Furnas (BONADIA *et al.*, 1999; CONCEIÇÃO, 2011).

#### 2.4.9.2 Modelo de De Larrard

Em geral, os modelos mais comuns de empacotamento de partículas operam com um número limitado de frações ou assumem uma simplificação da distribuição granulométrica. O modelo de empacotamento compressível (CPM - *Compressible Packing Model*) de De Larrard (1999), abrange combinações de qualquer número de frações considerando-as individualmente, com qualquer tipo de distribuição.

O estudo do empacotamento de De Larrard (1999) é dividido em densidade de empacotamento virtual e densidade de empacotamento real. Considera-se a forma da partícula utilizando para isso a massa específica e unitária e as interações entre partículas:

como o efeito de parede e efeito de afastamento. Este modelo é descrito pela Equação 4, Equação 5, Equação 6 e Equação 7 (DE LARRARD, 1999).

$$\gamma = \text{Mín} (\gamma_i) \quad \text{Equação 4}$$

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[ 1 - \beta_i + b_{ij} \beta_i \left( 1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \gamma_j - \sum_{j=i+1}^n \left[ 1 - a_{ij} \frac{\beta_i}{\beta_j} \right] \gamma_j} \quad \text{Equação 5}$$

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{d_j}{d_i} \right)^{1,02}} \quad \text{Equação 6}$$

$$b_{ij} = 1 - \left( 1 - \frac{d_i}{d_j} \right)^{1,5} \quad \text{Equação 7}$$

em que:

$\gamma$  = densidade de empacotamento virtual do conjunto de partículas;

$\gamma_i$  = densidade de empacotamento virtual do conjunto quando a fração  $i$  é dominante;

$\beta_i$  = densidade de empacotamento da fração granulométrica  $i$ ;

$\beta_j$  = densidade de empacotamento da fração granulométrica  $j$ ;

$\gamma_j$  = porção volumétrica da fração  $j$ ;

$a_{ij}$  = interação do modelo para o efeito de afastamento;

$b_{ij}$  = interação do modelo para o efeito de parede;

$d_i$  = dimensão das partículas da fração granulométrica  $i$ ;

$d_j$  = dimensão das partículas da fração granulométrica  $j$ ;

A densidade de empacotamento virtual representa o valor máximo que pode ser obtido pela colocação sucessiva das partículas, sem alterar a forma. Por isso, a densidade de empacotamento virtual será sempre maior que a real (DE LARRARD, 2009).

Assim, o modelo de De Larrard (1999) considera ainda um índice de compactação escalar ( $K$ ), que depende unicamente do processo de construção da estrutura, ou seja, da energia de compactação aplicada à mistura. A Tabela 2 apresenta o índice de compactação ( $K$ ) para alguns tipos de processo de mistura por via úmida, sendo que quanto maior o valor de  $K$ , melhor é a compactação do material.

Tabela 2: Índice de compactação ( $K$ )

Empacotamento úmido				Empacotamento Virtual
Lançamento Simples (Cintré, 1988)	Compactação com soquete (Kantha Rao e Krishnamoorthy, 1993)	Vibração (Joisel, 1952)	Vibrocompactado - 10 kPa (de Larrard <i>et al.</i> , 1994b)	
4,1	4,5	4,75	9	$\infty$

Fonte: De Larrard, 1999.

Este índice K é aplicado para determinação da densidade de empacotamento pelo modelo CPM de De Larrard (1999). Por meio deste fator, calculado pela Equação 8 o método consegue aproximações de 1% do valor real de densidade de empacotamento (DE LARRARD, 1999).

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i / \beta_i}{1/\varphi - 1/\gamma_i} \quad \text{Equação 8}$$

em que:

K: índice de compactação;

$\varphi$ : densidade de empacotamento real do conjunto de partículas;

Os dois modelos de empacotamento apresentados representam duas formas distintas de se analisar o empacotamento, uma forma mais simples, como é o caso do modelo de Funk e Dinger e outra mais complexa envolvendo um maior número de variáveis, como é o caso do modelo de De Larrard. Ao longo do trabalho serão discutidas com maior nível de detalhes as diferenças entre os dois modelos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais (item 3.1) e métodos (item 3.2) necessários ao desenvolvimento deste trabalho a fim de alcançar o objetivo estabelecido.

#### 3.1 MATERIAIS

Dentre os materiais utilizados, tem-se: dois tipos de cimentos Portland (item 3.1.1), um aditivo (item 3.1.2), agregados reciclados (item 3.1.3) e agregados naturais (item 3.1.4), além dos blocos intertravados comerciais (item 3.1.5).

##### 3.1.1 Cimentos

Foram utilizados dois tipos de cimento Portland para a obtenção dos concretos: o CP V ARI, utilizado na obtenção dos concretos com agregados reciclados e o CP II F 32, utilizado no concreto referência-empresa e no concreto referência-laboratório, esses dois últimos confeccionados com agregados naturais. Estes dois traços são os mesmos e diferem apenas no processo de vibrocompactação e no corpo de prova obtido. Algumas das propriedades físicas e mecânicas destes cimentos são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Características dos cimentos utilizados (média anual de 2014)

Propriedade	CP V ARI		CP II F 32	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Massa unitária à 20°C (g/cm <sup>3</sup> )	0,9	1,2	0,9	1,2
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3980	4130	3160	3400
#200 (%)	0,30	0,60	1,10	2,10
#325 (%)	2,70	3,90	11,5	13,10
Resistência à compressão com 1 dia (MPa)	22,4		14,6	
Resistência à compressão aos 3 dias (MPa)	37,7		28,9	
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	43,0		34,8	
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	51,2		42,0	
Massa específica absoluta média (g/cm <sup>3</sup> )	3,09		3,11	

Fonte: Itambé, 2014.

O cimento Portland CP V ARI é amplamente utilizado nas indústrias de artefatos de concreto devido a necessidade de uma desforma rápida e resistências elevadas nas primeiras idades. Isto garante elevada produtividade e redução das áreas de estocagem (ITAMBÉ, 2014).

O cimento Portland CP II F 32 é o mesmo utilizado por uma empresa produtora de blocos intertravados com 6 cm de espessura. A qualidade dos produtos dessa empresa é

atestada pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), por meio do Selo ABCP, o qual segue todos os preceitos estabelecidos na NBR 9781 (ABNT, 2013).

Com as informações da Tabela 3 pode-se observar a maior superfície específica apresentada pelo CP V ARI em relação ao CP II F. Além do menor percentual retido nas peneiras 200 mesh e 325 mesh. Estas duas características demonstram que o CP V ARI possui uma maior reatividade em relação ao CP II F e por isso, possui também maiores resistências iniciais, sendo que, com um dia de idade, o cimento CP V ARI atinge 43,75% da resistência de 28 dias. Aos 3 dias, atinge 73,63% e aos 7 dias 83,98%.

### 3.1.2 Aditivo plastificante

Para obtenção do concreto referência-laboratório foi utilizado o mesmo aditivo plastificante de massa CQ Press Mix Hyper (CAMARGO..., 2015) utilizado pela empresa parceira e responsável pelo traço do concreto referência-empresa. Os demais traços de concretos com agregados reciclados foram produzidos sem adição de nenhum tipo de aditivo, já que, a alteração do tipo de cimento pode modificar o comportamento do mesmo (MAZER e MACIOSKI, 2015).

### 3.1.3 Agregados reciclados

Para o estudo preliminar foram utilizados agregados reciclados produzidos por quatro usinas de reciclagem de RCD localizadas em um raio de 100 Km da cidade de Curitiba, as quais serão denominadas por A, B, C e D. Foram analisadas amostras de brita 0 também chamada de pedrisco ( $\phi \leq 12,5$  mm) e areia ( $\phi \leq 4,8$  mm) de cada uma das usinas. Estes agregados foram divididos conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4: Identificação dos agregados reciclados

Amostra	Espécie	Empresa
AA	Areia	A
PA	Pedrisco	
AB	Areia	B
AC	Areia	C
PC	Pedrisco	
AD	Areia	D
PD	Pedrisco	

A empresa A produz agregados reciclados em um britador de mandíbula (primário) e um britador de impacto (secundário). O britador de mandíbula possui um eixo, com mandíbula dentada e capacidade de produção de 60 toneladas/hora. Pode-se observar visualmente, por meio da Figura 31, que o Pedrisco A (PA) apresenta uma grande variação de partículas

arredondadas e lamelares, bem como grande teor de material cerâmico, assim como na Areia A (AA). Posteriormente será identificada a proporção de material cerâmico nas britas e a morfologia.

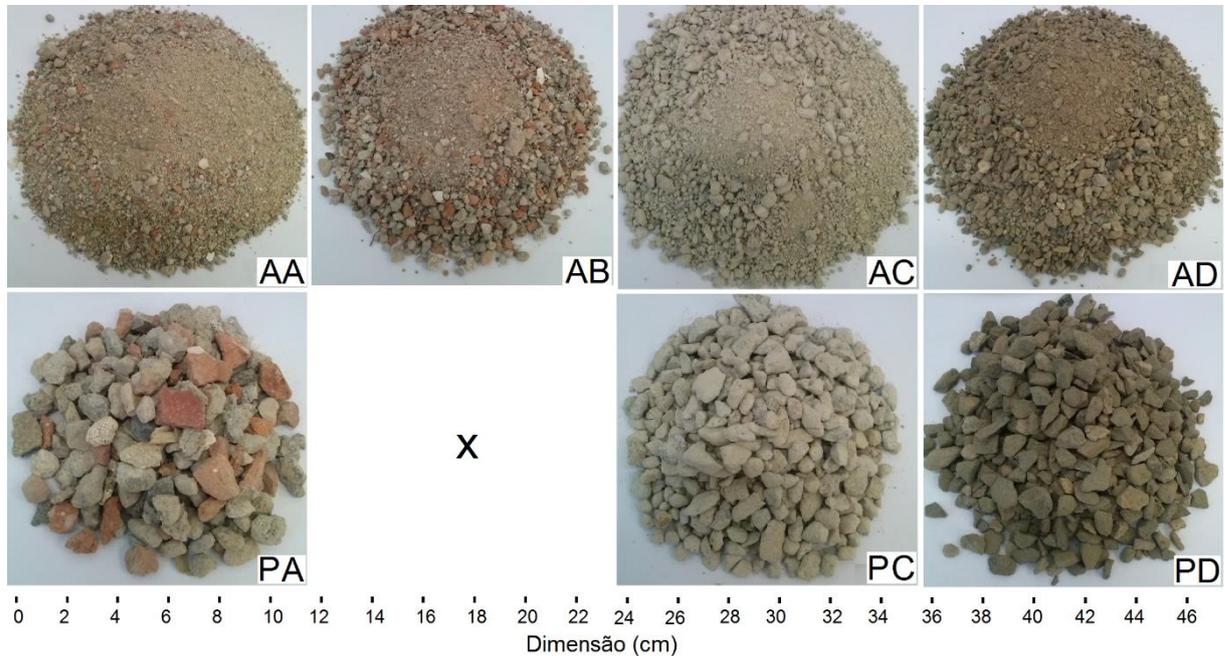


Figura 31: Agregados produzidos pelas empresas

A empresa B também produz agregados reciclados em britador de mandíbula, entretanto esta empresa não produz agregados do tipo pedrisco, mas apenas brita corrida (cascalho com dimensão > 12 mm) e areia. Desta forma optou-se por não utilizar a brita corrida por não se enquadrar nos parâmetros definidos neste trabalho.

Em comparação a Areia A (AA), a Areia B (AB) visualmente (Figura 31) apresenta maior porcentagem de partículas maiores do que finos. Apresenta também grande teor de material cerâmico.

A empresa C produz agregados reciclados com um rebitador (britador secundário) de mandíbula. Ao contrário das empresas A e B, a empresa C apresenta agregados com menor percentual de material cerâmico (predominância de agregados reciclados de concreto) e visualmente apresenta maior proporção de partículas angulosas no meio de partículas arredondadas.

A empresa D produz agregados reciclados em britador de impacto com capacidade de produção de aproximadamente 20 toneladas/hora, sendo o tamanho máximo da partícula que alimentam o britador de (30x30) cm. Dentre todas as empresas, esta parece apresentar agregados mais limpos, ou seja, sem a presença de finos e mais parecidos com o natural, com menor espessura de capa de argamassa sobre o agregado natural, além de poucos fragmentos de material cerâmico e gesso. Além disso, visualmente apresenta maior proporção de partículas lamelares.

As informações sobre os processos de produção das empresas estão sintetizadas na Tabela 5.

Tabela 5: Características das empresas produtoras de agregados reciclados

Empresa	Tipo de britador		Capacidade de produção	Agregado	
	Primário	Secundário		Areia	Brita 0
A	Mandíbula	Impacto	60 toneladas/hora	X	X
B	Mandíbula	*	**	X	***
C	*	Mandíbula	**	X	X
D	Impacto	*	20 toneladas/hora	X	X

\* Não é utilizado. \*\* Informação não disponível. \*\*\* Não produz.

### 3.1.4 Agregados naturais

Os agregados naturais utilizados para produção dos concretos de referência-laboratório foram doados pela empresa parceira fabricante de pré-moldados, sendo estes colhidos no mesmo dia da obtenção do traço da empresa. Isso porque, em datas diversas haverá dentro da empresa, traços diversos devido as diferentes características dos agregados ao longo do tempo. Devido ao sigilo comercial acordado com a empresa, nem o traço do concreto utilizado e nem as características dos agregados serão fornecidas.

### 3.1.5 Blocos intertravados

A fim de comparar os blocos produzidos pela empresa com o concreto produzido, também foram coletadas algumas amostras de blocos intertravados para análise da absorção de água e resistência à compressão axial, como pode-se ser observado na Figura 32.



Figura 32: Blocos intertravados (referência-empresa)

Estes blocos possuem largura de 10 cm por um comprimento de 20 cm e uma espessura de 6 cm de acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013). É importante salientar que, devido a variabilidade de tamanho e de formato das peças existem traços diferentes para espessuras diversas.

### 3.2 MÉTODOS

Neste item é apresentado o método da pesquisa. A fim de resumir suas etapas, foi elaborado o fluxograma da Figura 33, dividindo o projeto em cinco etapas: 'a', 'b', 'c', 'd' e 'e'.

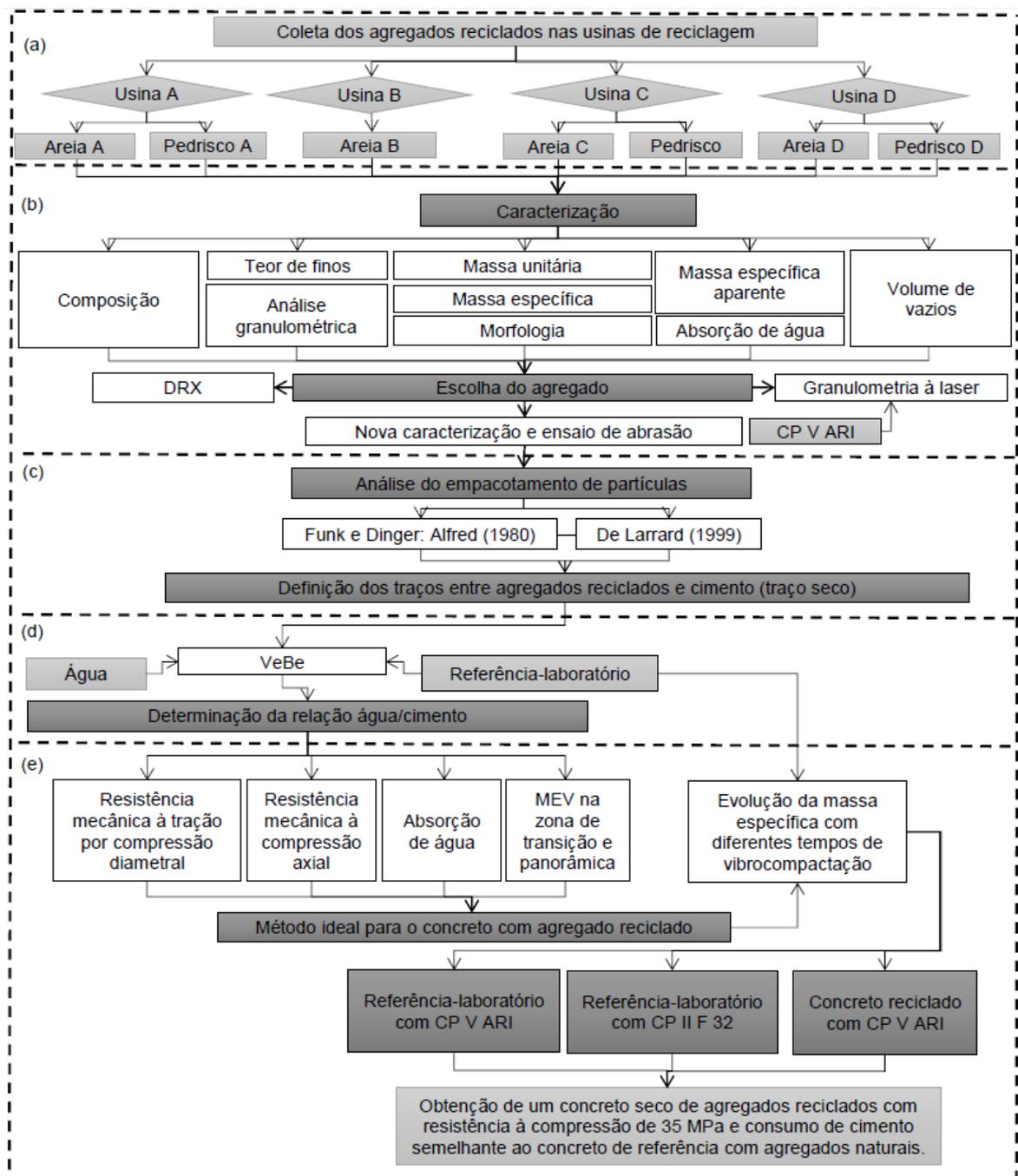


Figura 33: Fluxograma das etapas da pesquisa: materiais (a); caracterização dos materiais (b); análise do empacotamento (c); determinação da relação água/cimento (d); caracterização do concreto (e)

A etapa "a" consistiu na coleta das amostras de agregados reciclados nas usinas de reciclagem de RCD, já descrita em 3.1.3. A etapa "b" foi constituída pela caracterização dos materiais, escolha da empresa com material mais adequado para produção de concreto e

nova caracterização do agregado escolhido, descrita com mais detalhes no item 3.2.1. Na etapa “c” foi realizada a análise do empacotamento de partículas como descrito em 3.2.3. Na etapa “d” foi determinada a relação água/cimento ideal como descrito no item 3.2.5. Na última etapa (e) foi realizada a caracterização e análise das propriedades dos concretos produzidos a partir dos traços definidos e da referência-laboratório; cuja descrição está detalhada no item 3.2.7; também nesta última etapa (e) foi realizada a análise da massa específica com diferentes tempos de vibrocompactação, conforme procedimentos descritos no item 3.2.6.

### 3.2.1 Caracterização dos agregados reciclados

Os métodos de caracterização das amostras de materiais reciclados obtidos pelas usinas (A, B, C e D) e do cimento utilizado para a elaboração dos concretos com agregados reciclados, relacionados na Figura 33 (a) e (b), seguiram as descrições e números de amostras por ensaio da Tabela 6.

Tabela 6: Métodos de caracterização dos materiais

	Método de caracterização	Descrição do ensaio	Material analisado	Nº de amostras por ensaio
AR* das quatro empresas e AR*	Teor de fragmentos	Item 3.2.1.1	Brita 0	3
	Teor de materiais pulverulentos**	Item 3.2.1.2	Areia e brita 0	3
	Distribuição granulométrica	Item 3.2.1.3	Areia e brita 0	3
	Massa unitária e índice de vazios	Item 3.2.1.4	Areia e brita 0	3
	Massa específica real** e aparente	Item 3.2.1.4	Areia	3
	Massa específica real** e aparente	Item 3.2.1.4	Brita 0	3
	Absorção de água	Item 3.2.1.5	Areia	3
	Absorção de água	Item 3.2.1.5	Brita 0	3
	Morfologia	Item 3.2.1.6	Areia e brita 0	1
AR* escolhido	Desgaste por abrasão	Item 3.2.1.7	AR*	3
	Distribuição granulométrica	Item 3.2.1.8	Cimento e AR* < 0,075 mm	3
	Monitoramento da absorção de água	Item 3.2.1.10	Areia e brita 0	3

\*Agregados Reciclados \*\*Ensaio elaborado também para o agregado natural.

A Tabela 6 está dividida entre os ensaios elaborados para os agregados reciclados de todas as empresas e os ensaios aplicados somente para os agregados de uma das empresas, escolhida por meio dos ensaios elaborados para todas as empresas e o cimento CP V ARI. A escolha do agregado se deu por meio de alguns critérios que classificaram os agregados com índices variando de 1 a 4 dependendo do tipo de ensaio, sendo 1 o pior caso e 4 o melhor. Dentre os critérios para a escolha do agregado selecionado estão: aquele com o maior teor de fragmentos à base de concreto, teor de materiais pulverulentos e distribuição granulométrica mais próxima dos modelos de empacotamento máximo de partículas, maior massa unitária e específica, menor índice de vazios, menor absorção de água e morfologia mais arredondada.

Para o material da empresa escolhida (AR escolhido), os ensaios descritos na Tabela 6 foram realizados sobre novos lotes com 5 m<sup>3</sup> de areia e 5 m<sup>3</sup> de brita 0 (pedrisco). Devido à grande variabilidade do material reciclado em relação a composição, para caracterizar o novo lote as amostras foram colhidas de acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004b) por incrementos e fracionamentos. Neste procedimento foram coletadas amostras (com quantidade definida para cada ensaio) de uma pilha cônica de agregados em incrementos alternados em tempo e espaço, com o cuidado de retirar as camadas mais profundas da pilha, mas também da superfície, conforme a Figura 34.



Figura 34: Pilhas de agregados reciclados

Em seguida, foi realizado o fracionamento por meio do método de quarteamento, conforme mostrado na Figura 35, no qual o número de quarteamentos e o tamanho da amostra final dependeu do tamanho da amostra necessária a cada tipo de ensaio.



Figura 35: Quarteamento das amostras

Seguindo a ordem dos ensaios listados na Tabela 6, os itens subsequentes apresentam uma descrição detalhada de cada ensaio realizado e qual a sua finalidade.

### 3.2.1.1 Teor de fragmentos do agregado reciclado

Para poder classificar os agregados reciclados das diferentes empresas em: agregados de reciclados mistos (ARM) ou agregados reciclados de concreto (ARC), foi utilizado o método do anexo A da NBR 15116 (ABNT, 2004b) - Determinação da composição dos agregados reciclados graúdos por análise visual. O ARM é aquele composto na sua fração graúda em menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas e

o ARC é aquele composto, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas NBR 15116 (ABNT, 2004b).

Este método propõem a separação por meio visual de três grupos de partículas: o primeiro deles constituído por fragmentos que apresentam pasta de cimento endurecida em mais de 50% do volume e fragmentos constituídos por rocha em mais de 50% do volume; o segundo, constituído por fragmentos de cerâmica branca ou vermelha com superfície não polida, em mais de 50% do volume e o terceiro constituído por, fragmentos de materiais não minerais de natureza orgânica como madeira, plástico, betume e materiais carbonizados, além de contaminantes como vidros e gesso.

Feito isso foi calculado o percentual mássico de cada grupo em relação ao total de agregado reciclado. A composição dos teores de fragmentos dos agregados reciclados foi realizada apenas na brita 0 considerando que a areia é resultado da britagem do mesmo material que originou a brita 0.

### *3.2.1.2 Teor de materiais pulverulentos*

Foi determinado de acordo com a NBR NM 46 (ABNT, 2003b) por método aquoso e em triplicata. Os agregados reciclados à base de concreto, tendem a apresentar elevado teor de material pulverulento devido a pulverização da capa de argamassa que recobre o agregado natural no processo de britagem e/ou moagem, o que influencia nas propriedades do concreto. Para fins de comparação, este ensaio também foi executado para os agregados naturais.

### *3.2.1.3 Distribuição granulométrica*

A distribuição granulométrica foi realizada para a areia e brita 0 nas amostras coletadas de cada uma das empresas, segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003a). Posteriormente ao processo de escolha de um agregado, esse ensaio foi repetido para o novo lote de brita 0 (pedrisco) e areia, recebido da empresa escolhida. Estes dados foram utilizados para análise dos traços de agregados pelos modelos de empacotamento de Funk e Dinger (1980) e de De Larrard (1999).

### *3.2.1.4 Massa específica real e específica aparente, massa unitária e índice de vazios*

Os ensaios de massa unitária e índice de vazios foram realizados para a areia e a brita 0 de cada uma das empresas, bem como o ensaio de massa específica e massa específica aparente. Foram utilizadas para isso as NBR's NM 45 (ABNT, 2006) e NM 52 (ABNT, 2009) para areia e NM 53 (ABNT, 2003c) para a brita, respectivamente conforme

Tabela 6. Estes resultados foram utilizados para o cálculo do índice de vazios dos agregados e também para o cálculo do consumo de cimento dos traços por meio da Equação 9, adaptada de Helene e Terzian (1992).

$$C_{\text{cimento}} = \frac{1}{\frac{t_{\text{cimento}}}{m_{\text{cimento}}} + \frac{t_{\text{miúdo}}}{m_{\text{miúdo}}} + \frac{t_{\text{graúdo}}}{m_{\text{graúdo}}} + \frac{t_{\text{água}}}{m_{\text{água}}}} \quad \text{Equação 9,}$$

em que:

$C_{\text{cimento}}$  = consumo de cimento em kg/m<sup>3</sup>;

$t_{\text{cimento}}$  = quantidade de cimento no traço em massa;

$t_{\text{miúdo}}$  = quantidade de agregado miúdo no traço em massa;

$t_{\text{graúdo}}$  = quantidade de agregado graúdo no traço em massa;

$t_{\text{água}}$  = quantidade de água no traço em massa;

$m_{\text{cimento}}$  = massa específica real do cimento;

$m_{\text{miúdo}}$  = massa específica real do agregado miúdo;

$m_{\text{graúdo}}$  = massa específica real do agregado graúdo;

$m_{\text{água}}$  = massa específica real da água.

Foram realizados também ensaios de massa unitária por fração granulométrica. A finalidade deste ensaio foi para determinação do índice de vazios de cada fração, que por sua vez, foram usados no cálculo das densidades de empacotamento do modelo de De Larrard.

Contudo, devido ao elevado teor de vazios permeáveis do agregado reciclado, para determinação do índice de vazios, foi utilizado, ao contrário do que estabelece a norma, a massa específica aparente. Isso porque o modelo de De Larrard (1999), não considera a existência de vazios permeáveis, analisando o empacotamento dos agregados somente por meio dos vazios entre as partículas.

Devido à algumas dúvidas em relação ao método de ensaio de massa específica e massa específica aparente da NM 52 (ABNT, 2009), que serão discutidas ao longo da apresentação dos resultados, utilizou-se também o método do picnômetro descrito pela norma de solos DNER-ME 093/94 (DNER, 1994). Este ensaio foi realizado para comprovação do resultado obtido para a massa específica da areia escolhida e para a determinação da massa específica dos agregados naturais utilizados para elaboração do concreto referência-laboratório.

### 3.2.1.5 Absorção de água

Os ensaios de massa específica aparente foram utilizados para determinação da absorção de água dos agregados reciclados por meio das NBR's: NM 30 (ABNT, 2001a) para a areia e NM 53 (ABNT, 2003c) para a brita 0. Isso é importante para poder justificar algumas

variações ocorridas durante o desenvolvimento da pesquisa, uma vez que uma das principais características que distinguem o agregado reciclado do agregado natural é o elevado índice de vazios e a elevada absorção de água do primeiro.

### 3.2.1.6 Morfologia

Para a análise morfológica das partículas foi utilizado o método de análise digital de imagens proposto por Weidmann (2008), discutido no capítulo 2.

A forma das partículas dos agregados foi avaliada por meio do coeficiente de forma. Para o cálculo deste parâmetro foi necessário à obtenção da maior dimensão, massa e massa específica da partícula. A maior dimensão de cada partícula foi obtida por meio do método de análise digital de imagens baseado no procedimento utilizado por Fabro *et al.* (2011): as imagens foram obtidas por um *scanner* (Deskjet F2400 Séries) e as medições feitas por meio do programa AutoCad 2014.

Previamente a obtenção das imagens, todos os agregados foram lavados na peneira com abertura de 0,075 mm para a retirada do material pulverulento. O agregado lavado foi então peneirado reservando-se as faixas granulométricas retidas nas peneiras com abertura de 9,5 mm; 4,75 mm; 2,36 mm e 1,18 mm. Foram selecionados aleatoriamente 7 partículas de areia e 7 partículas de brita 0 de cada uma das quatro empresas (A, B, C e D) e para cada uma das peneiras.

Estas partículas e uma escala métrica foram dispostas sobre a lente do *scanner*, de forma ordenada para digitalização (Figura 36). A coleta de imagens dos agregados simultaneamente a imagem da escala permitiu que no processo de análise das imagens fosse possível determinar as dimensões reais das partículas. As imagens foram, então, analisadas no programa de análise de imagens AutoCad 2014, sendo obtidas manualmente as dimensões de cada partícula de cada fração dos agregados.

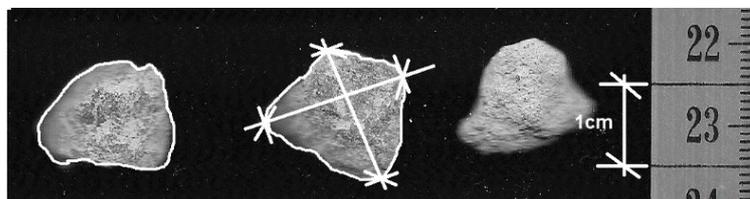


Figura 36: Ensaio de morfologia por análise de imagens

Com este procedimento foi possível obter a média dos coeficientes de forma de cada fração de agregado, calculado por meio da média ponderada das frações, em que é considerada a porcentagem de material retido na respectiva fração por análise granulométrica. A massa específica aparente, necessária ao cálculo do coeficiente de forma do agregado foi obtida conforme descrito no item 3.2.1.4.

### 3.2.1.7 Desgaste por abrasão

Sabe-se que os agregados reciclados são compostos por agregados naturais recobertos por uma capa de argamassa. Esta capa, devido ao tipo de misturador e manuseio do material, pode vir a se desgastar modificando a distribuição granulométrica do material. Isto pode aumentar a quantidade de finos e reduzir o tamanho das partículas maiores.

O ensaio comumente utilizado para determinar o desgaste por abrasão de agregados graúdos é o de abrasão “Los Ángeles” (ABNT, 2001b), contudo, este ensaio não representa a realidade do processo a que o material deste trabalho foi submetido, podendo gerar índices de abrasão mais elevados.

Assim, propôs-se um ensaio de desgaste por abrasão com a finalidade de analisar se existe ou não grande influência do método de preparação do concreto nas dimensões do agregado reciclado e conseqüentemente na distribuição granulométrica do mesmo, alterando por sua vez sua densidade de empacotamento.

O método utilizado para o ensaio de desgaste por abrasão dos agregados consistiu na produção de um concreto seco composto apenas pelos agregados graúdos (brita 0) e miúdos (areia) da empresa escolhida em um traço usual em massa de 1:3:2 (cimento: areia: brita). Além disso, foi adicionada uma quantidade de água suficiente para obtenção da consistência desejada (Figura 37).



Figura 37: Consistência de concretos secos

Após o material ser seco em estufa à 100 °C por 24 horas, a mistura, realizada em betoneira, constituiu-se de duas etapas de 1 e 4 minutos, totalizando 5 minutos, conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7: Método de mistura para o ensaio de abrasão

Etapa	Materiais adicionados	Tempo de mistura
1	100% graúdo + 50% água	1 min.
2	100% miúdo + 100% cimento + 50% água	4 min.

Na primeira etapa foi introduzido o agregado graúdo (com granulometria já definida conforme item 3.2.1.7) e metade da água, deixando misturar por 1 minuto. Em seguida, sem desligar a betoneira, foram introduzidos, ao longo dos 4 minutos finais, o agregado miúdo (também de granulometria definida), o cimento e os outros 50% da água, nesta ordem.

Este processo de mistura foi adaptado de Marchioni (2012). Imediatamente após a mistura em betoneira o concreto gerado foi lavado sobre uma peneira de 0,15 mm. O material retido na peneira foi seco em estufa também à 100° por 48 horas. Com a diferença entre a massa total de agregado e cimento e a massa seca retida na peneira foi possível determinar a porcentagem de material que fica abaixo da peneira 0,15 mm para o agregado graúdo e miúdo, considerando que o cimento tenha granulometria  $\leq 0,075$  mm.

Assim, foi possível verificar se a porcentagem de material passante na peneira 0,15 mm foi superior à da amostra antes desse procedimento de desgaste por abrasão. O resultado foi obtido após três repetições desse procedimento.

#### *3.2.1.8 Distribuição granulométrica ( $\leq 0,075$ mm)*

A análise da distribuição granulométrica por difração à laser foi realizada no equipamento Mastersizer 2000 (Malvern, U.K). A dispersão foi realizada em álcool isopropílico (95%), o qual contém no máximo 5% de água. Foram caracterizados por este ensaio o cimento e a fração do agregado reciclado da empresa escolhida com dimensão menor a 0,075 mm (material pulverulento).

Esse resultado foi utilizado para posterior cálculo do empacotamento de acordo com os modelos teóricos. O ensaio foi realizado no Grupo de Construções e Ambiente da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da USP, câmpus Pirassununga.

#### *3.2.1.9 Monitoramento da absorção de água pelos agregados*

Como foi descrito no capítulo 2, é recomendado adicionar certa quantidade de água ao agregado reciclado antes de misturá-lo ao concreto (pré-umidificação), devido a elevada absorção de água. Esta quantidade varia de acordo com o volume de absorção de água do agregado utilizado. Para definir a taxa de absorção de água foi utilizada a proposta de norma desenvolvida por Leite (2001).

De maneira sucinta o ensaio consiste na determinação da massa de uma amostra seca em estufa e do monitoramento da massa imersa em água deste mesmo material ao longo de 24 horas por meio de uma balança hidrostática. Para isso, conforme mostra a Figura 38, foi adaptada uma balança hidrostática, cujo recipiente no qual é colocada a amostra se constitui de uma peneira com abertura de de mesh 325 (0,044 mm) com tampa.

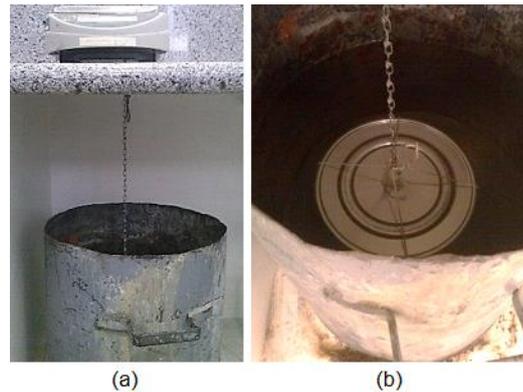


Figura 38: Balança hidrostática para monitoramento da absorção de água do agregado reciclado, vista lateral (a) e superior (b)

Para o monitoramento e determinação da taxa de absorção de água foram utilizadas duas amostras de agregados reciclados graúdos da empresa escolhida e duas amostras de agregado reciclado miúdo, também da empresa escolhida. A média das duas amostras serviu de base para o estabelecimento do procedimento de pré-umidificação do agregado reciclado antes da preparação do concreto.

### 3.2.2 Caracterização dos blocos intertravados (referência-empresa)

Os blocos intertravados doados pela empresa, designados como referência-empresa, foram ensaiados à compressão axial, absorção de água e massa específica saturada, conforme a NBR 9781 (ABNT, 2013), aos 7 e 28 dias de idade. Os blocos foram mantidos em câmara úmida e imersos em solução saturada de hidróxido de cálcio, até a data de ensaio.

### 3.2.3 Aplicação dos modelos de empacotamento de partículas

Escolhido o agregado reciclado mais apropriado para produção de concreto e realizados os ensaios de: granulometria à laser da fração  $< 0,075$  mm e abrasão, foram aplicados os modelos de empacotamento de partículas para os agregados reciclados (brita 0 e areia) a fim de definir o traço de maior empacotamento possível.

Foram utilizados os modelos de Funk e Dinger, o qual considera o ajuste do empacotamento apenas pela granulometria dos materiais e, o modelo de De Larrard, que considera adicionalmente a massa específica e unitária do material, citados na revisão de literatura.

Não se propõem neste trabalho que seja realizada a separação dos agregados em faixas granulométricas para posterior composição de uma distribuição ideal, pois isto tornaria o processo de eventual produção industrial inviável técnica e economicamente. O que se

propõem é a utilização de composições entre os agregados reciclados miúdos e graúdos, para obtenção do máximo empacotamento possível, uma vez que são comercializados separadamente pelas usinas.

Assim, foram definidos oito traços de concreto utilizando os modelos de Funk e Dinger e De Larrard, os quais se diferenciam principalmente pela condição de análise da distribuição granulométrica dos agregados e do cimento, conforme a Tabela 8.

Tabela 8: Aplicação dos modelos de empacotamento de partículas

Modo de consideração		Condição de análise	
		Funk e Dinger	De Larrard
Considerando o cimento como partícula a construção da curva granulométrica do traço (CAP)	Considerando toda a fração granulométrica da areia e do pedrisco	FD1: CAP	DL1: CAP
	Retirando apenas a fração granulométrica passante na peneira de 0,15 mm da areia e do pedrisco (s/ 0,15 AP)	FD2: CAP s/ 0,15 AP	DL2: CAP s/ 0,15 AP
	Retirando apenas a fração granulométrica passante na peneira de 0,15 mm da areia (s/ 0,15 A)	FD3: CAP s/ 0,15 A	DL3: CAP s/ 0,15 A
	Retirando apenas a fração granulométrica passante na peneira de 0,15 mm do pedrisco (s/ 0,15 P)	FD4: CAP s/ 0,15 P	DL4: CAP s/ 0,15 P
Não considerando o cimento como partícula para a construção da curva granulométrica do traço (AP)	Considerando toda a fração granulométrica da areia e do pedrisco	FD5: AP	DL5: AP
	Retirando apenas a fração granulométrica passante na peneira de 0,15 mm da areia e do pedrisco (s/ 0,15 AP)	FD6: AP s/ 0,15 AP	DL6: AP s/ 0,15 AP
	Retirando apenas a fração granulométrica passante na peneira de 0,15 mm da areia (s/ 0,15 A)	FD7: AP s/ 0,15 A	DL7: AP s/ 0,15 A
	Retirando apenas a fração granulométrica passante na peneira de 0,15 mm do pedrisco (s/ 0,15 P)	FD8: CAP s/ 0,15 P	DL8: CAP s/ 0,15 P

Os procedimentos de dosagem estão divididos em dois grupos maiores que dizem respeito ao modelo de empacotamento utilizado: Funk e Dinger (FD) e De Larrard (DL). Estes dois grupos foram sub-divididos em dois outros grupos que dizem respeito a quais componentes foram considerados no modelo de empacotamento: cimento, areia e pedrisco (CAP) e areia e pedrisco (AP).

Dentro deste último está a forma de consideração da curva granulométrica de cada componente: sem a fração inferior a 0,15 mm da areia e do pedrisco (s/ 0,15 AP); sem a fração inferior a 0,15 mm da areia e com a granulometria completa do pedrisco (s/ 0,15 A) e;

sem a fração inferior a 0,15 mm do pedrisco e com a granulometria completa da areia (s/ 0,15 P).

Por exemplo, na condição de análise “FD2: CAP s/ 0,15 AP” compara-se a diferença percentual entre a curva granulométrica ideal de Funk e Dinger, com curvas granulométricas de composições entre os agregados graúdos, miúdos e o cimento sem a fração da curva granulométrica passante na peneira 0,15 mm da areia e do pedrisco.

Há duas justificativas principais para a retirada da fração inferior a 0,15 mm do agregado reciclado. A primeira se refere a percepção do excesso de material fino presente no agregado reciclado e a segunda é em função desta granulometria ser muito semelhante a do cimento utilizado nesta pesquisa (ver resultados e discussões no item 4.3.3.2). Contudo, existe também uma terceira justificativa não técnica, que diz respeito aos aspectos negativos relacionados a saúde ocupacional do profissional que trabalha com agregados reciclados com elevado teor de finos.

