



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS EM COMPOSIÇÕES
GRANULOMÉTRICAS DE AGREGADOS MIÚDOS: EFEITOS NA
CONSISTÊNCIA, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E
POROSIDADE DE ARGAMASSAS

CAMILA SILVA RODRIGUES

BARREIRAS-BA
MARÇO-2018

CAMILA SILVA RODRIGUES

**EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS EM COMPOSIÇÕES
GRANULOMÉTRICAS DE AGREGADOS MIÚDOS: EFEITOS NA
CONSISTÊNCIA, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E
POROSIDADE DE ARGAMASSAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do
Oeste da Bahia, como requisito à obtenção do grau de
Engenheiro Civil.

Orientador: D.Sc. Juarez Hoppe Filho

BARREIRAS-BA

MARÇO-2018

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Universitária do Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias da Universidade Federal do Oeste da Bahia

R696 Rodrigues, Camila Silva.

Empacotamento de partículas em composições granulométricas de agregados miúdos: efeitos na consistência, resistência à compressão axial e porosidade de argamassas / Camila Silva Rodrigues. – 2018.

96 f.; il.

Orientador: Prof. Dr. Juarez Hoppe Filho.
Trabalho de Conclusão de Curso: (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias, Barreiras, BA, 2018.

1. Empacotamento de Partículas. 2. Agregados Mineraiis. 3. Resistencia de Materiais - Argamassa. I. Hoppe Filho, Juarez. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD: 620.1

CAMILA SILVA RODRIGUES

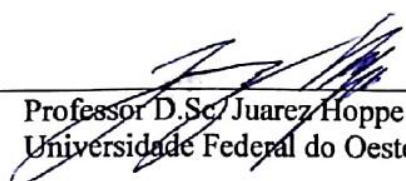
**EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS EM COMPOSIÇÕES
GRANULOMÉTRICAS DE AGREGADOS MIÚDOS: EFEITOS NA
CONSISTÊNCIA, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E
POROSIDADE DE ARGAMASSAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do
Oeste da Bahia, como requisito parcial à obtenção do
grau de Engenheiro Civil.

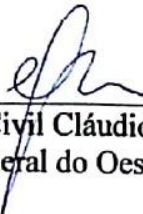
Aprovada em 29 de março de 2018

Banca Examinadora


Orientador:



Professor D.Sc. Juarez Hoppe Filho
Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)



Professor Eng.º Civil Cláudio Alex de Oliveira Pires
Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)



Professor D.Sc. Eljer Pavón de La Fé
Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)

À meus pais, Gilson e Jovelice, pelo apoio, sacrifício, compreensão e por todo amor, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida, por sempre me dar forças, sabedoria para tomada de decisões e por me guiar em Seus caminhos.

A minha família, pelo apoio financeiro, emocional, por ter caminhado ao meu lado durante toda essa jornada acadêmica, em especial, aos meus pais, Gilson e Jovelice, pelo exemplo de vida, de luta e de amor.

A Sergio Murilo por permanecer ao meu lado mesmo diante de todas as dificuldades, pelo apoio, compreensão, por todo amor e, principalmente, por acreditar na minha capacidade e que mesmo distante batalhou comigo todos os dias, meu muito obrigado.

Ao professor Juarez Hoppe Filho por ter aceitado o convite para ser meu orientador e desde então tem se empenhado para me ajudar na realização deste trabalho, obrigado pelos conselhos, apoio, amizade e por compartilhar comigo seus conhecimentos, fica aqui minha admiração e gratidão.

Aos professores Elier Pavón e Cláudio Alex Pires por terem aceitado o convite para avaliar este trabalho.

Aos amigos, que de alguma forma, permanecem comigo durante a caminhada da vida, em especial Sheila Maia, Ludna Baraúna, Nyanne Guimarães, Sara Dourado. E aos amigos, Rízia Gonçalves, Emanuella Correia, Lorena Santana, Marília Almeida, Lucas Ribeiro, Johnatas Magno, Bruno Oliveira, Wander Vasco, Itaylane Malta, que tive o prazer de conhecer na faculdade e que contribuíram para que essa caminhada se tornasse mais fácil.

Aos professores da Universidade Federal da Bahia, que tive prazer de conhecer e conviver, que acreditaram no meu potencial e ajudaram tornar esse sonho possível, compartilhando seus conhecimentos de forma tão generosa.

A Sérgio Murilo que conseguiu o agregado miúdo da cidade de Goiânia-GO. E a todos que colaboram, diretamente ou indiretamente, para realização deste trabalho.

Ao Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias (CCET) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), por ter proporcionado condições de desenvolver este trabalho.

Muito obrigado!

RESUMO

Os agregados são materiais importantes na composição de concretos e argamassas não somente pela questão econômica (enchimento), mas também pelas suas características físicas que determinam o desempenho do material tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A variabilidade morfológica e dimensional dos grãos dos agregados, quando combinadas, possibilita a obtenção de um esqueleto granular compacto, apresentando uma máxima densidade de empacotamento, o que pode alterar as propriedades do concreto e das argamassas, além de contribuir para a redução do consumo de cimento. Dessa forma, para resultar em um bom empacotamento é primordial que as partículas apresentem uma boa interação entre si, o que normalmente não ocorre nas misturas de concreto produzidas na região do oeste da Bahia, pelo fato do agregado miúdo comercializado na região possuir deficiência de partículas superiores a 0,60 mm. A ausência destes grãos ocasionará descontinuidade na distribuição granulométrica quando da mistura com o agregado graúdo. Portanto há que se adequar a amplitude granulométrica do agregado miúdo regional, o que pode ser realizado por meio de composição com pó de brita. O presente trabalho tem por objetivo analisar o efeito do empacotamento de partículas em cinco composições granulométricas obtidas através de diferentes agregados miúdos, sendo eles: areia fina e pó de brita disponibilizados comercialmente na região de Barreiras-Ba, areia grossa, originária de Goiânia-GO, a qual foi fracionada por peneiramento com intuito de obter uma composição de distribuição granulométrica similar à determinada pelo modelo de Funk e Dinger (1992) e duas composições granulométricas obtidas pela mistura da areia fina e do pó de brita. A mistura de 45% de areia fina e 55% de pós de brita adequou a distribuição granulométrica aos limites da zona ótima preconizada na norma NBR 7.211: 2005. A mistura de 30% de areia fina e 70% de pó de brita foi concebida para a obtenção de máximo empacotamento conforme modelo de Funk e Dinger (1992). O modelo CPM (Compressible Packing Model) de De Larrard (1999) foi utilizado para determinação das densidades de empacotamento real e virtual de cada agregado miúdo estudado, enquanto a densidade de empacotamento experimental foi realizada em laboratório. Nas argamassas executadas com os diferentes agregados miúdos foram avaliadas a consistência, a resistência à compressão e porosidade até 28 dias de idade. Os resultados indicaram que a densidade de empacotamento não depende apenas da distribuição granulométrica, mas também da morfologia e textura superficial dos grãos. A fluidez das argamassas tende a aumentar quanto maior for o empacotamento das partículas. A resistência à compressão, de maneira geral, está relacionada ao empacotamento de partículas do agregado miúdo, apesar de discrepâncias terem sido observadas. O empacotamento de partículas pouco influenciou na variação da porosidade das argamassas ao longo do tempo.

Palavras-chave: Empacotamento de partículas; distribuição granulométricas; consistência das argamassas; resistência à compressão; porosidade.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA	12
1.2 PRINCIPAIS PESQUISAS RELACIONADAS AO TEMA	14
1.3 OBJETIVOS	15
1.3.1 OBJETIVO GERAL	16
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4 JUSTIFICATIVA	16
2. REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 AGREGADOS	18
2.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	20
2.2.1 FATORES QUE INFLUENCIAM O EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	21
2.2.2 MODELOS DE EMPACOTAMENTO	22
2.2.3 MODELOS PARA OBTENÇÃO DE CURVAS GRANULOMÉTRICAS IDEIAS	22
2.2.4 MODELO PARA OBTENÇÃO DE COMPOSIÇÕES OTIMIZADAS	24
2.3 CONSISTÊNCIA	29
2.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	31
2.5 POROSIDADE DAS ARGAMASSAS	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 MATERIAIS	33
3.1.1 CIMENTO PORTLAND	33
3.1.2 AGREGADO MIÚDO	33
3.1.3 COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS	37
3.2 MÉTODOS	41
3.2.1 OBTENÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA IDEAL	41
3.2.2 ESTUDOS DAS COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS ATRAVÉS DO MODELO CPM	44
3.2.3 PROPORÇÃO DOS COMPONENTES E MISTURA DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND	46
3.2.4 ENSAIO DE CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS	47
3.2.5 MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA	48
3.2.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	49
3.2.7 POROSIDADE DAS ARGAMASSAS	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 ASPECTO VISUAL DOS AGREGADOS MIÚDOS UTILIZADOS NO ESTUDO DAS ARGAMASSAS	53