As curvas granulométricas para cada procedimento foram compostas de modo que as porcentagens dos materiais utilizados se complementassem, totalizando 100%. Por exemplo, 20% de areia e 80% de pedrisco ou 20% de areia, 65% de pedrisco e 15% de cimento. A porcentagem de cada material foi multiplicada pelo volume de material retido em cada peneira para formação da curva granulométrica do traço. Dessa forma, foi variada a porcentagem de areia de 1 a 100%, em massa, assim como a porcentagem de pedrisco (brita 0). A variação seguiu-se de 1 em 1% até a obtenção da proporção que obteve maior empacotamento. Para tal foram elaboradas planilhas usando o software Microsoft Office Excel.

Para todos os procedimentos os cálculos e análises respeitaram um intervalo de consumo de cimento de 300 à 400 kg/m<sup>3</sup> de modo a manter esse parâmetro equivalente ao concreto seco industrial com agregados naturais e resistência à compressão de 35 MPa. Esse procedimento resultou em traços cujo percentual de cimento ficou entre 12% e 18%, em massa.

Estes oito procedimentos resultaram em oito traços para cada modelo de empacotamento, destes oito, foram escolhidos dois, um para o cálculo do traço com o cimento incluso (CAP) e outro para o traço definido sem o cimento (AP). Para o modelo de Funk e Dinger, a escolha deu-se pela menor diferença percentual relativa entre a distribuição granulométrica teórica do modelo e a curva granulométrica resultante do traço de areia e brita 0 (pedrisco). Para o modelo de De Larrard, a escolha deu-se pelo maior valor de densidade de empacotamento encontrado. Foram totalizados então quatro traços, dois do modelo de Funk e Dinger e dois do modelo de De Larrard.

### 3.2.3.1 Variáveis do modelo de Funk e Dinger

Para o cálculo da diferença percentual relativa no modelo de Funk e Dinger, foi realizado o seguinte procedimento: primeiramente foi calculada a diferença entre o percentual acumulado passante de cada fração do traço e do modelo, então, essas diferenças foram somadas e divididas em relação a quantidade de frações consideradas no cálculo.

O coeficiente de distribuição “q” adotado para construção da curva do modelo de Funk e Dinger foi de 0,35. Este valor foi estabelecido por três motivos. Primeiro, porque está dentro do intervalo de 0,35 a 0,4, estabelecido por alguns autores (citados na revisão da literatura, item 2.4.9.1) como ideal para concretos secos. Segundo, porque valores inferiores resultam em traços com maior proporção de finos e, uma vez que foram utilizados agregados reciclados com elevado teor de finos, valores inferiores à 0,35 certamente agravariam problemas resultantes do uso de finos em excesso. Finalmente, porque coeficientes de distribuição menores geram maior consumo de pasta e como os agregados reciclados apresentam superfície rugosa, necessitam de um volume de pasta superior aos agregados naturais para preenchimento dos vazios.

### 3.2.3.2 Variáveis do modelo de De Larrard

No modelo de empacotamento de De Larrard (1999), foi necessário estabelecer a densidade de empacotamento ( $\beta_i$ ) de cada fração granulométrica separadamente. Assim, para as frações granulométricas com tamanhos entre 9,5 mm à 0,3 mm, foi determinada a densidade de empacotamento de cada fração granulométrica, reduzindo do valor unitário o valor obtido para o índice de vazios determinado conforme o item 3.2.1.4.

Para as frações granulométricas abaixo de 0,15 mm, a densidade de empacotamento foi definida por meio da análise de resultados obtido por alguns autores quando da aplicação do método de empacotamento úmido desenvolvido por Wong e Kwan (2008) e Kwan e Wong (2008). Este procedimento se justifica pelo elevado grau de aglomeração de partículas finas (< 0,15 mm). Quando se determina a densidade de empacotamento de materiais finos pela massa unitária e específica, há a formação de cadeias porosas que irão repercutir em resultados inferiores de densidade de empacotamento. Ao utilizar o modelo de empacotamento úmido o valor da densidade de empacotamento é maior e representa de modo mais próximo o estado destas partículas no concreto (WONG e KWAN, 2008a; KWAN e WONG, 2008).

Os autores proponentes do método úmido de empacotamento (WONG e KWAN, 2008a; KWAN e WONG, 2008), obtiveram densidades de empacotamento do cimento, sem a utilização de aditivo, em torno de 0,546. Com a utilização de 0,6% de superplastificante esta

mesma densidade ficou em torno de 0,586 e; 0,622 com a adição de 3% de superplastificante. Outro estudo, também realizado por Wong e Kwan (2008b), demonstrou que com 3% de superplastificante, obteve 0,631 para densidade de empacotamento do cimento. Hermann *et al.* (2015), obtiveram uma densidade de empacotamento igual a 0,614 para o cimento, com adição de 1% de superplastificante.

Pode-se observar nessas pesquisas que a densidade de empacotamento do cimento, com e sem adição de aditivos varia de 0,55 até 0,63. Quando aplicadas no modelo de De Larrard, densidades de empacotamento de 0,55 para frações com dimensões inferiores a 0,15 mm, geram resultados inferiores de empacotamento quando comparados com a aplicação de densidade de empacotamento de 0,63. Contudo, a proporcionalidade do traço permanece inalterada.

Por exemplo, quando foi aplicado uma densidade de empacotamento de 0,55 para as partículas finas no método DL1: CAP (com maior proporção de partículas finas), obteve-se uma densidade de empacotamento máxima de 0,896 com 59% de pedrisco, 24% de areia e 17% de cimento. Quando foi aplicado uma densidade de empacotamento de 0,63 para este mesmo método, observou-se uma densidade de empacotamento máxima de 0,930 também para a proporção 59% de pedrisco, 24% de areia e 17% de cimento.

Isto justifica o valor médio de densidade de empacotamento de partículas finas (0,61) utilizado para a obtenção das composições pelo modelo de De Larrard, uma vez que, para concretos com até 18% de cimento a densidade de empacotamento das partículas finas não altera o resultado do traço.

### 3.2.4 Preparação dos materiais para produção dos concretos

Todos os agregados naturais e reciclados utilizados neste trabalho foram secos em estufa a 100°C até a constância de massa para o preparo do concreto. Além disso, parte dos agregados reciclados passaram por um processo de peneiramento para retirada do material com dimensão inferior a 0,15 mm, conforme especificado no item 3.2.3. Para isso foi utilizado um peneirador vibratório PRODUTEST modelo "G" da Telastem e peneiras "manupen" de (500 x 500 x 100) mm, mostrado na Figura 39.

Para o preparo do concreto em betoneira de eixo inclinado, os agregados reciclados (areia e pedrisco) foram pré-umidificados com 95% do total de absorção de água conforme o item 4.3.6. Durante o primeiro minuto de pré-umidificação, os agregados foram homogeneizados com o acionamento da betoneira e então mantidos em repouso por mais quatro minutos.

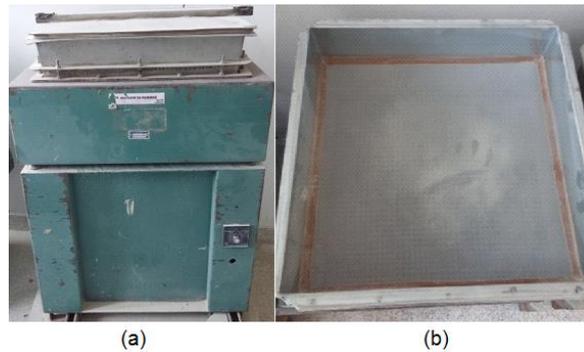


Figura 39: Peneirador vibratório, vista lateral (a) e superior (b)

Decorrido os cinco minutos, foi adicionado à betoneira, em movimento, o cimento Portland CP V ARI e, após um minuto foi adicionado a água até obter a relação água/cimento que atendeu os requisitos do item 3.2.5.

Para as misturas dos concretos de referência-laboratório seguiu-se a mesma seqüência, com exceção da pré-umidificação dos agregados.

### 3.2.5 Determinação do consumo de água

Para determinação do consumo de água de cada um dos quatro traços escolhidos foi utilizado o consistômetro de “VeBe”. Este equipamento é utilizado para determinação da consistência de concretos com reduzido teor de água, por meio da medida do tempo necessário para que um tronco de cone de concreto fresco consiga se remodelar para a forma cilíndrica, sob ação de uma vibrocompactação padronizada. Este tempo também é denominado grau “VeBe” (PETRUCCI e PAULON, 1998; DNIT, 2004).

O equipamento de “VeBe”, como pode ser observado na Figura 40 (a), é composto por uma mesa vibratória na qual é fixado um recipiente cilíndrico metálico.



Figura 40: Consistômetro de “VeBe”: equipamento e procedimento

Dentro deste recipiente o concreto é moldado, com auxílio de um cone, em três camadas com 25 golpes cada, semelhante ao corpo de prova para o ensaio de *slump test*, Figura 40 (b). Após a desforma e, antes de ligar a mesa, faz-se a leitura do abatimento na

escala da haste o qual deve ser igual a zero. Em seguida é posicionado sobre a face superior do cone de concreto um disco transparente de acrílico, fixado a uma haste graduada (nível 0) com um peso de 2,75 kg, Figura 40 (c). Este peso é fixado a um suporte que permite a movimentação somente no sentido vertical e com atrito reduzido.

Todas as superfícies que o concreto terá contato são pré-umidificadas. Para início do ensaio são acionados simultaneamente a mesa vibratória e um cronômetro. Através do disco transparente observa-se a expulsão do ar contido entre o disco e o concreto, além de permitir acompanhar a mudança de forma do tronco de cone em cilindro. No momento em que o concreto preenche toda a área do disco, o cronômetro e a mesa vibratória são desligados imediatamente, anotando-se o tempo decorrido.

Segundo Petrucci e Paulon (1998), o consumo de água ideal para concretos secos é definido quando o tempo de transformação do tronco de cone para um formato cilíndrico ocorre entre 20 a 30 segundos. Este é o intervalo de tempo necessário para que a água se espalhe por todo o concreto de consistência seca uniformemente, formando uma superfície lisa e horizontal, como mostrado na Figura 40 (d). Caso o tempo para essa transformação seja inferior a 20 segundos, significa que há água em excesso e, se for superior a 30 segundos, falta água na massa.

Assim, para garantir que todos os concretos secos estivessem em uma mesma faixa de consistência, utilizou-se o mesmo intervalo de 20 a 30 segundos no equipamento “VeBe”, para determinação da relação água/cimento de cada um dos quatro traços: dois do modelo de Funk e Dinger e dois do modelo de De Larrard. Assim, ao invés de fixar a relação água/cimento foi fixada a consistência do concreto, uma vez que este é um parâmetro fundamental para assegurar as mesmas propriedades de concretos vibrocompactados. Além disso, pelo fato de utilizar agregados porosos com grande proporção de material pulverulento, fica inviável garantir uma relação água/cimento específica, uma vez que são incertas a absorção de água desse agregado e a movimentação da água entre a pasta e a capa de argamassa das partículas.

Contudo, é preciso ressaltar que, o tempo “VeBe” deve ser ajustado conforme o equipamento de vibrocompactação em que o mesmo concreto será moldado, conforme será descrito no próximo sub-item.

### 3.2.6 Vibrocompactação

Na moldagem dos corpos de prova cilíndricos por vibrocompactação para caracterização de cada traço de concreto seco foi utilizado um dispositivo desenvolvido por Lima (2009). Esse dispositivo simula o comportamento de uma vibrocompactadora industrial.

Conforme pode ser observado na Figura 41, a vibrocompactadora de laboratório é composta por uma mesa vibratória fixada no solo e nivelada, sobre a qual está instalado um dispositivo constituído por cinco tubos guia verticais. Dentro de cada tubo, cilindros maciços de aço de 10,5 kg deslizam dentro dos tubos, exercendo pressão de compactação sobre os moldes, que ficam fixados na mesa e conectados na base de cada tubo. Esses cilindros simulam os pistões sobre os moldes, pressionando e compactando o concreto dentro de cinco moldes cilíndricos de (50x100) mm. Na extremidade superior dos moldes existem prolongamentos com tubos de PVC para garantir o total preenchimento dos moldes durante a vibrocompactação.

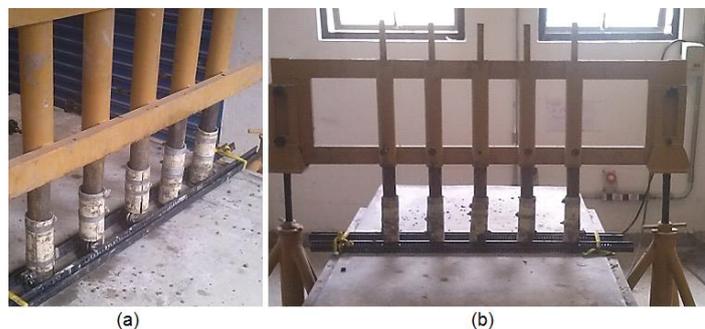


Figura 41: Vibrocompactadora de laboratório, vista lateral (a) e frontal (b)

Em seu trabalho, Lima (2009) fez a correlação entre a massa específica do concreto com o tempo necessário para a moldagem do mesmo na vibrocompactadora de laboratório. Assim, é possível definir o tempo equivalente de moldagem relacionando a massa específica do bloco produzido pela máquina industrial e a massa específica do corpo de prova produzido pela vibrocompactadora de laboratório. Exemplificando, para a vibrocompactadora industrial utilizada no estudo de Lima (2009), o tempo equivalente de moldagem foi de aproximadamente 27 segundos no laboratório, e 6 segundos no sistema industrial, para uma mesma massa específica. Isso porque a máquina industrial exercia uma força de 21 kgf para uma mesma área de aplicação de força, não considerando o efeito da vibração. Para Lima (2009), igualar a massa específica obtida por um ou outro método para um mesmo traço significa obter as mesmas características físicas e mecânicas.

Assim, Lima (2009) obteve o gráfico e a equação de correlação entre estas duas variáveis apresentados na Figura 42. Observa-se na legenda interna da Figura 42 um coeficiente de determinação estatístico linear de 0,9297.

A máquina industrial utilizada como referência para este trabalho, diferente da utilizada por Lima (2009), aplica uma força de 6 toneladas sobre 12 blocos de (10x20) cm. Assim, são aplicados 25.000 kg/m<sup>2</sup>, aproximadamente 4,7 vezes mais que o sistema alternativo de apenas 5347,61 kg/m<sup>2</sup>, ou seja, apenas 21,39% da carga aplicada na indústria.

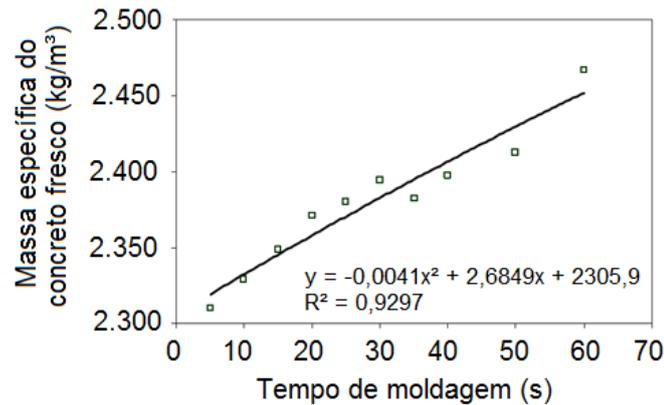


Figura 42: Tempo equivalente de moldagem x massa específica do concreto no estado fresco  
 Fonte: Adaptado de Lima, 2009.

Os procedimentos de caracterização dos equipamentos utilizados neste trabalho estão descritos no item 3.2.6.1.

Primeiramente, a fim de analisar os quatro traços estabelecidos pelo item 3.2.3 (traço seco) e 3.2.5 (a/c) em relação ao modelo de empacotamento utilizado e as condições de análise (com e sem o cimento incluso do cálculo), foi utilizado um tempo de vibrocompressão de 20 s. Tempo este estabelecido com base no menor tempo do consistômetro de “VeBe” (de 20s a 30s), uma vez que a vibrocompressão da mesa é mais intensa (como pode ser observado no item 4.6).

Feito isso, foram testados também, diferentes tempos de vibrocompactação com o traço referência-laboratório (agregados naturais) e com o melhor traço com agregados reciclados. Este ensaio teve o intuito de verificar se a vibrocompactadora de laboratório permite obter corpos de prova com a mesma massa específica obtida no equipamento industrial. Esta massa específica, relaciona todas as outras características do concreto (compressão e absorção), caso seja utilizado o mesmo traço e os mesmos materiais.

#### 3.2.6.1 Método de medição da vibração

Para poder medir a frequência, amplitude e aceleração foi utilizado o aquisitor de dados da marca Lynx - modelo ADS 2000 - interligado a um acelerômetro capacitivo Kyawa AS-5G posicionado no equipamento cuja vibração seria medida. O sensor foi configurado em um circuito de ponte completa, excitação de 5 V e frequência de amostragem de 1000 Hz. Os dados foram registrados por meio do software AQ Dados, e a análise pelo AQ Analysis. A análise da frequência de vibração foi realizada por meio de uma transformada rápida de Fourier, configurada no software como auto espectro e número de raios médio de 1025, com janela de compensação retangular.

### 3.2.7 Análise de desempenho do concreto

Os corpos de prova obtidos pela vibrocompactadora de laboratório foram curados no interior dos moldes por um período inicial de 24 horas, em local protegido de intempéries (câmara úmida), sem serem movimentados para evitar a incidência de fissuras, com suas superfícies protegidas por placas de vidro ou acrílico. Após este período inicial os corpos de prova foram desmoldados, identificados e mantidos em câmara úmida, porém imersos em solução saturada de hidróxido de cálcio, até a data de ensaio. Estes corpos de prova (CP) cilíndricos de (5x10) cm seguiram para as seguintes análises: resistência mecânica à tração por compressão diametral, resistência mecânica à compressão axial, MEV panorâmico e na zona de transição além da absorção de água, conforme Tabela 9.

Tabela 9: Detalhamento dos ensaios em corpos de prova (CP's)

Método de Ensaio	Norma utilizada	CP's por ensaio e por idade
Resistência à compressão diametral (7 e 28 dias)	NBR 7222 (ABNT, 1997)	6
Resistência à compressão axial (7 e 28 dias)	NBR 7215 (ABNT, 2013)	6
MEV (28 dias)	Ver item 3.2.7.1	1
Absorção de água (7 e 28 dias)	NBR 9778 (ABNT, 2013)	6
Massa específica seca e saturada (7 e 28 dias)	NBR 9778 (ABNT, 2009)	6
Índice de vazios (7 e 28 dias)	NBR 9778 (ABNT, 2009)	6

Para os ensaios de resistência à compressão axial e diametral foi utilizada uma taxa de aplicação de força de 0,5 MPa/s, sendo que para o ensaio de resistência à compressão axial foi utilizado um disco de neoprene para melhor distribuição da força sobre as superfícies dos corpos de prova.

Os resultados obtidos dos corpos de prova de concreto com agregados reciclados foram comparados aos resultados dos ensaios realizados nos blocos de concreto intertravado ensaiados segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013).

#### 3.2.7.1 Correção das resistências à compressão entre blocos e corpos de prova

Para comparar a resistência à compressão axial dos blocos e dos corpos de prova foi utilizado um coeficiente de transformação para diferentes relações altura/diâmetro estabelecida pela NBR 7680 (ABNT, 2015). Contudo, esta norma não define coeficientes quando a relação entre altura e diâmetro é menor que 1, que seria o caso dos blocos, com uma relação  $H/\phi = 0,71$ . Assim, partiu-se de uma equação do terceiro grau com coeficiente de determinação igual a 0,9982, que melhor descreveu a tendência do coeficiente de transformação "k" em função da relação  $H/\phi$  apresentados pela mesma norma, conforme mostra a Figura 43 (a).

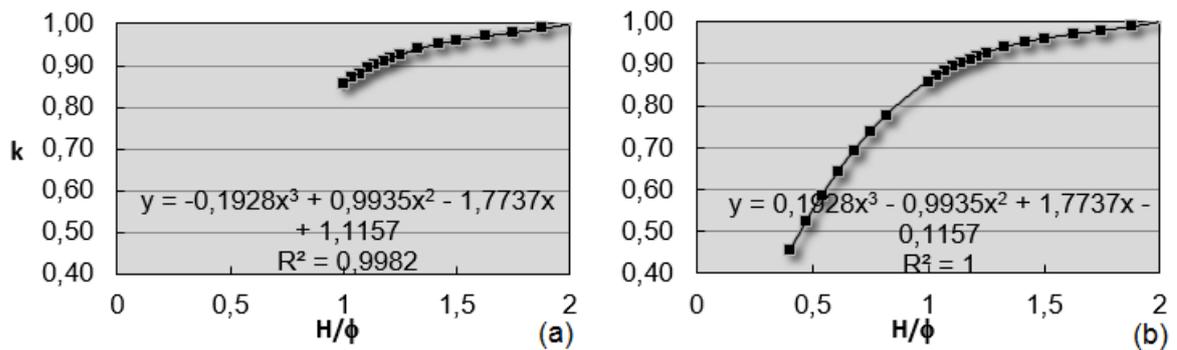


Figura 43: Coeficiente de transformação da resistência em função da relação  $H/\phi$

Desta equação do terceiro grau foram obtidos os valores para o coeficiente de transformação “k” para relações  $H/\phi < 1$ , conforme mostra a Figura 43 (b). Dessa forma, esta equação permitiu obter o coeficiente de transformação da resistência dos blocos (ensaiados com altura igual a 6 cm e diâmetro igual a 8,5 cm) para uma resistência equivalente para os corpos de prova de (5x10) cm de coincidentemente 0,71. Desta forma, para correção das resistências à compressão entre blocos e corpos de prova, as resistências dos blocos foram multiplicadas por 0,71.

É importante salientar que, para analisar este coeficiente de transformação, foram produzidos concretos com o traço da empresa para moldagem na vibrocompactadora industrial (blocos) e na vibrocompactadora de laboratório.

### 3.2.7.2 Ajuste das resistências à compressão entre cimentos (CP II F 32 e CP V ARI)

Foram utilizados dois tipos de cimento Portland para a obtenção dos concretos: o CP V ARI, utilizado na obtenção dos concretos com agregados reciclados e o CP II F 32, utilizado no concreto referência-empresa e no concreto referência-laboratório. Para que se pudesse fazer uma comparação entre os dois cimentos foram estabelecidos índices de ajuste entre os dois com base em dados fornecidos pelo fabricante (Itambé, 2014) e disponíveis no item 3.1.1. Aos 7 dias de idade a resistência média à compressão do CP V ARI fica em torno de 43 MPa e do CP II F 32 em torno de 34,8 MPa. Aos 28 dias 51,2 MPa e 42 MPa, respectivamente. Assim, como estes valores foram obtidos de argamassas padrões de mesmo traço, foram relacionadas estas resistências e observado que a resistência à compressão do CP V ARI aos sete dias é 26% maior que a do CP II F também aos sete dias e que, aos 28 dias esta diferença reduz para 22%. O valor da resistência à compressão da amostra de referência (produzido com CP II F) foi ajustado em 26% e 22% para as idades de 7 e 28 dias respectivamente, para que se pudesse comparar estes valores aos traços com agregados reciclados produzidos com CP V ARI.

### 3.2.7.3 *Microscopia eletrônica de varredura*

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizado no Laboratório de Análises de MEV e DRX da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Curitiba, em superfície fraturada de corpos de prova de concreto com 28 dias de idade. As amostras foram mantidas a 50°C durante um período de 24 horas anteriormente à execução do ensaio, para facilitar a execução do vácuo. As amostras foram metalizadas com alvo de ouro, (metalizador e evaporador Quorun, modelo Q150R ES). As micrografias foram obtidas por meio de um microscópio ZEISS, modelo EVO-MA15. Para esta análise foi observada a zona de transição entre o agregado reciclado e a pasta e o agregado natural e a pasta e também uma panorâmica para observação dos vazios nas amostras.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação dos resultados inicia na “Caracterização dos agregados das diferentes empresas” (item 4.1), no qual são apresentados os resultados do: “Teor de fragmentos do agregado reciclado” (item 4.1.1), “Teor de materiais pulverulentos” (item 4.1.2), “Distribuição granulométrica” (item 4.1.3), “Massa unitária, massa específica e massa específica aparente” (item 4.1.4), “Absorção de água e índice de vazios” (item 4.1.5) e “Morfologia” (item 4.1.6). Por fim é apresentado a “Escolha da empresa” (item 4.2), a “Caracterização do novo lote” (item 4.3), no qual são repetidos os ensaios do item 4.1, a “Determinação dos traços” (item 4.4), a “Determinação do melhor traço com agregados reciclados” (item 4.5), a “Determinação do tempo de equivalência entre os equipamentos de vibrocompactação” (item 4.6) e “Caracterização dos corpos de prova com o tempo equivalente” (item 4.7). Para encerrar é apresentada uma Discussão Geral, no qual são revisados e correlacionados os principais resultados.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS

#### 4.1.1 Teor de fragmentos do agregado reciclado

Na Figura 44 (a), (b), (c) e (d) são apresentados os resultados da análise visual e da massa dos fragmentos, obtidos segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004b) - Anexo A, de cada uma das empresas: A, B, C e D, respectivamente.

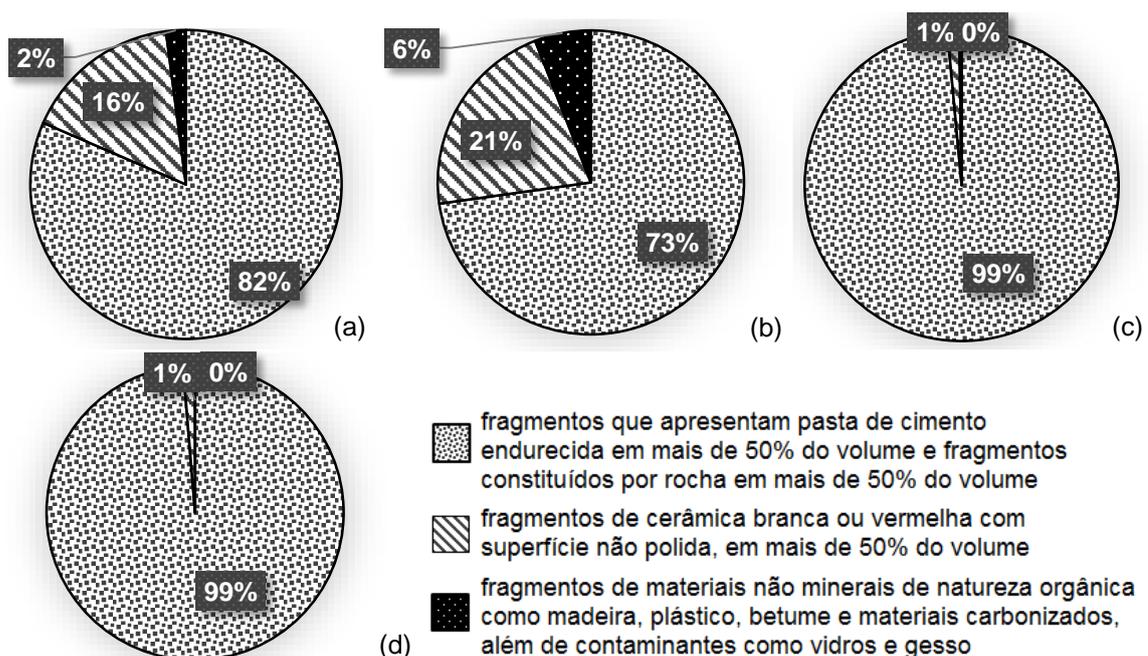


Figura 44: Composição dos agregados das empresas: A (a), B (b), C (c) e D (d)

Assim de acordo com os resultados da Figura 44, os agregados das empresas são classificados de acordo com a Tabela 10 em: agregado reciclado misto (ARM) e agregado reciclado de concreto (ARC).

Tabela 10: Classificação dos agregados

Empresa	Tipo de agregado
A	Agregado Reciclado Misto - ARM
B	Agregado Reciclado Misto - ARM
C	Agregado Reciclado de Concreto - ARC
D	Agregado Reciclado de Concreto - ARC

A presença de materiais cerâmicos no agregado reciclado pode prejudicar algumas qualidades do concreto, dependendo do nível de substituição. Isso ocorre, pois quanto maior a porcentagem de materiais cerâmicos, maior será o teor de absorção de água dos concretos e menor a resistência mecânica à compressão (AMADEI, 2011).

Além disso, por serem materiais menos resistentes ao desgaste por abrasão, agregados reciclados com elevados teores de material cerâmico, resultam em curvas granulométricas com elevado teor de finos e resultam em concretos com elevado desgaste superficial (BEJA, 2014).

De acordo com o teor de material cerâmico presente nas amostras, é recomendado a utilização dos agregados da empresa C ou da D. Contudo outras características também serão consideradas, em função dos resultados de outros ensaios.

#### 4.1.2 Teor de materiais pulverulentos

Pode-se observar na Figura 45 o teor de materiais pulverulentos ( $\leq 0,075$  mm) dos agregados miúdos AA, AB, AC e AD.

Comparando os resultados obtidos a partir dos ensaios previstos na NBR 15116 (ABNT, 2004b) com os previstos na NBR 7211 (ABNT, 2009) para agregados naturais, observa-se que esta apresenta valores bem menores (3% e 5%), confirmando o elevado teor de materiais pulverulentos presente nos agregados reciclados em comparação aos agregados naturais (15% e 20%).

É esperado que o agregado reciclado atenda as especificações da NBR 15116 (ABNT, 2004b), a qual define as porcentagens máximas de pulverulentos que podem estar presentes no agregado reciclado. Para os agregados miúdos reciclados, o teor máximo de pulverulentos, definido pela norma é de 15% para ARC e 20% para ARM. Sendo assim, apenas os agregados das empresas A, B e D atendem o limite estabelecido como máximo, pois a empresa C apresenta um desvio padrão ligeiramente superior, com um máximo de 16%.

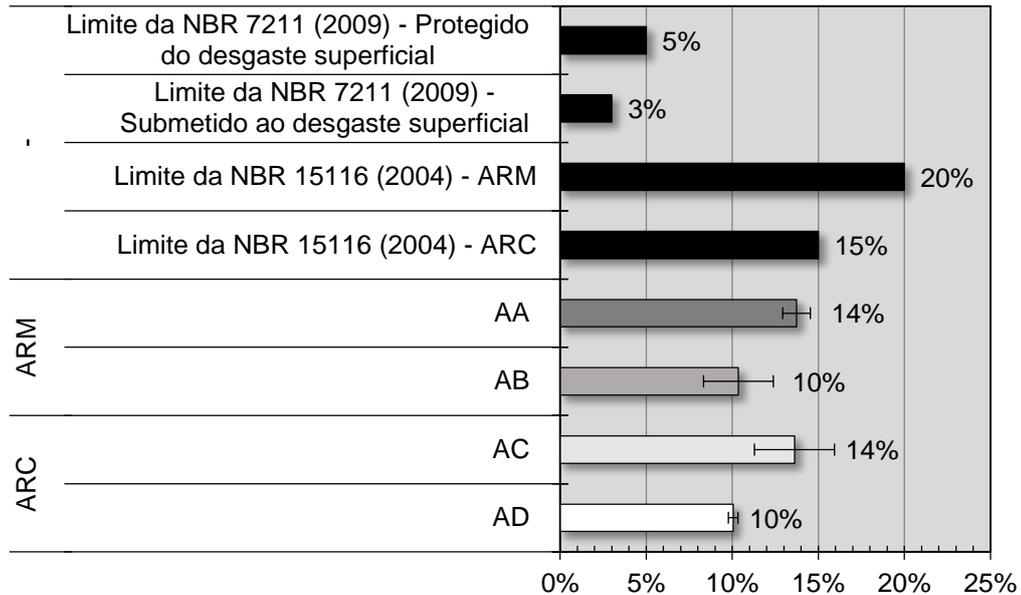


Figura 45: Teor de materiais pulverulentos dos agregados reciclados miúdos

Apresentar um teor de material pulverulento mais elevado que a norma significa que o concreto produzido com este tipo de agregado pode apresentar consistência mais seca. Isso ocorre pela elevação da superfície específica dos agregados que gera maior necessidade de água para dispersão das partículas. Nesse quesito, os agregados das empresas B e D se destacam das outras, por apresentarem menor teor de material pulverulento (10%).

Observando o desvio padrão apresentado pelas empresas, pode-se perceber que este foi maior para as empresas B (4,9%) e C (5%). Esses valores podem levar a hipótese de uma menor heterogeneidade do material destas duas empresas, já que a coleta das amostras foi realizada de igual forma para todas.

Da mesma forma, considerando o teor de materiais pulverulentos dos agregados graúdos das empresas, como observado na Figura 46, todas se apresentam dentro do limite estabelecido pela NBR 15116 (2004).

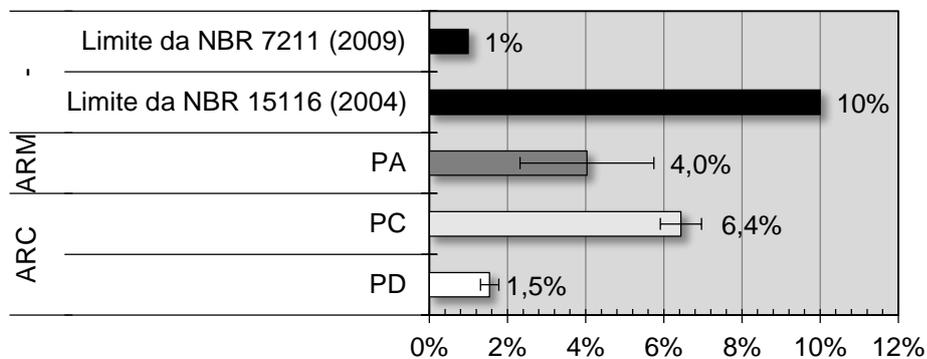


Figura 46: Teor de materiais pulverulentos dos agregados reciclados graúdos

A NBR 15116 (ABNT, 2004b) define que, para o agregado graúdo, o teor máximo de pulverulentos é de 10% tanto para ARC quanto para ARM. Enquanto a NBR 7211 (ABNT,

2009) estabelece um limite máximo de 1%. Dentro deste conceito, a empresa D é a única mais próxima deste valor com 1,5% de materiais pulverulentos.

Contudo, estar dentro dos limites em relação ao teor de materiais pulverulentos destas normas não significa que o agregado terá melhor empacotamento. Isso porque, os finos são igualmente importantes para o preenchimento do vazio entre as partículas. Por isso, é importante analisar a distribuição de toda a faixa granulométrica. Além disso, quando se analisa o teor de materiais pulverulentos estabelecido como ideal pelo modelo de empacotamento de Funk e Dinger ( $q=0,35$ ), esse está próximo de 17%, como será visto no item 4.1.3. Esse resultado indica que os agregados miúdos e graúdos da empresa C são os que estão mais próximos desse modelo.

#### 4.1.3 Distribuição granulométrica

Analisando a Figura 47, que apresenta as curvas granulométricas dos agregados miúdos AA, AB, AC e AD, pode-se observar também um elevado teor de partículas com dimensão inferior à 0,15 mm (entre 16 e 22%).

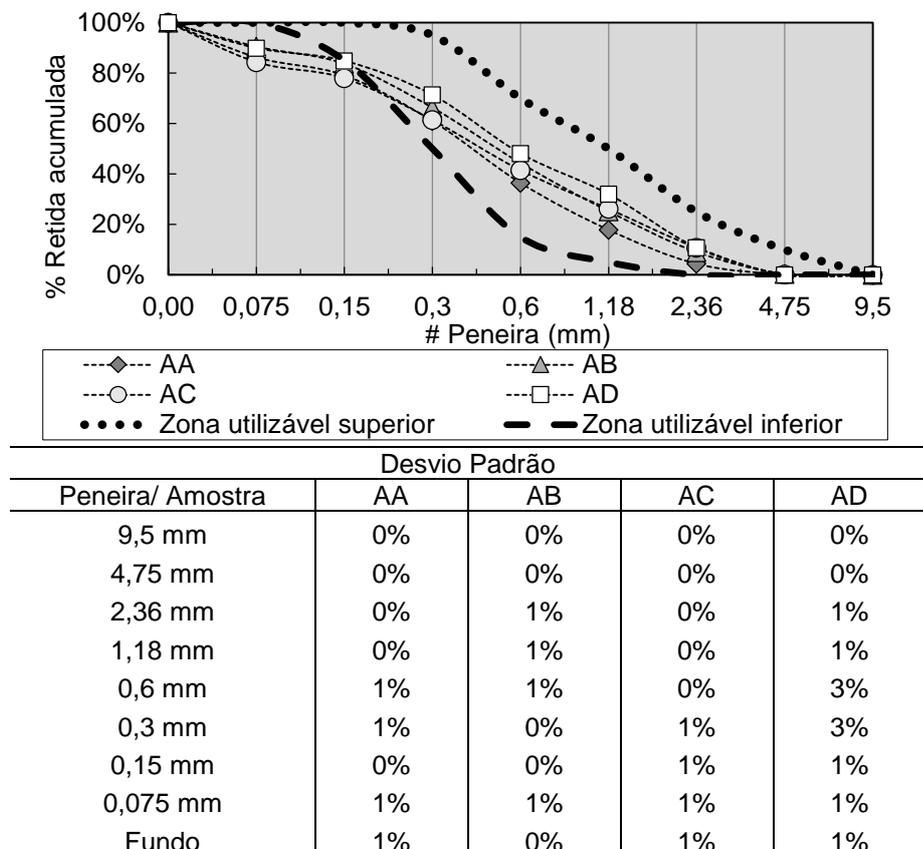


Figura 47: Curva granulométrica e desvio padrão dos agregados reciclados miúdos

Conforme pode-se observar na Tabela 11, segundo a classificação do agregado miúdo pela NBR 7211 (ABNT, 2009), as amostras se classificam como zona utilizável inferior

(MF = 1,55 a 2,2) e zona ótima (MF = 2,2 a 2,9) quando se considera apenas o módulo de finura.

Tabela 11: Classificação dos agregados miúdos segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009)

Amostra	Dimensão máxima característica (mm)	Módulo de Finura	Classificação segundo o módulo de finura	Classificação segundo a granulometria
AA	2,36	2,18	Zona utilizável inferior	Não classificável
AB	4,75	2,13	Zona utilizável inferior	Não classificável
AC	4,75	1,93	Zona utilizável inferior	Não classificável
AD	4,75	2,30	Zona Ótima	Não classificável

O fato das amostras não se encontrarem ao menos na zona utilizável prevista pela norma, segundo a granulometria é justificado pela grande quantidade de partículas com dimensão inferior a 0,15 mm presente em todas as amostras. Isso significa que as amostras obtiveram uma porcentagem retida acumulada inferior à desejada na peneira de 0,15 mm. Mesmo as amostras não atingindo a porcentagem retida acumulada necessária a peneira de 0,15 mm, elas apresentaram porcentagens retidas acumuladas suficientes em todas as outras peneiras da série normal da NBR 7211 (ABNT, 2009) (2,36 mm; 1,18 mm; 0,6 mm; e 0,3 mm).

Contudo é importante salientar que apesar dos agregados miúdos não estarem dentro dos parâmetros estabelecidos em norma, não significa necessariamente que não possam apresentar um elevado valor de empacotamento. Comprova-se isso com a análise da curva ideal pelo modelo de Funk e Dinger (1980), visto que ela também não se enquadra dentro dos limites da mesma norma, conforme pode ser analisado na Figura 48. Além disso, tem comportamento semelhante em relação a porcentagem de finos.

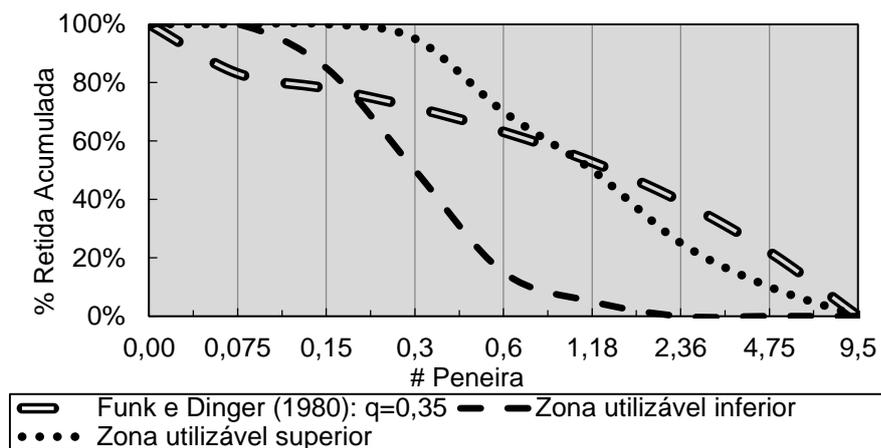


Figura 48: Comparação entre a NBR 7211 (ABNT, 2009) e o modelo de Funk e Dinger ( $D_s = 0,003$  mm;  $D_L = 9,5$  mm)

O valor do coeficiente de distribuição “ $q = 0,35$ ”, foi escolhido com base na revisão da literatura em que, segundo Schmidt *et al.* (2005) e Stutech (2005) apud Hüsken e Brouwers (2008) este valor pode maximizar o empacotamento para concretos *no-slump* (ver item 3.2.3).