4.2	CURVAS GRANULOMÉTRICAS	54
4.3	DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO	58
4.3.1	DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO EXPERIMENTAL DE CADA UMA DAS CLASSES (TAMANHO DE PARTÍCULA) QUE COMPÕEM O AGREGADO MIÚDO.....	59
4.3.2	DENSIDADES DE EMPACOTAMENTO REAL E VIRTUAL DOS AGREGADOS MIÚDOS	62
4.3.3	DENSIDADES DE EMPACOTAMENTO EXPERIMENTAL DOS AGREGADOS MIÚDOS	64
4.4	CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS	66
4.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	68
4.6	POROSIDADE DAS ARGAMASSAS	70
4.7	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS <i>VERSUS</i> PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO	72
4.7.1	EMPACOTAMENTO EXPERIMENTAL DE PARTÍCULAS <i>VERSUS</i> CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS.....	72
	DA COM MENORES QUANTIDADES DE ÁGUA.	72
4.7.2	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS EXPERIMENTAL <i>VERSUS</i> RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS ARGAMASSAS.	75
4.7.3	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS EXPERIMENTAL <i>VERSUS</i> POROSIDADE DAS ARGAMASSAS.....	76
4.8	CONSUMO DE CIMENTO PARA CADA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	77
4.9	VOLUME DE VAZIOS DO AGREGADO MIÚDO <i>VERSUS</i> VOLUME DE PASTA CONTIDO NAS ARGAMASSAS.....	79
5.	CONCLUSÃO	82
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS.....	88
	APÊNDICE B – ROTEIRO DE CÁLCULO DO MODELO CPM.....	89
	APÊNDICE C – RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	95
	APÊNDICE D – RESULTADOS DA POROSIDADE DAS ARGAMASSAS.....	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Casos extremos de possíveis empacotamentos: (a) Sistema monodisperso – mínima densidade de empacotamento; (b) Sistema polidisperso - máxima densidade de empacotamento..	21
Figura 2 - Distribuição granulométrica segundo o modelo de Alfred (1992).....	214
Figura 3 - Efeitos de interação entre os grãos.	27
Figura 4 - Curva granulométrica da areia fina originária da região oeste da Bahia e as curvas limite da zona ótima e zona utilizável recomendadas pela norma NBR 7.211: 2005.	34
Figura 5 - Curva granulométrica da areia grossa originária da região de Goiânia – GO e as curvas limite da zona ótima e zona utilizável recomendadas pela norma NBR 7.211:2005.	35
Figura 6 - Curva granulométrica do pó de brita e as curvas limite da zona ótima e zona utilizável recomendadas pela norma NBR 7.211: 2005.	36
Figura 7 - Distribuição granulométrica teórica da composição de 45% de areia fina e 55% de pó de brita e curvas limites da zona ótima e zona utilizável recomendadas pela norma NBR 7211:2005.	38
Figura 8 - Distribuição granulométrica teórica da composição de 30% de areia fina e 70% de pó de brita e distribuição granulométrica proposta pelo modelo de Funk e Dinger (1992).....	40
Figura 9 - Metodologia de estudo para análise dos efeitos de empacotamento de partículas de agregados miúdos destinados à execução de argamassas.	41
Figura 10 - Curva granulométrica obtida através do modelo de empacotamento proposto por Funk e Dinger (1992) e as curvas limite da zona ótima e zona utilizável recomendadas pela norma NBR 7.211: 2005.....	43
Figura 11 – Ensaio de massa unitária no estado solto	44
Figura 12 - Argamassadeira utilizada na mistura das argamassas	47
Figura 13 - a). Fôrma tronco-cônica utilizada para determinar a consistência da argamassa. b) Dimensões da fôrma tronco-cônica.....	48
Figura 14 - corpos-de-prova após a moldagem	49
Figura 15 - Prensa hidráulica para ensaio de resistência à compressão	49
Figura 16 - Balança hidrostática utilizada na determinação da massa submersa das amostras extraídas dos corpos-de-prova das argamassas.	50
Figura 17 - Ultrafreezer utilizado para congelamento das amostras extraídas dos corpos-de-prova das argamassas.	51
Figura 18 - Liofilizador utilizado para secagem das amostras extraídas dos corpos-de-prova das argamassas.....	51
Figura 19 – Aspecto visual dos agregados miúdos utilizados no estudo de argamassas.....	54

Figura 20 – Curva idealizada do modelo de Funk e Dinger (1992), considerando a dimensão máxima dos grãos de 4,75 mm e mínima de 0,09 mm, e distribuição granulométrica do agregado 2 antes e após a adequação ao modelo para a obtenção de máximo empacotamento	55
Figura 21 - Curva idealizada do modelo de Funk e Dinger (1992), considerando a dimensão máxima dos grãos de 0,60 mm e mínima de 0,09 mm, distribuição granulométrica do agregado 1 e curvas limites das zonas ótima e utilizável conforme diretrizes da norma NBR 7211:2005.....	56
Figura 22 - Curva idealizada do modelo de Funk e Dinger (1992), considerando a dimensão máxima dos grãos de 4,75 mm e mínima de 0,09 mm, distribuição granulométrica do agregado 3 e curvas limites das zonas ótima e utilizável conforme diretrizes da norma NBR 7211:2005.....	56
Figura 23 - Distribuição granulométrica do agregado 4 e curvas limites da zona ótima e zona utilizável conforme diretrizes da norma NBR 7211:2005.....	57
Figura 24 - Curva idealizada do modelo de Funk e Dinger (1992), considerando a dimensão máxima dos grãos de 4,75 mm e mínima de 0,09 mm e distribuição granulométrica do agregado 5.	58
Figura 25 - Densidades de empacotamento real e virtual dos agregados miúdos estudados.	63
Figura 26 - Densidades de empacotamento real, experimental e virtual dos agregados miúdos estudados.....	65
Figura 27 - Espalhamento das argamassas	67
Figura 28 - Aspecto visual do ensaio de consistência das argamassas com: agregado 1; agregado 2; agregado 3; agregado 4 e agregado 5.....	68
Figura 29 - Resistência à compressão das argamassas nas idades de 3, 7 e 28 dias	69
Figura 30 - Evolução da porosidade das argamassas produzidas com diferentes composições granulares.....	71
Figura 31 - Comparativo da densidade de empacotamento experimental versus consistência das argamassas.....	73
Figura 32 - Morfologia das classes dos grãos do agregado 2.....	74
Figura 33 - Morfologia das classes dos grãos do agregado 3.....	75
Figura 34 - Comparativo da densidade de empacotamento experimental versus resistência à compressão axial aos 28 dias	76
Figura 35 - Comparativo da densidade de empacotamento experimental versus porosidade aos 28dias	76
Figura 36 – Consumo de cimento Portland em Kg/m ³ .MPa para produzir argamassa de 1MPa.	78
Figura 37 – Volume de vazios do agregado miúdo, volume de pasta contido em cada uma das argamassas e consistência.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores do índice de compactação K.....	28
Tabela 2 – Composições granulométrica da areia fina e pó de brita.....	37
Tabela 3 - Distribuição granulométrica teórica da composição de 45% de areia fina e 55% de pó de brita.	38
Tabela 4 - Composição de areia fina e pó de brita, curva granulométrica próxima da curva obtida pelo modelo de Funk e Dinger (1992)	39
Tabela 5 – Resumo dos agregados utilizados nesse estudo.....	40
Tabela 6 - Análise granulométrica do agregado 2, segundo modelo de empacotamento proposto por Funk e Dinger (1992).....	43
Tabela 7 - Proporção de mistura das argamassas (massa).....	47
Tabela 8- Massa unitária e densidade de empacotamento das classes do agregado 1.....	59
Tabela 9 - Massa unitária e densidade de empacotamento das classes do agregado 2.....	60
Tabela 10 - Massa unitária e densidade de empacotamento das classes do agregado 3.....	60
Tabela 11 - Massa unitária no estado solto e densidade de empacotamento das classes do agregado 4.....	61
Tabela 12 - Massa unitária no estado solto e densidade de empacotamento das classes do agregado 5.....	61
Tabela 13 - Porcentagem de massa retidas em função das classes de partículas que constituem os agregados miúdos e os respectivos resultados normalizados.....	62
Tabela 14 - Porosidade das argamassas nas diferentes idades estudadas.....	70
Tabela 15 – Consumo do cimento Portland por metro cúbico de argamassa em relação à massa específica de cada agregado miúdo estudado.....	77
Tabela 16 – Consumo de agregado e de água, volume de vazios, volume de pasta e relação entre o volume de pasta e o volume de vazios do agregado.....	80

1. INTRODUÇÃO

1.1 Importância do tema

Os agregados eram considerados materiais inertes destinados apenas a baratear o custo final de produção do concreto, ou seja, possuíam a função de enchimento volumétrico. Porém, com o passar do tempo, a utilização em larga escala dos agregados evidenciou sua verdadeira importância que, além da econômica, assume significância técnica e social. Foi verificado que muitas das propriedades do concreto são influenciadas pelas características dos agregados, como porosidade, composição granulométrica, absorção d'água, estabilidade, forma e textura superficial dos grãos (NETO, 2005).

Os agregados utilizados na construção civil, geralmente, são as areias naturais e as areias originárias do processo de britagem. De acordo com Neto (2005), o uso de areia de britagem cresceu consideravelmente como agregado miúdo para concreto, devido à exaustão de jazidas nos grandes centros. A areia de britagem tem sido valorizada tanto no espaço comercial, quanto no meio técnico, devido as suas características físicas, especialmente quanto a sua curva granulométrica e a quantidade de finos presentes.

Com este cenário, aproveitando a diversidade de oferta de agregados, percebeu-se a importância de estudar os conceitos de empacotamento dos mesmos para a produção de concretos e argamassas. Castro e Pandolfelli (2009) relacionam esse interesse com o fato de que grande parte dos materiais, sejam eles naturais ou artificiais, contem partículas de diferentes formas e tamanhos. Os autores afirmam que o conceito de alta densidade de empacotamento foi redescoberto como uma solução para o alcance de materiais cimentícios de alto desempenho.

O termo empacotamento de partículas, na engenharia civil, tem sido utilizado para representar a forma como os grãos são acomodados com o intuito de minimizar, ao máximo, os espaços vazios da mistura granular.