Vale salientar que o coeficiente de distribuição é de difícil escolha sendo necessário levar em consideração característica como: a existência ou não de um fluxo de água; o nível e o tipo de pressão aplicada; o grau de mobilidade das partículas no decorrer do processo, entre outros fatores (ORTEGA *et al.*, 1997).

Conforme pode ser analisado na Figura 49, todos os agregados miúdos reciclados apresentam curvas granulométricas semelhantes, ou seja, estão dentro de um limite superior e inferior bastante restrito.

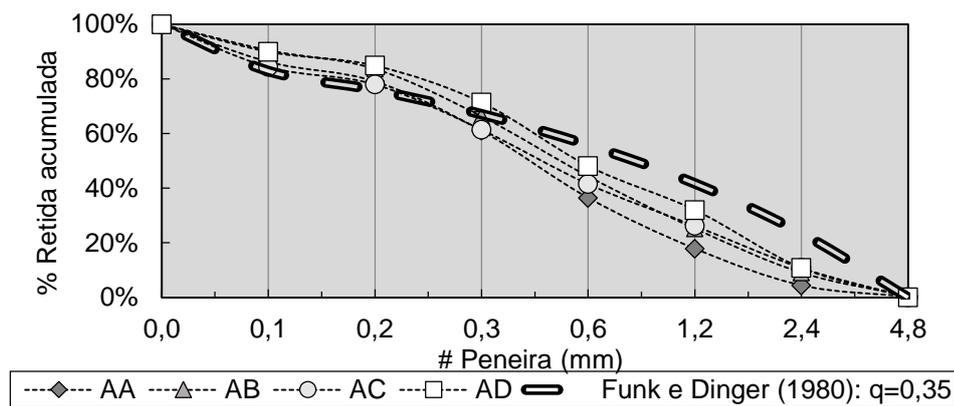


Figura 49: Comparação entre a distribuição granulométrica do modelo de empacotamento de Funk e Dinger ( $D_s = 0,003$  mm;  $D_L = 4,8$  mm), com valor de “q”=0,35 e as curvas granulométricas dos agregados reciclados miúdos

Quando comparadas ao modelo de empacotamento de partículas de Funk e Dinger, pode-se perceber que as curvas granulométricas de todos os agregados miúdos necessitam de mais partículas grossas (entre 0,6 mm e 2,4 mm) para poder se aproximar ainda mais da distribuição granulométrica de empacotamento máximo.

Esse fato torna impreciso determinar qual dos agregados miúdos tem o melhor empacotamento. Entretanto, apesar de todas as curvas granulométricas estarem próximas umas das outras, pode-se destacar que os agregados das empresas B e D, apresentam curvas mais próximas a da distribuição granulométrica de empacotamento máximo.

Da mesma forma que para os agregados miúdos, fez-se a comparação da distribuição granulométrica do modelo de empacotamento de Funk e Dinger e as distribuições granulométricas dos agregados graúdos BA, BC e BD, conforme pode ser analisado na Figura 50. Como a NBR 7211 (ABNT, 2009), não apresenta uma zona ótima ou utilizável para agregados graúdos, para fins de comparação foi realizado o ensaio de distribuição granulométrica para um agregado graúdo natural de origem granítica, comumente utilizado para produção de pavers. A empresa cujo agregado graúdo mais se aproximou da curva do agregado natural foi a da empresa D, entretanto, esta mesma empresa foi a que mais se distanciou da curva que representa o modelo de empacotamento de Funk e Dinger. O agregado graúdo da empresa C ficou mais próximo do modelo em comparação as outras

empresas, porém ainda relativamente longe. Dessa forma, sendo o agregado natural comumente utilizado na fabricação de pavers, sua distribuição está igualmente distante de uma distribuição que possa resultar na otimização do empacotamento de partículas.

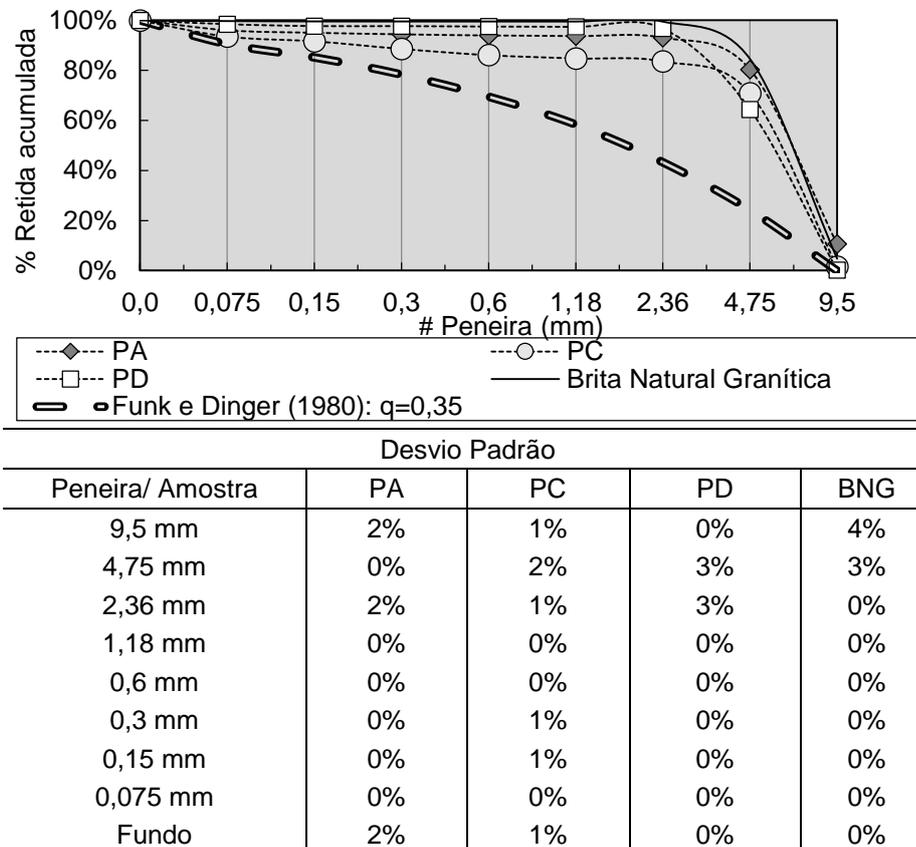


Figura 50: Curva granulométrica e desvio padrão dos agregados reciclados graúdos em relação ao modelo de Funk e Dinger ( $D_s=0,003$  mm;  $D_L=9,5$  mm)

Contudo, com combinações entre os agregados graúdos e miúdos, pode-se obter curvas bem mais próximas do modelo, como será observado no item 4.4.1.2. Como as curvas são muito próximas umas das outras não há como afirmar se a capacidade de redução dos vazios de uma é menor que outra apenas pela análise das curvas granulométricas. Assim, é preciso recorrer a outros tipos de análises físicas.

#### 4.1.4 Massa unitária

A massa unitária de um material representa a relação entre a massa das partículas e a unidade de volume que elas ocupam, incluindo nesta, vazios internos (poros) e espaços vazios entre as partículas. Como apresentado na revisão da literatura, partículas de mesma composição química e distribuição granulométrica podem apresentar morfologias diferentes e conseqüentemente índice de vazios e massas unitária diferentes.

Para agregados naturais a massa unitária varia de 1,30 a 1,75 g/cm<sup>3</sup> e é influenciada pelos seguintes fatores: modo de enchimento do recipiente (solto ou compactado), forma e volume do recipiente e umidade do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Na Figura 51 pode-se observar o intervalo aproximado de massa unitária, na condição seco, obtido para as areias recicladas, o qual varia entre 1,17 g/cm<sup>3</sup> até 1,41 g/cm<sup>3</sup> para o estado solto e 1,22 g/cm<sup>3</sup> até 1,48 g/cm<sup>3</sup> para o estado compactado. O menor valor de massa unitária na condição seca dos agregados reciclados em relação aos agregados naturais deve-se principalmente à elevada porosidade da capa de argamassa aderida na superfície da partícula rochosa, às fissuras internas não permeáveis provocadas pela rebitagem do material e também devido à presença, mesmo que em menor proporção, de materiais cerâmicos e gesso.

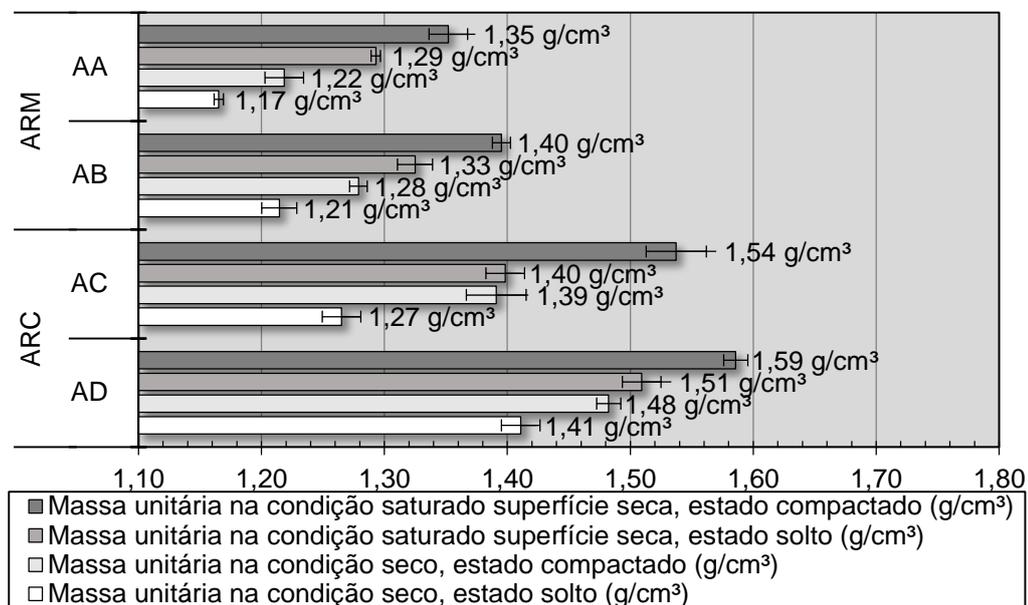


Figura 51: Massa unitária no estado solto e compactado dos agregados reciclados miúdos

A amostra que apresentou a maior massa unitária média em todas as condições e estados foi a da empresa D, seguida da empresa C, B e por fim, a da empresa A. O decréscimo da massa unitária apresentada por estas amostras está relacionada principalmente ao índice de vazios que, como pode ser visto no item 4.1.6, também decresce de AD para AA. Os resultados de distribuição granulométrica também podem contribuir para a análise desses resultados, uma vez que a amostra AD possui uma distribuição mais próxima do modelo de empacotamento máximo que as outras empresas, o que justifica, além da maior massa unitária, um menor índice de vazios.

É possível observar na Figura 51, que para a amostra AC, os valores de massa unitária no estado compactado e solto possuem diferenças mais pronunciadas que nas outras amostras, o que também pode ser observado nos resultados de índice de vazios (4.1.6). A

hipótese para esta constatação é que na compactação, ocorra a fratura da capa de argamassa, ou seja, partículas finas acabam se desprendendo e preenchendo os vazios entre as partículas maiores, melhorando assim o empacotamento do material. Contudo, esta diferença também pode estar relacionada a rugosidade das partículas, uma vez que as partículas mais rugosas tendem a ter uma dificuldade maior de compactação. Assim, ao aplicar algum tipo de compactação, os contatos entre superfícies rugosas são quebrados e as partículas sofrem um rearranjo, o que pode melhorar o empacotamento.

Um outro resultado da Figura 51, aponta a diferença entre a massa unitária seca e a massa unitária na condição saturado, tanto no estado seco como no estado compactado, podendo-se observar que devido a menor absorção de água do agregado da amostra AD (item 4.1.6), esta diferença é menor para a empresa D ( $\sim 0,10 \text{ g/cm}^3$ ).

Na Figura 52 é apresentado o intervalo aproximado de massa unitária dos agregados reciclados graúdos na condição seco, o qual varia entre  $1,06 \text{ g/cm}^3$  até  $1,50 \text{ g/cm}^3$  para o estado solto e de  $1,15 \text{ g/cm}^3$  até  $1,61 \text{ g/cm}^3$  para o estado compactado. Valores estes também inferiores aos agregados naturais, assim como para os agregados miúdos.

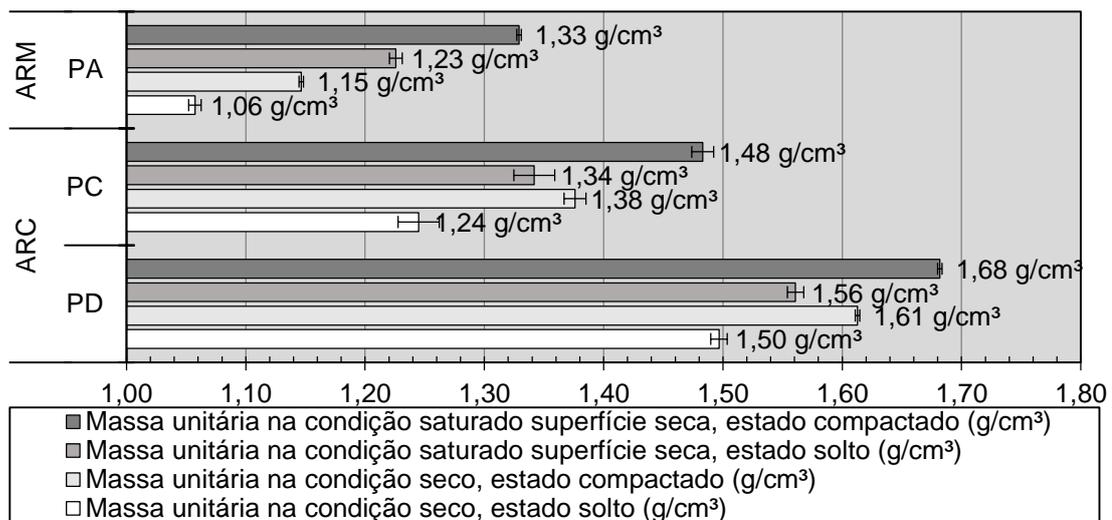


Figura 52: Massa unitária dos agregados reciclados graúdos

Apenas para a amostra PD, todos os valores de massa unitária do agregado graúdo foram superiores a amostra de agregado miúdo da mesma empresa, AD (Figura 51). Para as amostras PA e PC (graúdos), todos os valores de massa unitária foram superiores aos das amostras AA e AC (miúdos), respectivamente. Isto pode ser explicado pelo fato de a amostra PD quase não apresentar uma capa de argamassa aderida, constituindo-se em sua maioria de material rochoso. Em contrapartida, a amostra AD retém a maior parte dos outros constituintes do concreto, como a areia e a pasta endurecida. Essa afirmação pode ser confirmada por meio da análise da massa específica (4.1.5) da amostra AD, de  $2,12 \text{ g/cm}^3$  e da amostra PD, de  $2,64 \text{ g/cm}^3$ , bastante superior. Esses resultados indicam que o efeito da

massa específica, neste caso, supera o efeito do índice de vazios. Para as outras amostras esse fenômeno já não ocorre e, devido ao maior índice de vazios das amostras PA e PC, os valores de massa unitária são inferiores (por exemplo 1,33 g/cm<sup>3</sup> e 1,40 g/cm<sup>3</sup> respectivamente) aos valores de AA e AC (por exemplo 1,35 g/cm<sup>3</sup> e 1,48 g/cm<sup>3</sup> respectivamente) respectivamente. A distribuição granulométrica mais uniforme e mais próxima do modelo de empacotamento de partículas das amostras de agregado miúdo em relação ao graúdo também explica essa relação.

De modo similar para os pedriscos, as duas massas unitárias, na condição seco e na condição saturado superfície seca, tanto no estado solto como no compactado, foram maiores para as amostras PD, seguido das amostras PC e PA bem como os resultados obtidos para os agregados miúdos.

Outro fator relevante a ser explicado na Figura 52, está na diferença entre as duas massas unitárias (seco e saturado superfície seca). Para os agregados graúdos da empresa D (PD), esta diferença não é grande, enquanto que para os agregados das empresas A e C é bastante elevada. Assim, os agregados dessas empresas confirmam o maior índice de vazios (item 4.1.6).

Ainda analisando a Figura 52 observa-se que a mudança do estado solto para o compactado apresenta um acréscimo maior para PC e PD (ARC) que para PA (ARM). E essa influência é maior que a presença da água no interior das partículas (estado saturado superfície seca), indicado que o índice de vazios entre as partículas reduz.

#### 4.1.5 Massa específica real e massa específica aparente

A massa específica aparente representa a relação entre a massa das partículas e o volume de material, incluindo os vazios internos permeáveis ou impermeáveis contidos nas partículas e excluindo-se os vazios entre as partículas. A massa específica real é a massa da unidade de volume, excluindo desta os vazios internos permeáveis e os vazios entre as partículas (ABNT, 2009). Para rochas comuns de granito, arenito e calcário a massa específica real varia de 2,60 e 2,70 g/cm<sup>3</sup> (MEHTA e MONTEIRO, 2008), considerando que este tipo de agregado tem baixo índice de vazios no interior das partículas (em torno de 2%).

A massa específica real de agregados reciclados pode ser facilmente determinada por picnometria, contudo o método de determinação da massa específica aparente destes materiais descrito na NBR NM 52, sofre algumas críticas (LEITE, 2001; ULSEN 2011). Diferente dos agregados naturais, os agregados reciclados possuem elevado índice de vazios internos (partículas com porosidade aberta) devido a capa de argamassa aderida na superfície, a qual facilita a percolação de água. Assim, no processo de secagem dos agregados reciclados, para obter a condição saturado superfície seca, descrita na norma, não

somente a capa de água da superfície pode ser retirada, mas também a dos vazios internos. Além disso, o material pulverulento pode ser disperso devido a ação de secagem do material, o que sem perceber, pode alterar o resultado.

Embora as críticas sejam pertinentes, o ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR NM 52, uma vez que a mesma ainda está em vigor e não foram encontrados outros métodos possíveis de serem executados com os equipamentos disponíveis. Além disso, neste caso, o desvio padrão das amostras não foi elevado, conforme mostra a Figura 53.

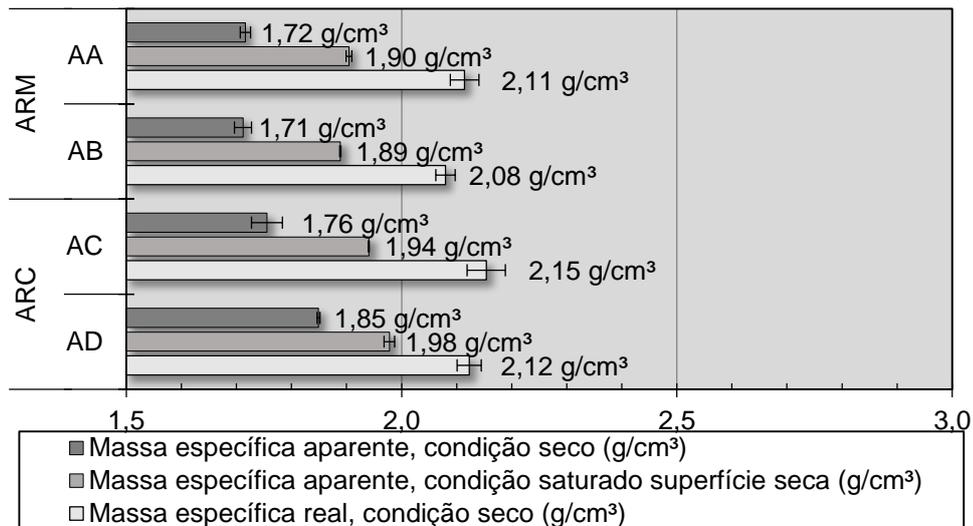


Figura 53: Massa específica real e aparente dos agregados reciclados miúdos

Sendo assim, na Figura 53 pode-se observar as massas específicas reais e aparentes dos agregados miúdos de todas as empresas. Estatisticamente, todos os agregados miúdos das empresas apresentaram a mesma massa específica real. Contudo, a diferença entre a massa específica real e a aparente da amostra AC, como das amostras AA e AB, são maiores que a amostra AD, o que sugere um maior número de poros abertos (vazios internos permeáveis) nas primeiras. As amostras AA e AB por serem ARM, possuem maior proporção de materiais cerâmicos, proporcionalmente mais leves e com maior número de vazios internos. Da mesma forma, foi observado que a amostra AC apresenta uma capa de argamassa mais espessa sobre o agregado rochoso que a amostra AD, o que pode ter causado a diferença entre as duas.

Na Figura 54 têm-se as massas específicas dos agregados graúdos. Os agregados das empresas com massa específica real mais elevada foram o PC e o PD (ARC). Sendo que a amostra PD possui uma massa específica real superior, o que confirma mais uma vez a maior proporção de capa de argamassa nos agregados da empresa C, uma vez que os dois são agregados reciclados de concreto e a pasta possui massa específica menor que a do agregado natural.

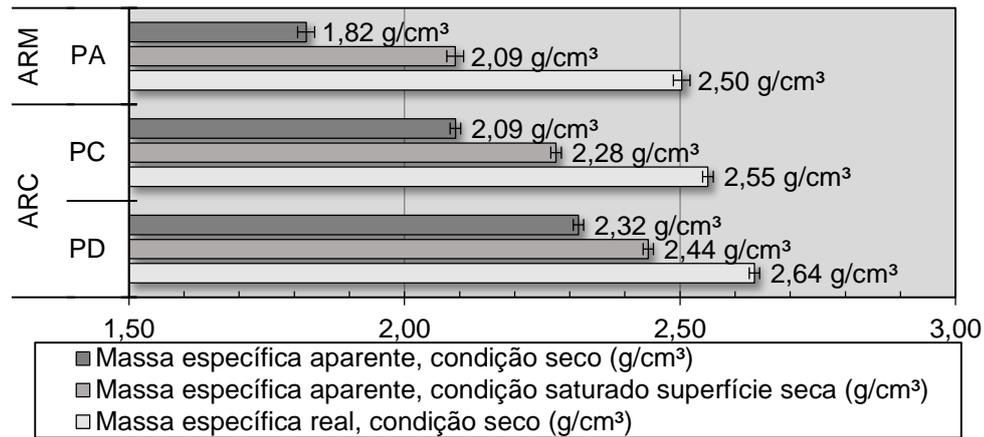


Figura 54: Massa específica real e aparente dos agregados reciclados graúdos

O valor mais elevado das massas específicas real e aparente e da massa unitária dos agregados graúdos em relação aos agregados miúdos, deve-se principalmente ao fato de os agregados graúdos possuírem maior percentual volumétrico de agregados naturais graúdos e os agregados miúdos, maior percentual de argamassa.

#### 4.1.6 Absorção de água e índice de vazios

Na Figura 55 observa-se que os agregados reciclados miúdos de todas as empresas estão dentro dos padrões estabelecidos pela NBR 15116 (2004).

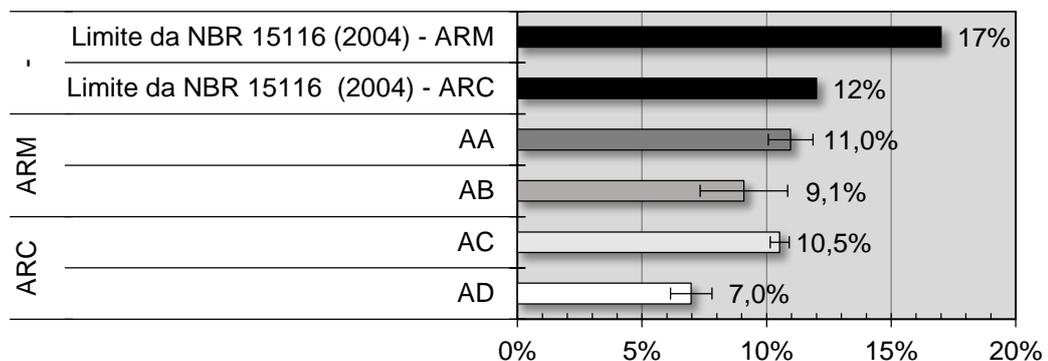


Figura 55: Valores de absorção de água dos agregados reciclados miúdos

Como principal resultado, a amostra AD foi a que, aparentemente, apresentou o menor valor de absorção de água (7%), embora todas as amostras sejam estatisticamente iguais. Isso comprova as análises anteriores sobre o fato dos agregados miúdos da empresa D apresentarem uma capa de argamassa menos espessa e a maior massa específica aparente.

Dos resultados apresentados na Figura 56, apenas o agregado graúdo da empresa D, está dentro do parâmetro estabelecido pela NBR 15116 (2004) para agregados graúdos reciclados de concreto.

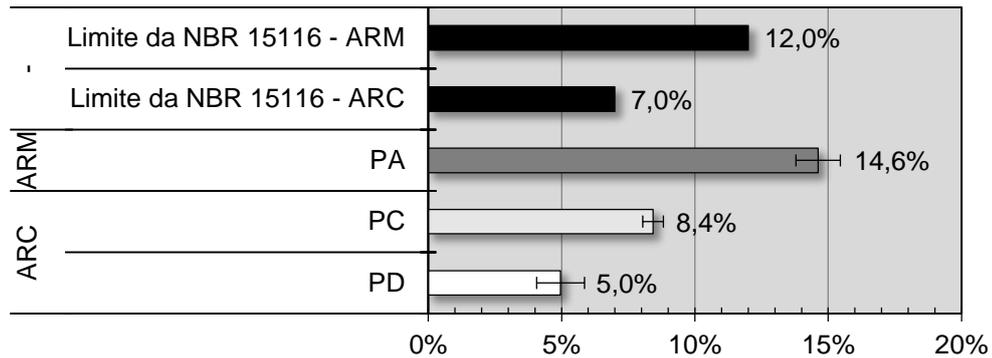


Figura 56: Valores de absorção de água dos agregados reciclados graúdos

Para agregados miúdos naturais o índice de absorção de água é em torno de 1% a 2,5% (LEITE, 2001), muito abaixo dos valores apresentados pelos agregados reciclados. A maior absorção de água dos agregados reciclados, pode ser explicada mais uma vez, pela capa de argamassa aderida, uma vez que parte da água disponível para hidratação do cimento será absorvida pelos vazios internos das partículas. Outra justificativa para valores elevados de absorção de água é a presença de materiais cerâmicos, que geralmente possuem elevado volume de vazios internos. Essas considerações podem ser observadas no elevado valor de absorção de água da amostra PA e somente a presença da capa de argamassa em PC, comparadas a PD.

Na Figura 57 e Figura 58 pode-se observar que os agregados da empresa D são os que apresentam menor índice de vazios, seguido próximo pelos da empresa C.

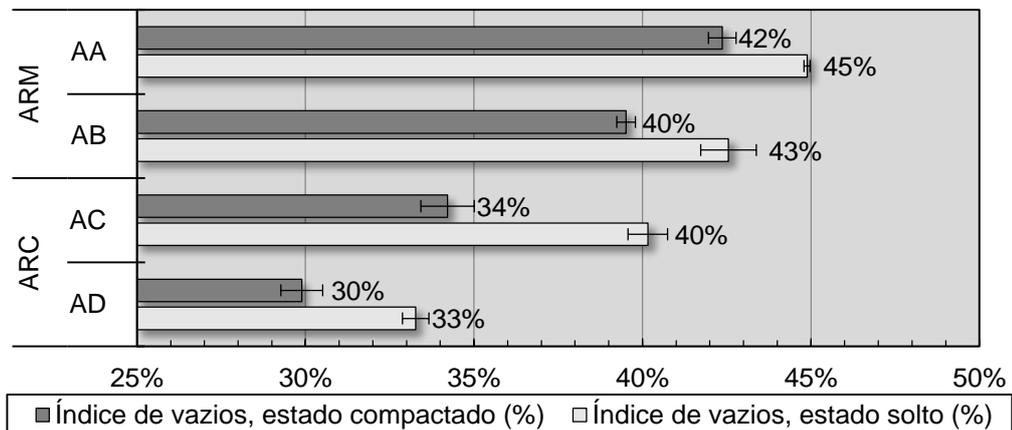


Figura 57: Índice de vazios dos agregados reciclados miúdos

Contudo, em ambos os casos, a diferença entre o índice de vazios no estado solto para o estado compactado é maior para a amostra AC, mostrando que esta empresa responde melhor aos efeitos da compactação. Isso conduz a suposição de que as partículas tenham superfícies mais rugosas, conforme citado no item 4.1.4, porém, também pode estar ligada a uma baixa resistência da capa de argamassa, que ao ser compactada se reduz a partículas menores que preenchem os vazios das maiores.

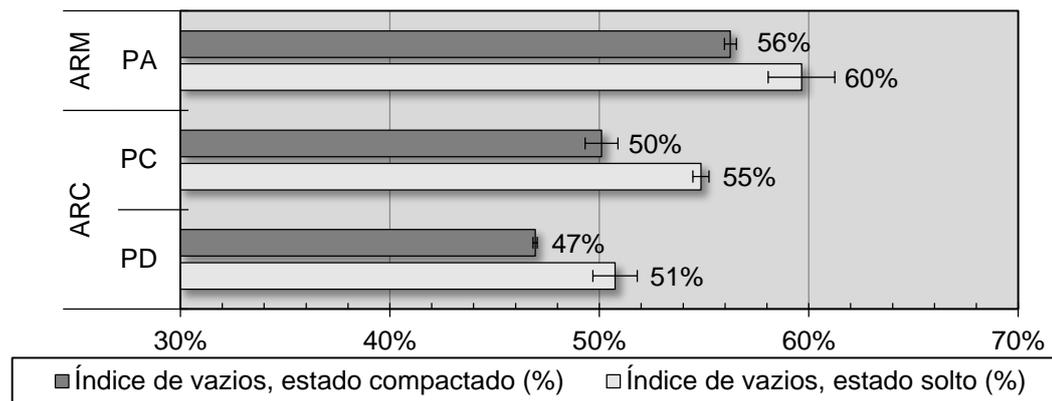


Figura 58: Índice de vazios dos agregados reciclados graúdos

Ter uma maior diferença no índice de vazios entre o estado solto e compactado pode ou não ser uma vantagem para o concreto. Será uma desvantagem caso a conformação do concreto não envolva compactação mas, pode ser uma vantagem nos processos de vibrocompactação, pois pode auxiliar no empacotamento das partículas.

Em contrapartida, partículas com maior dificuldade de compactação apresentarão maiores custos com a moldagem, e com o consumo de cimento.

Mesmo que isoladamente os agregados da empresa D tenham menor índice de vazios, não é possível afirmar, somente com esta informação, qual das empresas possui menor índice de vazios quando se faz a composição entre estes agregados.

Ao serem combinados no traço de concreto, agregados graúdos e miúdos poderão resultar em uma distribuição de partículas mais homogênea, na qual partículas menores irão preencher os vazios das maiores.

#### 4.1.7 Morfologia

Com os resultados obtidos pela análise de imagens foi possível calcular o coeficiente de forma de cada agregado. Considera-se que, quanto mais próximo do valor unitário (1,000) for o coeficiente de forma mais arredondada é a partícula.

Dessa forma, os resultados apresentados na Figura 59, mostram que o agregado miúdo da empresa C (AC) é o que apresenta a forma mais arredondada (coeficiente de forma igual a 0,329), apesar deste valor estar distante de ser uma esfera perfeita mas, tem valor melhor que partículas de areia quartzítica.

Areia naturais e artificiais apresentam coeficientes de forma entre 0,187 e 0,255, respectivamente (FABRO *et al.*, 2011).

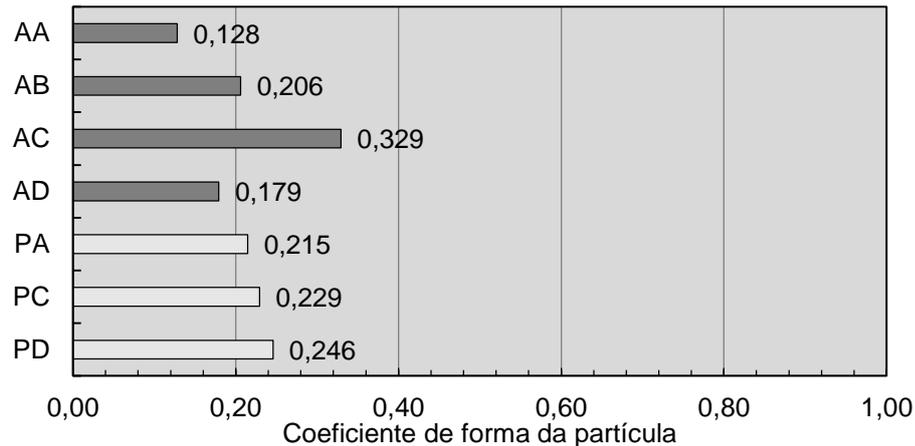


Figura 59: Coeficiente de forma dos agregados das empresas

O agregado miúdo reciclado da empresa B (AB) obteve coeficiente de forma igual a 0,206, semelhante ao das areias artificiais e o agregado miúdo da empresa D (AD), obteve coeficiente de forma igual a 0,179, mais semelhante ao das areias naturais. O agregado miúdo AC foi o que apresentou maior coeficiente de forma (0,329) indicando a presença de partículas mais arredondadas, característica esta, importante para a obtenção de maiores densidades de empacotamento.

Em relação ao coeficiente de forma dos agregados graúdos (PA, PC e PD), estes apresentaram resultados bastante semelhantes com diferenças apenas na segunda casa decimal (0,215; 0,229 e 0,246; respectivamente).

#### 4.2 SELEÇÃO DO AGREGADO IDEAL

Com base nos resultados de caracterização dos agregados e suas considerações apresentadas no item 4.1 resultou a Tabela 12, com os índices de cada uma das empresas em relação a cada um dos ensaios realizados. Estes foram estabelecidos pelos critérios citados no item 3.2.1 e analisados em relação ao empacotamento. Cabe ressaltar que estes são critérios subjetivos, porém essenciais a escolha do agregado. Dentre os parâmetros escolhidos, o teor de fragmentos é importante para obtenção de maiores resistências à compressão, uma vez que a utilização de materiais com maiores quantidades de material cerâmico, gesso e outros tende a ser prejudicial a esta propriedade do concreto. Assim, as empresas C e D são as que apresentam os menores teores destes materiais, com iguais índices de 4 por possuírem as duas 99% de material à base de concreto e, as empresas A e B com índices 3 e 2, respectivamente, por possuírem teores superiores destes materiais deletérios, 82% e 73% de material à base de concreto.

Tabela 12: Parâmetros dos agregados das empresas

Parâmetro	Empresa			
	A	B	C	D
Teor de fragmentos	3	2	4	4
Agregado miúdo				
Teor de pulverulentos	4	3	4	3
Distribuição granulométrica	1	2	3	4
Massa unitária	1	2	3	4
Massa específica real	4	4	4	4
Massa específica aparente	2	2	3	4
Absorção de água	3	3	3	4
Índice de vazios	1	2	3	4
Morfologia	1	3	4	2
Total	17	21	27	29
Agregados graúdos				
Teor de pulverulentos	3	0*	4	2
Distribuição granulométrica	3	0*	4	2
Massa unitária	2	0*	3	4
Massa específica real	2	0*	3	4
Massa específica aparente	2	0*	3	4
Absorção de água	2	0*	3	4
Índice de vazios	2	0*	3	4
Morfologia	2	0*	3	4
Total	18	0*	26	28

\*não há agregado para este dado

Em relação ao teor de pulverulentos do agregado graúdo e miúdo, o agregado da empresa C foi o que mais se aproximou do teor estabelecido pelo modelo de 17%. Por isso, para os agregados miúdos esta empresa pontuaram igual a empresa A, com 14% superior as empresas B e D com 10%. Da mesma forma, para o agregado graúdo, a amostra da empresa C ficou com índice 4 (6,4%) seguida da amostra da empresa A com índice 3 (2,4%) e da amostra da empresa D com índice 2 (1,5%).

Quando se considera a curva granulométrica em separado do agregado miúdo, a empresa que mais se assemelha a distribuição granulométrica do modelo, dentro do intervalo de tamanho de partículas mínimo e máximo é a empresa D (índice 4) e para o agregado graúdo é a empresa C (índice 4). Ter uma curva granulométrica mais próxima da ideal pode auxiliar na obtenção de composições com distribuição de tamanhos de partículas mais próximas do modelo de empacotamento.

Quando se analisa as massas unitárias e específicas dos agregados, fica evidente que o da empresa C apresenta uma capa de argamassa mais espessa que o da empresa D. Isto contribui para o travamento mecânico do concreto o que por um aspecto, melhora algumas propriedades como por exemplo, a resistência ao cisalhamento da zona de transição. Sob outro aspecto, pode dificultar a moldagem, sendo necessário aumentar o tempo de vibrocompactação, como será analisado em itens posteriores. De qualquer forma, as maiores massas unitárias foram encontradas para as amostras da empresa D. Com relação a

morfologia das partículas, os agregados miúdos da empresa C e os agregados graúdos da empresa D levam vantagem pela forma mais arredondada.

Com base em todos os resultados das caracterizações para uso em concreto seco, a ser utilizado no processo de vibrocompactação e com apoio de modelos teóricos para potencializar o empacotamento de partículas, os agregados com maiores pontuações (índices) foram os das empresas C e D. Contudo no período da dissertação a empresa D deixou de operar e como não havia possibilidade de acesso aos agregados, decidiu-se por continuar os estudos apenas com a empresa C.

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DO LOTE DE TRABALHO

Uma vez selecionado o agregado da empresa C, novos lotes com 5 m<sup>3</sup> cada, de areia (ACI) e de pedrisco (PCI), foram adquiridos e caracterizados. A fim de relacionar os resultados obtidos com o primeiro e o segundo lote de agregados da empresa C e verificar as mudanças ocorridas em todos os aspectos dos agregados reciclados, foram elaborados novamente todos os ensaios de caracterização. Além disso, também foram elaborados os ensaios de composição mineralógica, distribuição granulométrica dos materiais finos passantes na peneira 0,075 mm por difração à laser e massa unitária em cada fração granulométrica. Este último para poder ser aplicado ao modelo de empacotamento de De Larrard.

##### 4.3.1 Teor de fragmentos do agregado reciclado

Em relação à diferença entre os teores de fragmentos dos agregados reciclados do primeiro e do segundo lote, observa-se, analisando a Figura 60, que o segundo lote, apesar de conter menor proporção de agregados oriundos de concretos e argamassas, ainda é classificado pela NBR 15116 como ARC (agregado reciclado de concreto).

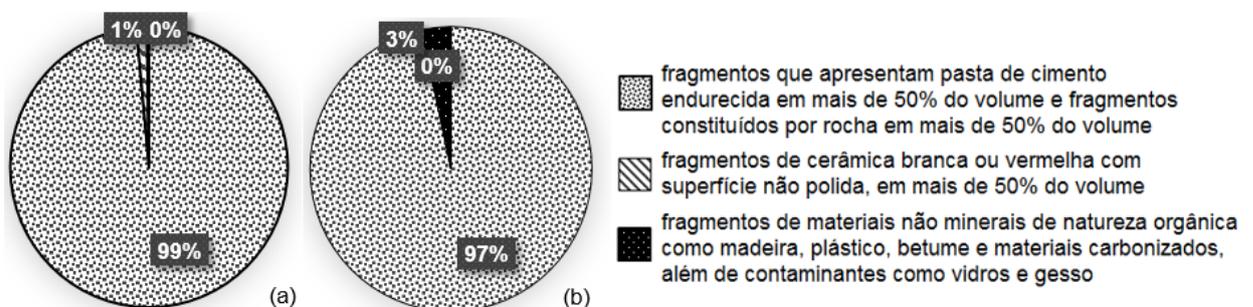


Figura 60: Comparação entre o teor de fragmentos do agregado reciclado do primeiro (a) com o segundo lote (b)

O segundo lote apresenta 3% de fragmentos de materiais não minerais em grande parte constituído por madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, e gesso, materiais

estes que, apesar de apresentarem baixos teores podem vir a modificar alguns resultados obtidos para o concreto.

#### 4.3.2 Teor de materiais pulverulentos

Em relação ao teor de materiais pulverulentos percebe-se, analisando a Figura 61, que o agregado miúdo do segundo lote (ACI), apresentou grande diferença em comparação com o lote anterior com um valor mais elevado. Além disso, o teor de finos superou o estipulado para sua classe (ARC) e também para agregados reciclados mistos (ARM). Isso significa que o concreto produzido com este agregado tem grandes chances de ter elevado consumo de água, necessário para recobrir as partículas, aumentando o consumo de cimento.