A minimização dos espaços vazios do sistema granular constituído pelos agregados demanda menor volume de pasta para o seu preenchimento. Essa redução se traduz menor consumo de cimento por unidade volumétrica de material, haja vista a pasta ter por finalidade preencher os espaços vazios e propiciar o afastamento dos grãos para permitir o escoamento do conjunto. O volume de pasta responsável pelo afastamento dos grãos é imprescindível para a fluidez do material, entretanto, o volume de pasta que preenche os

vazios da estrutura granular pouco interfere no seu escoamento, mas é de suma importância para compacidade do conjunto de agregados envoltos pela pasta (DAMINELLI, 2013).

De fato, a fluidez de concretos e argamassas é uma propriedade reológica de suma importância, pois esta, além de influenciar as propriedades no estado fresco pode intervir nas propriedades quando no estado endurecido. Desta forma, é de interesse a redução do volume de pasta para preenchimento dos espaços vazios do sistema granular e a manutenção de volume de pasta mínimo para garantir a adequada fluidez do concreto ou argamassa. Castro e Pandolfelli (2009) mencionam que a distribuição granulométrica, o índice de forma e a textura superficial dos grãos influenciam na fluidez da mistura, pois reduzem o volume de vazios do conjunto, ou seja, aumenta a densidade de empacotamento. Os autores explicam que a distribuição de tamanho das partículas promove o empacotamento e juntamente com o fluido (água) define as propriedades reológicas do material durante o processo de mistura e quando no estado fresco.

Posto isso, vê-se a importância de utilizar agregados que possuam diferentes formas e tamanhos, de modo que estas variações se combinem, ou seja, as partículas menores preencham, sucessivamente, os espaços vazios contidos entre as partículas maiores. Espera-se que essa combinação resulte em um esqueleto granular compacto, apresentando máxima densidade de empacotamento, melhorando as propriedades do concreto, além de contribuir para a redução da pasta de cimento que seria utilizada no preenchimento dos vazios.

Na prática, porém, torna-se difícil reproduzir, para misturas granulares utilizados em concretos, uma máxima densidade de empacotamento encontrada por meio dos modelos teóricos. Isso ocorre devido à irregularidade da morfologia dos grãos, que geralmente não são esféricos e, quanto mais distantes da forma esférica, maior será os vazios entre as partículas, diminuindo a densidade de empacotamento. Por outro lado, no cotidiano prático, há baixo controle do empacotamento na produção do concreto, o que resulta, normalmente, em maior consumo de cimento. Diante do distanciamento entre conhecimento teórico e prático, há que se promover estudos que visem propiciar melhorias no empacotamento dos agregados e, desta forma, reduzir o consumo de cimento Portland para a obtenção de um concreto de consistência pré-estabelecida. Esta prática, se implementada, reduz o impacto ambiental decorrente da extração de materiais primas e produção de clínquer, pois a demanda de concreto ou argamassa será atendida, porém com menor consumo de cimento por unidade volumétrica de material.

1.2 Principais pesquisas relacionadas ao tema

A utilização dos conceitos de empacotamento de partículas tem como propósito obter um esqueleto granular compacto, com máxima densidade de empacotamento do agregado, visando melhorar as propriedades dos concretos e das argamassas e ainda reduzir o consumo de cimento. Sendo assim, as pesquisas relacionadas com o tema estão crescendo nos últimos anos. A seguir, estão listadas algumas das principais pesquisas dos últimos 5 anos.

- Londero *et al* (2017) propuseram estudar onze curvas granulométricas, sendo que a curva granulométrica que representa a média dos limites inferior e superior da zona ótima na NBR 7211:2005 – Agregados para concreto- especificação, foi utilizada como referência. O intuito do estudo foi verificar qual destas composições granulométricas possui o menor índice de vazios. Comparou-se, então, a densidade de empacotamento dos diferentes agregados miúdos, utilizando diferentes modelos de empacotamento de partículas. Foram determinados, teoricamente, a densidade de empacotamento real e virtual, e por meio de ensaio laboratorial, a densidade de empacotamento experimental. Concluiu-se que é possível aumentar a densidade de empacotamento por meio do uso de modelos de empacotamento de partículas em composições aleatórias frente à curva média indicada da norma NBR 7211.
- Londero (2016) utilizou os conceitos de empacotamento de partículas para a dosagem de concretos ecológicos. Através deste concluiu que é possível dosar um concreto com consumo de cimento reduzido, através de técnicas de empacotamento de partículas, que se comporte mecanicamente semelhante a um concreto convencional.
- Lenz (2016) estudou a influência do empacotamento do esqueleto granular no módulo de elasticidade de concreto convencionais. O autor concluiu que quanto maior o empacotamento menor o consumo de cimento e maior o módulo de elasticidade estático.
- Lima *et al.* (2016) estudaram a influência do método do empacotamento do agregado miúdo na resistência do concreto convencional. Foi concluído que o aumento da compactação do agregado provocou perda de abatimento, e conseqüente aumento na dificuldade de adensamento, devido ao aumento da

quantidade de partículas finas. Não houve incrementos significativos na resistência mecânica do material.

- Quintanilha *et al.* (2016) estudaram a influência do método de empacotamento de partículas, utilizando apenas agregado graúdo, na resistência à compressão do concreto de cimento Portland convencional. Os autores concluíram que o concreto produzido com maior empacotamento das partículas dos agregados graúdos apresentou consistência mais fluida, e em relação a resistência mecânica, foi semelhante àquela obtida pelo concreto produzido da forma tradicional.
- Baranhuk (2014) analisou a influência do empacotamento dos agregados, utilizando os modelos propostos por Alfred (1992) e Toufar modificado (FENNIS, 2011), na porosidade do concreto, principalmente o efeito que esta produz na durabilidade do concreto. O autor concluiu que empacotamento dos agregados tem influência na porosidade do concreto, reduzindo-a significativamente quando se aplica o modelo de Toufar modificado (FENNIS, 2011).
- Damireli (2013) utilizou os conceitos de empacotamento de partículas para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes e controle reológico. O autor concluiu que o aumento do empacotamento permite a diminuição do teor de água para mover os finos da pasta e do teor de pasta para mover os agregados, o que pode gerar misturas com menor teor ligantes, mas com a mesma relação a/c, de forma que a resistência é mantida constante. Misturas de baixo empacotamento, apresentam, por sua vez, pior comportamento reológico.
- Oliveira (2013) empregou os conceitos de reologia e de empacotamento de partículas na dosagem dos concretos de alto desempenho e auto adensável, procurando caracterizar, reologicamente, essas misturas no estado fresco, além da caracterização no estado endurecido, e avaliou a viabilidade econômica do uso de empacotamento de partículas. A autora obteve resultados satisfatórios, tanto para os conceitos de reologia quanto para o de empacotamento de partículas. Em relação a viabilidade, concluiu que os concretos produzidos por empacotamento são mais caros em relação aos dosados com base na reologia por requerer uma quantidade maior de adição mineral e de aditivo superplastificante.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência do empacotamento de partículas em composições granulométricas de agregado miúdo, verificando os efeitos decorrentes deste na consistência, resistência à compressão axial e porosidade de argamassas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Obter uma distribuição granulométrica ideal através do modelo de empacotamento de Funk e Dinger (1992), utilizando areia grossa, a qual possui uma amplitude granulométrica de 0,09 mm a 4,75 mm.
- Obter duas composições granulométricas misturando areia fina e pó de brita a fim de ampliar a distribuição granulométrica da areia fina utilizada para produção de concretos na região de Barreiras – Ba.
- Analisar as densidades de empacotamento das composições granulométricas, sendo elas a areia fina, a areia grossa (adequada ao modelo de Funk e Dinger (1992)), o pó de brita e das duas composições granulométricas obtidas com a mistura da areia fina e do pó de brita.
- Analisar a influência do empacotamento de partículas sobre a consistência das argamassas, obtidas a partir das cinco composições granulométricas, utilizando a mesma relação água/cimento (0,55).
- Analisar a influência do empacotamento de partículas sobre a resistência à compressão e porosidade das argamassas.

1.4 Justificativa

A justificativa para o desenvolvimento desse trabalho está fundamentada, sobretudo, em apresentar solução técnica mais adequada para o uso do agregado miúdo na produção de concreto na região do Oeste da Bahia, pois nesta região é comercializado agregados classificados como fino. Este, por sua vez, ao entrar em contato com o agregado graúdo, não apresenta uma boa interação entre os grãos, podendo aumentar a quantidade de vazios da mistura devido a descontinuidade granulométrica. De acordo com Carneiro e

Cincotto (1997) uma argamassa ou concreto preparados com areia de granulometria de descontinuidade acentuada terá maior índice de vazios, necessitando de maior quantidade de aglomerante para a mesma trabalhabilidade.

Diante do exposto, busca-se fazer um estudo que possibilite a utilização de composições otimizadas a partir de agregado miúdo proveniente de britagem com o agregado miúdo natural fino, adequando-as para apresentar uma boa distribuição granulométrica para o uso na mistura de concreto, com o intuito de corrigir a deficiência granulométrica da areia fina, ou seja, adequá-la para que esta apresente uma granulométrica contínua. Além do mais, tem-se o intuito de analisar, entre outras propriedades, a consistência de argamassas obtidas a partir de diferentes composições granulométricas de agregados miúdos. Uma vez que uma mistura granular apresenta um esqueleto mais compacto, pode possibilitar a obtenção de uma consistência desejável, sem a necessidade de aumentar a quantidade de pasta para este fim.

Cabe ressaltar que este estudo foi realizado em argamassas, sem a consideração da influência da morfologia (índice de forma) e textura superficial dos grãos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Agregados

Os agregados são indispensáveis para a produção de argamassas ou concretos. De fato, a utilização destes nas misturas tem por objetivo reduzir o consumo de cimento por unidade de volume, ou seja, atuam como enchimento. Obviamente que esta função requer que os agregados tenham afinidade com o cimento Portland e possuam características químico-mineralógicas que garantam o adequado desempenho do material quando sob utilização e ao longo do tempo (NEVILLE E BROOKS, 2013). Também, há que se destacar a influência dos agregados no estado fresco da argamassa ou concreto e, sob este ponto de vista, o empacotamento, a morfologia e a textura superficial dos grãos possuem considerável relevância. Portanto, há que se ter ciência que a utilização dos agregados transcende a questão econômica (enchimento) e assume importância técnica para o bom desempenho do material que o contém. Diante desta conjuntura, é necessário explanar, sucintamente, sobre a classificação dos agregados para, então, apresentar os conceitos inerentes ao empacotamento de partículas.