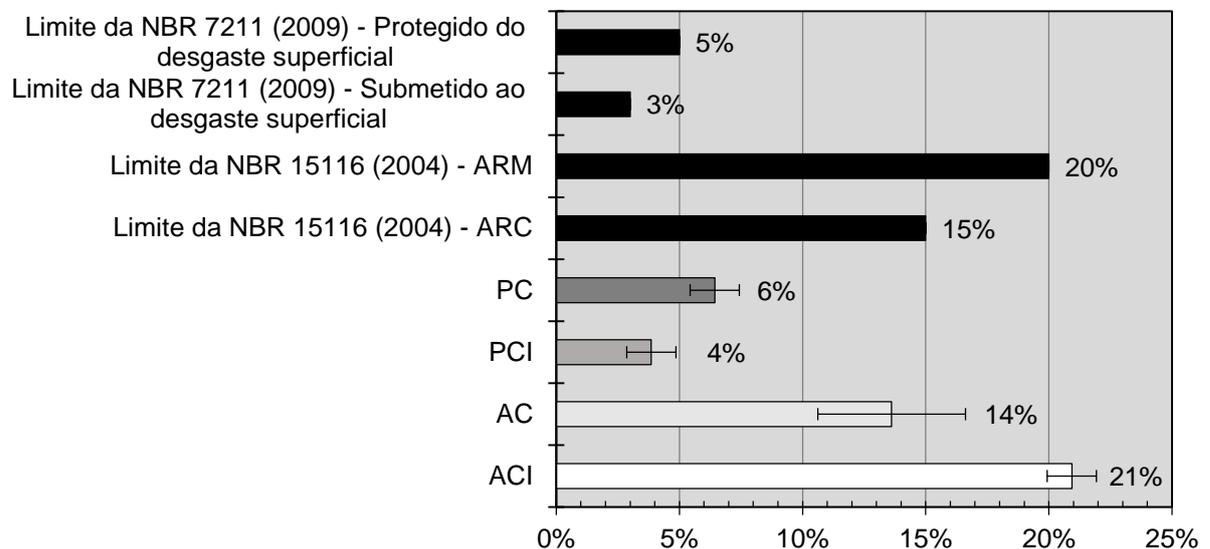


Figura 61: Teor de materiais pulverulentos em comparação com o novo lote

Em contrapartida o agregado graúdo do novo lote (PCI), apresentou menor teor de material pulverulento, o que vem a ser um fator positivo em relação a norma, uma vez que este atingiu os limites da NBR 7211 (2009) para agregados naturais. Contudo, por hora, em relação ao empacotamento não há como afirmar se este é um fator positivo ou não.

#### 4.3.3 Distribuição granulométrica

Com as curvas granulométricas apresentadas nas Figura 62 e Figura 63, percebe-se uma redução das porcentagens retidas entre as peneiras 1,2 mm e 0,15 mm (17%) e um aumento das porcentagens retidas nas peneiras 4,75 mm, 2,36 mm (12%) e menor que 0,075 mm (7%).

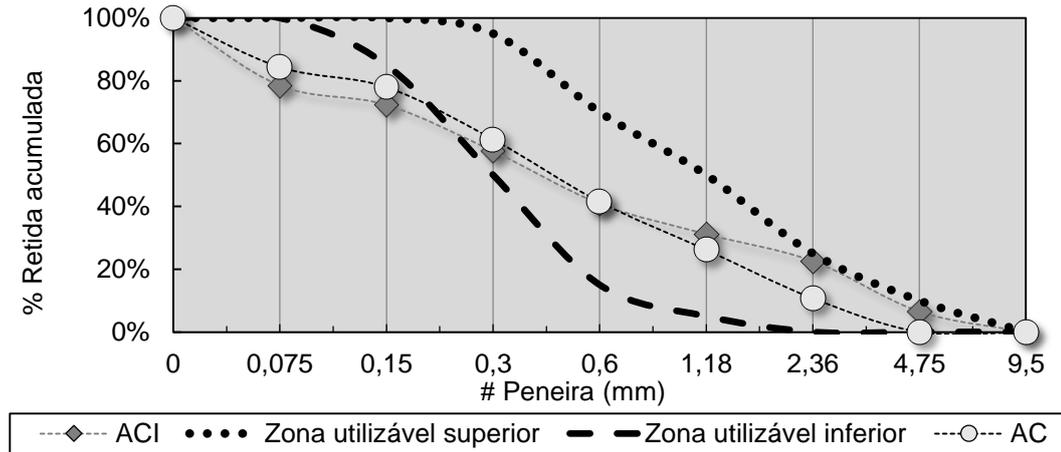


Figura 62: Distribuição granulométrica dos agregados miúdos em comparação com o novo lote

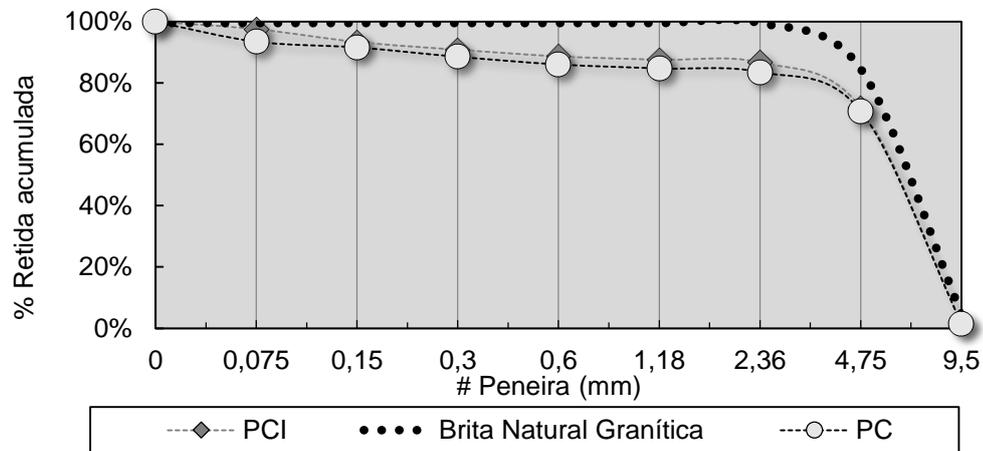


Figura 63: Distribuição granulométrica dos agregados graúdos em comparação com o novo lote

Para o agregado graúdo do novo lote, as diferenças não foram tão relevantes como para o agregado miúdo, não ultrapassando os 2% apresentados pelo teor de materiais pulverulentos.

#### 4.3.3.1 Desgaste por abrasão

Os resultados deste ensaio, apresentados na Figura 64, mostraram que este desgaste não é relevante. Até mesmo porque em todos os casos, a porcentagem de material passante após abrasão foi menor que a porcentagem de material fino antes do ensaio. Este resultado pode ser explicado pela grande perda de material, tanto durante a pesagem dos materiais como durante a realização do ensaio (introdução dos materiais na betoneira de eixo inclinado). Percebe-se que devido ao elevado teor de material fino, a manipulação principalmente do agregado miúdo, dificilmente não acarretará na perda de material, inclusive

porque além de fino este material é bastante leve. A perda de material durante a manipulação ficou em torno de 1,7% em média.

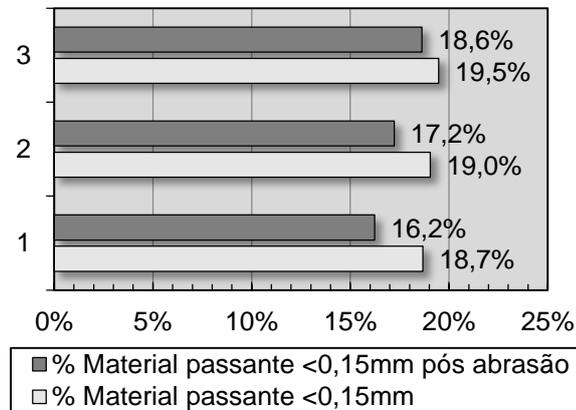


Figura 64: Desgaste por abrasão

A adição de água para atingir à consistência desejada no concreto seco, foi muito mais elevada que o estipulado. Ao invés da relação água/cimento de 0,4, mais que o dobro de água precisou ser utilizado, resultando em um traço de 1:3:2:0,83 (cimento: miúdos: grãos: água).

#### 4.3.3.2 Distribuição granulométrica ( $AR < 0,075 \text{ mm}$ )

A Figura 65 apresenta a distribuição granulométrica da fração de agregado reciclado com dimensão inferior à 0,075 mm. Segundo resultados do ensaio, 10% das partículas possuem tamanho inferior a 0,003 mm (D10), 50% possuem tamanho inferior a 0,011 mm (D50) e 90% das partículas são menores que 0,038 mm (D90). Para o menor tamanho, adota-se D10. O mesmo procedimento é usado para o tamanho médio, o qual adota-se D50, e para o maior tamanho, D90.

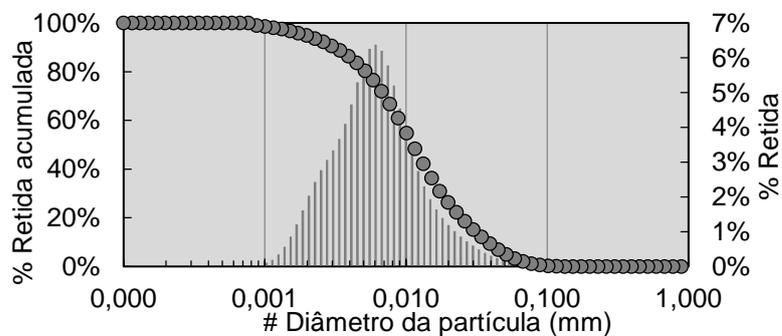


Figura 65: Distribuição granulométrica ( $AR \leq 0,075 \text{ mm}$ )

Analisando o gráfico da Figura 65, as partículas apresentam uma distribuição relativamente estreita e próxima a um comportamento normal.

#### 4.3.3.3 Distribuição granulométrica do cimento

Da mesma forma, para o cimento, pode-se analisar a distribuição granulométrica por meio da Figura 66. Segundo dados do ensaio, 10% das partículas possuem tamanho inferior a 0,004 mm, 50% possuem tamanho inferior a 0,011 mm e 90% das partículas são menores que 0,031 mm.

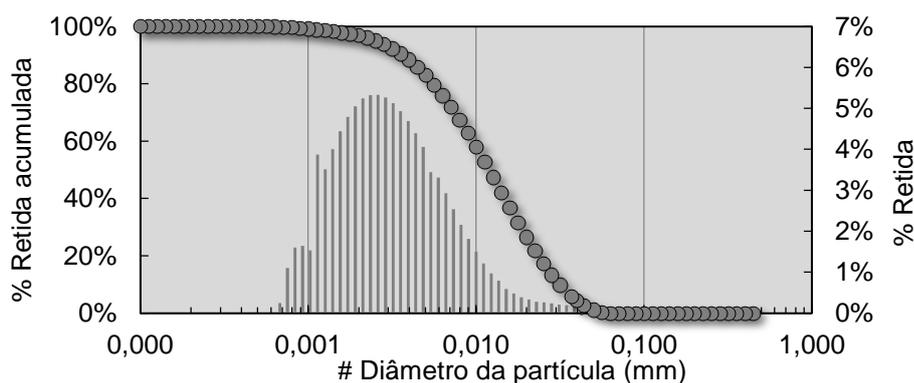


Figura 66: Distribuição granulométrica do cimento

Analisando a distribuição granulométrica do cimento e da fração inferior a 0,075 mm do agregado reciclado, percebe-se a grande similaridade. A distribuição granulométrica do cimento apresenta ligeira distorção de uma distribuição normal.

Este resultado aponta para duas possibilidades. A primeira diz respeito a possibilidade das partículas de agregado reciclado complementarem os vazios deixados por partículas maiores juntamente com cimento. A outra, diz respeito a uma possível dificuldade na obtenção de grandes densidades de empacotamento, uma vez que a introdução de partículas de mesmo tamanho podem elevar a dispersão das partículas maiores, aumentando o espaço entre elas. Assim, pode ser necessário a introdução de partículas menores, como *fillers* e/ou a retirada do material fino do agregado reciclado.

Apesar da distribuição granulométrica do cimento e da fração com dimensão inferior a 0,075 mm dos agregados reciclados serem muito similares, o fato do agregado reciclado ter menor massa específica que do cimento, sua capacidade de aglomeração pode ser bem maior.

#### 4.3.4 Massa unitária, massa específica real e massa específica aparente

Conforme observado na Figura 67 e na Figura 68, a maioria das massas unitárias e massas específicas obtiveram diferenças significativas quando comparados os resultados do primeiro e do segundo lote. As diferenças mais significativas entre o primeiro e o segundo lote

ocorreram entre os agregados miúdos (AC e ACI), tanto em relação a massa unitária, como em relação a massa específica. Essa diferença mais acentuada pode ser explicada pela maior dificuldade na execução do ensaio com a partícula na condição saturado superfície seca para este agregado, muito mais que para o agregado graúdo e também, pela maior diferença entre as distribuições granulométricas do primeiro e do segundo lote.

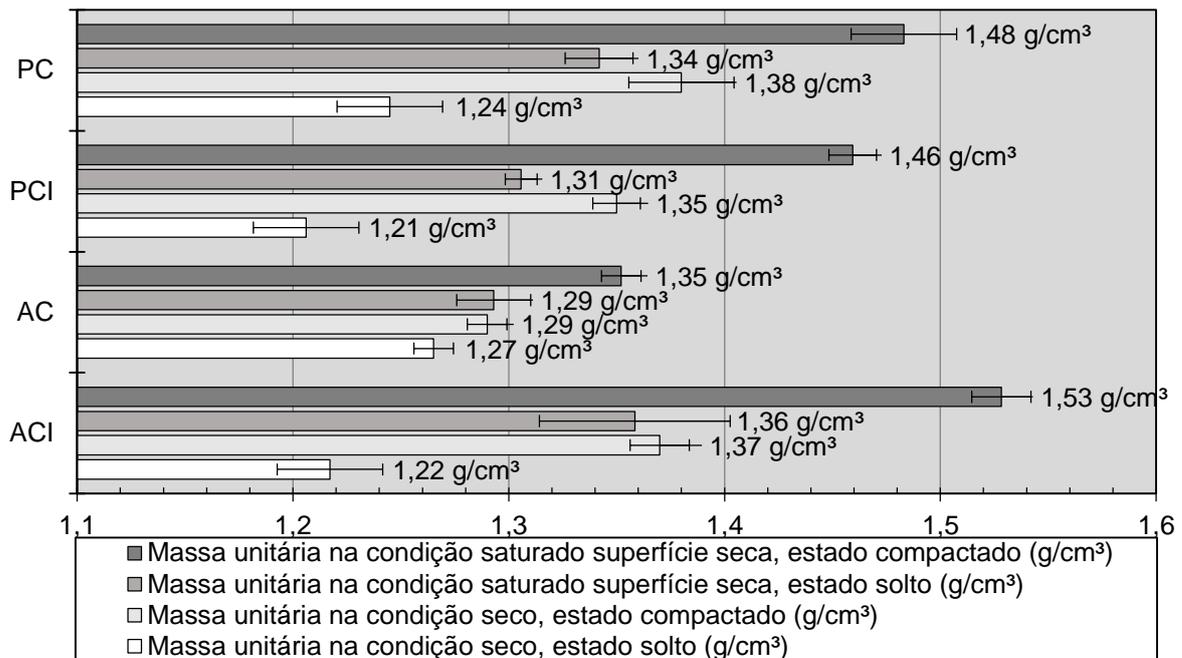


Figura 67: Massa unitária, comparação com o novo lote

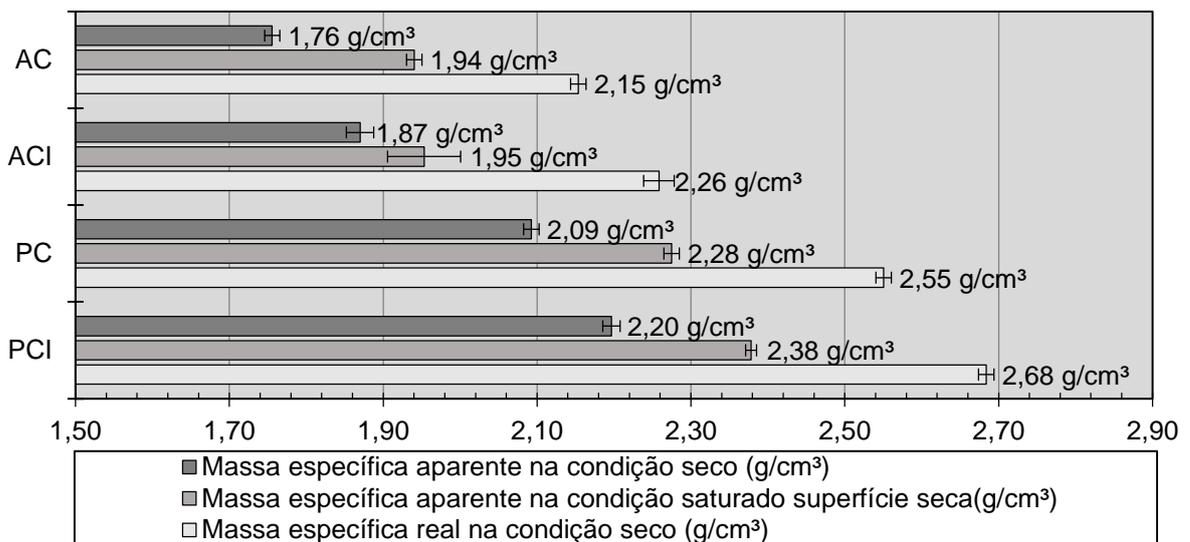


Figura 68: Massa específica real e aparente, comparação com o novo lote

Devido aos problemas já mencionados em relação ao ensaio de massa específica aparente, foram também realizados os ensaios de massa específica do agregado seco por picnometria e também por meio do monitoramento da absorção de água pelos agregados que será mencionado no item 4.3.5.1. No ensaio pelo método do picnômetro, obteve-se uma

massa específica de  $2,58 \text{ g/cm}^3$  para a areia C e  $2,68 \text{ g/cm}^3$  para a brita C. No ensaio de monitoramento da absorção de água pelos agregados, encontrou-se uma massa específica de  $2,45 \text{ g/cm}^3$  e  $2,59 \text{ g/cm}^3$  respectivamente.

Para a realização dos cálculos, foi utilizada a massa específica real obtida pelo método do picnômetro por ter uma menor margem de erro. Pelo ensaio no estado saturado superfície seca, há a possibilidade de perder material fino devido ao uso de secadores e, pelo ensaio de monitoramento da absorção de água, perder este mesmo material fino pelos vazios da peneira utilizada na balança hidrostática.

#### 4.3.4.1 Massa unitária por fração granulométrica

Para os cálculos do modelo de De Larrard, fez-se necessário à realização do ensaio de massa unitária por fração granulométrica, conforme descrito no item 3.2.1.4. Agregados graúdos e miúdos foram classificados granulometricamente e para cada fração foram apresentados os resultados de massa unitária, índice de vazios, e densidade de empacotamento, nas Figura 69 e Figura 70. A diferença entre estas duas figuras está na forma de determinação do índice de vazios e conseqüentemente na densidade de empacotamento.

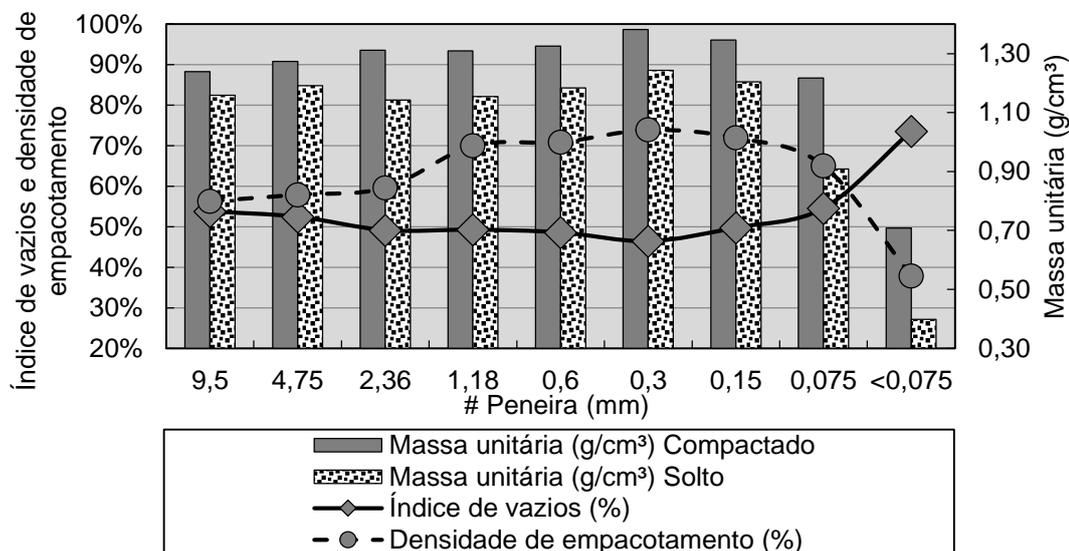


Figura 69: Massa unitária, índice de vazios total e densidade de empacotamento por fração granulométrica do segundo lote;

A Figura 69 apresenta os resultados do índice de vazios total de cada fração do agregado, ou seja, a somatória dos vazios internos e entre as partículas. Este valor foi calculado por meio da massa unitária e da massa específica real. A Figura 70, apresenta os resultados de índice de vazio entre as partículas (necessário ao cálculo do modelo de empacotamento), calculado por meio da massa unitária e da massa específica aparente.

Em relação as diferenças apresentadas entre as massas específicas real e aparente do agregado gráudo ou miúdo, foi considerado para cada fração um valor ponderado, somando a multiplicação entre a porcentagem de material retido em cada peneira da areia e do pedrisco e o valor da massa específica real.

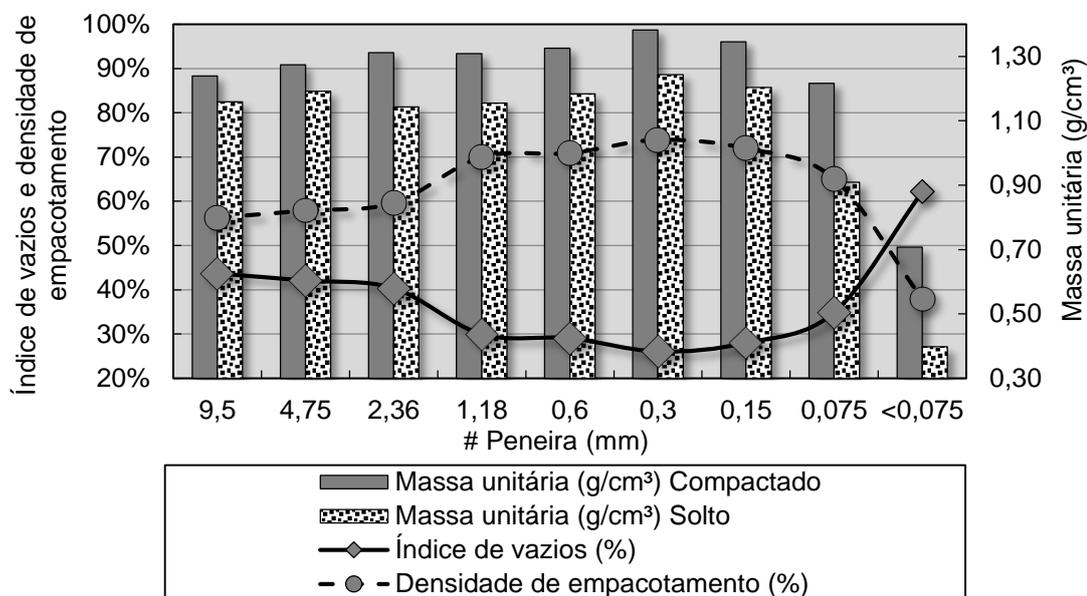


Figura 70: Massa unitária, índice de vazios entre partículas e densidade de empacotamento por fração granulométrica do segundo lote

Nos dois casos, entre as peneiras de 9,5 mm e 0,3 mm, observou-se uma regularidade nos resultados: quanto maior o tamanho da partícula, menor a massa unitária compactada, maior o índice de vazios, menor a densidade de empacotamento e vice e versa. Contudo, ao se analisar as partículas menores que 0,15 mm, foi observado uma inversão de comportamento, uma vez que a massa unitária reduziu, bem como a densidade de empacotamento, o que provocou o aumento no índice de vazios.

Além disso, quando analisou-se as partículas menores que 0,075 mm, verificou-se que a massa unitária do estado compactado tem diferenças mais significativas comparado com as partículas maiores. Esse fato permite concluir que partículas de dimensões similares ou inferiores a 0,075 mm são mais afetadas pelo efeito de compactação. A explicação deste fenômeno pode estar no efeito de aglomeração das partículas finas e na consequente formação de estruturas porosas, resultando dessa forma em menores densidade de empacotamento.

Adicionalmente, o índice de vazios é menor quando considera-se apenas os vazios entre as partículas. Neste caso, foram encontrados valores bastante elevados para as densidades de empacotamento, como é o caso da fração retida na peneira de 0,3 mm, a qual atinge o valor de 74%.

Uma hipótese para esse comportamento relaciona-se com a variação da distribuição granulométrica de uma mesma fração (por exemplo, de 0,6 mm à 0,3 mm), o que não caracteriza as frações efetivamente como monodispersões. Esta hipótese também pode justificar os valores de massa unitária no estado solto para as frações de 9,5 e 4,75 mm que, como pode-se observar nas Figura 69 e Figura 70 apresentam valores mais elevados que para as frações menores (2,36 mm e 1,18 mm). Os valores mais elevados de massa unitária para a fração de 9,5 mm, podem estar relacionados a uma maior variação de dimensões de partículas no intervalo entre as frações de 9,5 mm e 4,75 mm, uma vez que são maiores que as dos intervalos entre 2,36 mm e 1,18 mm, abrangendo assim, um maior número de tamanho de partículas dentro de um mesmo intervalo.

É importante salientar que as densidades de empacotamento apresentadas na Figura 69 e Figura 70, foi calculada com base na massa unitária no estado compactado.

#### 4.3.5 Absorção de água e índice de vazios

Em relação à absorção de água do novo lote (Figura 71), observa-se que apesar do aumento em relação ao primeiro lote, tanto o agregado miúdo como o agregado graúdo, ainda se mantêm dentro dos padrões estabelecidos para agregados reciclados de concreto pela NBR 15116 (2004).

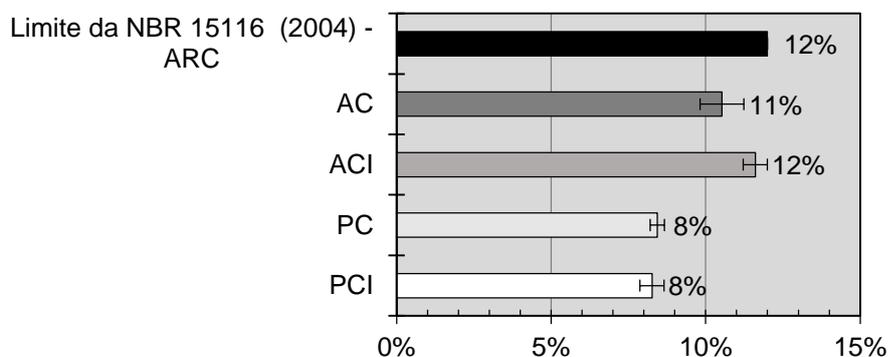


Figura 71: Valores de absorção de água em comparação com o novo lote

Entretanto, para o índice de vazios (Figura 72), as diferenças entre o novo lote e o antigo são significativas, sendo menores para o agregado graúdo, e maiores para o agregado miúdo.

Assim, vale ressaltar que, apesar de alguns resultados se apresentarem muito semelhantes entre um lote e outro, o ideal para as empresas, seria a caracterização periódica dos agregados reciclados para formação de uma faixa padrão para cada tipo de ensaio. Para fins de pesquisa, o ideal é realizar, em cada novo lote, uma caracterização completa. Isso, contribui para realizar os cálculos de empacotamento e minorar a dispersão dos resultados.

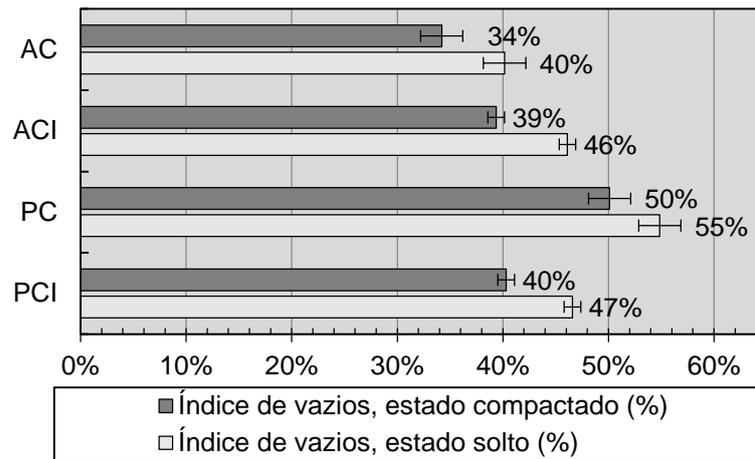


Figura 72: Índice de vazios em comparação com o novo lote

#### 4.3.5.1 Monitoramento da absorção de água pelos agregados

Nas Figura 73 e Figura 74 estão apresentadas as curvas de absorção de água dos agregados miúdo e graúdo reciclados, respectivamente.

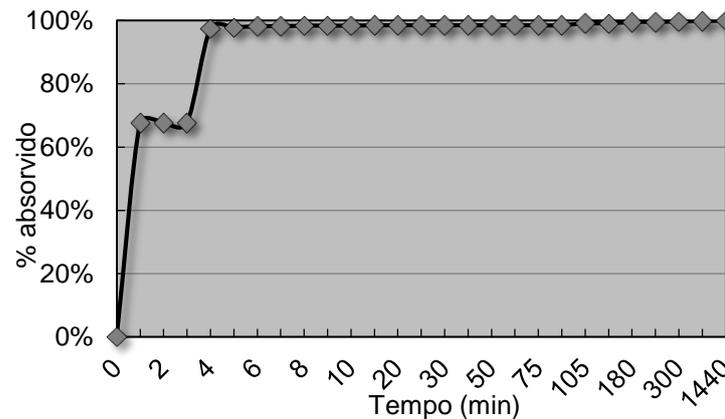


Figura 73: Curva de absorção de água do agregado reciclado miúdo escolhido (ACI)

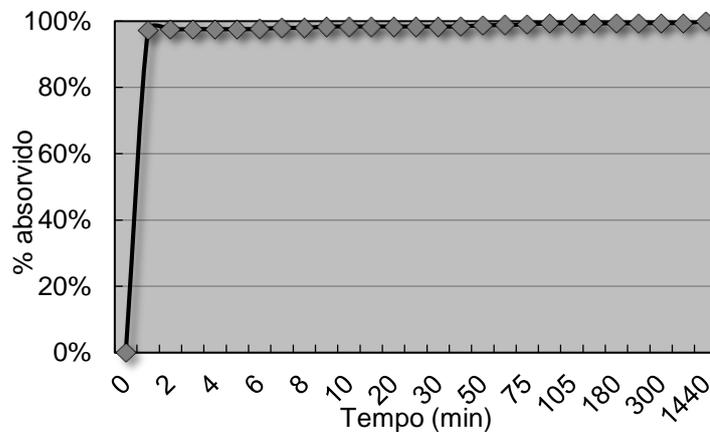


Figura 74: Curva de absorção de água do agregado reciclado graúdo escolhido (PCI)

Por meio das curvas apresentadas na Figura 73 e na Figura 74 foi constatado que, com 4 minutos de imersão, o agregado miúdo da empresa escolhida absorve 98% da quantidade de água absorvida em 24 horas de imersão. Quanto ao agregado graúdo, com 2 minutos de imersão ele absorve 97% do total absorvido em 24 horas de imersão.

Com base nestas observações foram estabelecidas algumas diretrizes para compensação da absorção de água do material para execução dos traços de concreto com agregado reciclado. Foi estabelecido que os agregados reciclados seriam pré-umedecidos 5 minutos antes do início da mistura dos outros materiais na betoneira. A quantidade de água utilizada no pré-umedecimento foi correspondente à 95% do volume total da absorção de água de cada agregado. Assim, o total de água de cada traço de concreto, corresponde ao somatório da quantidade de água referente ao percentual aproximado de 95% da absorção de água total do agregado (água de pré-umedecimento) e a quantidade de água adicionada para obter a consistência desejada (água livre).

Estes valores foram escolhidos levando-se em consideração três fatores. Primeiro, 5 minutos foi considerado um tempo razoável de espera para iniciar o preparo do concreto. Tempo este que não torna o processo demorado, reduzindo ao máximo a perda de produtividade. Segundo, o percentual de absorção de água do material reciclado não varia muito dos 5 minutos às 24 horas de ensaio; e terceiro, compensar apenas parcialmente a taxa de absorção de água das frações de agregado miúdo e graúdo reciclado permite que não haja um excesso de água no concreto, fato que levaria as resistências mecânicas a valores muito baixos.

Assim, como o agregado reciclado pode absorver parte da água da mistura de concreto, pode ocorrer também uma perda de água do agregado reciclado para a mistura quando da utilização do agregado saturado (LEITE, 2001).

#### 4.4 DETERMINAÇÃO DOS TRAÇOS

Após a obtenção dos dados dos agregados reciclados da empresa escolhida para um novo lote, estes dados foram aplicados aos modelos de empacotamento e os resultados são mostrados no item 4.4.1.

##### 4.4.1 Aplicação dos modelos de empacotamento de partículas

Com o objetivo de reduzir o número de amostras, foram escolhidos quatro traços dos dezesseis avaliados, dois de cada modelo de empacotamento (dois para o modelo de De Larrard e dois para o modelo de Funk e Dinger), sendo um para o método de cálculo sem o cimento e outro para o método com o cimento.

#### 4.4.1.1 Modelo de De Larrard

Para a construção da Tabela 13, que apresenta os traços obtidos por meio do modelo de De Larrard, foram utilizados os dados do APÊNDICE A e os cálculos conforme exemplo do APÊNDICE B. Um das observações foi que, com os mesmos agregados (com e sem a fração fina) e, executado o cálculo sem o cimento (AP) e com o cimento (CAP), as relações finais entre os agregados foram diferentes. Um importante resultado desta avaliação é definir qual a melhor forma de analisar o empacotamento do concreto.

Tabela 13: Traços obtidos por meio do modelo de De Larrard

DL1: CAP						
Teor de cimento (% em massa)	Cimento (kg)	Miúdo (kg)	Graúdo (kg)	< 0,15 mm (%)	Relação de graúdos (%)	Densidade de empacotamento virtual
18%	1,0	1,0	3,6	31,1	78,3	0,927
17%	1,0	1,1	3,8	30,5	77,6	0,929
16%	1,0	1,3	4,0	30,1	75,5	0,931
15%	1,0	1,4	4,3	29,6	75,4	0,932
14%	1,0	1,7	4,4	29,5	72,1	0,933
13%	1,0	1,9	4,8	28,8	71,6	0,935
12%	1,0	2,2	5,1	28,7	69,9	0,936

DL2: CAP - s/0,15AP						
Teor de cimento (% em massa)	Cimento (kg)	Miúdo (kg)	Graúdo (kg)	< 0,15 mm (%)	Relação de graúdos (%)	Densidade de empacotamento virtual
18%	1,0	1,7	2,9	25,4	63,0	0,945
17%	1,0	2,0	2,9	25,1	59,2	0,947
16%	1,0	2,3	3,0	24,6	56,6	0,950
15%	1,0	2,6	3,1	24,1	54,4	0,952
14%	1,0	2,9	3,2	23,7	52,5	0,954
13%	1,0	3,4	3,3	23,1	49,3	0,957
12%	1,0	3,8	3,5	22,6	47,9	0,957

DL3: CAP - s/0,15A						
Teor de cimento (% em massa)	Cimento (kg)	Miúdo (kg)	Graúdo (kg)	< 0,15 mm (%)	Relação de graúdos (%)	Densidade de empacotamento virtual
18%	1,0	4,6	0,0	35,1	0	0,940
17%	1,0	4,7	0,2	33,8	4,1	0,942
16%	1,0	4,7	0,6	32,2	11,3	0,945
15%	1,0	4,6	1,1	30,6	19,3	0,947
14%	1,0	4,5	1,6	29,3	26,2	0,949
13%	1,0	4,4	2,3	27,5	34,3	0,952
12%	1,0	4,3	3,0	26,0	41,0	0,954

(continua)

DL4: CAP - s/0,15P						
Teor de cimento (% em massa)	Cimento (kg)	Miúdo (kg)	Graúdo (kg)	< 0,15 mm (%)	Relação de graúdos (%)	Densidade de empacotamento virtual
18%	1,0	1,3	3,3	29,3	71,7	0,929
17%	1,0	1,4	3,5	28,7	71,4	0,931
16%	1,0	1,6	3,7	28,4	69,8	0,933
15%	1,0	1,9	3,8	28,2	66,6	0,934
14%	1,0	2,1	4,0	27,8	65,6	0,935
13%	1,0	2,3	4,4	27,1	65,6	0,937
12%	1,0	2,7	4,6	27,0	63,0	0,938

DL5: AP						
Teor de cimento (% em massa)	Cimento (kg)	Miúdo (kg)	Graúdo (kg)	< 0,15 mm (%)	Relação de graúdos (%)	Densidade de empacotamento virtual
18%	1,0	2,1	2,5	46,4	54,3	0,952
17%	1,0	2,3	2,6	45,7	53,1	0,952
16%	1,0	2,4	2,9	44,9	54,7	0,952
15%	1,0	2,6	3,1	44,2	54,4	0,952
14%	1,0	2,8	3,3	43,5	54,1	0,952
13%	1,0	3,1	3,6	42,7	53,7	0,952
12%	1,0	3,4	3,9	42,0	53,4	0,952

DL6: AP - s/0,15AP						
Teor de cimento (% em massa)	Cimento (kg)	Miúdo (kg)	Graúdo (kg)	< 0,15 mm (%)	Relação de graúdos (%)	Densidade de empacotamento virtual
18%	1,0	2,6	2,0	18	43,4	0,884
17%	1,0	2,8	2,1	17	42,9	0,884
16%	1,0	3,0	2,3	16	43,3	0,884
15%	1,0	3,3	2,4	15	42,1	0,884
14%	1,0	3,5	2,6	14	42,6	0,884
13%	1,0	3,8	2,9	13	43,2	0,884
12%	1,0	4,2	3,1	12	42,5	0,884

DL7: AP - s/0,15A						
Teor de cimento (% em massa)	Cimento (kg)	Miúdo (kg)	Graúdo (kg)	< 0,15 mm (%)	Relação de graúdos (%)	Densidade de empacotamento virtual
18%	1,0	2,4	2,2	37	47,8	0,897
17%	1,0	2,6	2,3	35	46,9	0,897
16%	1,0	2,8	2,5	31	47,2	0,897
15%	1,0	3,0	2,7	30	47,4	0,897
14%	1,0	3,2	2,9	29	47,5	0,897
13%	1,0	3,6	3,1	28	46,3	0,897
12%	1,0	3,9	3,4	27	46,6	0,897

(continua)

(conclusão)

DL8: AP - s/0,15P						
Teor de cimento (% em massa)	Cimento (kg)	Miúdo (kg)	Graúdo (kg)	< 0,15 mm (%)	Relação de grãos (%)	Densidade de empacotamento virtual
18%	1,0	2,4	2,2	44	47,8	0,954
17%	1,0	2,6	2,3	41	46,9	0,954
16%	1,0	2,8	2,5	38	47,2	0,954
15%	1,0	3,0	2,7	37	47,4	0,954
14%	1,0	3,2	2,9	36	47,5	0,954
13%	1,0	3,5	3,2	35	47,7	0,954
12%	1,0	3,8	3,5	35	47,9	0,954

Excluindo a condição de análise DL3, em todos os outros casos, a relação entre agregados graúdos e miúdos ficou acima de 40%. Na prática e até mesmo na teoria, esta relação é entre 20 e 40% (OLIVEIRA, 2004; PIROLA, 2011). Em alguns casos o agregado graúdo (pedrisco) é até mesmo eliminado do traço, dependendo da granulometria da areia utilizada.

Em relação ao consumo de cimento, ou teor de cimento, o valor foi fixado para todos os traços de modo a não ser uma variável de influência nos resultados. Contudo, uma relação água/cimento ( $a/c$ ) de 0,4 foi utilizada inicialmente para obtenção deste teor de cimento. Quando foi obtida a quantidade de água ideal de cada traço por meio do consistômetro “VeBe”, a fim de igualar as condições de consistência do concreto, as relações água/cimento foram alteradas, uma vez que o agregado reciclado tem superfície porosa e por isso absorve parte da água de amassamento.

Em todos os casos de cálculo com o cimento (DL1, DL2, DL3 e DL4), as densidades de empacotamento, conforme mostra a Tabela 13, ficaram em torno de 0,927 e 0,957 e pode-se perceber variações na densidade de empacotamento conforme o incremento ou redução do cimento. Em todos os casos, quanto mais cimento menor a densidade de empacotamento.

Para o traço DL1, por exemplo, o máximo empacotamento (0,940) seria encontrado com 7% de cimento em massa, ou seja, 175 kg/m<sup>3</sup> de cimento, apesar de este não ser apresentado na Tabela 13. Consumo este relativamente baixo, que demonstra um excesso de material pulverulento ( $\leq 0,075$  mm) no agregado reciclado. O mesmo ocorre com o traço DL2, uma vez que este representa os cálculos retirando-se a fração menor que 0,15 mm do pedrisco e da areia. Contudo DL2 alcança a maior densidade de empacotamento com 13% de cimento (0,957). O que evidencia o elevado teor de material inferior a 0,15 mm do agregado reciclado, uma vez que há a possibilidade de adicionar uma maior quantidade de cimento e ainda obter uma densidade de empacotamento maior, dois fatores que elevam a resistência do concreto.

A Figura 75 facilita a visualização dos resultados das densidades de empacotamento para cada condição de análise da Tabela 13. Todas ficaram muito próximas, sendo que apenas as condições de análise DL6 e DL7 é que ficaram abaixo de 0,900.

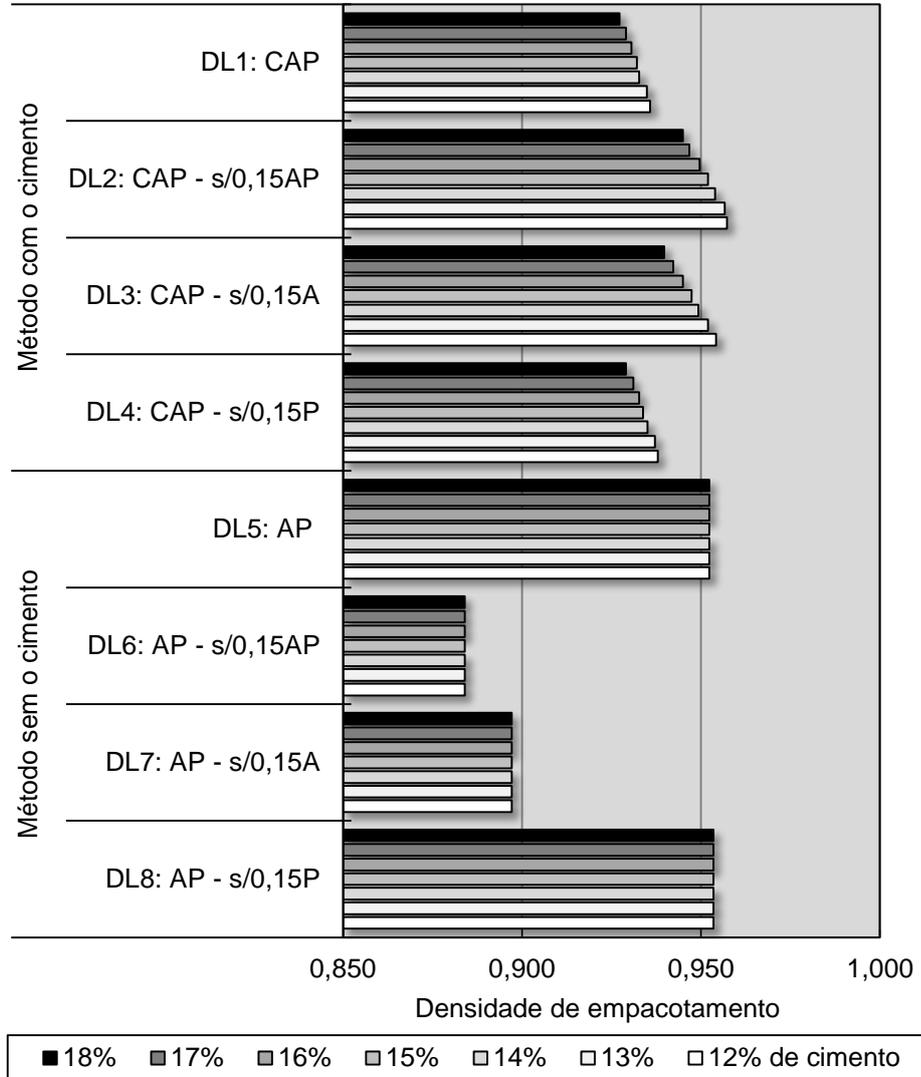


Figura 75: Densidade de empacotamento virtual pelo modelo de De Larrard em função do percentual em massa de cimento

Na análise da densidade de empacotamento para os traços DL1, DL2, DL3 e DL4, quando o percentual de cimento é cerca de 15% (349 kg/m<sup>3</sup>), aproximadamente o mesmo utilizado na referência-empresa e na referência-laboratório (350 kg/m<sup>3</sup>), as melhores densidades de empacotamento são encontradas nos traços DL2 (0,952) e DL3 (0,947). Pela diferença entre as densidades de empacotamento não ser elevada (0,005) e pelo fato de que o traço DL2 tem a tendência de desperdiçar maior quantidade de material inferior a 0,15 mm, o traço escolhido para o cálculo do empacotamento do modelo de De Larrard, com o cimento, foi o DL3.

Cabe aqui, ressaltar que o índice de compactação “K”, para obtenção das densidades de empacotamentos reais dos concretos não foi considerado devido ao fato de que não foram encontrados na literatura valores para este índice de compactação quando da aplicação de 245 kPa ou 52,4 kPa, como é o caso da vibrocompactadora industrial e da vibrocompactadora de laboratório, respectivamente (Tabela 2 do item 2.4.9.2 e Tabela 16 do item 4.6). Ressalta-se que todas as comparações realizadas são baseadas nas densidades de empacotamento virtuais sem que isto interfira nos resultados das análises apresentadas. Enfatiza-se também que o objetivo deste item é a obtenção da maior densidade de empacotamento, independentemente do procedimento de preparo do concreto.

Sendo assim, nos traços definidos pelo método de empacotamento sem o cimento (DL5, DL6, DL7 e DL8), todas as densidades de empacotamento em função da quantidade de cimento foram iguais, justamente pelo fato de o cimento não estar incluído no cálculo de empacotamento. Nesse caso, não é possível afirmar, somente com base nestes cálculos, se a influência do cimento será positiva ou negativa na aumento do empacotamento.

Contudo, ao se considerar o maior empacotamento das partículas, passa-se a analisar o cimento e a água não como partículas, mas sim como uma pasta (ou gel) que irá reger a trabalhabilidade do concreto e preencher os vazios entre partículas. Para que esta pasta possa interferir na trabalhabilidade é necessário que todos os vazios entre as partículas sejam preenchido e, posteriormente, formar uma fina camada na superfície das mesmas, que até o momento estavam conectadas. A viscosidade e a espessura desta fina camada permitirão que o concreto desenvolva maior ou menor fluidez. Dessa forma, é necessário que os agregados tenham um afastamento, mesmo que pequeno, como seria o caso do concreto seco. De forma lógica, traços com maiores densidades de empacotamento e com mesma proporção de pasta, resultarão em concretos mais compactos.

Assim, optou-se por escolher os traços de maiores densidades de empacotamento (DL5 e DL8). Porém, como as densidades de empacotamento dos traços DL5 (0,952) e DL8 (0,954) apresentam uma diferença mínima (0,002), optou-se por escolher o traço com menor desperdício de material passante na peneira de 0,15 mm, ou seja, o traço DL5: AP.

#### *4.4.1.2 Modelo de Funk e Dinger*

Para o modelo de empacotamento de Funk e Dinger, diferente do modelo de De Larrard, analisa-se a menor diferença entre a curva do traço e a curva do modelo de empacotamento máximo (diferença percentual relativa). Para a construção da Tabela 14 que apresenta os traços obtidos por meio deste modelo e, conseqüentemente, das curvas granulométricas da Figura 76, baseou-se nos dados do APÊNDICE C, utilizados para o cálculo do modelo conforme exemplo do APÊNDICE D.

Tabela 14: Traços desenvolvidos por meio do modelo de Funk e Dinger

FD1: CAP						
Teor de cimento (% em massa)	Cimento (kg)	Miúdo (kg)	Graúdo (kg)	< 0,15 mm (%)	Relação de graúdos (%)	Diferença percentual relativa
18%	1	1,9	2,7	35	58,7	6,1%
17%	1	2,1	2,8	35	57,1	5,9%
16%	1	2,3	3,0	34	56,6	5,7%
15%	1	2,6	3,1	34	54,4	5,5%
14%	1	2,8	3,4	34	54,8	5,3%
13%	1	3,1	3,6	33	53,7	5,1%
12%	1	3,5	3,8	33	52,0	4,9%

FD2: CAP - s/0,15AP						
Teor de cimento (% em massa)	Cimento (kg)	Miúdo (kg)	Graúdo (kg)	< 0,15 mm (%)	Relação de graúdos (%)	Diferença percentual relativa
18%	1	3,3	1,2	29	26,7	2,6%
17%	1	3,6	1,2	28	25,0	2,5%
16%	1	3,9	1,3	28	25,0	2,4%
15%	1	4,3	1,3	27	23,2	2,3%
14%	1	4,9	1,3	27	21,0	2,4%
13%	1	5,1	1,6	26	23,9	2,4%
12%	1	5,6	1,8	25	24,3	2,6%

FD3: CAP - s/0,15A						
Teor de cimento (% em massa)	Cimento (kg)	Miúdo (kg)	Graúdo (kg)	< 0,15 mm (%)	Relação de graúdos (%)	Diferença percentual relativa
18%	1	3,2	1,4	30	30,4	2,8%
17%	1	3,5	1,4	29	28,6	2,6%
16%	1	3,8	1,5	29	28,3	2,5%
15%	1	4,1	1,6	28	28,1	2,4%
14%	1	4,5	1,6	27	26,2	2,3%
13%	1	4,9	1,8	27	26,9	2,3%
12%	1	5,4	1,9	26	26,0	2,4%

FD4: CAP - s/0,15P						
Teor de cimento (% em massa)	Cimento (kg)	Miúdo (kg)	Graúdo (kg)	< 0,15 mm (%)	Relação de graúdos (%)	Diferença percentual relativa
18%	1	2,1	2,4	34	53,3	5,8%
17%	1	2,3	2,6	33	53,1	5,6%
16%	1	2,6	2,7	33	50,9	5,3%
15%	1	2,9	2,8	33	49,1	5,2%
14%	1	3,1	3,0	33	49,2	4,9%
13%	1	3,5	3,2	32	47,8	4,7%
12%	1	3,8	3,5	32	47,9	4,5%

(continua)

(conclusão)

FD5: AP						
Teor de cimento (% em massa)	Cimento (kg)	Miúdo (kg)	Graúdo (kg)	< 0,15 mm (%)	Relação de grãos (%)	Diferença percentual relativa
18%	1	2,7	1,9	36	41,3	2,8%
17%	1	2,8	2,1	36	42,9	2,8%
16%	1	3,1	2,2	35	41,5	2,8%
15%	1	3,3	2,4	35	42,1	2,8%
14%	1	3,5	2,6	34	42,6	2,8%
13%	1	3,9	2,8	34	41,8	2,8%
12%	1	4,2	3,1	33	42,5	2,8%

FD6: AP - s/0,15AP						
Teor de cimento (% em massa)	Cimento (kg)	Miúdo (kg)	Graúdo (kg)	< 0,15 mm (%)	Relação de grãos (%)	Diferença percentual relativa
18%	1	3,1	1,5	18	32,6	4,4%
17%	1	3,3	1,6	17	32,7	4,4%
16%	1	3,6	1,7	16	32,0	4,4%
15%	1	3,9	1,8	15	31,6	4,4%
14%	1	4,1	2,0	14	32,8	4,4%
13%	1	4,6	2,1	13	31,3	4,4%
12%	1	5,0	2,3	12	31,5	4,4%

FD7: AP - s/0,15A						
Teor de cimento (% em massa)	Cimento (kg)	Miúdo (kg)	Graúdo (kg)	< 0,15 mm (%)	Relação de grãos (%)	Diferença percentual relativa
18%	1	3,5	1,1	19	23,9	5,0%
17%	1	3,8	1,1	18	22,4	5,0%
16%	1	4,1	1,2	17	22,6	5,0%
15%	1	4,4	1,3	16	22,8	5,0%
14%	1	4,7	1,4	15	23,0	5,0%
13%	1	5,2	1,5	14	22,4	5,0%
12%	1	5,6	1,7	13	23,3	5,0%

FD8: AP - s/0,15P						
Teor de cimento (% em massa)	Cimento (kg)	Miúdo (kg)	Graúdo (kg)	< 0,15 mm (%)	Relação de grãos (%)	Diferença percentual relativa
18%	1	2,9	1,7	33	37,0	2,7%
17%	1	3,1	1,8	32	36,7	2,7%
16%	1	3,3	2,0	31	37,7	2,7%
15%	1	3,6	2,1	30	36,8	2,7%
14%	1	3,8	2,3	29	37,7	2,7%
13%	1	4,2	2,5	28	37,3	2,7%
12%	1	4,6	2,7	28	37,0	2,7%

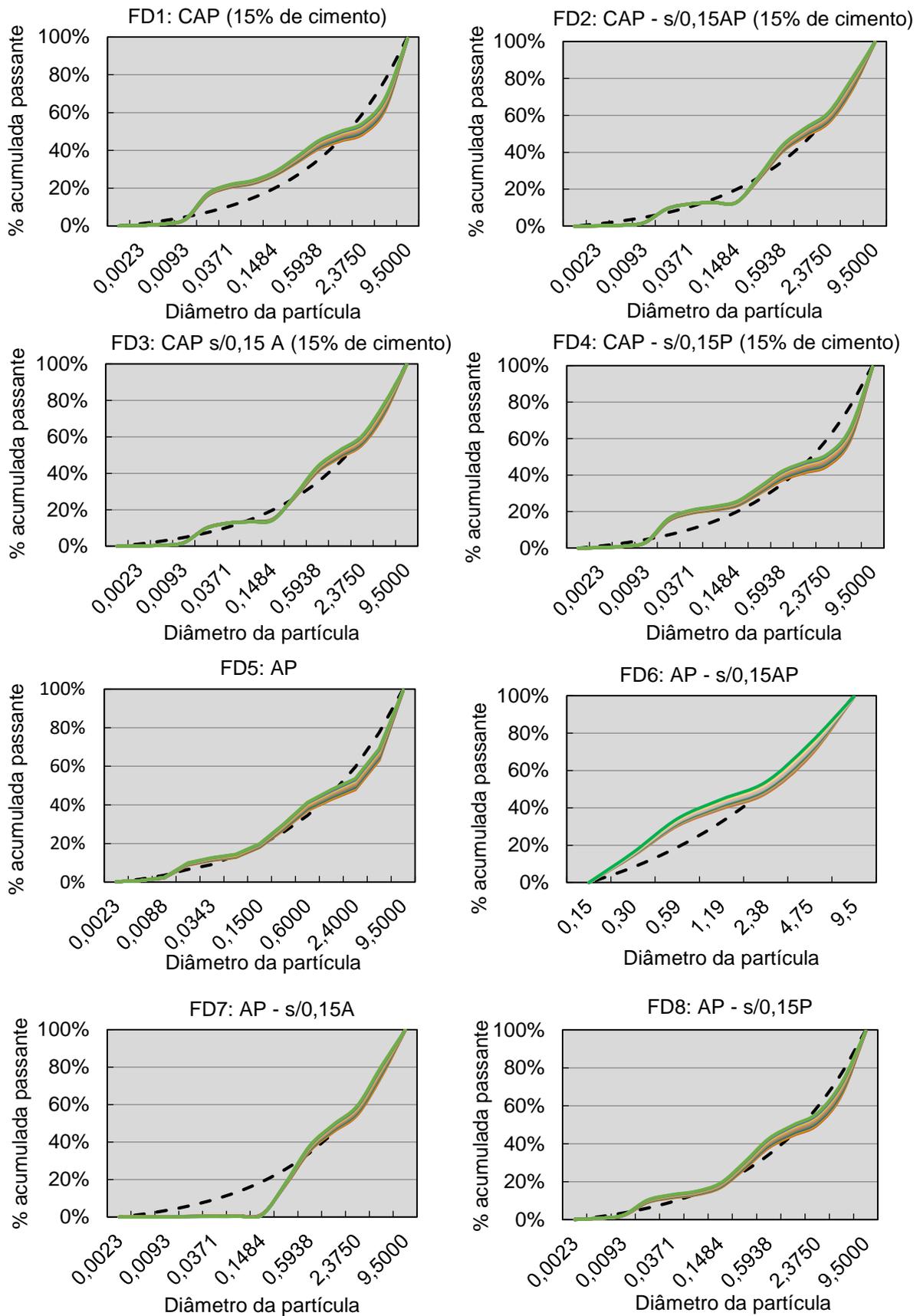


Figura 76: Análise das curvas granulométricas dos traços do modelo de Funk e Dinger

É importante lembrar que foi apresentado na Figura 76 apenas as composições com 15% de cimento porque este é o consumo de cimento do traço de referência. Os traços de FD1: CAP se apresentam bastante semelhantes aos traços FD4: CAP – s/0,15P. Com 15% de cimento foram obtidos traços de 1: 2,6: 3,1 (54,4% de relação grãos) e 1: 2,9: 2,8 (49,1% de relação grãos). Estes valores são coerentes pois o agregado grão (P = pedrisco) apresenta uma quantidade de material inferior a 0,15 mm pequena. O mesmo acontece com os traços: FD2: CAP - s/0,15AP e FD3: CAP - s/0,15A, com traços de 1: 4,3: 1,3 (23,2%) e 1: 4,1: 1,6 (28,1%) respectivamente. Com os traços: FD5: AP e FD8: AP - s/0,15P, com traços 1: 3,3: 2,4 (42,1%) e 1: 3,6: 2,1 (36,8%). Para os traços: FD6: AP - s/0,15AP e FD7: AP - s/0,15A, com traços de 1: 3,9: 1,8 (31,6%) e 1: 4,4: 1,3 (22,8%) respectivamente.

Comparando os modelos de Funk e Dinger e de De Larrard, o modelo de Funk e Dinger, em todos métodos de cálculo (com e sem cimento), produziu traços com quantidades inferiores de agregados grãos.

A Figura 77 apresenta de forma resumida os valores das diferenças relativas de cada condição de análise do modelo de Funk e Dinger.

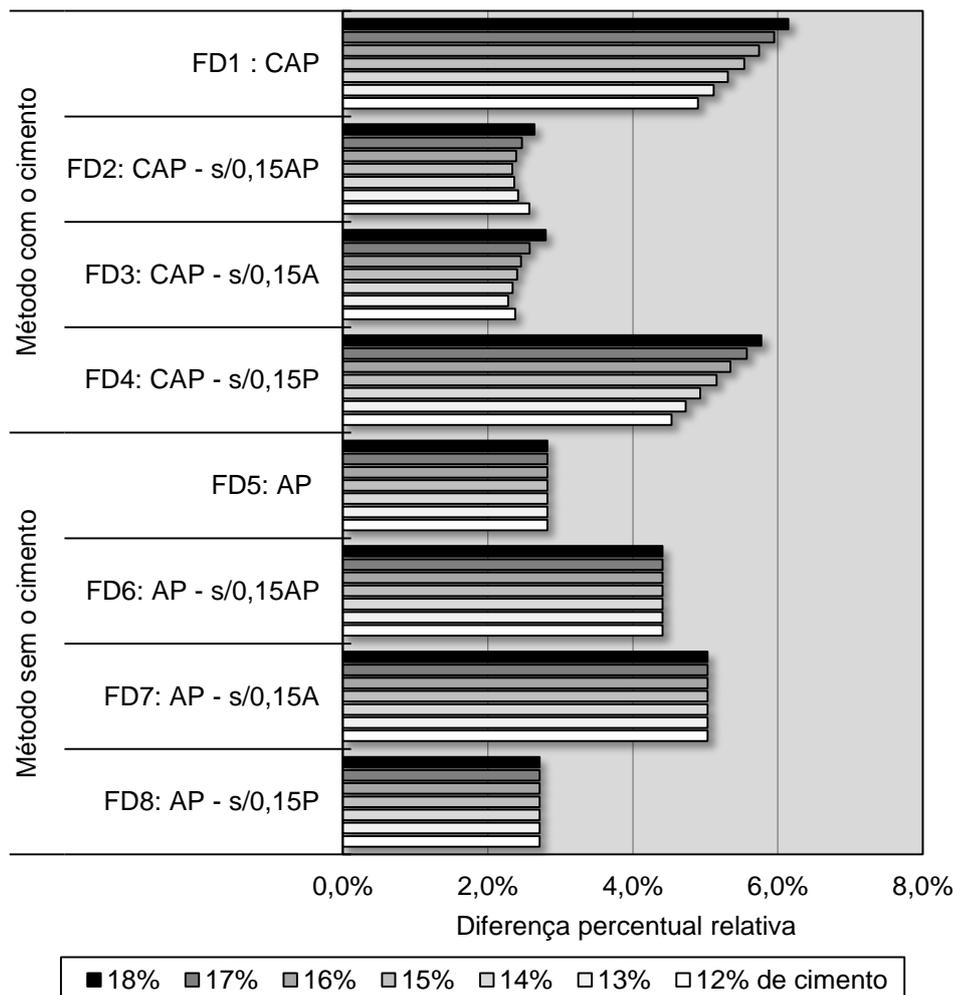


Figura 77: Diferença percentual relativa sobre o modelo de Funk e Dinger

Assim como no modelo de De Larrard, quando o cimento é incluído no cálculo do empacotamento, obtém-se resultados contrários àqueles quando não se adiciona cimento. Os melhores resultados são obtidos quando se retira a fração fina (inferior a 0,15 mm) da areia e do pedrisco simultaneamente. Quando o cimento não é considerado, os melhores resultados são apresentados quando não se exclui da curva granulométrica as partículas menores que 0,15 mm da areia e do pedrisco ou, quando essas partículas são excluídas apenas do pedrisco (P), o qual possui uma porcentagem muito pequena de finos.

Dentre os traços obtidos pelo método com o cimento, FD2 e FD3, foram os que resultaram em curvas granulométricas mais próximas do modelo de Funk e Dinger. Com 15% de cimento, por exemplo, o método FD2 obteve uma diferença relativa de 2,3% e o método FD3, uma diferença de 2,4% (esses dados também podem ser analisados na Tabela 14). Não sendo esta uma diferença muito significativa, foi escolhido o traço FD3, pois este tem menor desperdício de material reciclado. Em FD3 basta excluir a fração inferior a 0,15 mm da areia enquanto FD2 é preciso excluir tanto da areia como do pedrisco, garantindo assim maior economia de material e no tempo de preparo dos materiais.

Para os métodos de empacotamento sem o cimento incluso no cálculo, os traços de menor diferença relativa foram o FD5 e o FD8. Assim, pelos mesmos motivos da escolha de FD3, o traço FD5 também foi escolhido, com uma diferença de 2,8%, contra 2,7% do traço FD8, como mostra a Tabela 14. Não sendo necessária a retirada de nenhuma fração granulométrica da brita e da areia reciclada.

#### 4.4.2 Traços produzidos e determinação do consumo de água

Dos dois modelos de empacotamento calculados, foram escolhidos, segundo itens anteriores quatro traços de concretos, os quais apresentaram maiores densidades de empacotamento. Estes traços estão apresentados na Tabela 15, como DL3, DL5, FD3 e FD5. Além destes traços com agregados reciclados é apresentado na mesma tabela os traços de referência (empresa e laboratório) com agregados naturais.

Pode-se perceber, por meio da Tabela 15 que, para os dois modelos de empacotamento os melhores resultados se deram sem a fração inferior a 0,15 mm do agregado miúdo. Quando houve a introdução do cimento no cálculo do empacotamento (CAP); e quando não houve (AP), os melhores resultados se deram com a curva granulométrica inteira. Fato que se explica pela curva de distribuição granulométrica da fração do agregado reciclado menor de 0,15 mm ser semelhante à do cimento. Sendo assim, as partículas de cimento substituem as partículas finas de agregado reciclado, reduzindo a porcentagem de finos e conseqüentemente o efeito de afastamento das partículas.

Tabela 15: Traços selecionados para execução de concretos em laboratório

Dados	Blocos: Referência- empresa	Corpos de prova: Referência- laboratório	Métodos			
			DL3: CAP - s/0,15A	DL5: AP	FD3: CAP - s/0,15A	FD5: AP
Cimento (kg)	1	1	1	1	1	1
Areia reciclada (kg)	x	x	4,6	2,6	4,1	3,3
Pedrisco reciclado (kg)	x	x	1,1	3,1	1,6	2,4
Areia natural (kg)	5,1	5,1	x	x	x	x
Pedrisco natural (kg)	0,5	0,5	x	x	x	x
Aditivo plastificante (kg)	0,0059	0,0059	0	0	0	0
% cimento (massa)	15	15	15	15	15	15
Teor de Argamassa (%)	93	93	83	54	76	64
Empacotamento: DL	*	*	0,947	0,952	0,947	0,944
Diferença relativa: FD (%)	10	10	3,4	4,4	2,4	2,8
Vazio calculado (%/m <sup>3</sup> )	x	x	5	5	5	6
Vazio Real (%/m <sup>3</sup> )	x	x	17	15	16	16
% Finos ≤ 0,15 mm	24	24	19	22	18	22
Relação de grãos (%)	8,9	8,9	19,3	54,4	28,1	42,1
Dados obtidos após a produção dos concretos						
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	337	337	349	324	348	322
Umidade total (%)	x	8	15	17	14	17
Consumo de água (kg)	x	0,54	0,39	0,60	0,36	0,61
Água absorvida (kg)	x	0,00	0,60	0,53	0,59	0,56
Água total (kg)	x	0,54	0,99	1,13	0,95	1,17
Tempo "VeBe" (s)	x	28	22	24	21	29

\* Material insuficiente para obtenção de dados

Contudo, quando comparados ambos os métodos sem a fração fina da areia (DL3 e FD3) apesar de não serem idênticos apresentam valores parecidos na Tabela 15, bem como os métodos DL5 e FD5.

Além dos traços, são também apresentados na Tabela 15 a porcentagem de cimento igual a 15% para todos os traços, o teor de argamassa relativamente alto para as referências (empresa e laboratório) e para os traços sem a fração fina do agregado reciclado, o valor do empacotamento virtual (sem as considerações do índice de compactação, K) para cada traço, a diferença percentual relativa sobre o modelo de Funk e Dinger (FD), o índice de vazios calculado entre as partículas por meio do valor do empacotamento de De Larrard obtido, o índice de vazios real, contando com o índice de vazios interno das partículas, a porcentagem de finos inferior a 0,15 mm, a relação de agregados grãos e o consumo de cimento em função da quantidade de água de cada traço.

Pode-se perceber por meio dos dados da Tabela 15 que a diferença percentual relativa entre o traço de referência (empresa e laboratório) e o modelo de Funk e Dinger (10%)

é bem maior que a diferença entre o modelo e os traços de concretos com agregados reciclados (entre 2,4 e 4,4%).

Com o intuito de analisar a diferença entre as resistências à tração e à compressão, a absorção de água e as massas específicas para duas idades dos traços produzidos pelos diferentes métodos e a fim de não tornar o tempo de moldagem excessivo, foi fixado, para todos os corpos de prova, um tempo de pré-vibração de 5 segundos, e um tempo de 20 segundos para a vibrocompactação. Este tempo de produção foi escolhido previamente apenas para garantir o mesmo tratamento a todas as composições com agilidade e viabilidade do trabalho. A agilidade e viabilidade se explicam pelo fato da produção de 48 corpos de prova por traço resultar em um tempo de produção excessivo caso fosse utilizado um tempo de vibrocompactação ideal de 240 s, como descrito no item 4.6. Sem esta agilidade planejada não seria possível manter a mesma consistência para os últimos corpos de prova a serem moldados, a partir de um único traço preparado. Devido a limitações do processo de vibrocompactação, só é possível moldar 5 corpos de prova por vez e, considerando que o concreto perde consistência com o tempo, moldar 48 amostras com tempo de 240s e com qualidade, seria impraticável.

Os traços com maior porcentagem de finos necessitaram de maior quantidade de água tanto para a absorção como para obtenção do tempo “VeBe” especificado (entre 20 e 30s).

Com este método, não se pode garantir que a relação água/cimento seja a mesma, até porque são agregados reciclados com alto índice de absorção de água, mas pode-se garantir que todos os concretos estejam em uma faixa bastante restrita de consistência, o que por sua vez garante um mesmo comportamento quanto a vibrocompactação. Com isto, pode-se prever a relação água/cimento, mas não se pode garantir que esta seja realmente a relação entre a água livre e o cimento, devido a variação na absorção de água do agregado reciclado.

Em relação aos traços DL3 e FD3, a soma entre 5% dos vazios internos e o vazio entre partículas calculado pelo modelo de De Larrard ficou em 5,9% e 5,8%, respectivamente. Assim, como a densidade de empacotamento desses traços foi calculada com o cimento e os agregados, foi reduzido desse vazio, o volume de água adicionado, no caso, 6,0% e 5,4%, respectivamente. Então, a diferença entre o vazio disponível para o preenchimento por água e o volume de água adicionado foi de - 0,1% e 0,4% respectivamente, o que significa que praticamente não houve volume disponível para que a água formasse uma camada entre as partículas de cimento e agregados. Com os traços DL5 e FD5, o mesmo cálculo foi realizado em relação a pasta. Sendo o volume de pasta (cimento e água) de 24% para ambos, e o volume calculado pelo modelo de De Larrard mais 5% dos vazios internos de 5,3% e 6,1%, respectivamente, o volume de pasta responsável por separar as partículas e reger a trabalhabilidade do concreto foi de 18,7% e 18,0% do volume total de pasta. Quando se faz

esta mesma analogia para os traços DL3 e FD3, o volume de pasta disponível para capa que cobre os agregados reduz para 7,1% e 7,3% respectivamente, justamente pela menor proporção de finos desses dois traços.

#### 4.5 DETERMINAÇÃO DO MELHOR TRAÇO COM AGREGADOS RECLADOS

A partir dos traços obtidos no item anterior, foram confeccionados corpos de prova para avaliação da resistência mecânica à compressão e à tração aos 7 e 28 dias, além da absorção de água e da massa específica conforme apresentado na Figura 78, na Figura 79 e dados individuais de cada corpo de prova que podem ser analisados no APÊNDICE E.

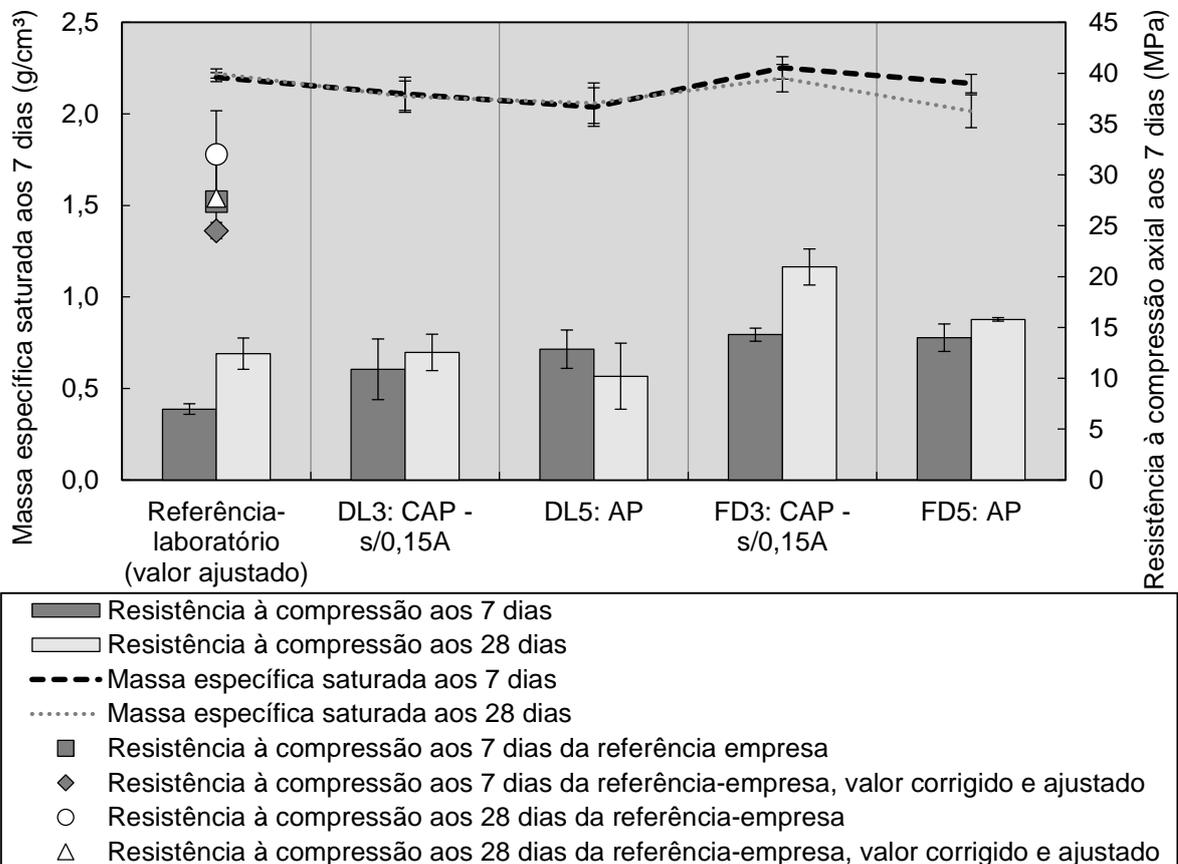


Figura 78: Resistência à compressão axial e massa específica saturada, comparação entre traços (tempo de moldagem de 20s)

Em relação a Figura 78 seguem alguns esclarecimentos para posterior análise:

- O valor da resistência à compressão da amostra de referência (empresa e laboratório) foi ajustado em 26% e 22% para as idades de 7 e 28 dias respectivamente, conforme descrito na metodologia (item 3.2.7.2) para transformação das resistências mecânicas à compressão entres os cimentos CP II F 32 e CP V ARI;

- b) são apresentados os valores das resistências à compressão dos blocos aos 7 e 28 dias produzidos pela vibrocompactadora da empresa e;
- c) são apresentados os valores corrigidos da resistência à compressão dos blocos de acordo com o descrito na metodologia (item 3.2.7.1) para correlacionar as diferentes alturas. Assim, os valores apresentados na Figura 78 se referem apenas a corpos de prova cilíndricos de (5x10) cm com cimento CP V ARI e por isso podem ser comparados.

Com relação a resistência à compressão dos concretos de agregados reciclados aos 7 dias, os valores são estatisticamente superiores aos obtidos para o concreto referência-laboratório (valor ajustado), com agregados naturais, sendo que o traço FD3 foi o que obteve maior resistência aos 28 dias. Esse traço também foi o que obteve a diferença mais significativa entre as resistências aos 7 e 28 dias e isso pode ser devido a maior massa específica deste concreto.

Embora o modelo de Funk e Dinger utilize menor número de variáveis, o de De Larrard fornece informações sobre a densidade de empacotamento e o volume de vazios.

Entretanto, nenhum dos concretos atingiu os valores das resistências corrigidas dos blocos da empresa (referência-empresa) e isso se deve principalmente ao tempo insuficiente de vibrocompactação a que os corpos de prova foram produzidos na vibrocompactadora de laboratório. Assim, fez-se necessários os estudos discutidos no item 4.6.

Quando se analisa a massa específica saturada percebe-se que em relação a referência-laboratório, os valores não são estatisticamente diferentes, apesar dos agregados reciclados serem muito mais porosos, conforme será confirmado com a análise da Figura 79.

Em relação a diferença entre a massa específica aos 7 e 28 dias não ocorreram mudanças significativas, uma vez que os valores de massa específica aos 28 dias ficaram graficamente sob os valores de massa específica aos 7 dias de idade.

Na Figura 79, são apresentados os dados de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova da referência-laboratório e dos traços de concretos com agregados reciclados, bem como seus respectivos valores de absorção de água. Observa-se que, além de apresentar o maior valor de resistência à tração por compressão diametral e à compressão axial aos 28 dias, o traço FD3 apresenta uma absorção de água significativamente menor que dos outros traços com agregado reciclado.

Isso indica um melhor empacotamento das partículas, uma vez que foram utilizados: o mesmo método de preparo do concreto, os mesmos materiais e a mesma consistência. Outra hipótese seria a respeito da dificuldade de obtenção da condição saturado devido ao preenchimento dos vazios superficiais do agregado reciclado por pasta e com isso, a impermeabilização desta superfície, fazendo com que as partículas de agregado reciclado se transformem em partículas de porosidade interna fechada.

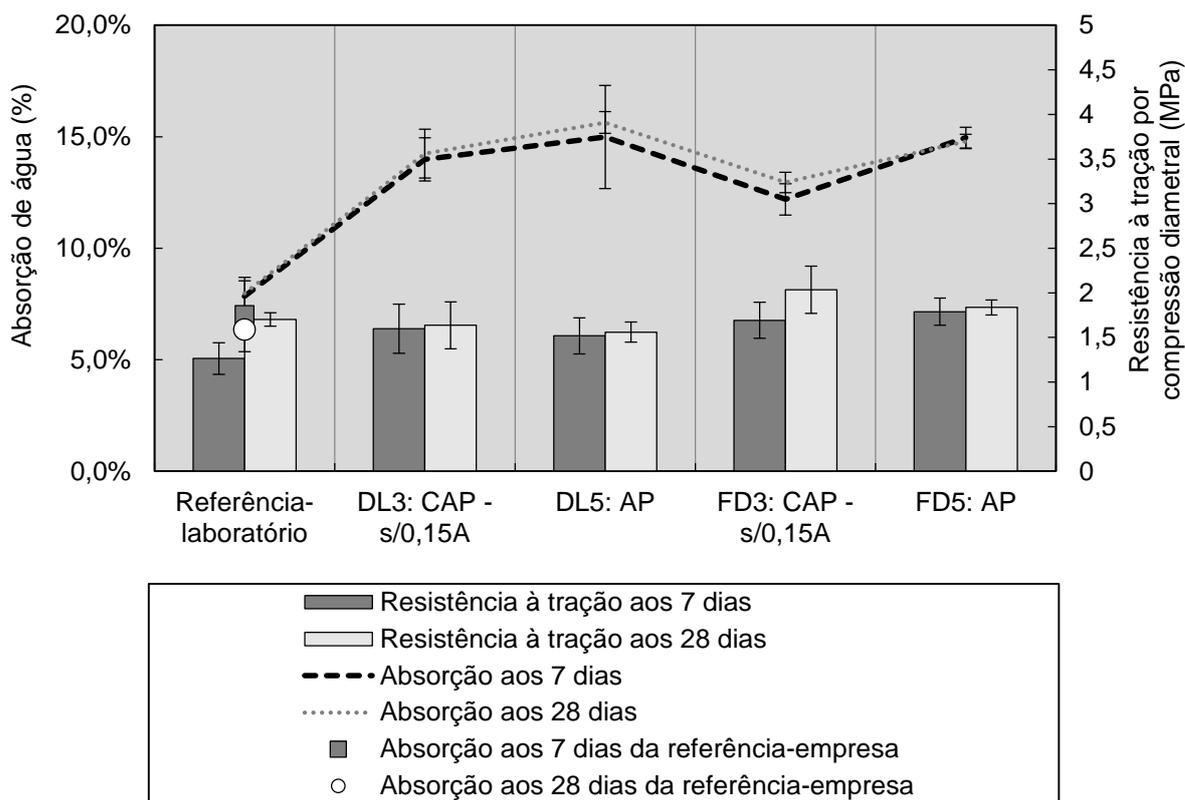


Figura 79: Resistência mecânica à tração por compressão diametral e absorção de água, comparação entre traços

Apesar do valor da absorção de água dos concretos com agregados reciclados (entre 10% e 15%) ser superior aos 6%, estabelecido como máximo pela NBR 15116 (ABNT, 2004b), este resultado pode ser um fator positivo, uma vez que a resistência mecânica não é alterada. Isso pode melhorar a percolação da água dentro do paver e com isso a absorção da água da chuva. Aos 7 e 28 dias não houve diferença estatística para cada traço isoladamente.