Os agregados podem ser classificados, segundo Neto (2005), quanto a origem, dimensões dos grãos e quanto a massa unitária.

Quanto a origem, os agregados são classificados em naturais, britados, artificiais e reciclados. Os agregados naturais derivam da natureza e estão prontos para o uso. Os britados são aqueles cominuídos através de processo de britagem, adequando-os para uso em concreto. Os agregados artificiais derivam de processos industriais e por fim, os reciclados são aqueles provenientes de resíduos industriais granulares que tenham propriedades adequadas para uso.

Quanto as dimensões dos grãos podem ser graúdos e miúdos. Os agregados graúdos são aqueles cujo grãos passam na peneira com abertura de malha 152 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 4,75 mm. Os agregados miúdos são aqueles que passam na peneira com abertura de malha 4,75 mm, e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 0,075mm. (NETO, 2005)

Quanto à massa unitária, podem ser leves, pesados ou normais, conforme a NBR 9.935: 2011 – agregados terminologia. Os agregados leves são aqueles que possuem baixa densidade como, por exemplo, agregados de argila expandida, escória siderúrgica,

vermiculita, resíduo de esgoto sinterizado, entre outros; já os agregados densos ou pesados são aqueles com elevada densidade como, por exemplo, barita, magnetita, limonita, hematita, entre outros. Por fim, os agregados de densidade normais são aqueles que possuem densidades compreendidas, geralmente, entre 2.000 kg/m³ e 3.000 kg/m³, sendo eles: as areias, as pedras britadas e os seixos.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a porosidade, a forma e a textura da superfície dos agregados determinam as propriedades do concreto, principalmente, no seu estado fresco. As partículas cujas texturas são mais ásperas e possuem formas mais alongadas e angulosas, requerem mais cimento na mistura, aumentando, assim, o custo. Geralmente os grãos de origem natural possuem a forma mais arredondada, enquanto que aqueles provenientes de rochas intrusivas são mais angulosos e/ou alongados.

Neto (2005), ressalta, que as areias grossas (agregado miúdo) produzem misturas de concretos mais ásperas e não trabalháveis, ao mesmo tempo que, as areias finas aumentam o consumo de água, aumentando, na mesma relação, o consumo de cimento, tornando a mistura antieconômica. Dessa forma, há uma necessidade de obter uma distribuição granulométrica equilibrada, a fim de obter uma estrutura mais compacta da massa de concreto, diminuindo os índices de vazios.

Posto isto, em um composto formado por agregados e cimento, sabendo-se que os espaços vazios presentes entre os agregados serão preenchidos pela pasta de cimento, obter um composto mais compacto, além de melhorar as propriedades mecânicas e físicas do concreto, acarretará mais economia, uma vez que o cimento possui maior valor em relação aos agregados (LONDERO, 2016).

Neville e Brooks (2013) fazem uma abordagem sobre os requisitos de granulometria, isto é, quando uma granulometria é ou não adequada para produção de um “bom” concreto. A princípio, os autores declaram que a granulometria só é importante se esta afetar a trabalhabilidade, pois não possui relação com a resistência. Porém, para alcançar alta resistência, é necessário um adensamento máximo do concreto, obtido através da aplicação de uma energia aceitável, o que somente é conseguido com uma mistura suficientemente trabalhável. Os autores concluem, por fim, que não existe uma granulometria ideal devido à interação entre os principais fatores que afetam a trabalhabilidade, os quais são: área superficial do agregado, volume relativo ocupado pelo agregado, a tendência à segregação e a quantidade de finos da mistura.

No entanto, vários pesquisadores, entre eles Füller Thompson (1907), Andreasen e Andersen (1930), Funk e Dinger (1992), De Larrard (1999), Fennis (2011), estão desenvolvendo linhas de pesquisas para a determinação da curva granulométrica ideal dos agregados para uso em concretos, através das técnicas de empacotamento de partículas. Este tema será discutido, com mais detalhes, no próximo item.

2.2 Empacotamento de partículas

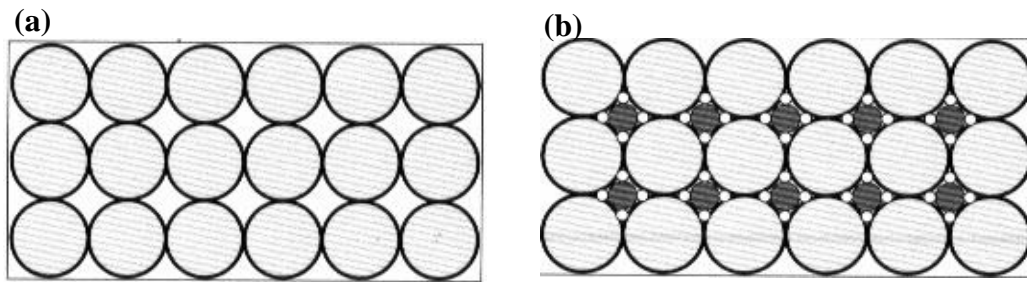
O empacotamento de partículas, pode ser definido, segundo McGearry (1961) *apud* Oliveira *et al* (2000, p.119) como:

O problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios, serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente.

Para Londero (2016), com a utilização das técnicas do empacotamento de partículas é possível melhorar o esqueleto granular que compõem os concretos, ou seja, reduzir a quantidade de espaços vazios do composto, possibilitando a redução do consumo de cimento Portland.

De acordo com Riva (2010), o arranjo espacial das partículas e o modo de empacotamento das partículas vão depender das suas formas e das suas distribuições espaciais, bem como sua disposição ou formação no local. O autor complementa, baseando nos estudos de Harris (1971), que existe dois casos extremos de possíveis empacotamento, os quais são, o sistema que possui apenas grãos esféricos, de tamanhos uniformes, o qual irá possuir densidade mínima, denominado monodisperso, e o sistema que possui uma distribuição gradual de tamanho de grãos, cujo grãos menores preenchem os vazios entre os grãos maiores em uma sucessão ideal, de tal forma que esse sistema irá apresentar uma densidade máxima, denominado de polidisperso. A representação destes sistemas é apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Casos extremos de possíveis empacotamentos: (a) Sistema monodisperso – mínima densidade de empacotamento; (b) Sistema polidisperso - máxima densidade de empacotamento



Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.*, 2000.

2.2.1 Fatores que influenciam o empacotamento de partículas

Segundo Oliveira *et al.* (2000), a densidade de empacotamento em sistemas monodispersos de partículas esféricas estará entre os valores 0,60 e 0,64. Porém, teoricamente, é possível obter valores superiores, igual a 0,74, para estruturas ordenadas.

Londero *et al* (2017) acrescentam afirmando que esta densidade de empacotamento máxima é alcançada considerando o empacotamento de uma rede cúbica de face centrada (cfc) de partículas perfeitamente esféricas, onde cada partícula foi posicionada no sistema uma a uma. Desse modo, quando se tem um conjunto granular formado a partir de condições diferentes das ideais apontadas, os valores encontrados são naturalmente menores que o valor máximo.

Os fatores que influenciam o empacotamento de partículas em um conjunto granular, de acordo com Oliveira *et al.* (2000) são:

- A distribuição granulométrica: esta altera as condições de monodispersão do sistema granular, permitindo obter sistemas granulométricos muito bem empacotados, ou não. Os vazios existentes entre as partículas maiores devem ser preenchidos, da melhor forma possível, pelas partículas menores, de forma a diminuir os espaços vazios entre os grãos maiores.
- A morfologia: quanto mais afastada do formato esférico a partícula for, menor é a densidade de empacotamento da mistura. Isso ocorre pelo atrito que surge pelo contato das superfícies irregulares das mesmas. Quanto menor o tamanho das partículas irregulares, maior esse efeito, em função da maior área superficial específica. Além do atrito, a irregularidade do formato do grão pode gerar

estruturas que nunca alcançarão um máximo empacotamento devido à sua geometria.

- A compactação das partículas: esta deve ser aplicada com bastante cautela, afim de evitar possíveis segregações.

2.2.2 Modelos de empacotamento

Atualmente, muitos estudos estão sendo desenvolvidos na área de empacotamento de partículas, podendo citar entre eles, Daminieli (2013); Oliveira (2013); Baranhuk (2014); Lenz (2016); Londero (2016), os quais teve como objetivos a utilização dos conceitos de empacotamento de partículas e aplicação de modelos matemáticos que permitem a otimização de misturas granulares.

Será feita uma abordagem sobre os modelos de empacotamento cujo objetivo é encontrar curvas granulométricas ideais os quais são: Modelo de Furnas (1931) e o modelo de Andreasen e Andersen (1930), modelo de Funk e Dinger (1992) e o modelo para obtenção de composições otimizadas que é o modelo proposto por De Larrard (1999), conhecido como Modelo de empacotamento compressível (CPM, do inglês Compressible Packing Model).