Assim, optou-se por seguir os estudos com o traço FD3 de agregados reciclados e com ele foram analisadas a microestrutura e a variação do tempo de vibrocompactação (item 4.6).

#### 4.5.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Com amostras de concreto da referência-empresa e amostras de concreto FD3 (com agregados reciclados) foram obtidas imagens por microscópio eletrônico de varredura tanto da zona de transição entre a partícula de agregado e a pasta (Figura 80) quanto da panorâmica dos fragmentos (Figura 81).

Pode-se perceber na Figura 80 (a) que há vazio entre a pasta e a partícula indicando que há falta de pasta para cobrir toda a superfície das mesmas, diferente do que ocorre na Figura 80 (b) onde quase não se percebe a existência de vazios.

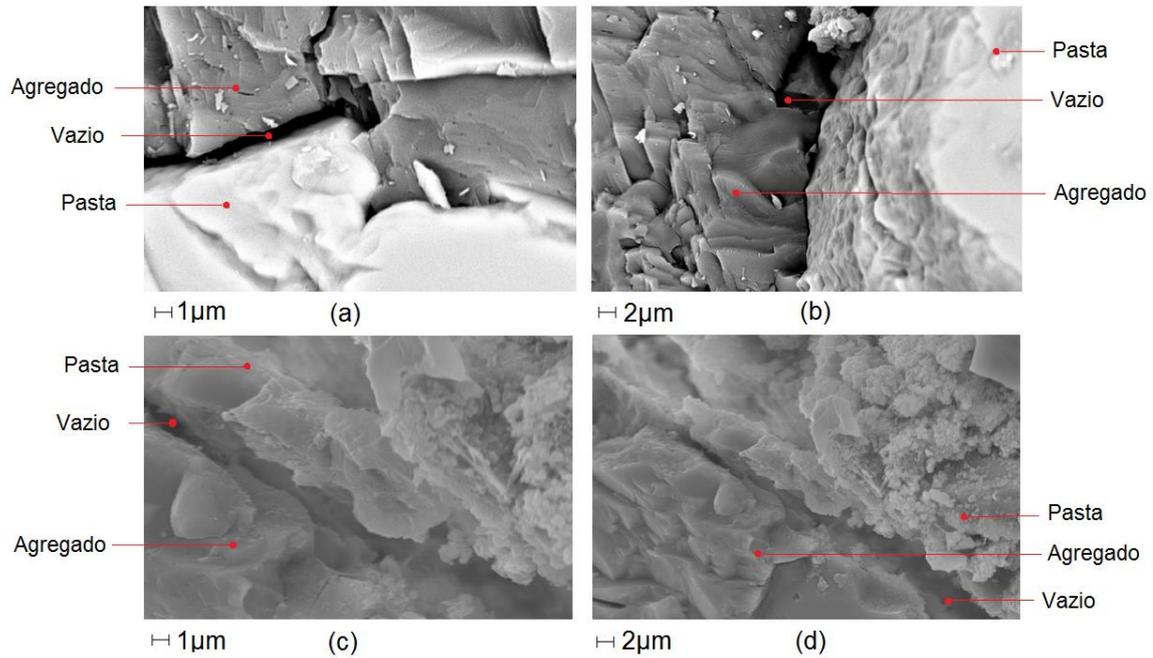


Figura 80: MEV da zona de transição de concretos com agregados naturais com ampliação de 10.000X (a) e 5.000X (b) e com agregados reciclados com ampliação de 10.000X (c) e 5.000X (d)

Nas Figura 80(a) e (b) pode-se observar que a superfície da partícula de agregado natural se apresenta claramente mais lisa que a superfície da partícula de agregado reciclado, observado nas Figura 80 (c) e (d). Isto pode ser percebido pelas faces mais retas e alongadas apresentadas pelos vazios na imagem, o que também foi observado por Leite (2001), conforme apresentado na revisão da literatura. A pasta aparece em cinza claro, a partícula de agregado aparece em cinza escuro e os vazios são pretos.

Ainda na Figura 80, pode ser observado que a pasta se apresenta bem mais homogênea em concretos com agregados naturais do que em concretos com agregados reciclados, onde a pasta apresenta alguns grânulos, provavelmente pela interação com a pasta aderida sobre a superfície dos agregados.

Na imagem panorâmica apresentada na Figura 81, percebe-se uma maior quantidade de vazios no concreto com agregados naturais com superfície menos plana.

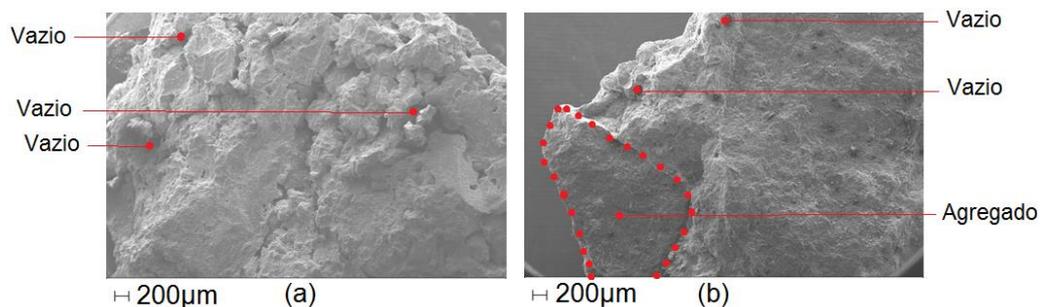


Figura 81: Panorâmica da superfície de fragmentos de concretos com agregados naturais (a) e reciclados (b), ampliação de 45X

A falta de uma distribuição granulométrica mais contínua e com pouco material graúdo é o que pode ter ocasionado estes vazios. Na imagem em que aparece o fragmento de concreto com agregados reciclados, Figura 81 (b), pode-se observar uma partícula de agregado reciclado com nitidez (superfície pontilhada).

#### 4.6 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE EQUIVALÊNCIA ENTRE OS EQUIPAMENTOS DE VIBROCOMPACTAÇÃO

Para a análise de desempenho de vibrocompactação dos equipamentos (consistômetro VeBe, vibrocompactadora de laboratório ou mesa vibratória e vibrocompactadora industrial) primeiramente foi medido a aceleração ao longo do tempo.

A Figura 82, mostra os resultados obtidos para a mesa vibratória com medições realizadas nas vibrações longitudinais, transversais e verticais. A mesa vibratória como visto na metodologia faz parte da vibrocompactadora de laboratório utilizada para moldagem dos corpos de prova.

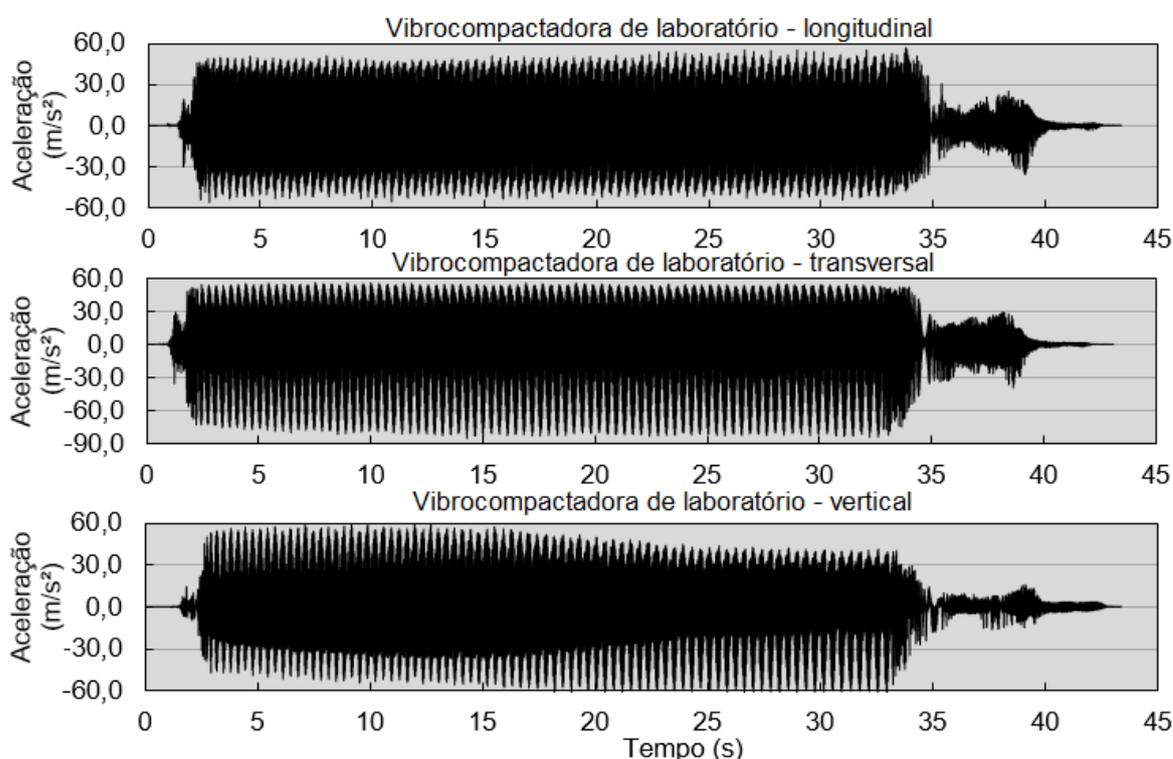


Figura 82: Medidas de aceleração da mesa vibratória da vibrocompactadora de laboratório

Na Figura 82 é mostrado que existe uma aceleração semelhante em todas as direções (longitudinal, transversal e vertical) de aproximadamente 45 m/s<sup>2</sup>, representada pela parte mais escura (mais frequente) das imagens. O que significa que a mesa vibratória apresenta praticamente a mesma aceleração em todas as direções.

Para a análise do consistômetro “VeBe”, como mostra a Figura 83, foram analisadas várias intensidades de vibração. Isso porque, diferentemente da mesa vibratória o consistômetro “VeBe” pode ser ajustado conforme a necessidade em seis intensidades de vibração. Neste equipamento a direção vertical apresenta a maior aceleração em relação as outras direções.

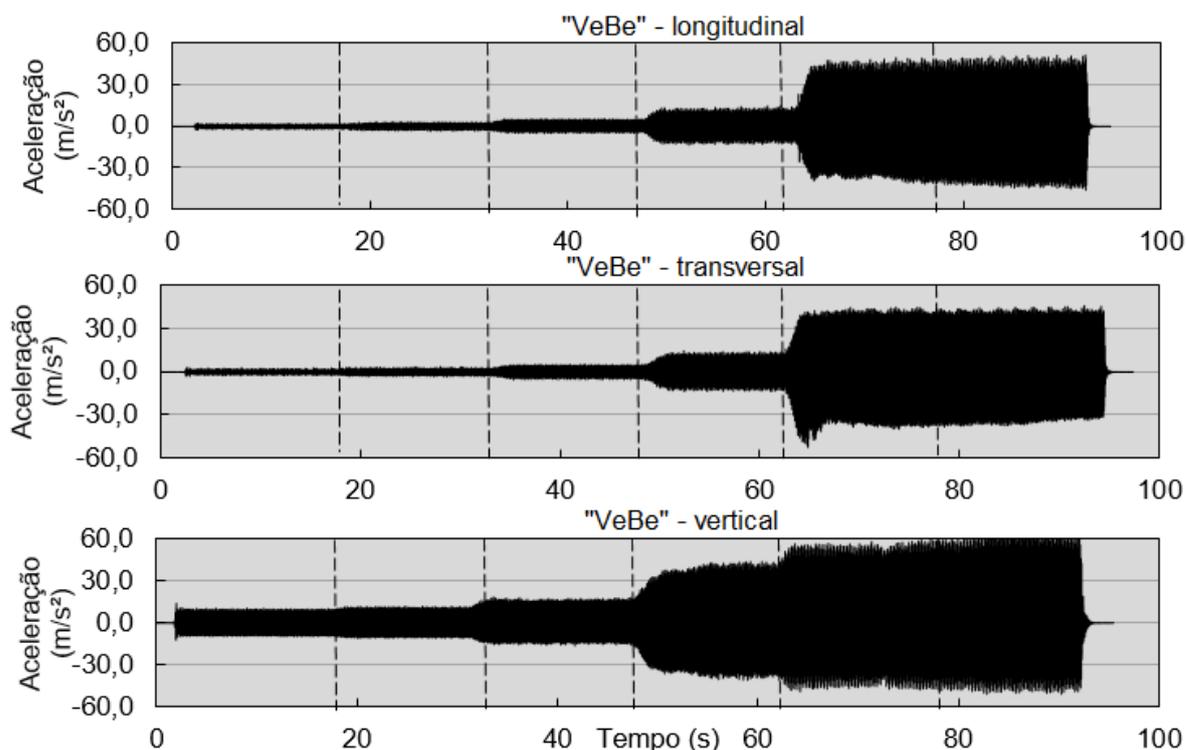


Figura 83: Medidas de aceleração do consistômetro “VeBe”

Enquanto a aceleração do consistômetro “VeBe” na direção vertical no último estágio fica em aproximadamente 60 m/s<sup>2</sup>, nas outras duas direções se apresenta semelhante a mesa vibratória com uma aceleração predominante de aproximadamente 45 m/s<sup>2</sup>.

É importante salientar que na vibrocompactadora de laboratório e no consistômetro “VeBe”, as medições foram realizadas sem a aplicação de compressão simultânea à vibração.

Embora nos dois equipamentos, seja possível observar uma vibração relativamente constante, a vibrocompactadora industrial, possui dois picos de aceleração e ainda assim não constantes (Figura 84). O primeiro pico apresentado na Figura 84, representa o tempo de espalhamento do concreto no molde, sem a compactação e com um tempo de processamento bem mais curto, em torno de 1,5 s. O segundo pico representa a etapa de vibrocompactação, com uma tensão de compactação de 245 kPa. Esta última etapa tem um tempo de duração de aproximadamente 4s.

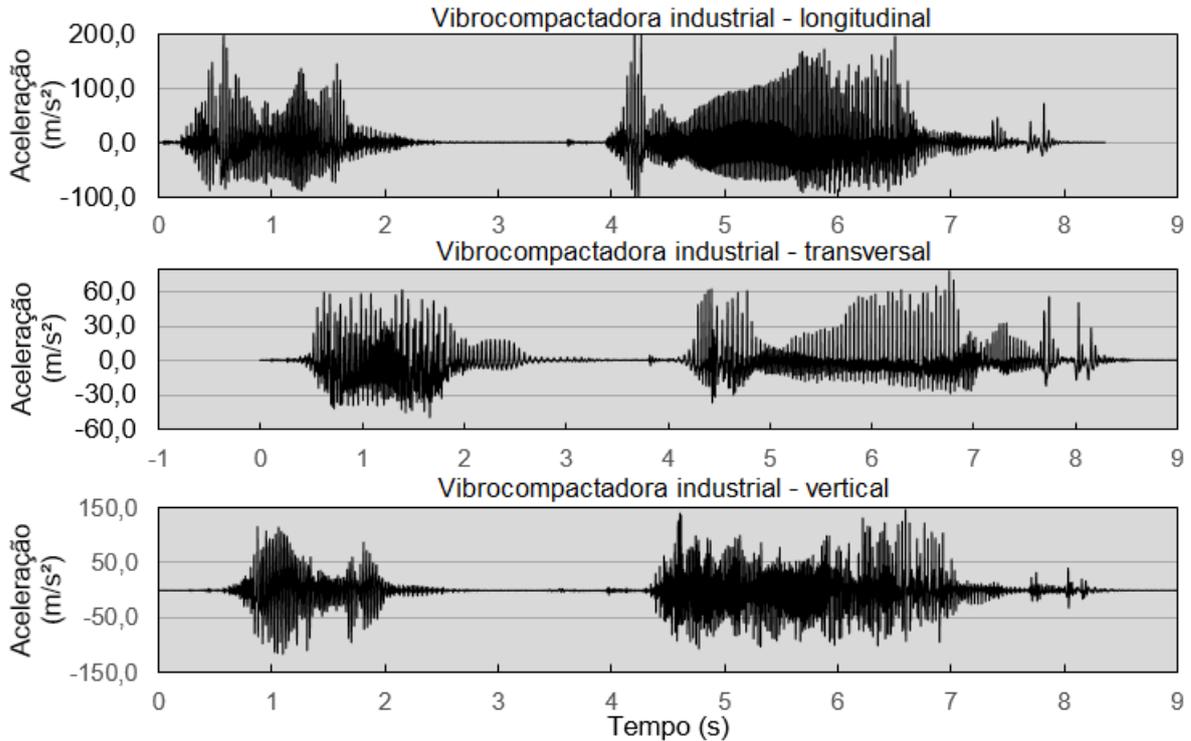


Figura 84: Medidas de aceleração da vibrocompactadora industrial

Com os resultados de amplitude foram obtidos, pelo software de análise, as frequências de cada um dos equipamentos em cada uma das direções. O resultado foi obtido, da mesma forma que para as amplitudes, por meio do resultado mais frequente observado. Na Figura 85 podem ser observadas as frequências da vibrocompactadora industrial na direção vertical e o número de vezes que aparece.

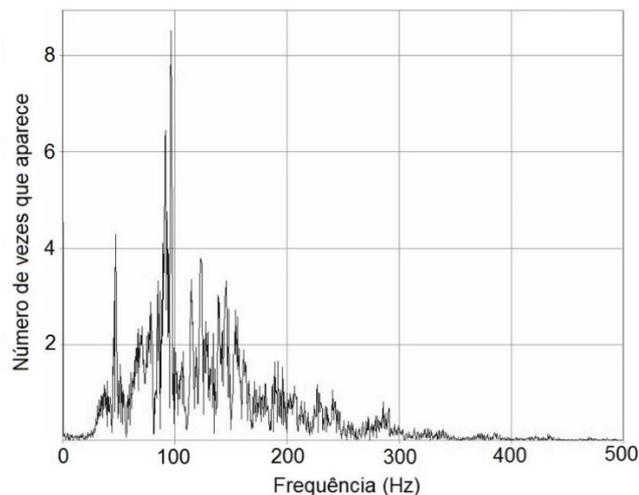


Figura 85: Frequência de vibração da vibrocompactadora industrial na direção vertical

Por meio da análise da Figura 85, mais uma vez fica evidente a grande quantidade de picos apresentada por este equipamento, dentre as quais há uma frequência mais evidente. Na Tabela 16, são apresentados os dados de cada um dos equipamentos, incluindo frequência e tensão de compressão aplicado na compactação.

Tabela 16: Dados dos equipamentos de vibrocompactação

Dados	Consistômetro "VeBe"	Vibrocompactadora de laboratório	Vibrocompactadora industrial
Frequência (Hz)			
Direção longitudinal	16,1	65,9	95,7
Direção transversal	16,1	65,9	21,0
Direção vertical	16,1	65,9	96,7
Tensão de compactação (kPa)	0,65	52,40	245,0

Deve-se ressaltar que o bloco produzido pela empresa tem uma altura de 6 cm, enquanto o corpo de prova produzido na vibrocompactadora de laboratório possui 10 cm. Com base nestas informações é evidente que os corpos de prova necessitará de um tempo de vibrocompactação maior para obter as mesmas propriedades de um bloco.

Contudo, esta hipótese foi verificada experimentalmente. Com o mesmo traço produzido pela vibrocompactadora industrial foram obtidos corpos de prova na vibrocompactadora de laboratório, para a qual foram avaliadas: a massa específica saturada e a resistência mecânica à compressão axial aos sete dias em diversos tempos de vibrocompactação, conforme apresentado na Figura 86 e na Figura 87, com dados individuais disponíveis no APÊNDICE F. Foram testados os tempos (em segundos) de: 20, 40, 60, 120, 240 e 480.

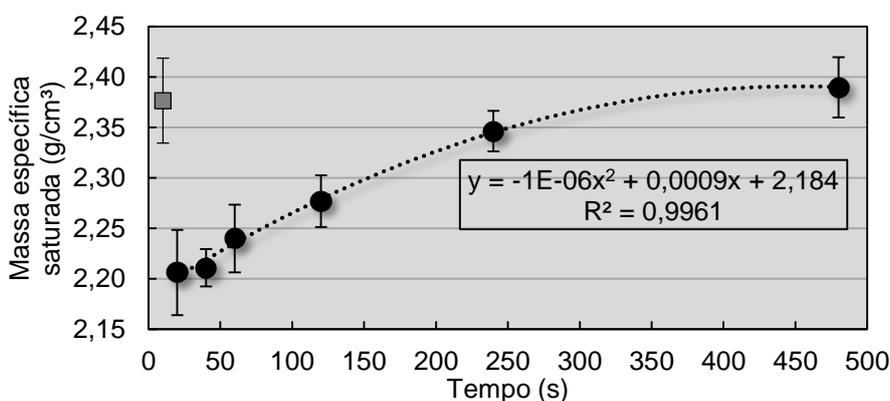


Figura 86: Variação da massa específica saturada de corpos de prova produzidos em diferentes tempos de vibrocompactação (Tempo "VeBe" de 24s e  $a/c = 0,61$ )

Analisando a Figura 86, dentro do intervalo do desvio padrão dos blocos para os agregados naturais da empresa, foi verificado que o tempo necessário para que a vibrocompactadora de laboratório conseguisse obter um corpo de prova com a mesma massa específica saturada do concreto referência-empresa (blocos) seria igual ou maior que 240s.

Ainda na Figura 86, foi obtida uma curva polinomial de ordem 2 que descreve, por meio dos resultados, o comportamento da vibrocompactadora de laboratório de acordo com o tempo de vibrocompactação. A curva polinomial foi escolhida por representar de forma mais

realista o comportamento da vibrocompactação, uma vez que em determinado ponto a curva evolui de forma mais lenta, representando que até certo ponto a massa específica aumenta para tempos mais longos de vibrocompactação, até um tempo limite no qual não há mais alteração. O coeficiente de determinação encontrado foi de 0,9961, o que representa uma razoável correlação entre os resultados e a linha de tendência.

É importante salientar também, que tempos maiores que 60 segundos, resultaram em perda de pasta pelas aberturas do molde. Concluiu-se com isso que, com o aumento do tempo de vibrocompactação, as partículas de agregados aproximaram-se e com isso a espessura da camada de pasta sobre as mesmas tornou-se cada vez menor. Isto demonstra que há uma quantidade elevada de pasta para o equipamento utilizado. Supõe-se então que esta perda de pasta foi necessária para a obtenção do melhor ajuste das partículas e para o alcance da massa específica desejada.

Outra evidência observada por meio da Figura 86 e da Figura 87, foi que os valores médios de resistência à compressão axial do concreto referência-laboratório são condizentes com os resultados obtido pelo gráfico de massa específica para o mesmo concreto. Com 240s de vibrocompactação, o valor obtido para a referência-laboratório foi semelhante ao obtido para o concreto referência-empresa, valor corrigido.

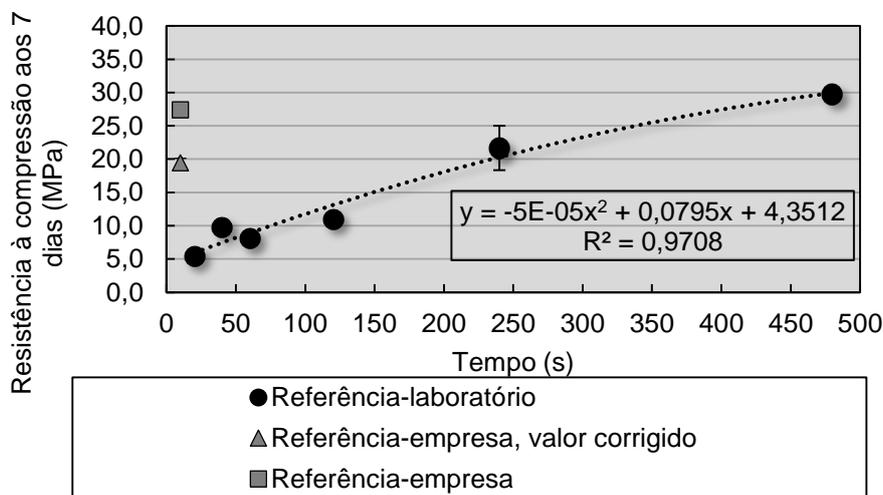


Figura 87: Variação da resistência à compressão axial aos sete dias de corpos de prova produzidos em diferentes tempos de vibrocompactação (Tempo “VeBe” de 24 s e a/c = 0,61)

Por meio dos dados da Figura 87, conclui-se que o valor do coeficiente de transformação ( $k=0,71$ ) da resistência à compressão axial dos blocos para corpos de prova foi confirmado, uma vez que com 240s de vibrocompactação os corpos de prova obtiveram as mesmas características dos blocos (mesma resistência à compressão e mesma massa específica saturada, ambas aos sete dias de idade). O esperado é que o tempo de vibrocompactação de concretos com agregados reciclados seja maior devido a sua rugosidade superficial, que teoricamente proporciona maior atrito. Contudo, não é admissível

pelas empresas que o tempo de processamento de concretos com agregados reciclados seja maior, devido as prováveis perdas de produtividade.

Para verificar esta questão foi então produzido um traço de concreto reciclado para analisar a massa específica saturada (Figura 88) e a resistência mecânica à compressão axial (Figura 89) aos sete dias com diferentes tempos de vibrocompactação conforme foi realizado com o traço e agregados da empresa. O traço utilizado foi o definido pelo item 4.5. Os resultados individuais dos corpos de prova podem ser analisados no APÊNDICE G.

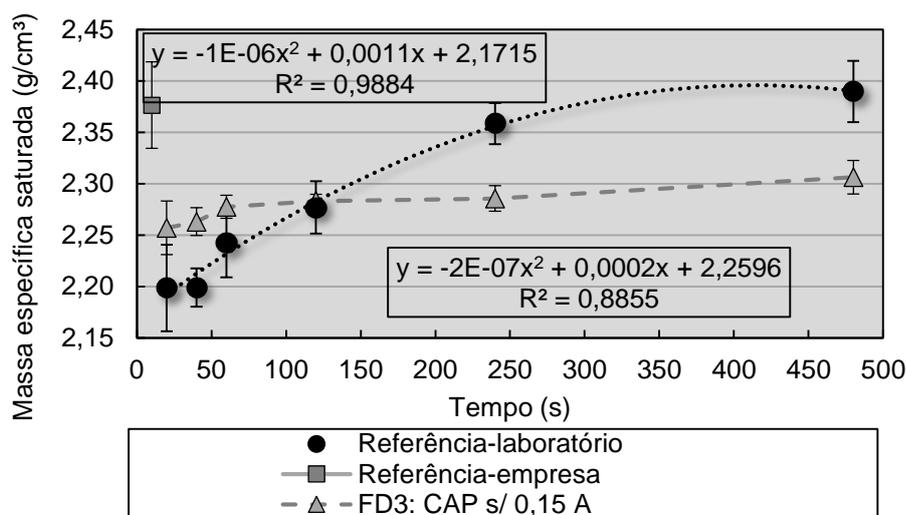


Figura 88: Variação da massa específica aos sete dias de concretos com agregados reciclados produzidos em diferentes tempos de vibrocompactação (Tempo “VeBe” de 27 s e a/c = 0,95)

Em relação a massa específica, analisando apenas os valores médios percebe-se que no concreto com agregados reciclados (FD3: CAP s/0,15AP) é apresentado o mesmo comportamento que para concretos com agregados naturais (referência-laboratório), ou seja, evolui positivamente com o aumento do tempo de vibrocompactação. Contudo, a taxa de evolução é bem menor que para os concretos com agregados naturais, sendo que com tempos menores que 120s apresenta uma massa específica relativamente maior que para o concreto natural. Isso pode ser explicado pelo fato do concreto com agregados reciclados estar bem empacotado e que o aumento do tempo de vibrocompactação pouco influenciou no aumento da massa específica. Outra razão para a reduzida taxa de evolução da massa específica do agregado reciclado pode estar na elevada rugosidade das partículas que dificultam a movimentação das partículas dentro do concreto.

O fato da massa específica do concreto com traço FD3 não atingir o valor da referência-laboratório em tempos maiores que 120s pode ser explicado pela massa específica do agregado reciclado que é menor em relação ao do natural e também pela porosidade interna a qual é maior que do natural. Por esse motivo, o concreto com agregados reciclados (FD3) também não atingiu os valores da referência-empresa.

O comportamento do concreto com agregados reciclados (FD3: CAP s/0,15AP) em relação ao aumento da resistência à compressão axial com o tempo de vibrocompactação (Figura 89) foi semelhante ao da massa específica. Contudo, esse concreto atinge a mesma resistência à compressão axial do concreto com agregados naturais referência-empresa, valor corrigido e ajustado com o tempo de vibrocompactação de 120s, não havendo alteração estatística na resistência à compressão com tempos maiores de vibrocompactação. Este tempo pode ser explicado pelo fato dos agregados reciclados apresentarem uma alta densidade de empacotamento.

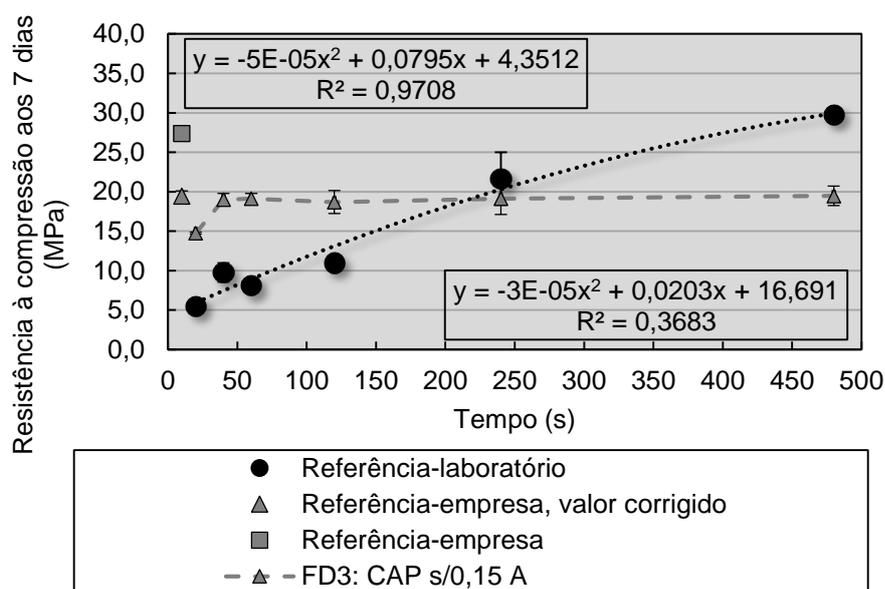


Figura 89: Variação da resistência à compressão axial aos sete dias de concretos com agregados reciclados produzidos em diferentes tempos de vibrocompactação (Tempo “VeBe” de 27 s e a/c = 0,95)

Na Figura 89 cabe ressaltar algumas explicações. O valor da referência-laboratório está ajustado para o cimento CP V ARI bem como o valor da referência-empresa.

Em todos os casos (referência-laboratório e FD3: CAP s/0,15AP), observou-se que com tempos maiores de vibrocompactação ocorreram perda de pasta do concreto o que sugere que se esteja usando provavelmente uma quantidade de água e cimento superior ao necessário para este equipamento. Como a relação a/c é definida pelo equipamento “VeBe”, devido ao mencionado, este tempo deve ser ajustado. Ao atingir valores próximos a massa específica estabelecida pela empresa, é necessário realizar outro ensaio no consistômetro “VeBe” e analisar um novo tempo ou grau “VeBe”, o que irá alterar a quantidade de água. Assim, poderá ser confirmado se a quantidade de água utilizada inicialmente é ou não excessiva para preenchimento dos vazios entre as partículas de agregado e cimento.

Em resumo, o tempo equivalente estabelecido para o traço de referência (empresa /laboratório) foi de 240s, por ser ideal tanto para o concreto de referência como o concreto com agregados reciclados (FD3).

#### 4.7 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS COM O TEMPO EQUIVALENTE

Sendo determinado pelo item 4.6 o tempo equivalente entre a vibrocompactadora industrial e a vibrocompactadora de laboratório, foram então moldados corpos de prova com o traço escolhido (FD3) e com traço da referência-empresa para avaliação da resistência à compressão axial, massa específica saturada (Figura 90), resistência à tração por compressão diametral e absorção de água (Figura 91) aos 7 e 28 dias. Estas duas figuras se referem a valores teóricos relativos à blocos de concreto obtidos por meio da transformação dos resultados dos corpos de prova com o tempo equivalente de 240 segundos para blocos intertravados de concreto. Os valores obtidos pelos corpos de prova foram simplesmente divididos por 0,71, por meio do processo inverso da “correção”. Os valores individuais dos corpos de prova das duas figuras podem ser analisados no APÊNDICE H.

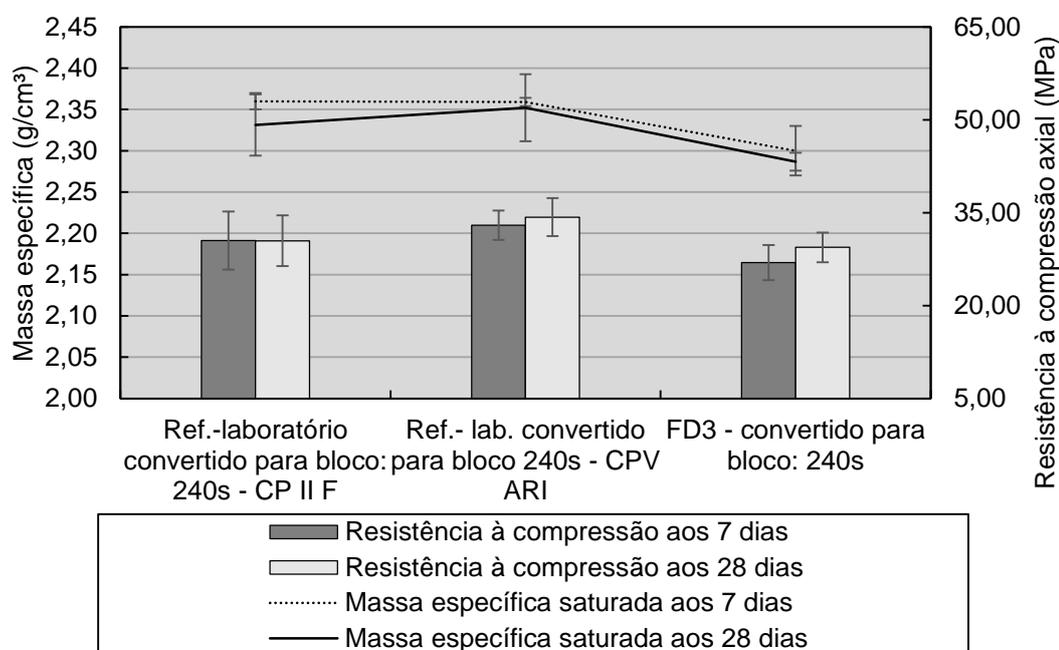


Figura 90: Valores teóricos de resistência à compressão axial e massa específica saturada de blocos com agregados reciclados

Por meio dos dados da Figura 90, observa-se que nenhum dos blocos teóricos atingiu o valor médio esperado para resistência mecânica à compressão axial de 35 MPa. Contudo, os valores de resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias dos concretos de referência não obtiveram diferenças estatísticas dos concretos com agregados reciclados, apesar deste último apresentar valores médios inferiores.

Em relação a massa específica saturada, como esperado, os valores para concretos com agregados reciclados foram menores, e os valores de absorção de água maiores, apresentados na Figura 91, devido ao elevado volume de vazios internos das partículas.

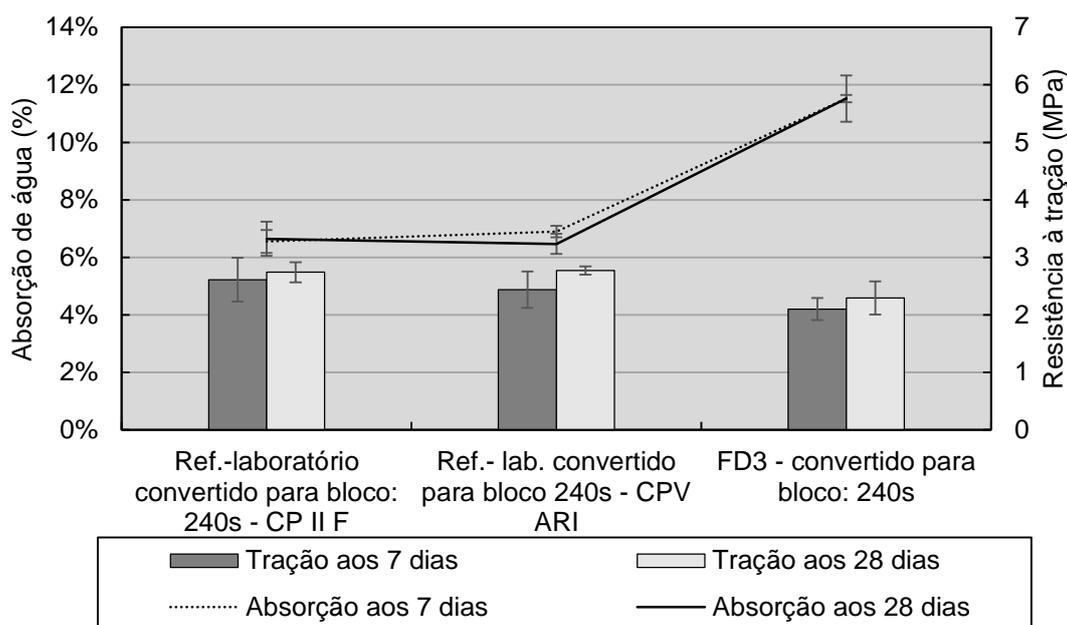


Figura 91: Valores teóricos de resistência à tração por compressão diametral e absorção de blocos com agregados reciclados

Em relação a resistência à tração por compressão diametral, também não houveram diferenças estatísticas, apesar do concreto com agregados reciclados apresentar valores médios mais baixos.

Dessa forma, é estatisticamente possível a obtenção de concretos secos utilizando agregados reciclados com igual consumo de cimento e desempenho aos concretos com agregados naturais, se utilizado técnicas de empacotamento de partículas. Entretanto, é preciso salientar que o concretos com agregados naturais não teve o traço desenvolvido utilizando técnicas de empacotamento de partículas.

#### 4.8 DISCUSSÃO GERAL

Neste trabalho, com 100% de substituição de agregados naturais por agregados reciclados de concreto (ARC), produzido em usina de reciclagem de RCD, e com consumo de cimento similar ao utilizado nas indústrias de pré-moldados, foi possível obter resistência mecânica à compressão axial semelhante a pavers produzidos industrialmente. Nos trabalhos de Latterza (1998), Amadei (2011), Soutsos *et al.* (2011b) e Matar e Dalatti (2012) foi necessário aumentar o consumo de cimento quando da substituição de agregados naturais por reciclados, para garantir a mesma consistência e resistência. Isso ressalta a importância e relevância do uso de ferramentas que aumentem a densidade de empacotamento de partículas, associado ao pré-umedecimento dos agregados reciclados sobre a resistência mecânica.

Contudo, não se pode deixar de observar que a relação água/cimento total é realmente superior a do concreto com agregados naturais, apesar de parte da água ser absorvida pelos agregados. Porém, descartando-se o volume de água para pré-umedecer os agregados reciclados, a relação água/cimento fica semelhante a do concreto com agregados naturais e até mesmo menor quando se retira a fração inferior a 0,15 mm do agregado reciclado. Entretanto, apesar do pré-umedecimento proporcionar uma idéia desta relação entre a água disponível para reação com o cimento, este valor ainda sim é impreciso, devido as trocas de água entre os agregados reciclados e a pasta

Comparando-se a força de compactação e a frequência de vibração da vibrocompactadora industrial com o vibrocompactadora de laboratório, foi constatado que a industrial é muito superior, sendo necessário um tempo equivalente de vibrocompactação em laboratório de 240s. O tempo equivalente é uma medida para compor um fator de escala de modo a produzir em laboratório, corpos de prova com as mesmas características dos blocos de concreto (pavers) obtidos industrialmente. Contudo, esse tempo elevado favorece a perda de parte da pasta, o que conseqüentemente reduz a camada que permeia as superfícies das partículas.

Não foram encontrados métodos ou procedimentos de dosagem consagrados para concretos secos. Contudo, a utilização dos modelos de empacotamento e do equipamento de vibrocompactação de laboratório se mostraram eficientes na elaboração de traços para esses, sendo possível a execução destes procedimentos dentro das empresas.

## 5 CONCLUSÃO

Após a realização dos experimentos, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Em relação a diferença entre as características dos agregados das diferentes empresas:
  - Estar dentro dos limites normativos não significa atender aos requisitos de melhor empacotamento. Isso ficou evidente nas análises de teor de pulverulentos e de distribuição granulométrica dos agregados reciclados;
  - Apesar de algumas empresas apresentarem valores de teor de materiais pulverulentos que atendem a NBR 15116 (2004), em relação aos modelos de empacotamento, a distribuição granulométrica do agregado reciclado em questão necessitaria de uma quantidade de material pulverulento superior ao desta norma para garantir um maior empacotamento;
  - Comparando a faixa granulométrica dos agregados reciclados miúdos com a faixa granulométrica da norma para agregados naturais observou-se uma maior semelhança com a distribuição granulométrica do modelo de empacotamento máximo. A mesma observação é válida para o agregado reciclado graúdo em relação ao graúdo natural. Esses resultados mostram que agregados reciclados tem um maior potencial de empacotamento;
  - Os ARC estudados apresentaram morfologia mais arredondadas que areias naturais e artificiais e;
  - Em relação a diferença entre o primeiro e segundo lote da empresa escolhida (C):
    - A reduzida abrasão durante simulação em betoneira garante que não há alteração na distribuição granulométrica;
    - Com 4 minutos de imersão em água, o agregado reciclado miúdo absorve 98 % do total de água absorvida em 24 horas e as partículas graúdas com 2 minutos de imersão absorvem 97% do total, o que deve prescindir a pré-umidificação dos agregados reciclados antes da produção do concreto para que a água de amassamento não seja absorvida;
- Em relação a diferença entre os modelos de empacotamento de Funk e Dinger e De Larrard:
  - Ambos os modelos de empacotamento apontaram para maiores densidades de empacotamento ao incluir o cimento no cálculo e retirar a fração inferior a 0,15 mm do agregado reciclado. Quando o cimento não foi incluído no cálculo, ambos os modelos apresentaram melhores densidades de empacotamento quando utilizou-se a curva completa dos agregados reciclados;

- Considerar o cimento como uma partícula para o cálculo da densidade de empacotamento possibilitou observar mais claramente qual a influência da variação do mesmo no resultado final da densidade de empacotamento e;
- Apesar de apresentar traços bastante semelhantes, comparando os modelos de Funk e Dinger e de De Larrard, o primeiro produziu traços com quantidades inferiores de agregados graúdos;
- Em relação ao método de obtenção da consistência dos concretos (relação a/c):
  - A utilização de um intervalo de consistência e um teor de cimento como parâmetros fixos para a pesquisa foi uma alternativa para o controle da elevada absorção do agregado reciclado e;
  - Devido à perda de pasta observada com elevados tempos de vibrocompactação fica evidente que o tempo “VeBe” deve ser ajustado de acordo com a vibrocompactadora utilizada;
- Em relação ao desempenho das máquinas de vibrocompactação:
  - Foi observado que é possível a obtenção de um tempo equivalente para vibrocompactadoras com diferentes características de vibração e diferentes intensidades de compressão;
- Em relação a obtenção de concretos com agregados reciclados com resistência a compressão de 35 MPa:
  - Foi constatado que é possível a obtenção de concretos com 100% de agregados reciclados de concreto com a mesma resistência à compressão aos 28 dias e mesmo consumo de cimento que concretos com agregados naturais utilizados na fabricação de paver por indústria de pré-moldados. Contudo, não foi possível obter a resistência esperada de 35 MPa para nenhum dos concretos (com agregados naturais ou reciclados), sendo necessário para isso, maior adição de cimento;
  - É importante ressaltar que não foi utilizada nenhuma técnica de empacotamento para os concretos com agregados naturais, sendo utilizado como referência um traço usual de uma empresa específica. Caso fossem utilizados métodos de empacotamento para os agregados naturais, poderia-se obter resistências superiores.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a elaboração desta dissertação surgiram algumas sugestões para trabalhos a fim de complementar o mesmo. Dentre estas sugestões estão:

- Produzir blocos de concreto com agregados reciclados em vibrocompactadoras industriais para avaliar o desempenho mecânico e a durabilidade;
- Elaborar uma equação ou modelo que descreva o comportamento do concreto (massa específica e resistência à compressão) em função da frequência, aceleração e tempo de moldagem nas máquinas vibrocompactadoras;
- Estudar o ajuste da relação água/cimento e do tempo “VeBe” para vibrocompactadoras em diferentes intervalos de tempo, principalmente devido a expulsão de pasta em intervalos maiores de vibrocompactação;
- Estudar a introdução de aditivos e seu efeito na vibrocompactação de concretos;
- Estudar alternativa de uso para o material passante na peneira de 0,15 mm do agregado reciclado e não utilizado em traços com empacotamento otimizado, para que não se torne um passivo ambiental;
- Aplicar o modelo de empacotamento de De Larrard para cimentos com a curva granulométrica da fração do agregado reciclado de concreto inferior a 0,075 mm e;
- Desenvolver um equipamento de laboratório que possa variar a frequência, amplitude e tensão de compactação para o estudo de concretos secos.

## REFERÊNCIAS

AIQIN, Wang; CHENGZHI, Zhang; NINGSHENG, Zhang. The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement. **Cement and Concrete Research** **29**, p. 1721-1726, 1999.

AMADEI, Daysa I. B. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do município de Juranda/PR**. 2011. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011. Disponível em: <<http://www.peu.uem.br/Discertacoes/Daysa.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2015.

ANGULO Sérgio C.; JOHN, Vanderley M. Requisitos para execução de aterros de resíduos de construção e demolição. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, São Paulo BT/PCC/436, ISSN 0103-9830, 2006.

ARAGÃO, Helio G. **Análise estrutural de lajes pré-moldadas produzidas com concreto reciclado de construção e demolição**. 2007. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007. Disponível em: <[http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec/dissertacoes\\_arquivos/Dissertacoes/Helio%20Guimaraes%20Aragao.pdf](http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec/dissertacoes_arquivos/Dissertacoes/Helio%20Guimaraes%20Aragao.pdf)>. Acesso em: 18 jan. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Manual de pavimento intertravado: passeio público. São Paulo, 2010.

\_\_\_\_\_. Guia básico de utilização do cimento Portland. 7.ed. 28p. (BT-106) ISBN 85-87024-23-X. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR 7222: concreto e argamassa — determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndrico. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. NBR 7680: concreto - extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. NBR 7809: agregado graúdo - determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. NBR 9781: peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. NBR 10004: resíduos sólidos– classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

\_\_\_\_\_. NBR 15116: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos. Rio de Janeiro, 2004b.

\_\_\_\_\_. NBR NM 30: agregado miúdo - determinação da absorção de água. Rio de Janeiro. 2001a.

\_\_\_\_\_. NBR NM 45: agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. 2006.

\_\_\_\_\_. NBR NM 46: agregados - determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro. 2003b.

\_\_\_\_\_. NBR NM 51: agregado graúdo – ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro. 2001b.

\_\_\_\_\_. NBR NM 52: agregado miúdo - determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2009.

\_\_\_\_\_. NBR NM 53: agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro. 2003c.

\_\_\_\_\_. NBR NM 248: agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003a.

BARRA, Marilda. **Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado**. 1996. 223 f. Tese (Doutorado) - Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camin, Canal i Ports. Universitat Politècnica de la Catalunya, Barcelona, 1996.

BEJA, Igor A. **Agregado reciclado de construção e demolição com adição de aglomerantes hidráulicos como sub-base de pavimentos**. 2014. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-16102014-151237/pt-br.php>>. Acesso em: 31 ago. 2015.

BENEZET, Jean C.; ADAMIEC P.; NEMOZ-GAILLARD, M. Study of real granular assemblies. **Powder Technology 173**. Centre des Matériaux de Grande Diffusion, Ecole des Mines d'Alès, France. 2007. 118–125.

BLEECK, Thomas H. **Particle packing; an effective approach to optimized design of ultra high strength and self compacting concretes**. University of New South Wales at the Australian Defence Force Academy. Final Thesis Report 2011. 17 p.

BONADIA, Phascoal; STUDART, André R.; PILEGGI, Rafael G.; PANDOLFELLI, Victor C. Aplicação do conceito de distância de separação interagregado (MPT) a concretos refratários de alta alumina. **Cerâmica**, v.45 n.291, São Paulo, 1999.

BRASIL. Decreto nº 7404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. **Diário Oficial da União República Federativa do Brasil**, Brasília, DF. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm)>. Acesso em: 11 mar. 2016.

BROUWERS, H. Jos H.; RADIX, H. J. Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research** **35**, p. 2116 – 2136, 2005a.

\_\_\_\_\_. Self-compacting concrete: the role of the particle size distribution. In: FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DESIGN, PERFORMANCE AND USE OF SELF-CONSOLIDATING CONCRETE - SCC'2005, p. 26 - 28, China, 2005b.

BUTTLER, Alexandre M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados de concretos reciclados**. 2003. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-06082003-172935/publico/buttler.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2015.

\_\_\_\_\_. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. 2007. 499 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-16102007-111106/pt-br.php>>. Acesso em: 18 jan. 2015.

CABRAL, Antônio E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 254 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-21102007-164548/pt-br.php>>. Acesso em: 31 ago. 2015.

CAETANO, Mário J. L. **Tamanho das partículas e sua distribuição**. 2011. Disponível em: <[http://www.ctb.com.pt/?page\\_id=3592](http://www.ctb.com.pt/?page_id=3592)>. Acesso em: 30 out. 2014.

CAMARGO QUÍMICA. Ficha técnica: CQ PRESS MIX HYPER Disponível em: <<http://www.camargoquimica.com.br/download/36/cq-press-mix-hyper->>. Acesso em: 17 mar. 2015.

CAPELLO, Giuliana. Entulho vira matéria-prima: Agregados reciclados chegam aos canteiros das construtoras, adquiridos de empresas especializadas ou gerados na própria obra. **Téchne**. Edição 112. Julho, 2006. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/112/artigo2870812.aspx>>. Acesso em: 3 ago. 2014.

CARNEIRO, Alex P.; BURGOS, Paulo C.; ALBERTE, Elaine P. V. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. Editado por: CASSA, José C. S.; CARNEIRO, Alex P.; BRUM, Irineu A. S. de. **Uso de agregados reciclados em camadas de base e sub-base de pavimentos: projeto entulho bom**. Cap. 06. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, 2001.

CASTRO, Alessandra L. de; PANDOLFELLI, Victor C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**. 55 (2009) 18-32.

CHAVES, Arthur P.; PERES, Antônio E.C. **Teoria e Prática de Tratamento de Minérios: britagem, peneiramento e moagem**. Ed. Signus, v.3, 2ª.ed., São Paulo, 2003.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 307/2002**. Legislação. Brasília, Distrito Federal, Brasil: DOU nº 136, de 17 de julho de 2002, Seção 1, p. 95-96.

CONCEIÇÃO, Edilene de S. **Influência da distribuição granulométrica no empacotamento de matérias-primas na formulação de porcelânicos**. 2011. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-04112011-150732/pt-br.php>>. Acesso em: 31 ago. 2015.

DE LARRARD, François. Concrete optimisation with regard to packing density and rheology. In: 3º RILEM: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RHEOLOGY OF CEMENT SUSPENSIONS SUCH AS FRESH CONCRETE, France, 2009.

\_\_\_\_\_. **Concrete mixture proportioning: as scientific approach**. London: E&FNSpon. 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 093/94: solos – determinação da densidade real. 1994. 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 064/2004 – ME: pavimento rígido – determinação da consistência do concreto pelo consistômetro “VeBe” – método de ensaio. Rio de Janeiro. 2004. 5p.

FABRO, Fabiana; GAVA, Giovanna P.; GRIGOLI, Henrique B.; MENEGHETTI, H. C. Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. vol. 4, nº 2, p. 191-212, 2011. ISSN 1983-4195.

FENNIS, Sebastiana A. A. M. **Design of ecological concrete by particle packing optimization**. 2011. 277 f. Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica de Delft, Delft, 2011.

FENNIS, Sebastiana A. A. M.; WALRAVEN, Joost C.; DEN UIJL, J. A. Compaction-interaction packing model: regarding the effect of fillers in concrete mixture design. **Materials and Structures** **46**, p. 463–478, 2013a.

\_\_\_\_\_. Defined-performance design of ecological concrete. **Materials and Structures** **46**, p. 639–650, 2013b.

\_\_\_\_\_. The use of particle packing models to design ecological concrete. **HERON**, Delft University of Technology, the Netherlands, v. 54, N° 2/3 20p, 2009.

FENNIS, Sebastiana A. A. M.; WALRAVEN, Joost C. Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. **HERON**, Delft University of Technology, the Netherlands, v. 57, N°. 2/73, 30p. 2012.

FERGUSON, Samuel P. **Sphere packings V**. 1997. 54 f. Tese (Doutorado) - University of Michigan, 1997. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=B6EE43480509C46E26B6A30BED5B7ADA?doi=10.1.1.56.3254&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2016.

FERNANDES, Idário. **Blocos e pavers: produção e controle de qualidade**. Ed. Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais LTDA, 6ª ed. São Paulo, 2008. 182 p.

FIGUEIRA, Hedda V. O.; ALMEIDA, Salvador L. M.; LUZ, Adão B. da. **Tratamento de Minérios**, 4ª Ed. CETEM 113. Pág. 113 a 194. Rio de Janeiro. 2004.

FLATT, Robert J. **Interparticle forces and superplasticizers in cement suspensions**. 1999. 330 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Departamento de Materiais da Escola politécnica Federal de Lausanne, Suíça, 1999.

FORMADINI, Sidiclei. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**. 2005. 285 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <[http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat\\_view/28-doutorado/61-2005?Itemid=>](http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat_view/28-doutorado/61-2005?Itemid=>)>. Acesso em: 31 ago. 2015.

FUNG, Wilson W. S.; KWAN, Albert K. H.; WONG, Henry H. C. Wet packing of crushed rock fine aggregate. **Materials and Structures** **42**, p. 631–643, 2009.

FUNK, J.E., DINGER, D.R. FUNK, J.E.J. (1980) Caol Grinding and Particle Size Distribution Studies for Coal-Water Slurries at High Solids Content. **Final Report, Empire State Electric Energy Research Corporation (ESEERCO)**. New York.

FURLAN. Alimentadores Vibratórios. Disponível em: <<http://furlan.com.br/2014/alimentadores-calhas-vibratorias/>>. Acesso em: 30 set. 2014a.

\_\_\_\_\_. Peneiras Vibratórias. Disponível em: <<http://furlan.com.br/2014/peneiras-vibratorias/>>. Acesso em: 30 set. 2014b.

\_\_\_\_\_. Transportadores de Correia. Disponível em: <<http://furlan.com.br/2014/transportadores-de-correia/>>. Acesso em: 30 set. 2014c.

FURNAS, C. C. Grading aggregates – Mathematical relations for beds of broken solids of maximum density. **Industrial and Engineering Chemistry**, Vol 23, nº9, p. 1052-1057. 1931.

GAYARRE, Fernando L.; LÓPEZ-COLINA, Carlos; SERRANO, M.A.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, A. Manufacture of concrete kerbs and floor blocks with recycled aggregate from C&DW. **Construction and Building Materials 40**, University of Oviedo, Espanha, Ed. Elsevier, 1193–1199, 2013.

GOLTERMANN, Pear; JOHANSEN, Vagn; PALBØL, Lars. Packing of aggregates: an alternative tool to determine the optimal aggregate mix. **ACI Materials Journal 94-M51**, p. 434-442, 1997.

GONÇALVES, Rodrigo D. C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto**: um novo material para dosagens estruturais. 2001. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. Disponível em: <[http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/2001ME\\_RodrigoDantasCasilloGoncalves.pdf](http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/2001ME_RodrigoDantasCasilloGoncalves.pdf)>. Acesso em 18 jan. 2015.

GRADIN, Antônio M. N.; COSTA, Paulo S. N. **Reciclagem dos resíduos sólidos da construção civil**. UCSal – Universidade Católica do Salvador, 2009. Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/download/RESIDUOS/leitura%20anexa%202.pdf>>. Acesso em 21 jun. 2014.

GRADWELL, Jo; TICKELL, R. Geoff; MILLARD, Stephen G.; SOUTSOS, Marios N.; BUNGEY, John H.; JONES, Nicola. Determining the economic viability of precast concrete products made with recycled construction and demolition waste. In: INTERNATIONAL CONFERENCE: SUSTAINABLE WASTE MANAGEMENT AND RECYCLING: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES, Londres, Kingston University, 2004.

HALES, Thomas. A proof of the Kepler conjecture. In ANNALS OF MATH. 162, 1065-1185, 2005

HANSEN, Tobern C.; BOEGH, Erik. Elasticity and drying shrinkage of recycled-aggregate concrete. **ACI Journal**, v. 82, n. 56, p. 648-652, 1985.

HE, Huan; STROEVEN, Piet; STROEVEN, Martijn; SLUYS, Lambertus J. Influence of particle packing on elastic properties of concrete. **Magazine of Concrete Research** **64(2)**, p.163–175, 2012.

HELENE, P. TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto. São Paulo: Pini, 1992.

HENAN HONGJI MINE MACHINERY CO., LTD. Britador de impacto vertical. Disponível em: <<http://www.hjcrusher.com.pt/2-vertical-impact-crusher-5.html#s>>. Acesso em: 28 out. 2014.

HERMANN, Aline; LANGARO, Eloise A.; LOPES, Sarah H.; KLEIN, Nayara S. Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico. **Revista Ibracon de estruturas e materiais, RIEM**. ISSN 1983-4195. 2015.

HEWLETT, Petter C. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4<sup>o</sup> ed. USA. Elsevier Science & Technology Books. 2004. ISBN: 0750662565

HUNGER, Martin; BROUWERS, H. Jos H. Development of self-compacting eco-concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BUILDING MATERIALS, Alemanha, 2006, p. 2-0189–2-0198.

HÜSKEN, G.; BROUWERS, H. Jos H. A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research** **38**, p. 1246–1259, 2008.

ITAMBÉ. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/produtos/cp-v-ari/>>. Acesso em: 12 nov. 2014.

JONES, Martyn R.; ZHENG, Li; NEWLANDS, Moray D. Comparison of particle packing models for proportioning concrete constituents for minimum voids ratio. **Materials and Structures**, Vol. 35, pp 301-309, 2002.

KLEIN, Nayara S. **El rol físico del agua en mezclas de cemento Portland**. 273 f. Tese (Doutorado) - Departament d'Enginyeria de la Construcció, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. 2012.

KWAN, Albert K.H.; FUNG, Wilson W.S. Packing density measurement and modelling of fine aggregate and mortar. **Cement & Concrete Composites** **31**, p. 349–357, 2009.

KWAN, Albert K. H.; FUNG, Wilson W. S.; WONG, Henry H. C. Water film thickness, flowability and rheology of cement–sand mortar. **Advances in Cement Research** **22**, N<sup>o</sup>. 1, p. 3–14. 2010.

KWAN, Albert K. H.; MORA, Carlos. F.; CHAN, H. C. Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing. **Cement and Concrete Research**, v. 29, N°. 9, p. 1403-1410, 1999.

KWAN, Albert K. H.; MORA, Carlos. F. Effects of various shape parameters on packing of aggregate particles. **Magazine of Concrete Research** 53, N°. 2, p. 91-100, 2001.

KWAN, Albert K. H.; CHAN, K. W.; WONG, Vivian. A 3-parameter particle packing model incorporating the wedging effect. **Powder Technology** 237, p. 172–179, 2013.

KWAN, Albert K. H.; WONG, Henry H. C. Packing density of cements materials: part 2—packing and flow of OPC + PFA + CSF. **Materials and Structures** 41, p. 773–784, 2008.

LASSO, Paulo R. O.; VAZ, Carlos M. P.; BERNARDI, Alberto C.de C.; OLIVEIRA, Cauê R. de; BACCHI, Osny O. S. Avaliação do uso de resíduos de construção e demolição reciclados como corretivo da acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. ISSN 0100-0683. vol.37, n°6, Viçosa, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-0683201300060022>>. Acesso em: 05 fev. 2016.

LATTERZA, Luciano de M. **Concreto com agregado gráudo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição**: um novo material para a fabricação de painéis leves de vedação. 1998.116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1998. Disponível em: < [http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/1998ME\\_LucianoDeMelloLatterza.pdf](http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/1998ME_LucianoDeMelloLatterza.pdf)>. Acesso em: 18 jan. 2015.

LEITE, Fabiana da C. **Comportamento de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2007. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <[http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-09012008-162141/publico/Dissertacao\\_de\\_Mestrado\\_Revisada\\_Fabiana\\_da\\_Conceicao\\_Leite.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-09012008-162141/publico/Dissertacao_de_Mestrado_Revisada_Fabiana_da_Conceicao_Leite.pdf)>. Acesso em: 18 jan. 2015.

LEITE, Mônica B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <[http://www.lume.ufrgs.br/bitstream\\_id/45864/000292768.pdf](http://www.lume.ufrgs.br/bitstream_id/45864/000292768.pdf)>. Acesso em: 18 jan. 2015.

LEVY, Salomon M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <[http://www.infohab.org.br/acervos/abstract/codigoAutor/785/codigo\\_biblio/31074/cod/1](http://www.infohab.org.br/acervos/abstract/codigoAutor/785/codigo_biblio/31074/cod/1)>. Acesso em: 18 jan. 2015.

LI, L.Gu; KWAN, Albert K. H. Mortar design based on water film thickness. **Construction and Building Materials** **25**, p. 2381–2390. 2011.

\_\_\_\_\_. Packing density of concrete mix under dry and wet conditions. **Powder Technology**, v. 253, p. 514-521, 2014.

LIMA, Adauto J. M. **Utilização de resíduo de Pinus spp e materiais cimentícios alternativos na produção de blocos para alvenaria estrutural**. Tese (Doutorado) - Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, 2009.

LUZ, Adão B. da; POSSA, Mario V.; ALMEIDA, Salvador L. **Tratamento de minérios**. CETEM – Centro de tecnologia mineral e CNPq. 2ª ed., Rio de Janeiro, 676 p, 1998.

LUZ, Adão B. da; SAMPAIO, João A.; FRANÇA, Sílvia C. A. **Tratamento de minérios**. CETEM – Centro de tecnologia mineral e CNPq. 5ª ed., Rio de Janeiro, 965 p, 2010.

MACHADO Jr, Eloy F.; AGNESINI, Marcos V. C. Estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas de microconcretos leves produzidos com argila expandida e com agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, Punta del Este, Uruguai, 2000. 12p.

MALTA, Juliana O.; SILVEIRA, Vanessa S.; GONÇALVES, Jardel P.; FILHO, Romildo D. T. Influência da pré-saturação do agregado miúdo reciclado na viscosidade e resistência à compressão de argamassas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 85-98, 2014.

MANGULKAR, Mangesh N.; JAMKAR, Sanjay S. Review of Particle Packing Theories used for Concrete Mix Proportioning. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, Volume 4, Issue 5, p. 143-148, 2013.

MAPRE, Equipamentos Rodoviários. Usina de Reciclagem de Entulho. Disponível em: <<http://mapreequipamentos.com.br/usina-de-reciclagem-de-entulho/>>. Acesso em: 30 set. 2014.

MARCHIONI, Mariana L. **Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco para peças de concreto para pavimentação intertravada**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-18072013-150832/pt-br.php>>. Acesso em: 31 ago. 2015.

MATAR, Pierre; DALATI, Roubá A. R. El. Using recycled concrete aggregates in precast concrete hollow blocks. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. **Mat.-wiss. u.Werkstofftech** **43**, N°. 5, 2012

MAZER, Wellington; MACIOSKI, Gustavo. Assessment of compatibility between superplasticizer and cements. In: VII BRAZILIAN CONFERENCE ON RHEOLOGY (BCR). Curitiba. 2015

METALÚRGICA SANTA RITA. Britador de mandíbulas. Disponível em: <<http://www.msr.com.br/ct/curiosidades/britador-de-mandibulas/>>. Acesso em: 29 ago.2014.

METSO, Minerals. Equipamentos para britagem. Disponível em: <[www.metsominerals.com.br](http://www.metsominerals.com.br)>. Acesso em: 29 out. 2014.

MIRANDA, Leonardo F. R. **Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos classe A da construção civil**. 2005. 438 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <[http://www.prppg.ufpr.br/ppgcc/sites/www.prppg.ufpr.br/ppgcc/files/documentos/tese\\_leonardo\\_miranda.pdf](http://www.prppg.ufpr.br/ppgcc/sites/www.prppg.ufpr.br/ppgcc/files/documentos/tese_leonardo_miranda.pdf)>. Acesso em: 18 jan. 2015.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Ed. Pini, 3ª Ed., 2008.

MOHAMMED, Mohammed H.; EMBORG, Mats; PUSCH, Roland; KNUTSSON, Sven. Packing Theory for Natural and Crushed Aggregate to Obtain the Best Mix of Aggregate: Research and Development. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, Vol: 6, N°07, p. 678-684, 2012.

MOREIRA, Lucia H. H. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-19012011-144053/pt-br.php>>. Acesso em: 18 jan. 2015.

MOTTA, Rosângela S. **Estudo laboratorial de agregados reciclados de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-19072006-114729/pt-br.php>>. Acesso em: 18 jan. 2015.

NEVILLE, Adam M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2º ed., Porto Alegre, Editora Bookman, 448p., 2013

NEVILLE, Adam M.; **Propriedades do Concreto**. 2º ed., São Paulo, Editora Pini Ltda, 1997.

OLIVEIRA, Alexandre L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação**. 2004. 271 f. Tese (Doutorado) - Pós-Graduação em Engenharia Civil da

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87148/206164.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 18 jan. 2015.

OLIVEIRA, Ivone R.; STUDART, André R.; PILEGGI, Rafael G.; PANDOLFELLI, Victor C. **Dispersão e Empacotamento de Partículas:** princípios e aplicações em processamento cerâmico. Ed. Fazenda Arte, S. Paulo, 2000, 224 p. ISBN 85-86425-15-X.

ORTEGA, Fernando dos S.; PILEGGI, Rafael G.; SEPÚLVEDA, Pilar; PANDOLFELLI, Victor C. Influência dos modelos de Alfred e de Andreasen sobre a microestrutura e densidade a verde de compactos cerâmicos obtidos por colagem ou prensagem. **Cerâmica** **43**, p. 283-284, 1997.

PETRUCCI, Eládio G. R.; PAULON, Vladimir A. **Concreto de cimento Portland**. Ed. Globo S.A., 13ª ed. São Paulo, 1998. 307 p.

PIROLA, Fernanda C. **Contribuição para o estudo de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação de 50 MPa**. 2011. 164f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/95668>>. Acesso em: 31 ago. 2015.

POON, Chi S.; CHAN, Dixon. Feasible use of concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. **Construction and Building Materials** **20**, p. 569–577, 2006.

SILVA, Abilio P.; SEGADÃES, Ana M.; DEVEZAS, Tessaleno C. Aplicação de métodos estatísticos na otimização da densidade de empacotamento de distribuições de pós de alumina. **Cerâmica** **50**, p. 345-354, 2004.

SILVA, Phillipe C. G; MIRANDA, Leonardo F. R. Análise da influência do controle granulométrico nas características físicas e mecânicas de agregados reciclados para pavimentação. In: ENTAC – ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2008, Fortaleza, Ceará. **Anais...12**, 10 p. Fortaleza, Ceará. 2008.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil:** a experiência do SINDUSCON-SP. São Paulo, 2005. Disponível em: <[http://www.sindusconsp.com.br/downloads/prodserv/publicacoes/manual\\_residuos\\_solidos.pdf](http://www.sindusconsp.com.br/downloads/prodserv/publicacoes/manual_residuos_solidos.pdf)>. Acesso em: 03 fev. 2015.

SOUSA, José G. G. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto:** aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado. 2001. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília, 2001. Disponível em: <[http://estruturas.unb.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=112%3Aateses-e-dissertacoes-2001&catid=51&Itemid=80&lang=pt](http://estruturas.unb.br/index.php?option=com_content&view=article&id=112%3Aateses-e-dissertacoes-2001&catid=51&Itemid=80&lang=pt)>. Acesso em: 18 jan. 2015.

SOUTSOS, Marios N.; MILLARD, Stephen G.; BUNGEY, John H.; JONES, Nicola; TICKELL, R Geoff; GRADWELL, Jo. The use of recycled construction and demolition waste in the manufacture of precast concrete building blocks. In: PROC. OF THE INST. OF CIV. ENG., ENGINEERING SUSTAINABILITY, 2004, Barcelona, Espanha. **Anais eletrônicos...** p. 139–48. Forum Barcelona, 2004. Disponível em: <<http://congress.cimne.upc.es/rilem04/frontal/Papers.htm>>. Acesso em: 18 fev. 2015.

SOUTSOS, Marios N.; TANG, Kangkang; MILLARD, Stephen G. Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate. **Construction and Building Materials** **25**. 726–735, 2011a.

\_\_\_\_\_. The use of recycled demolition aggregate in precast concrete products: Phase III: Concrete pavement flags. **Construction and Building Materials** **36**. p. 674–680, 2012.

\_\_\_\_\_. Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: Concrete paving blocks. **Construction and Building Materials** **25**. p. 3131–3143, 2011b.

TENÓRIO, Jonathas J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com Agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais**. 2007. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007. Disponível em: <[http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec/dissertacoes\\_arquivos/Dissertacoes/Jonathas%20Juda%20Lima%20Tenorio.pdf](http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec/dissertacoes_arquivos/Dissertacoes/Jonathas%20Juda%20Lima%20Tenorio.pdf)>. Acesso em: 18 jan. 2015.

THYSSENKRUPP INDUSTRIAL SOLUTIONS. Britador de Impacto em Modelo 3D (Impact Crushing). Disponível em: <<http://www.tkis.com.br/produtos/processo/processo/attachment/impactcrushing/>>. Acesso em: 27 jul. 2014.

ULSEN, Carina. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição**. 2011. 239 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-12122011-132841/pt-br.php>>. Acesso em: 18 jan. 2015.

WEIDMANN, Denis F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland**. 2008. 273 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/106626/264453.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 31 ago. 2015.

WONG, Henry H. C.; KWAN, Albert K. H. Packing density of cementitious materials: part 1—measurement using a wet packing method. **Materials and Structures** **41**, p. 689–701, 2008a.

\_\_\_\_\_. Rheology of Cement Paste: Role of Excess Water to Solid Surface Area Ratio. **Journal of Materials in Civil Engineering**, p. 189-197, 2008b.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de De Larrard

Massa específica real (kg/m <sup>3</sup> )	2680	2580	3090	
Dados para reprodução da condição de análise DL1: CAP				
di = dj (mm)	$\beta_i = \beta_j$	% Retida do agregado graúdo em volume	% Retida do agregado miúdo em volume	% Retida do cimento em volume
9,5000	0,56	1,7%	0,0%	0,0%
4,7500	0,58	70,3%	6,6%	0,0%
2,3750	0,60	14,7%	16,0%	0,0%
1,1875	0,70	0,9%	8,6%	0,0%
0,5938	0,71	1,1%	9,7%	0,0%
0,2969	0,74	2,2%	16,7%	0,0%
0,1484	0,72	2,5%	14,7%	0,0%
0,0742	0,65	4,2%	6,2%	0,0%
0,0371	0,61	0,3%	2,6%	6,1%
0,0186	0,61	0,5%	4,1%	20,6%
0,0093	0,61	0,9%	7,7%	36,3%
0,0046	0,61	0,4%	3,6%	22,8%
0,0023	0,61	0,3%	2,4%	10,2%
0,0012	0,61	0,1%	0,8%	2,9%
0,0006	0,61	0,0%	0,0%	1,3%
0,0003	0,61	0,0%	0,0%	0,0%
Composição do yi (% volume)		0% a 91%	0% a 91%	9% a 13%

Dados para reprodução da condição de análise DL2: CAP - s/0,15AP				
di = dj (mm)	$\beta_i = \beta_j$	% Retida do Agregado Graúdo (em volume)	% Retida do Agregado Miúdo (em volume)	% Retida do Cimento (em volume)
9,5000	0,56	1,8%	0,0%	0,0%
4,7500	0,58	75,3%	9,1%	0,0%
2,3750	0,60	15,7%	22,2%	0,0%
1,1875	0,70	1,0%	11,9%	0,0%
0,5938	0,71	1,2%	13,4%	0,0%
0,2969	0,74	2,3%	23,1%	0,0%
0,1484	0,72	2,7%	20,3%	0,0%
0,0742	0,65	0,0%	0,0%	0,0%
0,0371	0,61	0,0%	0,0%	6,1%
0,0186	0,61	0,0%	0,0%	20,6%
0,0093	0,61	0,0%	0,0%	36,3%
0,0046	0,61	0,0%	0,0%	22,8%
0,0023	0,61	0,0%	0,0%	10,2%
0,0012	0,61	0,0%	0,0%	2,9%
0,0006	0,61	0,0%	0,0%	1,3%
0,0003	0,61	0,0%	0,0%	0,0%
Composição do yi (% volume)		0% a 91%	0% a 91%	9% a 13%

Dados para reprodução da condição de análise DL3: CAP - s/0,15A

di = dj (mm)	$\beta_i = \beta_j$	% Retida do Agregado Graúdo (em volume)	% Retida do Agregado Miúdo (em volume)	% Retida do Cimento (em volume)
9,5000	0,56	1,7%	0,0%	0,0%
4,7500	0,58	70,3%	9,1%	0,0%
2,3750	0,60	14,7%	22,2%	0,0%
1,1875	0,70	0,9%	11,9%	0,0%
0,5938	0,71	1,1%	13,4%	0,0%
0,2969	0,74	2,2%	23,1%	0,0%
0,1484	0,72	2,5%	20,3%	0,0%
0,0742	0,65	4,2%	0,0%	0,0%
0,0371	0,61	0,3%	0,0%	6,1%
0,0186	0,61	0,5%	0,0%	20,6%
0,0093	0,61	0,9%	0,0%	36,3%
0,0046	0,61	0,4%	0,0%	22,8%
0,0023	0,61	0,3%	0,0%	10,2%
0,0012	0,61	0,1%	0,0%	2,9%
0,0006	0,61	0,0%	0,0%	1,3%
0,0003	0,61	0,0%	0,0%	0,0%
Composição do yi (% volume)		0% a 91%	0% a 91%	9% a 13%

Dados para reprodução da condição de análise DL4: CAP - s/0,15P

di = dj (mm)	$\beta_i = \beta_j$	% Retida do Agregado Graúdo (em volume)	% Retida do Agregado Miúdo (em volume)	% Retida do Cimento (em volume)
9,5000	0,56	1,8%	0,0%	0,0%
4,7500	0,58	75,3%	6,6%	0,0%
2,3750	0,60	15,7%	16,0%	0,0%
1,1875	0,70	1,0%	8,6%	0,0%
0,5938	0,71	1,2%	9,7%	0,0%
0,2969	0,74	2,3%	16,7%	0,0%
0,1484	0,72	2,7%	14,7%	0,0%
0,0742	0,65	0,0%	6,2%	0,0%
0,0371	0,61	0,0%	2,6%	6,1%
0,0186	0,61	0,0%	4,1%	20,6%
0,0093	0,61	0,0%	7,7%	36,3%
0,0046	0,61	0,0%	3,6%	22,8%
0,0023	0,61	0,0%	2,4%	10,2%
0,0012	0,61	0,0%	0,8%	2,9%
0,0006	0,61	0,0%	0,0%	1,3%
0,0003	0,61	0,0%	0,0%	0,0%
Composição do yi (% volume)		0% a 91%	0% a 91%	9% a 13%

Dados para reprodução da condição de análise DL5: AP			
di = dj (mm)	$\beta_i = \beta_j$	% Retida do Agregado Graúdo (em volume)	% Retida do Agregado Miúdo (em volume)
9,5000	0,56	1,7%	0,0%
4,7500	0,58	70,3%	6,6%
2,3750	0,60	14,7%	16,0%
1,1875	0,70	0,9%	8,6%
0,5938	0,71	1,1%	9,7%
0,2969	0,74	2,2%	16,7%
0,1484	0,72	2,5%	14,7%
0,0742	0,65	4,2%	6,2%
0,0371	0,61	0,3%	2,6%
0,0186	0,61	0,5%	4,1%
0,0093	0,61	0,9%	7,7%
0,0046	0,61	0,4%	3,6%
0,0023	0,61	0,3%	2,4%
0,0012	0,61	0,1%	0,8%
Composição do yi (% volume)		0% a 100%	0% a 100%

Dados para reprodução da condição de análise DL6: AP - s/0,15AP			
di = dj (mm)	$\beta_i = \beta_j$	% Retida do Agregado Graúdo (em volume)	% Retida do Agregado Miúdo (em volume)
9,5000	0,56	1,8%	0,0%
4,7500	0,58	75,3%	9,1%
2,3750	0,60	15,7%	22,2%
1,1875	0,70	1,0%	11,9%
0,5938	0,71	1,2%	13,4%
0,2969	0,74	2,3%	23,1%
0,1484	0,72	2,7%	20,3%
Composição do yi (% volume)		0% a 100%	0% a 100%

Dados para reprodução da condição de análise DL7: AP - s/0,15A			
di = dj (mm)	$\beta_i = \beta_j$	% Retida do Agregado Graúdo (em volume)	% Retida do Agregado Miúdo (em volume)
9,5000	0,56	1,7%	0,0%
4,7500	0,58	70,3%	9,1%
2,3750	0,60	14,7%	22,2%
1,1875	0,70	0,9%	11,9%
0,5938	0,71	1,1%	13,4%
0,2969	0,74	2,2%	23,1%
0,1484	0,72	2,5%	20,3%
0,0742	0,65	4,2%	0,0%
0,0371	0,61	0,3%	0,0%
0,0186	0,61	0,5%	0,0%
0,0093	0,61	0,9%	0,0%
0,0046	0,61	0,4%	0,0%
0,0023	0,61	0,3%	0,0%
0,0012	0,61	0,1%	0,0%
Composição do yi (% volume)		0% a 100%	0% a 100%

Dados para reprodução da condição de análise DL8: AP - s/0,15P			
$d_i = d_j$ (mm)	$\beta_i = \beta_j$	% Retida do Agregado Graúdo (em volume)	% Retida do Agregado Miúdo (em volume)
9,5000	0,56	1,8%	0,0%
4,7500	0,58	75,3%	6,6%
2,3750	0,60	15,7%	16,0%
1,1875	0,70	1,0%	8,6%
0,5938	0,71	1,2%	9,7%
0,2969	0,74	2,3%	16,7%
0,1484	0,72	2,7%	14,7%
0,0742	0,65	0,0%	6,2%
0,0371	0,61	0,0%	2,6%
0,0186	0,61	0,0%	4,1%
0,0093	0,61	0,0%	7,7%
0,0046	0,61	0,0%	3,6%
0,0023	0,61	0,0%	2,4%
0,0012	0,61	0,0%	0,8%
Composição do $y_i$ (% volume)		0% a 100%	0% a 100%

## APÊNDICE B - Exemplo de cálculo do modelo de De Larrard

DL1: AP para 15% de cimento, 85% de agregado miúdo e 0% de agregado graúdo, em volume