2.2.3 Modelos para obtenção de curvas granulométricas ideais

2.2.3.1 Modelo de Furnas (1931)

O modelo de Furnas (1931) propõe uma abordagem discreta, em que o empacotamento máximo ocorre quando as partículas finas preenchem, completamente, os vazios existentes entre as partículas maiores. Furnas (1931) mostrou que as proporções dos vários tamanhos de partículas envolvidas na elaboração de uma distribuição de máxima densidade de empacotamento formam uma progressão geométrica. A Equação 1 representa o modelo de Furnas (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

$$CPFT = \left(\frac{D_P^{\log r} - D_S^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_S^{\log r}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Em que:

CPFT = Porcentagem acumulada de partículas menores que D_p (%);

D_p = Diâmetro da partícula (mm);

D_s = Diâmetro de menor partícula (mm);

D_L = Diâmetro da maior partícula (mm);

r = Quociente entre o volume das partículas retidas em uma malha de peneira de abertura D_p e o volume das partículas retidas na malha imediatamente inferior.

2.2.3.2 Modelo de Andreasen e Andersen (1930)

Andreasen e Andersen (1930) propuseram a Equação 2, que resulta em uma distribuição contínua. Os autores determinaram que para maximizar o empacotamento, o expoente q de sua equação deveria estar entre 0,33 e 0,50. Posteriormente, estudos realizados por Funk e Dinger (1992) mostraram, através de simulações computacionais, que o expoente que proporciona a máxima densidade de empacotamento é 0,37 (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

$$CPFT = \left(\frac{D_p}{D_L} \right)^q \times 100 \quad (2)$$

Em que:

CPFT = Porcentagem acumulada de partículas menores que D_p (%);

D_p = Diâmetro da partícula (mm);

D_L = Diâmetro da maior partícula (mm);

q = Coeficiente de distribuição = 0,37.

2.2.3.3 Modelo de Funk e Dinger (1992)

Funk e Dinger (1992), através de análises comparativas entre o modelo de Furnas (1931) e o modelo de Andreasen e Andersen (1930) chegou à conclusão que: no modelo gerado por Furnas, a quantidade de partículas finas de diâmetros distintos, adicionada para construir a distribuição, forma uma progressão geométrica e a distribuição de Andreasen e Andersen (1930) gera uma linha reta quando representada graficamente em uma escala log-log, indicando, também, uma progressão geométrica, convergindo, matematicamente,

para o modelo de Alfred (1992). A Equação 3 representa o modelo proposto por Funk e Dinger (1992) (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

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

Em que:

CPFT = Porcentagem acumulada de partículas menores que D_p (%);

D_p = Diâmetro da partícula (mm);

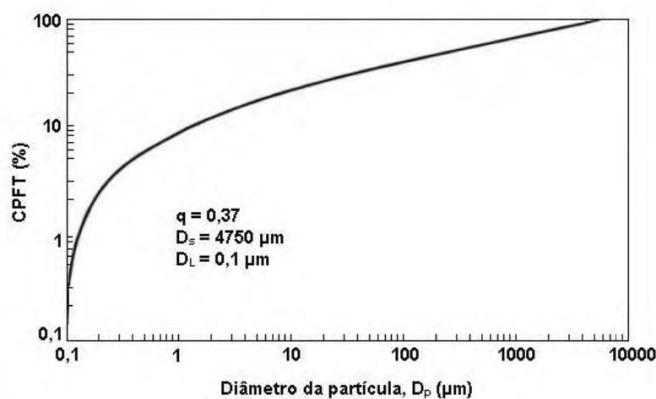
D_s = Diâmetro de menor partícula (mm);

D_L = Diâmetro da maior partícula (mm);

q = Coeficiente de distribuição (0,37).

Observa-se que na Equação 3 há a introdução do tamanho mínimo da partícula, o qual não existia no modelo proposto por Andreasen e Andersen (1930) (Equação 2), o que tornava o modelo proposto mais distante da realidade. O modelo de Alfred (1992) pode ser observado graficamente na Figura 2.

Figura 2 - Distribuição granulométrica segundo o modelo de Alfred (1992).



CPFT = A porcentagem acumulada de partículas menores que D_p

Fonte: Oliveira et al, 2000

2.2.4 Modelo para obtenção de composições otimizadas

O modelo CPM (do inglês Compressible Packing Model – Modelo de Empacotamento Compressível) pode ser descrito, segundo De Larrard (1999), como um

método cujo os fundamentos matemáticos determinam a densidade de empacotamento de conjunto granulares constituídos por grãos de diferentes tamanhos. Para aplicação do modelo é necessário conhecer a distribuição granulométrica do conjunto e a densidade de empacotamento de cada uma das classes, individualmente. Além do mais, é necessário ter em mente dois conceitos, os quais são densidade de empacotamento virtual e densidade de empacotamento real.

De Larrard (1999) define a densidade de empacotamento virtual como a máxima densidade que uma determinada mistura pode alcançar. Esse valor, como já mencionado anteriormente por Oliveira (2000), pode chegar a 0,74 para uma mistura de rede cúbica de face centrada de esferas que se tocam. De acordo com Londero *et al.* (2017), essa densidade é alcançada quando cada uma das partículas esféricas, mantendo a sua forma original, é colocada uma a uma no espaço. Por outro lado, a densidade de empacotamento real apresentará valores menores em relação a densidade de empacotamento virtual, uma vez que as partículas não são colocadas uma a uma no espaço. Também, deve-se levar em consideração o tipo de compactação, a interação entre as partículas e o tamanho do recipiente que ocupam (LONDERO *et al.*, 2017).

Londero (2016) explica que para a aplicação do modelo CPM é necessário ordenar, identificar e caracterizar cada uma das classes de grãos (tamanhos de grãos) envolvidas na mistura, tomando a classe (*i*) como dominante em cada etapa de cálculo. É necessário conhecer o empacotamento (β_i) de cada classe, cuja forma mais adequada para obtenção é a experimental. Para agregados, a densidade de empacotamento (β_i) se determina comumente por meio da Equação 4.

$$\beta_i = 1 - v = 1 - \left(\frac{\rho_{ag} - m_{ag}}{\rho_{ag}} \right) \quad (4)$$

Em que:

β_i = Densidade de empacotamento da classe *i*;

v = Índice de vazios;

ρ_{ag} = Massa específica do agregado (g/cm³);

m_{ag} = Massa unitária do agregado da classe *i* (g/cm³).

De Larrard (1999) menciona as situações que podem ser encontradas em misturas binárias (misturas com partículas com apenas dois tamanhos de grãos) e misturas

polidispersas (misturas com partículas com mais de dois tamanhos de grãos) as quais podem ser:

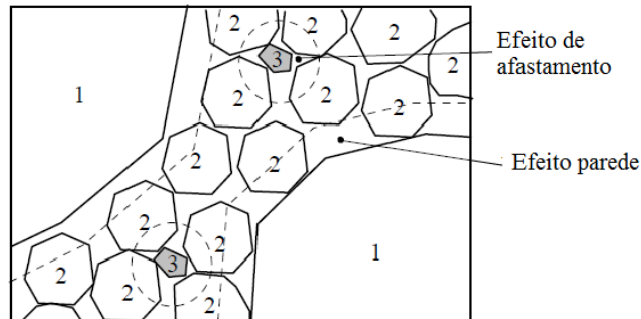
- Misturas binárias sem interação, acontece quando a quantidade de grãos de um diâmetro é muito maior do que a quantidade de grãos de outra dimensão, ou seja, ($d_1 \gg d_2$). Quando os grãos de dimensões maiores são dominantes eles preenchem o volume de forma como se os finos não estivessem presentes. Quando ao contrário, os grãos menores são completamente amontoados nas porosidades dos grãos secundários (grãos maiores).
- Misturas binárias com interação total, acontece quando a quantidade de grãos de um diâmetro é igual a quantidade de grãos de outra dimensão, ou seja, ($d_1 = d_2$). As densidades de empacotamento de cada classe (β_i), geralmente, são diferentes. A segregação total não altera a compacidade média, de forma que pode considerar que parte do recipiente é preenchida com apenas grãos de classe 1 e a outra parte preenchida com grãos de classe 2.
- Misturas binárias com interação parcial, acontece quando a quantidade de grãos de um diâmetro é maior do que quantidade de grãos de outra dimensão, ou seja, ($d_1 > d_2$).
- Por fim, tem-se as misturas polidispersas o qual é o caso mais genérico e mais comum, pois trata-se de mistura com mais de dois grãos de dimensões distintas, ou seja, ($d_1 > d_2 > d_3$).

A partir das duas últimas situações descritas acima (misturas binárias com interação parcial e misturas polidispersas), De Larrard (1999) descreve dois efeitos físicos que podem acontecer durante essas interações, os quais são: efeito de afastamento e efeito parede (Figura 3).

O efeito de afastamento ocorre quando as partículas menores são grandes demais para se encaixarem no vazio entre as partículas maiores. Este efeito diminui o empacotamento, aumentando a porosidade na região. O efeito parede é o efeito exercido pelos grãos maiores sobre grãos menores. Este provoca diminuição do empacotamento, aumentando a porosidade na proximidade das superfícies grandes. Observando a Figura 3,

assumindo a classe 2 como dominante, vê-se os grãos de classe 2 submetidos ao efeito de afastamento exercido pela classe 3, além do efeito parede exercido pela classe 1.

Figura 3 - Efeitos de interação entre os grãos.



Fonte: Adaptado, De Larrard (1999)

O efeito de afastamento é representado por a_{ij} e o efeito parede é representado por b_{ij} . As Equações 5 e 6 os determinam, respectivamente.

$$a_{ij} = \sqrt{1 - (1 - d_j/d_i)^{1,02}} \quad (5)$$

$$b_{ij} = \sqrt{1 - (1 - d_i/d_j)^{1,50}} \quad (6)$$

Em que:

a_{ij} = Efeito de afastamento;

b_{ij} = Efeito parede;

d_i = diâmetro das partículas da classe i (μm);

d_j = diâmetro das partículas da classe j (μm);

As equações do efeito de afastamento e de efeito parede funcionam de maneira em que sempre compara duas classes de tamanhos de grãos, devendo ser realizadas todas as combinações possíveis entre as n classes que compõem o conjunto. A classe dominante é chamada de classe i , sendo d_i o diâmetro de suas partículas, todas as demais classes serão chamadas de classe j , sendo d_j o diâmetro de suas partículas. Todas as classes (tamanhos de partículas) deverão ser calculadas considerando-as como dominantes, e as demais como secundárias.