Fração volumétrica			Diâmetro	% Retida	i	$\beta_i$	$y_i$	Somatória 1	Somatória 2	$\gamma_i$	$\gamma$	
Graúdo	Miúdo	Cimento										
0%	85%	15%	9,5000	0,0%	1	0,56	0,00	0,00	0,81	2,955	0,889	
0%	85%	15%	4,7500	5,7%	2	0,58	0,06	0,00	0,72	2,103		
0%	85%	15%	2,3750	13,7%	3	0,60	0,14	0,01	0,63	1,631		
0%	85%	15%	1,1875	7,3%	4	0,70	0,07	0,01	0,51	1,452		
0%	85%	15%	0,5938	8,2%	5	0,71	0,08	0,03	0,42	1,297		
0%	85%	15%	0,2969	14,2%	6	0,74	0,14	0,05	0,31	1,159		
0%	85%	15%	0,1484	12,5%	7	0,72	0,13	0,09	0,24	1,078		
0%	85%	15%	0,0742	5,2%	8	0,65	0,05	0,17	0,20	1,037		
0%	85%	15%	0,0371	3,1%	9	0,61	0,03	0,23	0,16	0,994		
0%	85%	15%	0,0186	6,5%	10	0,61	0,06	0,25	0,10	0,935		
0%	85%	15%	0,0093	11,9%	11	0,61	0,12	0,27	0,04	0,889		
0%	85%	15%	0,0046	6,5%	12	0,61	0,06	0,30	0,02	0,892		
0%	85%	15%	0,0023	3,6%	13	0,61	0,04	0,33	0,00	0,916		
0%	85%	15%	0,0012	1,1%	14	0,61	0,01	0,35	0,00	0,945		
0%	85%	15%	0,0006	0,2%	15	0,61	0,00	0,37	0,00	0,968		
0%	85%	15%	0,0003	0,0%	16	0,61	0,00	0,38	0,00	0,982		
Somatório				100%								

i/j		a <sub>ij</sub>															
		9,50	4,75	2,38	1,19	0,59	0,30	0,15	0,07	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
9,5000	1	1,00	0,71	0,50	0,36	0,25	0,18	0,13	0,09	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
4,7500	2		1,00	0,71	0,50	0,36	0,25	0,18	0,13	0,09	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
2,3750	3			1,00	0,71	0,50	0,36	0,25	0,18	0,13	0,09	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01
1,1875	4				1,00	0,71	0,50	0,36	0,25	0,18	0,13	0,09	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
0,5938	5					1,00	0,71	0,50	0,36	0,25	0,18	0,13	0,09	0,06	0,04	0,03	0,02
0,2969	6						1,00	0,71	0,50	0,36	0,25	0,18	0,13	0,09	0,06	0,04	0,03
0,1484	7							1,00	0,71	0,50	0,36	0,25	0,18	0,13	0,09	0,06	0,04
0,0742	8								1,00	0,71	0,50	0,36	0,25	0,18	0,13	0,09	0,06
0,0371	9									1,00	0,71	0,50	0,36	0,25	0,18	0,13	0,09
0,0186	10										1,00	0,71	0,50	0,36	0,25	0,18	0,13
0,0093	11											1,00	0,71	0,50	0,36	0,25	0,18
0,0046	12												1,00	0,71	0,50	0,36	0,25
0,0023	13													1,00	0,71	0,50	0,36
0,0012	14														1,00	0,71	0,50
0,0006	15															1,00	0,71
0,0003	16																1,00

i/j		b <sub>ij</sub>															
		9,50	4,75	2,38	1,19	0,59	0,30	0,15	0,07	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
9,5000	1	1,00															
4,7500	2	0,65	1,00														
2,3750	3	0,35	0,65	1,00													
1,1875	4	0,18	0,35	0,65	1,00												
0,5938	5	0,09	0,18	0,35	0,65	1,00											
0,2969	6	0,05	0,09	0,18	0,35	0,65	1,00										
0,1484	7	0,02	0,05	0,09	0,18	0,35	0,65	1,00									
0,0742	8	0,01	0,02	0,05	0,09	0,18	0,35	0,65	1,00								
0,0371	9	0,01	0,01	0,02	0,05	0,09	0,18	0,35	0,65	1,00							
0,0186	10	0,00	0,01	0,01	0,02	0,05	0,09	0,18	0,35	0,65	1,00						
0,0093	11	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,05	0,09	0,18	0,35	0,65	1,00					
0,0046	12	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,05	0,09	0,18	0,35	0,65	1,00				
0,0023	13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,05	0,09	0,18	0,35	0,65	1,00			
0,0012	14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,05	0,09	0,18	0,35	0,65	1,00		
0,0006	15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,05	0,09	0,18	0,35	0,65	1,00	
0,0003	16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,05	0,09	0,18	0,35	0,65	1,00

		Somatório 1																
		y <sub>i</sub>	0,00	0,06	0,14	0,07	0,08	0,14	0,13	0,05	0,03	0,06	0,12	0,06	0,04	0,01	0,00	0,00
		β <sub>i</sub>	0,56	0,58	0,60	0,70	0,71	0,74	0,72	0,65	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
β <sub>i</sub>	i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
0,56	1	0,00																
0,58	2	0,00	0,00															
0,60	3	0,00	0,01	0,00														
0,70	4	0,00	0,01	0,00	0,00													
0,71	5	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00												
0,74	6	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00											
0,72	7	0,00	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02	0,00										
0,65	8	0,00	0,02	0,04	0,02	0,02	0,04	0,02	0,00									
0,61	9	0,00	0,02	0,05	0,03	0,03	0,05	0,04	0,01	0,00								
0,61	10	0,00	0,02	0,05	0,03	0,03	0,05	0,04	0,01	0,00	0,00							
0,61	11	0,00	0,02	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00						
0,61	12	0,00	0,02	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,02	0,01	0,02	0,02	0,00					
0,61	13	0,00	0,02	0,05	0,03	0,03	0,06	0,05	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,00				
0,61	14	0,00	0,02	0,05	0,03	0,03	0,06	0,05	0,02	0,01	0,02	0,04	0,02	0,00	0,00			
0,61	15	0,00	0,02	0,05	0,03	0,03	0,06	0,05	0,02	0,01	0,02	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00		
0,61	16	0,00	0,02	0,05	0,03	0,03	0,06	0,05	0,02	0,01	0,02	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	

Somatório 2																	
$y_i$		0,00	0,06	0,14	0,07	0,08	0,14	0,13	0,05	0,03	0,06	0,12	0,06	0,04	0,01	0,00	0,00
$\beta_i$		0,56	0,58	0,60	0,70	0,71	0,74	0,72	0,65	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
$\beta_i$	$i/j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0,56	1	0,00	0,02	0,07	0,05	0,07	0,12	0,11	0,05	0,03	0,06	0,12	0,06	0,04	0,01	0,00	0,00
0,58	2		0,00	0,04	0,04	0,06	0,11	0,11	0,05	0,03	0,06	0,11	0,06	0,03	0,01	0,00	0,00
0,60	3			0,00	0,03	0,05	0,10	0,10	0,04	0,03	0,06	0,11	0,06	0,03	0,01	0,00	0,00
0,70	4				0,00	0,02	0,07	0,08	0,04	0,02	0,06	0,11	0,06	0,03	0,01	0,00	0,00
0,71	5					0,00	0,05	0,06	0,03	0,02	0,05	0,10	0,06	0,03	0,01	0,00	0,00
0,74	6						0,00	0,03	0,02	0,02	0,05	0,09	0,05	0,03	0,01	0,00	0,00
0,72	7							0,00	0,01	0,01	0,04	0,08	0,05	0,03	0,01	0,00	0,00
0,65	8								0,00	0,01	0,03	0,07	0,05	0,03	0,01	0,00	0,00
0,61	9									0,00	0,02	0,06	0,04	0,03	0,01	0,00	0,00
0,61	10										0,00	0,03	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00
0,61	11											0,00	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00
0,61	12												0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
0,61	13													0,00	0,00	0,00	0,00
0,61	14														0,00	0,00	0,00
0,61	15															0,00	0,00
0,61	16																0,00

O que resultou na construção da seguinte tabela:

Em massa			Em volume			$\gamma$
% Graúdo	% Miúdo	% Cimento	% Graúdo	% Miúdo	% Cimento	
0%	82%	17%	0%	85%	15%	0,889
10%	72%	17%	10%	75%	15%	0,895
20%	63%	17%	20%	65%	15%	0,901
30%	53%	17%	30%	55%	15%	0,907
40%	43%	17%	40%	45%	15%	0,913
50%	33%	17%	50%	35%	15%	0,919
59%	24%	17%	60%	25%	15%	0,925
69%	14%	17%	70%	15%	15%	0,900
74%	9%	17%	75%	10%	15%	0,865
78%	5%	17%	80%	5%	15%	0,832
83%	0%	17%	85%	0%	15%	0,802
$\gamma$ Máximo						0,925

## APÊNDICE C – Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger

Massa específica real (kg/m <sup>3</sup> )	2680	2580	3090
--	------	------	------

## Dados para reprodução da condição de análise FD1: CAP

Diâmetro (mm)	Distribuição granulométrica ideal do modelo de Funk e Dinger (q=0,35)	% Passante do Agregado Graúdo em volume	% Passante do Agregado Miúdo em volume	% Passante do Cimento em volume
9,5000	100,0%	98,3%	100,0%	100,0%
4,8000	77,8%	28,0%	93,4%	100,0%
2,4000	60,1%	13,3%	77,4%	100,0%
1,2000	46,2%	12,4%	68,8%	100,0%
0,6000	35,3%	11,3%	59,1%	100,0%
0,3000	26,7%	9,2%	42,4%	100,0%
0,1500	20,0%	6,6%	27,7%	100,0%
0,0773	14,9%	2,5%	21,5%	100,0%
0,0343	10,1%	2,2%	18,9%	93,9%
0,0199	7,6%	1,7%	14,9%	73,3%
0,0088	4,6%	0,4%	3,5%	14,2%
0,0045	2,7%	0,1%	1,1%	4,0%
0,0023	1,2%	0,0%	0,3%	1,1%
0,0012	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Variação (% volume)		0% a 91%	0% a 91%	9% a 13%

## Dados para reprodução da condição de análise FD2: CAP - s/0,15AP

Diâmetro (mm)	Distribuição granulométrica ideal do modelo de Funk e Dinger (q=0,35)	% Passante do Agregado Graúdo em volume	% Passante do Agregado Miúdo em volume	% Passante do Cimento em volume
9,5000	100,0%	98,2%	100,0%	100,0%
4,7500	77,5%	23,0%	90,9%	100,0%
2,3750	59,8%	7,2%	68,7%	100,0%
1,1875	46,0%	6,3%	56,8%	100,0%
0,5938	35,1%	5,1%	43,5%	100,0%
0,2969	26,6%	2,7%	20,4%	100,0%
0,1484	19,9%	0,0%	0,0%	100,0%
0,0742	14,7%	0,0%	0,0%	100,0%
0,0371	10,5%	0,0%	0,0%	93,9%
0,0186	7,3%	0,0%	0,0%	73,3%
0,0093	4,8%	0,0%	0,0%	14,2%
0,0046	2,8%	0,0%	0,0%	4,0%
0,0023	1,2%	0,0%	0,0%	1,1%
0,0012	0,0%	0,0%	0,0%	0%
Variação (% volume)		0% a 91%	0% a 91%	9% a 13%

Dados para reprodução da condição de análise FD3: CAP - s/0,15A

Diâmetro (mm)	Distribuição granulométrica ideal do modelo de Funk e Dinger (q=0,35)	% Passante do Agregado Graúdo em volume	% Passante do Agregado Miúdo em volume	% Passante do Cimento em volume
9,5000	100,0%	98,3%	100,0%	100,0%
4,7500	77,5%	28,0%	90,9%	100,0%
2,3750	59,8%	13,3%	68,7%	100,0%
1,1875	46,0%	12,4%	56,9%	100,0%
0,5938	35,1%	11,3%	43,5%	100,0%
0,2969	26,6%	9,2%	20,3%	100,0%
0,1484	19,9%	6,6%	0,0%	100,0%
0,0742	14,7%	2,5%	0,0%	100,0%
0,0371	10,5%	2,2%	0,0%	93,9%
0,0186	7,3%	1,7%	0,0%	73,3%
0,0093	4,8%	0,4%	0,0%	14,2%
0,0046	2,8%	0,1%	0,0%	4,0%
0,0023	1,2%	0,0%	0,0%	1,1%
0,0012	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Variação (% volume)		0% a 91%	0% a 91%	9% a 13%

Dados para reprodução da condição de análise FD4: CAP - s/0,15P

Diâmetro (mm)	Distribuição granulométrica ideal do modelo de Funk e Dinger (q=0,35)	% Passante do Agregado Graúdo em volume	% Passante do Agregado Miúdo em volume	% Passante do Cimento em volume
9,5000	100,0%	98,2%	100,0%	100%
4,7500	77,8%	22,9%	93,4%	100%
2,3750	60,1%	7,2%	77,4%	100%
1,1875	46,2%	6,2%	68,8%	100%
0,5938	35,3%	5,0%	59,1%	100%
0,2969	26,7%	2,7%	42,4%	100%
0,1484	20,0%	0,0%	27,7%	100%
0,0742	14,9%	0,0%	21,5%	100%
0,0371	10,1%	0,0%	18,9%	94%
0,0186	7,6%	0,0%	14,9%	73%
0,0093	4,6%	0,0%	3,5%	14%
0,0046	2,7%	0,0%	1,1%	4%
0,0023	1,2%	0,0%	0,3%	1%
0,0012	0,0%	0,0%	0,0%	0%
Variação (% volume)		0% a 91%	0% a 91%	9% a 13%

Dados para reprodução da condição de análise FD5: AP			
Diâmetro (mm)	Distribuição granulométrica ideal do modelo de Funk e Dinger ( $q=0,35$ )	% Passante do Agregado Graúdo em volume	% Passante do Agregado Miúdo em volume
9,5000	100,0%	98,3%	100,0%
4,7500	77,5%	28,0%	93,4%
2,3750	59,6%	13,3%	77,4%
1,1875	45,5%	12,4%	68,8%
0,5938	34,5%	11,3%	59,1%
0,2969	25,8%	9,2%	42,4%
0,1484	19,0%	6,6%	27,7%
0,0742	13,9%	2,5%	21,5%
0,0371	9,1%	2,2%	18,9%
0,0186	6,5%	1,7%	14,9%
0,0093	3,5%	0,4%	3,5%
0,0046	1,5%	0,1%	1,1%
0,0023	0,0%	0,0%	0,3%
Variação (% volume)		0% a 100%	0% a 100%

Dados para reprodução da condição de análise FD6: AP - s/0,15AP			
Diâmetro (mm)	Distribuição granulométrica ideal do modelo de Funk e Dinger ( $q=0,35$ )	% Passante do Agregado Graúdo em volume	% Passante do Agregado Miúdo em volume
9,5000	100,0%	98,2%	100,0%
4,7500	71,9%	23,0%	90,9%
2,3750	49,8%	7,2%	68,7%
1,1875	32,5%	6,3%	56,8%
0,5938	18,9%	5,1%	43,5%
0,2969	8,3%	2,7%	20,4%
0,1484	0%	0,0%	0,0%
Variação (% volume)		0% a 100%	0% a 100%

Dados para reprodução da condição de análise FD7: AP - s/0,15A			
Diâmetro (mm)	Distribuição granulométrica ideal do modelo de Funk e Dinger ( $q=0,35$ )	% Passante do Agregado Graúdo em volume	% Passante do Agregado Miúdo em volume
9,5000	100,0%	98,3%	100,0%
4,7500	77,2%	28,0%	90,9%
2,3750	59,3%	13,3%	68,7%
1,1875	45,3%	12,4%	56,8%
0,5938	34,3%	11,3%	43,5%
0,2969	25,7%	9,2%	20,4%
0,1484	18,9%	6,6%	0,0%
0,0742	13,6%	2,5%	0,0%
0,0371	9,4%	2,2%	0,0%
0,0186	6,2%	1,7%	0,0%
0,0093	3,6%	0,4%	0,0%
0,0046	1,6%	0,1%	0,0%
0,0023	0,0%	0,0%	0,0%
Variação (% volume)		0% a 100%	0% a 100%

Dados para reprodução da condição de análise FD8: AP - s/0,15P			
Diâmetro (mm)	Distribuição granulométrica ideal do modelo de Funk e Dinger ( $q=0,35$ )	% Passante do Agregado Graúdo em volume	% Passante do Agregado Miúdo em volume
9,5000	100,0%	98,2%	100,0%
4,7500	77,2%	23,0%	93,4%
2,3750	59,3%	7,2%	77,4%
1,1875	45,3%	6,3%	68,8%
0,5938	34,3%	5,1%	59,1%
0,2969	25,7%	2,7%	42,4%
0,1484	18,9%	0,0%	27,7%
0,0742	13,6%	0,0%	21,5%
0,0371	9,4%	0,0%	18,9%
0,0186	6,2%	0,0%	14,9%
0,0093	3,6%	0,0%	3,5%
0,0046	1,6%	0,0%	1,1%
0,0023	0,0%	0,0%	0,3%
Variação (% volume)		0% a 100%	0% a 100%

## APÊNDICE D – Exemplo de cálculo do modelo de Funk e Dinger

FD1: AP para 15% de cimento, 85% de agregado miúdo e 0% de agregado graúdo, em volume

Diâmetro (mm)	% acumulada de partículas passantes			Composição			% acumulada de partículas passantes x Composição		
	Miúdo	Graúdo	Cimento	Miúdo	Graúdo	Cimento	Miúdo	Graúdo	Cimento
9,5000	100,0%	98,3%	100%	0%	85%	15%	0%	84%	15%
4,7500	93,4%	28,0%	100%	0%	85%	15%	0%	24%	15%
2,3750	77,4%	13,3%	100%	0%	85%	15%	0%	11%	15%
1,1875	68,8%	12,4%	100%	0%	85%	15%	0%	11%	15%
0,5938	59,1%	11,3%	100%	0%	85%	15%	0%	10%	15%
0,2969	42,4%	9,2%	100%	0%	85%	15%	0%	8%	15%
0,1484	27,7%	6,6%	100%	0%	85%	15%	0%	6%	15%
0,0742	21,5%	2,5%	100%	0%	85%	15%	0%	2%	15%
0,0371	18,9%	2,2%	94%	0%	85%	15%	0%	2%	14%
0,0186	14,9%	1,7%	73%	0%	85%	15%	0%	1%	11%
0,0093	3,5%	0,4%	14%	0%	85%	15%	0%	0%	2%
0,0046	1,1%	0,1%	4%	0%	85%	15%	0%	0%	1%
0,0023	0,3%	0,0%	1%	0%	85%	15%	0%	0%	0%
0,0012	0,0%	0,0%	0%	0%	85%	15%	0%	0%	0%

Diâmetro (mm)	Somatório	% acumulada de partículas passantes do modelo	Somatório da diferença entre o modelo de Funk e Dinger e a composição
9,5000	99%	100%	1%
4,8000	39%	77%	39%
2,4000	26%	60%	34%
1,2000	26%	46%	20%
0,6000	25%	35%	11%
0,3000	23%	27%	4%
0,1500	21%	20%	1%
0,0773	17%	15%	2%
0,0343	16%	11%	5%
0,0199	12%	7%	5%
0,0088	2%	5%	2%
0,0045	1%	3%	2%
0,0023	0%	1%	1%
0,0012	0%	0%	0%
Total			127,49%

O que resultou na construção da seguinte tabela:

Composições (% em massa)			Composições (% em volume)				Diferença
Areia	Brita	Cimento	Areia	Brita	Cimento	Soma	
0%	83%	17%	0%	85%	15%	100%	127,49%
10%	73%	17%	11%	74%	15%	100%	106,03%
20%	63%	17%	21%	64%	15%	100%	90,88%
30%	53%	17%	32%	54%	15%	100%	85,35%
40%	43%	17%	42%	43%	15%	100%	86,86%
50%	33%	17%	52%	33%	15%	100%	93,98%
60%	23%	17%	62%	23%	15%	100%	116,90%
70%	13%	17%	72%	13%	15%	100%	149,91%
80%	3%	17%	83%	3%	15%	100%	183,10%
83%	0%	17%	86%	0%	14%	100%	193,06%

## APÊNDICE E – Valores individuais para os corpos de prova da Figura 78 e da Figura 79

Corpos de prova	Ref.- empresa CII	Referência- empresa (valor ajustado e corrigido)	Ref.- laboratório	Ref.- laboratório (valor ajustado)	DL3: CAP - s/0,15A	DL5: AP	FD3: CAP - s/0,15A	FD5: AP
Resistência à compressão axial aos 7 dias (20 segundos)								
CP1	27,10	24,24	4,62	5,82	11,26	11,59	14,77	12,19
CP2	22,52	20,15	5,70	7,18	8,02	10,48	13,62	12,36
CP3	27,42	24,53	5,96	7,51	16,67	12,79	14,87	14,91
CP4	28,62	25,60	10,10	12,73	4,69	5,99	14,62	16,46
CP5	39,40	35,25	5,59	7,04	14,90	14,54	13,59	15,27
CP6	26,50	23,71	5,77	7,27	9,35	14,87	16,02	13,46
Média	28,59	25,58	6,29	7,93	10,82	11,71	14,58	14,11
DP	5,69	5,09	1,92	2,43	4,44	3,27	0,91	1,71
Média + DP	34,28	30,67	8,21	10,35	15,26	14,98	15,49	15,82
Média - DP	22,91	20,49	4,37	5,50	6,37	8,44	13,68	12,39
CP1	27,10	24,24	4,62	5,82	11,26	11,59	14,77	-
CP2	-	-	5,70	7,18	8,02	10,48	-	12,36
CP3	27,42	24,53	5,96	7,51	-	12,79	14,87	14,91
CP4	28,62	25,60	-	-	-	-	14,62	13,46
CP5	-	-	5,59	7,04	14,90	14,54	-	15,27
CP6	26,50	23,71	5,77	7,27	9,35	14,87	-	13,46
Média	27,41	24,52	5,53	6,97	10,88	12,85	14,75	13,89
DP	0,89	0,80	0,53	0,66	2,99	1,88	0,13	1,19
Corpos de prova	Resistência à compressão axial aos 28 dias (20 segundos)							
CP1	27,39	23,73	19,53	23,83	9,88	10,50	15,07	15,56
CP2	24,90	21,57	10,18	12,42	10,91	8,10	18,29	17,35
CP3	29,48	25,54	9,22	11,25	18,09	6,76	22,58	15,97
CP4	36,29	31,43	10,11	12,33	14,63	7,52	21,16	12,15
CP5	37,22	32,24	8,72	10,64	11,18	18,04	20,28	15,75
CP6	35,01	30,33	12,72	15,52	13,45	14,69	22,47	15,88
Média	31,72	27,47	11,75	14,33	13,02	10,94	19,98	15,44
DP	5,14	4,45	4,05	4,95	3,04	4,51	2,88	1,74
Média + DP	36,86	31,93	15,80	19,28	16,06	15,45	22,85	17,18
Média - DP	26,57	23,02	7,69	9,38	9,98	6,42	17,10	13,71
CP1	27,39	23,73	-	-	-	10,50	-	15,56
CP2	-	-	10,18	12,42	10,91	8,10	18,29	-
CP3	29,48	25,54	9,22	11,25	-	-	22,58	15,97
CP4	36,29	31,43	10,11	12,33	14,63	7,52	21,16	-
CP5	-	-	8,72	10,64	11,18	-	20,28	15,75
CP6	35,01	30,33	12,72	15,52	13,45	14,69	22,47	15,88
Média	32,04	27,76	10,19	12,43	12,54	10,20	20,96	15,79
DP	4,28	3,71	1,54	1,88	1,80	3,26	1,77	0,18

Corpos de prova	Referência -empresa CPII	Referência- laboratório	DL3: CAP - s/0,15A	DL5: AP	FD3: CAP - s/0,15A	FD5: AP
	Massa específica saturada aos 7 dias (20 segundos)					
CP1	2,33	2,17	2,18	1,91	2,27	2,16
CP2	2,43	2,20	2,13	1,89	2,19	2,15
CP3	2,35	2,21	2,05	2,19	2,35	2,19
CP4	2,42	2,21	2,08	2,14	2,17	2,15
CP5	2,36	2,21	2,01	2,10	2,29	2,16
CP6	2,41	2,21	2,20	1,99	2,25	2,18
Média	2,38	2,20	2,11	2,04	2,25	2,17
DP	0,04	0,02	0,07	0,13	0,06	0,02
Média + DP	2,42	2,22	2,18	2,16	2,32	2,19
Média - DP	2,34	2,18	2,04	1,91	2,19	2,15
CP1	-	-	2,2	1,9	2,3	2,2
CP2	2,3	2,2	2,1	-	2,2	2,1
CP3	2,4	2,2	2,1	-	-	2,2
CP4	2,4	2,2	2,1	2,1	-	2,2
CP5	2,4	2,2	-	2,1	2,3	2,2
CP6	-	2,2	-	2,0	2,2	2,2
Média	2,38	2,21	2,11	2,03	2,25	2,17
DP	0,03	0,01	0,06	0,11	0,04	0,02
Corpos de prova	Massa específica saturada aos 28 dias (20 segundos)					
CP1	2,33	2,19	1,99	2,20	2,28	2,05
CP2	2,31	2,19	2,17	2,16	2,32	1,96
CP3	2,45	2,22	2,10	2,15	2,24	2,03
CP4	2,43	2,23	2,22	2,07	2,29	2,07
CP5	2,35	2,18	2,15	2,09	2,21	2,24
CP6	2,37	2,27	2,13	2,06	2,22	2,13
Média	2,37	2,21	2,13	2,12	2,26	2,08
DP	0,06	0,03	0,08	0,06	0,04	0,09
Média + DP	2,43	2,25	2,20	2,18	2,30	2,17
Média - DP	2,32	2,18	2,05	2,06	2,22	1,99
CP1	2,33	2,19	-	-	2,28	2,05
CP2	2,31	2,19	2,17	2,16	-	1,96
CP3	-	2,22	2,10	2,15	2,24	2,03
CP4	2,43	2,23	-	2,07	2,29	2,07
CP5	2,35	2,18	2,15	2,09	2,21	-
CP6	2,37	-	2,13	2,06	2,22	2,13
Média	2,36	2,20	2,14	2,10	2,25	2,05
DP	0,05	0,02	0,03	0,04	0,04	0,06

Corpos de prova	Referência-laboratório CPII	DL3: CAP - s/0,15A	DL5: AP	FD3: CAP - s/0,15A	FD5: AP
Resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias (20 segundos)					
CP1	1,71	1,77	1,71	1,87	1,58
CP2	1,11	1,41	1,59	1,81	1,70
CP3	1,36	1,73	1,02	2,14	1,98
CP4	1,06	1,21	1,44	1,43	1,87
CP5	1,49	1,06	1,20	1,52	1,17
CP6	1,30	1,87	1,64	1,83	1,82
Média	1,34	1,51	1,44	1,77	1,68
DP	0,24	0,33	0,27	0,26	0,29
Média + DP	1,58	1,84	1,71	2,02	1,97
Média - DP	1,10	1,18	1,16	1,51	1,40
CP1	-	1,77	1,71	1,87	1,58
CP2	1,11	1,41	1,59	1,81	1,70
CP3	1,36	1,73	-	-	1,98
CP4	1,06	1,21	1,44	1,43	1,87
CP5	1,49	-	1,20	1,52	-
CP6	1,3	1,87	1,64	1,83	1,82
Média	1,26	1,60	1,52	1,69	1,79
DP	0,18	0,28	0,20	0,20	0,15
Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias (20 segundos)					
Corpos de prova					
CP1	1,62	0,53	1,46	2,58	1,93
CP2	1,82	1,56	1,72	1,85	1,77
CP3	1,69	1,42	1,52	1,83	1,65
CP4	1,65	0,85	1,37	2,47	1,75
CP5	1,73	1,93	1,54	1,93	1,81
CP6	1,90	1,10	1,32	2,10	1,92
Média	1,73	1,23	1,49	2,13	1,81
DP	0,10	0,51	0,14	0,32	0,11
Média + DP	1,84	1,74	1,63	2,45	1,91
Média - DP	1,63	0,72	1,35	1,80	1,70
CP1	1,62	-	1,46	-	1,93
CP2	1,82	1,56	1,72	1,85	1,77
CP3	1,69	1,42	1,52	1,83	-
CP4	1,65	-	-	2,47	1,75
CP5	1,73	1,93	1,54	1,93	1,81
CP6	-	-	-	2,10	1,92
Média	1,70	1,64	1,56	2,04	1,84
DP	0,08	0,26	0,11	0,26	0,08

Corpos de prova	Referência-empresa CPII	Referência-laboratório	DL3: CAP - s/0,15A	DL5: AP	FD3: CAP - s/0,15A	FD5: AP
	Massa específica saturada aos 7 dias (20 segundos)					
CP1	7,1%	8,1%	14,2%	15,0%	13,8%	14,7%
CP2	6,2%	8,6%	13,0%	14,2%	12,9%	14,8%
CP3	7,7%	7,6%	14,9%	13,2%	11,5%	15,5%
CP4	7,2%	7,3%	14,0%	17,6%	12,2%	14,6%
CP5	6,9%	8,0%	14,0%	15,0%	12,0%	15,0%
CP6	7,0%	7,9%	13,8%	15,0%	12,2%	15,3%
Média	7,0%	7,9%	14,0%	15,0%	12,4%	15,0%
DP	0,5%	0,5%	0,6%	1,5%	0,8%	0,4%
Média + DP	7,5%	8,4%	14,6%	16,5%	13,2%	15,3%
Média - DP	6,5%	7,5%	13,4%	13,5%	11,6%	14,6%
CP1	7,1%	8,1%	14,2%	15,0%	-	14,7%
CP2	-	-	-	14,2%	12,9%	14,8%
CP3	-	7,6%	-	-	-	-
CP4	7,2%	-	14,0%	-	12,2%	14,6%
CP5	6,9%	8,0%	14,0%	15,0%	12,0%	15,0%
CP6	7,0%	7,9%	13,8%	15,0%	12,2%	15,3%
Média	7%	8%	14%	15%	12%	15%
DP	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Corpos de prova	Massa específica saturada aos 28 dias (20 segundos)					
CP1	6,0%	8,9%	15,5%	16,0%	13,6%	14,8%
CP2	7,4%	8,2%	14,8%	14,9%	12,7%	14,3%
CP3	5,1%	7,4%	13,7%	15,8%	12,6%	15,1%
CP4	6,0%	7,4%	13,0%	15,8%	13,0%	14,9%
CP5	7,3%	8,0%	14,2%	15,9%	13,0%	15,1%
CP6	6,0%	8,0%	13,8%	16,0%	13,0%	14,9%
Média	6,3%	8,0%	14,2%	15,7%	13,0%	14,9%
DP	0,9%	0,6%	0,9%	0,4%	0,4%	0,3%
Média + DP	7,2%	8,5%	15,0%	16,2%	13,3%	15,1%
Média - DP	5,4%	7,4%	13,3%	15,3%	12,6%	14,6%
CP1	6,0%	-	-	16,0%	-	14,8%
CP2	-	8,2%	14,8%	-	12,7%	-
CP3	-	7,4%	13,7%	15,8%	12,6%	15,1%
CP4	6,0%	7,4%	-	15,8%	13,0%	14,9%
CP5	-	8,0%	14,2%	15,9%	13,0%	15,1%
CP6	6,0%	8,0%	13,8%	16,0%	13,0%	14,9%
Média	6,0%	7,8%	14,1%	15,9%	12,8%	15,0%
DP	0,0%	0,4%	0,5%	0,1%	0,2%	0,1%

## APÊNDICE F – Valores individuais para os corpos de prova da Figura 86 e da Figura 87

Dados	Massa específica saturada aos 7 dias (g/cm <sup>3</sup> )					
	Referência - laboratório					Ref.-empresa
Tempo de vibrocompactação (s)	40	60	120	240	480	
CP1	2,15	2,24	2,27	2,34	2,42	2,33
CP2	2,23	2,24	2,26	2,35	2,38	2,43
CP3	2,22	2,21	2,30	2,33	2,38	2,35
CP4	2,22	2,28	2,30	2,41	2,41	2,42
CP5	2,18	2,24	2,26	2,36	2,36	2,36
Média	2,20	2,24	2,28	2,36	2,39	2,38
DV	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,04
Média + DV	2,23	2,27	2,30	2,39	2,41	2,42
Média - DV	2,17	2,22	2,26	2,33	2,37	2,33
CP1	-	2,24	2,27	2,34	-	2,33
CP2	2,23	2,24	2,26	2,35	2,38	-
CP3	2,22	-	2,30	2,33	2,38	2,35
CP4	2,22	-	2,30	-	2,41	2,42
CP5	2,18	-2,24	2,26	2,36	-	2,36
Média	2,21	0,75	2,28	2,35	2,39	2,36
DV	0,02	2,59	0,02	0,01	0,02	0,04

Dados	Resistência à compressão axial aos 7 dias (MPa)					
	Referência - laboratório					Ref.-empresa
Tempo de vibrocompactação (s)	40	60	120	240	480	
CP1	11,33	8,80	10,51	11,26	29,42	27,10
CP2	17,46	14,02	12,19	22,83	29,82	22,52
CP3	10,07	6,80	10,52	16,71	29,64	27,42
CP4	8,88	8,82	10,55	23,05	30,03	28,62
CP5	8,76	7,88	14,30	24,02	32,98	26,50
Média	11,30	9,26	11,61	19,57	30,38	26,43
DV	3,60	2,78	1,67	5,47	1,47	2,32
Média + DV	14,90	12,05	13,28	25,05	31,85	28,75
Média - DV	7,70	6,48	9,95	14,10	28,91	24,11
CP1	11,33	8,80	10,51	-	29,42	27,10
CP2	-	-	12,19	22,83	29,82	-
CP3	10,07	6,80	10,52	16,71	29,64	27,42
CP4	8,88	8,82	10,55	23,05	30,03	28,62
CP5	8,76	7,88	-	24,02	-	26,50
Média	9,76	8,08	10,94	21,65	29,73	27,41
DV	1,20	0,96	0,83	3,34	0,26	0,89

## APÊNDICE G – Valores individuais para os corpos de prova da Figura 88 e da Figura 89

Dados	Massa específica saturada aos 7 dias (g/cm <sup>3</sup> )				
	FD3: CAP s/0,15 A				
Tempo de vibrocompactação (s)	40	60	120	240	480
CP1	2,26	2,30	2,29	2,28	2,32
CP2	2,28	2,28	2,28	2,30	2,31
CP3	2,29	2,29	2,29	2,28	2,29
CP4	2,27	2,27	2,26	2,25	2,31
CP5	2,25	2,25	2,28	2,33	2,28
Média	2,27	2,27	2,28	2,29	2,30
DV	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02
Média + DV	2,28	2,29	2,29	2,32	2,32
Média - DV	2,25	2,26	2,27	2,26	2,29
CP1	2,26	-	2,29	2,28	2,32
CP2	2,28	2,28	2,28	2,30	2,31
CP3	-	2,29	2,29	2,28	-
CP4	2,27	2,27	-	-	2,31
CP5	2,25	-	2,28	-	2,28
Média	2,26	2,28	2,28	2,29	2,31
DV	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02

Dados	Resistência à compressão axial aos 7 dias (g/cm <sup>3</sup> )				
	FD3: CAP s/0,15 A				
Tempo de vibrocompactação (s)	40	60	120	240	480
CP1	19,51	18,98	15,81	18,71	19,13
CP2	19,78	15,22	20,18	6,21	22,79
CP3	18,16	18,26	14,67	16,44	21,22
CP4	11,05	19,39	18,56	20,86	19,24
CP5	18,57	19,86	17,28	20,47	18,32
Média	17,41	18,34	17,30	16,54	20,14
DV	3,62	1,84	2,18	6,03	1,83
Média + DV	21,03	20,18	19,48	22,57	21,97
Média - DV	13,80	16,50	15,12	10,51	18,31
CP1	19,51	18,98	-	18,71	19,13
CP2	19,78	-	20,18	-	-
CP3	18,16	18,26	-	16,44	21,22
CP4	-	19,39	18,56	20,86	19,24
CP5	18,57	19,86	17,28	20,47	18,32
Média	19,01	19,12	18,67	19,12	19,48
DV	0,77	0,68	1,45	2,02	1,23

## APÊNDICE H – Valores individuais para os corpos de prova da Figura 90 e da Figura 91

Corpos de prova	Ref.- laboratório convertido para bloco: 240s - CP II F	Ref.- lab. convertido para bloco 240s - CPV ARI	FD3 - convertido para bloco: 240s	Corpos de prova	Ref.- laboratório convertido para bloco: 240s - CP II F	Ref.- lab. convertido para bloco 240s - CPV ARI	FD3 - convertido para bloco: 240s
	Massa específica saturada aos 7 dias				Resistência à compressão aos 7 dias		
CP1	2,34	2,38	2,28	CP1	15,86	35,41	26,35
CP2	2,35	2,36	2,30	CP2	32,15	31,04	8,75
CP3	2,33	2,35	2,28	CP3	23,54	30,86	23,15
CP4	2,41	2,39	2,25	CP4	32,46	25,24	29,38
CP5	2,36	2,28	2,33	CP5	33,83	34,61	28,83
Média	2,36	2,35	2,29	Média	27,57	31,43	23,29
DP	0,03	0,04	0,03	DP	7,71	4,02	8,50
Média + DP	2,39	2,39	2,32	Média + DP	35,28	35,45	31,79
Média - DP	2,33	2,31	2,26	Média - DP	19,86	27,41	14,80
CP1	2,34	2,38	2,28	CP1	-	35,41	26,35
CP2	2,35	2,36	2,30	CP2	32,15	31,04	-
CP3	2,33	2,35	2,28	CP3	23,54	30,86	23,15
CP4	-	2,39	-	CP4	32,46	-	29,38
CP5	2,36		-	CP5	33,83	34,61	28,83
Média	2,35	2,37	2,29	Média	30,50	32,98	26,93
DP	0,01	0,02	0,01	DP	4,70	2,37	2,84
Corpos de prova	Massa específica saturada aos 28 dias			Corpos de prova	Resistência à compressão aos 28 dias		
CP1	2,33	2,38	2,31	CP1	52,99	37,08	24,4
CP2	2,33	2,36	2,30	CP2	28,04	34,75	30,4
CP3	2,38	2,35	2,28	CP3	26,28	22,99	31,5
CP4	2,34	2,39	2,26	CP4	32,23	50,82	17,1
CP5	2,28	2,28	2,29	CP5	35,34	31,01	31,4
Média	2,33	2,35	2,29	Média	34,97	35,33	26,94
DP	0,04	0,04	0,02	DP	10,67	10,18	6,25
Média + DP	2,37	2,39	2,31	Média + DP	45,65	45,51	33,19
Média - DP	2,29	2,31	2,27	Média - DP	24,30	25,15	20,69
CP1	2,33	2,38	2,31	CP1	-	37,08	24,41
CP2	2,33	2,36	2,30	CP2	28,04	34,75	30,38
CP3		2,35	2,28	CP3	26,28	-	31,49
CP4	2,34	2,39		CP4	32,23	-	-
CP5		2,28	2,29	CP5	35,34	31,01	31,35
Média	2,33	2,35	2,30	Média	30,47	34,28	29,41
DP	0,00	0,04	0,01	DP	4,09	3,06	3,37

Corpos de prova	Ref.- laboratório convertido para bloco: 240s - CP II F	Ref.- lab. convertido para bloco 240s - CPV ARI	FD3 - convertido para bloco: 240s	Corpos de prova	Ref.- laboratório convertido para bloco: 240s - CP II F	Ref.- lab. convertido para bloco 240s - CPV ARI	FD3 - convertido para bloco: 240s
	Absorção aos 7 dias				Tração aos 7 dias		
CP1	7,4%	6,6%	10,7%	CP1	3,33	2,12	1,79
CP2	6,8%	6,9%	11,8%	CP2	2,99	2,76	2,50
CP3	6,1%	7,0%	9,9%	CP3	2,23	2,44	2,10
CP4	6,0%	7,0%	12,3%	CP4	2,61	3,50	1,91
CP5	7,0%	6,6%	13,4%	CP5	1,54	1,90	2,29
Média	6,6%	6,8%	11,6%	Média	2,54	2,54	2,12
DP	0,6%	0,2%	1,4%	DP	0,69	0,63	0,29
Média + DP	7,2%	7,0%	13,0%	Média + DP	3,23	3,17	2,40
Média - DP	6,1%	6,6%	10,2%	Média - DP	1,85	1,92	1,83
CP1	-	6,6%	10,7%	CP1	-	2,12	-
CP2	6,8%	6,9%	11,8%	CP2	2,99	2,76	-
CP3	6,1%	7,0%	-	CP3	2,23	2,44	2,10
CP4	-	7,0%	12,3%	CP4	2,61	-	1,91
CP5	7,0%	6,6%	-	CP5	-	-	2,29
Média	6,6%	6,8%	11,6%	Média	2,61	2,44	2,10
DP	0,4%	0,2%	0,8%	DP	0,38	0,32	0,19
Corpos de prova	Absorção aos 28 dias			Corpos de prova	Tração aos 28 dias		
	CP1	7,3%	6,5%		11,7%	CP1	2,91
CP2	6,9%	6,3%	12,2%	CP2	2,30	2,70	2,29
CP3	6,2%	6,7%	11,6%	CP3	3,01	2,77	2,58
CP4	5,9%	7,0%	11,4%	CP4	2,74	2,65	2,90
CP5	6,8%	6,0%	11,5%	CP5	2,57	2,84	1,93
Média	6,6%	6,5%	11,7%	Média	2,71	2,78	2,34
DP	0,6%	0,4%	0,3%	DP	0,28	0,12	0,40
Média + DP	7,2%	6,9%	12,0%	Média + DP	2,99	2,90	2,75
Média - DP	6,1%	6,1%	11,3%	Média - DP	2,42	2,66	1,94
CP1	-	6,5%	11,7%	CP1	2,91	-	2,01
CP2	6,9%	6,3%	-	CP2	-	2,70	2,29
CP3	6,2%	6,7%	11,6%	CP3	-	2,77	2,58
CP4	-	-	11,4%	CP4	2,74	-	-
CP5	6,8%	-	11,5%	CP5	2,57	2,84	-
Média	6,6%	6,5%	11,5%	Média	2,74	2,77	2,29
DP	0,4%	0,2%	0,1%	DP	0,17	0,07	0,29