Considerando uma mistura polidispersa, a densidade de empacotamento virtual (γ_i), de cada uma das classes é calculada segundo a Equação 7. O resultado admitido para a densidade de empacotamento virtual é aquele que possuir menor valor dentre as densidades de empacotamento virtuais determinadas quando da consideração de cada uma das diferentes classes como dominantes.

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + b_{ij} \cdot \beta_i \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \cdot y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[1 - a_{ij} \cdot \frac{\beta_i}{\beta_j} \right] \cdot y_j} \quad (7)$$

$$\gamma = \text{Min} (\gamma_i)$$

Em que:

γ_i = Densidade de empacotamento virtual da mistura quando a classe i;

γ = Densidade de empacotamento virtual da mistura;

y_j = Volume relativo da classe j;

β_i = Densidade de empacotamento da classe i;

a_{ij} e b_{ij} = Coeficientes referentes ao efeito de afastamento e ao efeito parede, respectivamente;

A densidade de empacotamento real (Φ), pode ser determinada através da Equação 8. Quanto maior a densidade de empacotamento, menor a quantidade de vazios.

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{y_i / \beta_i}{1 / \Phi - 1 / \gamma_i} \quad (8)$$

Em que:

K = índice de compactação, dado pela Tabela 1.

γ_i = Densidade de empacotamento virtual da mistura quando a classe i é dominante;

y_i = Volume relativo da classe i;

Φ = Densidade de empacotamento real;

Tabela 1 - Valores do índice de compactação K.

Processos de compactação	K
Lançamento simples	4,10
Apiloamento	4,50
Vibração	4,75
Vibração + compressão de 10 KPa	9,00

Fonte: Adaptado de De Larrard (1999)

2.3 Consistência

A consistência é influenciada pela densidade de empacotamento, sendo assim, os efeitos de uma distribuição granulométrica otimizada, além da morfologia e da textura superficial dos grãos dos agregados, incidem diretamente sobre a fluidez do material. (CASTRO E PANDOLFELLI, 2009). Portanto, há que se conceituar a consistência e apresentar os principais fatores intervenientes, de tal forma que o leitor possa associar os efeitos do empacotamento das partículas dos agregados sobre o comportamento do material no estado fresco.

A consistência, pode ser definida, como a resistência da forma de uma substância ou a facilidade com que ela flui. Em concretos, a consistência, geralmente, é tomada como uma medida do grau de umidade, pois, dentro de certos limites, concretos com maior quantidade de água são mais trabalháveis que concretos secos. No entanto, concretos com a mesma consistência podem apresentar trabalhabilidades diferentes, pois a trabalhabilidade não depende somente da consistência, mas de fatores como local em que o concreto ou argamassa está sendo aplicado, além de transporte, lançamento e adensamento (NEVILLE E BROOKS, 2013).

Ritchie (1962) *apud* Sobral (2000) diz que a consistência depende de duas propriedades, as quais são a compacidade e a mobilidade. A compacidade seria a propriedade que determina a quantidade de energia necessária para completar a compactação, e a mobilidade é a propriedade inversamente proporcional à resistência interna à deformação, sendo dependente do ângulo de atrito interno, da coesão e da viscosidade.

Muitos fatores afetam a consistência do concreto sendo que, de acordo com Sobral (2000), podem ser citados: o teor de água/mistura seca, a granulometria e forma dos grãos dos agregados, os aditivos e o tempo e temperatura.

Segundo Sobral (2000), o teor de água/mistura seca é o principal fator que influi na consistência, sendo expressa em porcentagem do peso da água em relação ao peso da mistura de cimento e agregados secos. Cabe ressaltar que para um teor de água/mistura seca constante, a alteração das características físicas dos agregados interfere sobremaneira na consistência do concreto ou argamassa. Portanto, uma distribuição granulométrica com maior empacotamento de partículas tende a diminuir a consistência do material, aumentando a sua fluidez. Obviamente que esta tendência não pode ser considerada

taxativa pois a morfologia dos grãos e a textura superficial dos mesmos também exercem influência considerável.

Em relação a granulometria, esta deve ser considerada em conjunto com o teor de água/mistura seca, ou imediatamente, o fator água/cimento, quando se procura uma consistência adequada para o concreto. Se fixar o fator água/mistura seca e modificar a granulometria, observa-se uma mudança na consistência do concreto. Se houve uma redução na superfície específica do agregado, o concreto se torna mais plástico, caso contrário, menos plástico (SOBRAL, 2000).

Ainda segundo o autor, os aditivos, se forem utilizados corretamente, podem suprir certas deficiências do concreto. Geralmente os aditivos são utilizados para melhorar a consistência de concretos pobres e ásperos.

O tempo e a temperatura estão relacionados com o enrijecimento da mistura de concreto recém-preparada. Esse enrijecimento não deve ser confundido com a pega do cimento, pois resulta da absorção de parte da água pelo agregado, da evaporação de outra parte, e ainda, da perda da água utilizada nas reações químicas de hidratação inicial. Esses fatores influenciam na mudança da consistência do concreto, principalmente, no momento do lançamento. (SOBRAL, 2000).

O estudo realizado por Arnold (2011) sobre a influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas constatou-se que, quanto mais arredondado o agregado for, menor será a quantidade de água para a obtenção do índice de consistência desejado. A autora, ainda conclui que a esfericidade e o arredondamento dos grãos influenciam, diretamente, na trabalhabilidade das argamassas.

Fabro *et al.* (2011) analisaram a influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. Os autores constataram que a forma dos grãos dos agregados influencia fortemente a fluidez das argamassas, sendo que, quanto maior o coeficiente de forma (grão mais arredondado) do agregado maior a fluidez da argamassa. As areias que possuem partículas esféricas e arredondadas tem ângulo de atrito menor do que as areias constituídas de partículas lamelares, portanto esta será mais fluida.

A redução da porosidade entre os grãos, ou seja, uma mistura granular com bom empacotamento pode acarretar em uma fluidez desejável sem necessidade de aumentar a quantidade de pasta. Sendo assim, o empacotamento pode ser a solução para minimizar a o teor de cimento Portland e água mantendo a reologia do concreto e da argamassa (DAMINELI, 2013).

2.4 Resistência à compressão axial

Para Jacintho e Giongo (2005), a resistência do concreto é definida como a capacidade de um material de suportar ações aplicadas, sem que este sofra colapso. O concreto apresenta vazios internos propiciado pela forma do arranjo dos agregados e também da pasta de cimento, estes vazios são os caminhos preferenciais de agentes externos agressivos que comprometem com a desempenho do concreto.

A resistência do concreto é de grande interesse para projetista e engenheiros de controle de qualidade, a resistência à compressão axial é ainda mais ponderada do que os outros tipos de resistência, sendo assim, a maior parte dos elementos de concreto são projetadas para alcançar uma boa resistência à compressão (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

A determinação da resistência à compressão é feita a partir de ensaios utilizando corpos-de-prova de dimensões padronizadas, além de especificações de como será realizada a moldagem dos corpos-de-prova, tempo e tipo de cura. Essas determinações podem ser encontradas na NBR 7.215: 1996 - Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a resposta do concreto às tensões aplicadas depende não apenas do tipo de tensão, mas sim da combinação de fatores que estão relacionados com a porosidade. Os fatores podem ser apontados são, materiais que formam o traço do concreto, grão de compactação e condições de cura. A relação água/cimento e porosidade, é sem dúvida, para os autores, o fator mais importante que influi na resistência, pois estes, independentemente, de outros fatores, afetam a porosidade da matriz da argamassa de cimento e da zona de transição na interface entre a matriz e o agregado graúdo.

Os estudos realizados por Lima *et al* (2016) e por Quintanilha *et al.* (2016) avaliaram a influência do empacotamento de partículas do agregado miúdo e do agregado graúdo, respectivamente. Em ambos estudos, os autores constataram que o empacotamento influencia na consistência da mistura, porém não apresenta incrementos, significativos, na resistência à compressão axial.

De acordo com o estudo de Lenz (2016) o empacotamento do esqueleto granular não altera significativamente os resultados de resistência à compressão, desde que a relação água/cimento se mantenha a mesma. Porém, o empacotamento das partículas

possibilita uma redução do consumo de cimento de forma que possa alcançar a mesma resistência à compressão.

2.5 Porosidade das argamassas

Campitelli (1987) define porosidade de um material como a propriedade de apresentar poros ou vazios em sua estrutura interna. É representada pela fração do volume total de uma amostra porosa que é ocupada por poros ou por espaços vazios.

Os vazios existentes em concretos de cimento Portland pode ser derivado dos próprios agregados, da interface pasta/agregado e da pasta de cimento. Esses espaços vazios são o meio encontrado para agentes agressivos, como gases, líquidos e sólidos dissolvidos, se moverem para dentro da pasta de cimento endurecido prejudicando a durabilidade do material (CASTRO E PANDOLFELLI, 2009).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) a formação de poros na pasta de cimento geralmente está associada à hidratação do cimento e à evaporação da água livre. Sendo assim, o volume de vazios capilares na pasta de cimento endurecida depende da quantidade de água de amassamento que foi utilizada no início da hidratação e do grau de hidratação do cimento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados, abrangendo a caracterização física, e os procedimentos experimentais realizados para alcançar o objetivo do estudo. De forma concisa, o estudo foi dividido em três etapas:

1) Caracterização dos agregados miúdos utilizados, com intuito de obter a densidade de empacotamento de cada uma das classes (tamanho de partícula) e da mistura e análises para obter composições granulométricas com melhor empacotamento;

2) Determinação da proporção de mistura das argamassas, moldagem dos corpos-de-prova e quantificação da consistência das argamassas executadas com diferentes composições granulométricas; e

3) Efeitos do empacotamento das partículas nas argamassas por meio de ensaios de resistência à compressão axial e porosidade, nas idades de 3, 7 e 28 dias.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento Portland

Para a execução das argamassas foi utilizado o cimento Portland do tipo CP II – Z 32, da marca Ciplan, por ser um cimento de ampla utilização na região de Barreiras, no estado da Bahia. De acordo com a NBR 11.578: 1991 – Cimento Portland Composto, esse tipo de cimento deve possuir entre 76% e 94% de clínquer e sulfatos de cálcio, 6% a 14% de material pozzolânico e 0% a 10% de material carbonático. A massa específica adotada teoricamente foi de 3,00 g/cm³.

3.1.2 Agregado miúdo

O presente estudo irá analisar os efeitos do empacotamento de cinco diferentes agregados miúdos, onde dois (areia fina e pó de brita) serão utilizados exatamente como disponibilizados comercialmente na região de Barreiras – BA. Uma areia grossa que será discretizada por peneiramento para posterior composição de distribuição granulométrica a partir do modelo de Funk e Dinger (1992) e a areia fina e pó de brita serão misturados a fim de gerar duas composições, uma que resulta em distribuição granulométrica que se

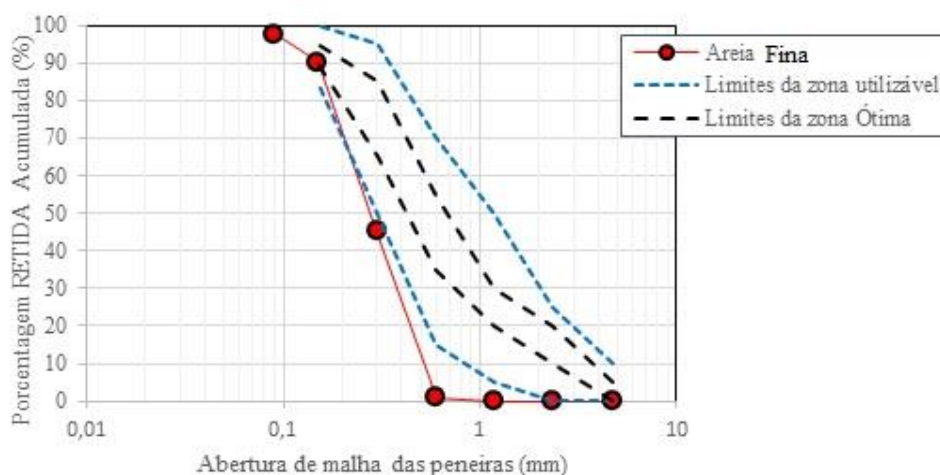
situada dentro dos limites da zona ótima preconizada na norma NBR 7.211: 2005 e, outra distribuição granulométrica que se assemelhe à distribuição determinada pelo modelo de Funk e Dinger (1992).

Para os cinco agregados utilizados foram realizados ensaios de massa específica, de acordo com NBR NM 52:2009 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente; massa unitária, conforme NBR NM 45:2006 – Determinação da massa unitária e do volume de vazios; e ensaio de granulometria, conforme NBR NM 248:2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica.

- **Areia Fina**

A areia fina utilizada é originária da região do oeste da Bahia, e apresenta características comuns de areia extraída do leito de rio. A massa específica da areia, determinada em duplicata, foi de 2,62 g/cm³. A massa unitária no estado solto, determinada em triplicata foi de 1,58 g/cm³, e a porosidade da estrutura granular foi de 40%. A curva granulométrica da areia fina, amplamente comercializada na região de Barreiras – BA, é apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Curva granulométrica da areia fina originária da região oeste da Bahia e as curvas limite da zona ótima e zona utilizáveis recomendadas pela norma NBR 7.211: 2005.



Fonte: A autora

Conforme observado na Figura 4, o agregado não atende os limites da zona utilizável proposto pela NBR 7.211:2005 – Agregados para concreto - especificações. A dimensão máxima característica desta amostra foi de 0,60 mm e o módulo de finura foi de 1,36.

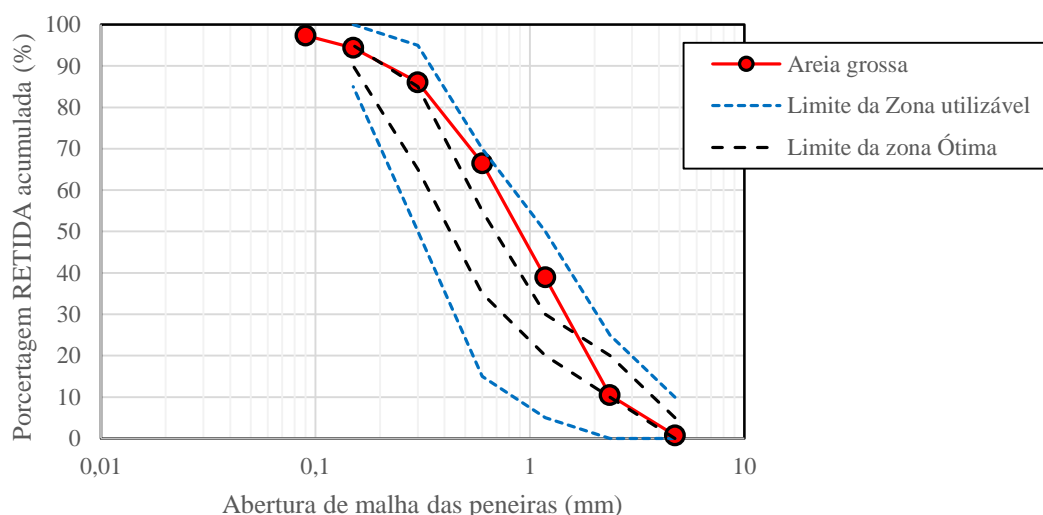
Essa caracterização granulométrica resultou em uma porcentagem retida no fundo de 2,27%.

- **Areia Grossa**

Como a região do oeste da Bahia não dispõe de areia grossa, a areia utilizada no estudo foi adquirida na região de Goiânia - GO. O motivo de utilizar o agregado proveniente de Goiânia – GO foi, simplesmente, pela maior facilidade de acesso da autora.

A areia grossa apresenta características comuns de areia extraída do leito de rio. A massa específica da areia, determinada em duplicata foi de 2,61 g/cm³. A massa unitária no estado solto, determinada em triplicata foi de 1,46 g/cm³, e a porosidade da estrutura granular foi de 46%. A curva granulométrica da areia grossa é apresentada na Figura 5.

Figura 5 - Curva granulométrica da areia grossa originária da região de Goiânia – GO e as curvas limite da zona ótima e zona utilizável recomendadas pela norma NBR 7.211:2005.



Fonte: A autora

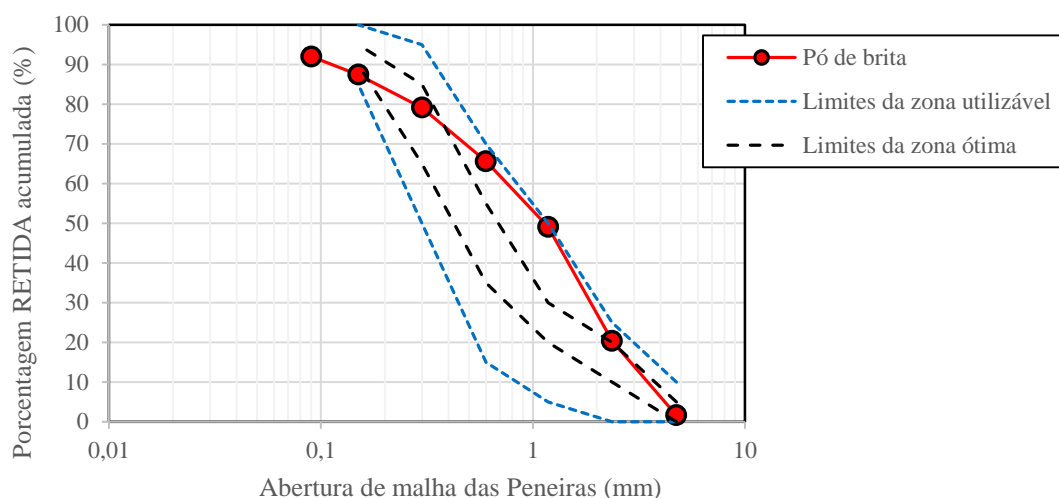
O agregado não atende os limites da zona ótima proposto pela NBR 7.211:2005, porém se enquadra nos limites da faixa da zona utilizável. A dimensão máxima característica foi de 4,75 mm e o módulo de finura foi de 2,97.

Este agregado será utilizado para adequação do modelo de Funk e Dinger (1992), sendo assim é importante ressaltar que a granulometria original será apenas para caracterizar o material.

- **Pó de brita (brita calcária)**

O pó de brita é originário de uma mineração situada na região do oeste da Bahia. A massa específica deste material, determinada em duplicata foi de 2,69 g/cm³. A massa unitária no estado solto, determinada em triplicata foi de 1,65 g/cm³, e a porosidade da estrutura granular foi de 39%. A curva granulométrica do pó de pedra é apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Curva granulométrica do pó de brita e as curvas limite da zona ótima e zona utilizável recomendada pela norma NBR 7.211: 2005.



Fonte: A autora

O agregado não atende os limites da zona ótima proposto pela NBR 7.211:2005, porém se enquadra nos limites da faixa da zona utilizável. A dimensão máxima característica foi de 4,75 mm e o módulo de finura foi de 3,03.

Essa caracterização granulométrica resultou em uma porcentagem retida no fundo de 8,07%.

3.1.3 Composições granulométricas

Com intuito de corrigir a deficiência granulométrica do agregado miúdo (areia) local, utilizando os agregados disponíveis na região foi feita duas composições utilizando a areia fina e o pó de brita, resultando nas proporções apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Composições granulométricas da areia fina e pó de brita

Composição	Areia fina (%)	Pó de brita (%)
1	45	55
2	30	70

Fonte: A autora

Primeiramente, buscou-se obter uma proporção entre a areia fina e o pó de brita de tal forma que a distribuição granulométrica resultante estivesse contida entre os limites da zona ótima proposta pela norma NBR 7.211:2005. De posse da distribuição granulométrica (APÊNDICE A), utilizando a massa retida (%) de cada um dos agregados (areia fina e pó de brita) e com a utilização do software *Microsoft Excel 2013* foi estabelecida a proporção que melhor atendesse a imposição inicial. Essa proporção foi determinada por meio de variação na proporção entre os agregados até a obtenção do enquadramento nos limites da zona ótima da norma. Após a obtenção da proporção (45% areia fina e 55% de pó de brita), foi feita a mistura e a homogeneização dos agregados para, por fim, fazer os ensaios de massa específica e massa unitária. A distribuição granulométrica teórica do agregado composto por 45% de areia fina e 55% de pó de brita constam da Tabela 3 e da Figura 7.

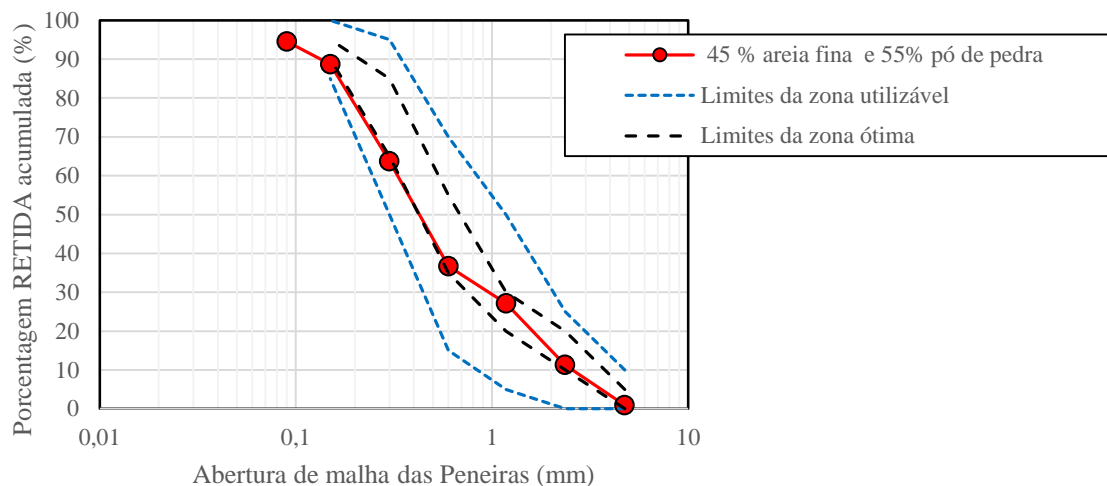
Para composição 45% de areia fina e 55% de pó de brita, a massa específica, determinada em duplicata foi de 2,66 g/cm³. A massa unitária no estado solto, determinada em triplicata foi de 1,72 g/cm³, e a porosidade da estrutura granular foi de 35%.

Tabela 3 - Distribuição granulométrica teórica da composição de 45% de areia fina e 55% de pó de brita.

Composição Areia fina e Pó de brita		
Proporção areia fina (%)	45	
Proporção pó de brita (%)	55	
Peneira (mm)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
4,75	0,90	0,90
2,36	10,35	11,25
1,18	15,87	27,12
0,6	9,57	36,69
0,3	27,00	63,69
0,15	24,97	88,66
0,09	5,88	94,54
Fundo	5,46	100,00

Fonte: A autora

Figura 7 - Distribuição granulométrica teórica da composição de 45% de areia fina e 55% de pó de brita e curvas limites da zona ótima e zona utilizável recomendada pela norma NBR 7211:2005.



Fonte: A autora

A determinação da segunda composição tinha por objetivo obter uma distribuição granulométrica que se aproximasse ao máximo da curva granulométrica ideal obtida por meio do modelo de Funk e Dinger (1992).

A composição a ser idealizada com a areia fina e o pó de brita, após análise teórica por meio do software *Microsoft Excel 2013* evidenciou o excesso de finos nos agregados. O pó de brita, por dispor de partículas com dimensão máxima característica de 4,75 mm poderia suprir a carência de partículas com dimensão superior a 0,60 mm da areia fina,

entretanto a simulação com teores crescentes de pó de brita incrementavam demasiadamente o teor de finos, inviabilizando a obtenção de distribuição granulométrica similar à proposta pelo modelo de Funk e Dinger (1992). Diante desta situação, optou-se por peneirar o pó de brita, descartando a parcela passante na peneira de abertura de malha de 0,60 mm. Assim sendo, por já dispor da caracterização prévia da distribuição granulométrica do pó de brita, realizou-se, teoricamente, por meio do software *Microsoft Excel 2013*, a variação dos percentuais de areia fina e pó de brita peneirado para estabelecer a proporção mais adequada, o que resultou na mistura de 30% de areia fina e 70% de pó de brita. A distribuição granulométrica teórica do agregado composto por 30% de areia fina e 70% de pó de brita peneirado consta da Tabela 4 e da Figura 8.

Após a obtenção das proporções (30% areia fina e 70% de pó de brita) foi feita a mistura e a homogeneização dos agregados para, por fim, fazer os ensaios de massa específica e massa unitária.

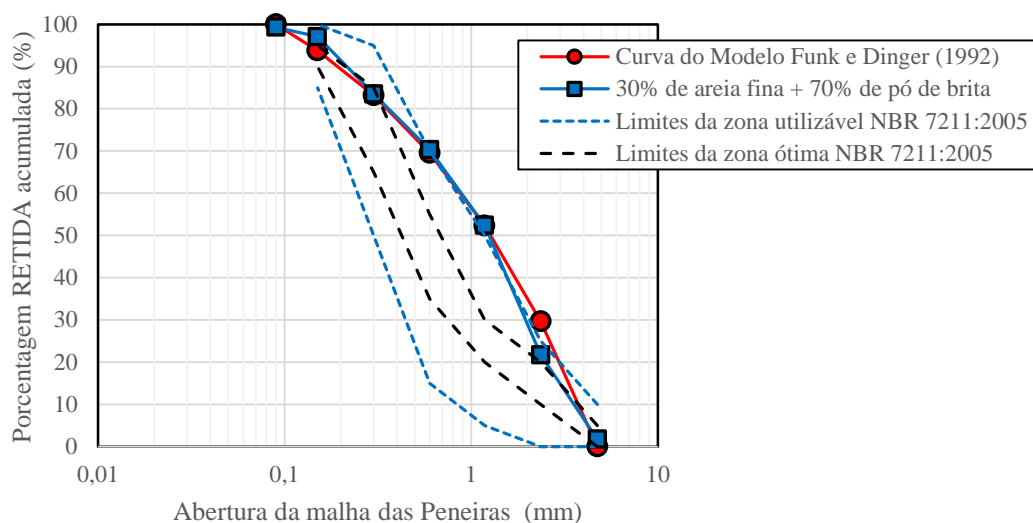
Para composição 30% de areia fina e 70% de pó de brita, a massa específica, determinada em duplicata foi de 2,65 g/cm³. A massa unitária no estado solto, determinada em triplicata foi de 1,74 g/cm³, e a porosidade da estrutura granular foi de 34%.

Tabela 4 - Composição de areia fina e pó de brita, curva granulométrica próxima da curva obtida pelo modelo de Funk e Dinger (1992)

Composição Areia fina e Pó de brita		
Proporção areia fina (%)	30	
Proporção pó de brita (%)	70	
Peneira (mm)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
4,75	1,74	1,74
2,36	20,00	21,73
1,18	30,64	52,38
0,6	17,93	70,31
0,3	13,18	83,49
0,15	13,59	97,08
0,09	2,24	99,32
Fundo	0,68	100,00

Fonte: A autora

Figura 8 - Distribuição granulométrica teórica da composição de 30% de areia fina e 70% de pó de brita e distribuição granulométrica proposta pelo modelo de Funk e Dinger (1992)



Fonte: A autora

Na Tabela 5 serão apresentadas, de forma resumida, as cinco composições utilizadas e as nomenclaturas para a identificação dos diferentes agregados miúdos empregados no decorrer deste trabalho.

Tabela 5 – Resumo dos agregados utilizados nesse estudo.

Composições Granulométricas	Nomenclatura	Observações
Areia fina	Agregado 1	Agregado comercializado na região de Barreiras - BA com deficiência granulométrica para uso em concreto.
Areia grossa	Agregado 2	Agregado utilizado para a adequação ao modelo de Funk e Dinger (1992)
Pó de brita	Agregado 3	Agregado comercializado na região de Barreiras – BA, com boa amplitude granulométrica, o qual foi utilizado para corrigir a deficiência granulométrica da areia fina, a fim de utilização na execução de concreto.
45% de areia e 55% de pó de brita	Agregado 4	Agregado com distribuição granulométrica contida entre os limites da zona ótima proposta pela norma NBR 7.211:2005
30% de areia e 70% de pó de brita	Agregado 5	Agregado com distribuição granulométrica similar à curva obtida pelo modelo de Funk e Dinger (1992)

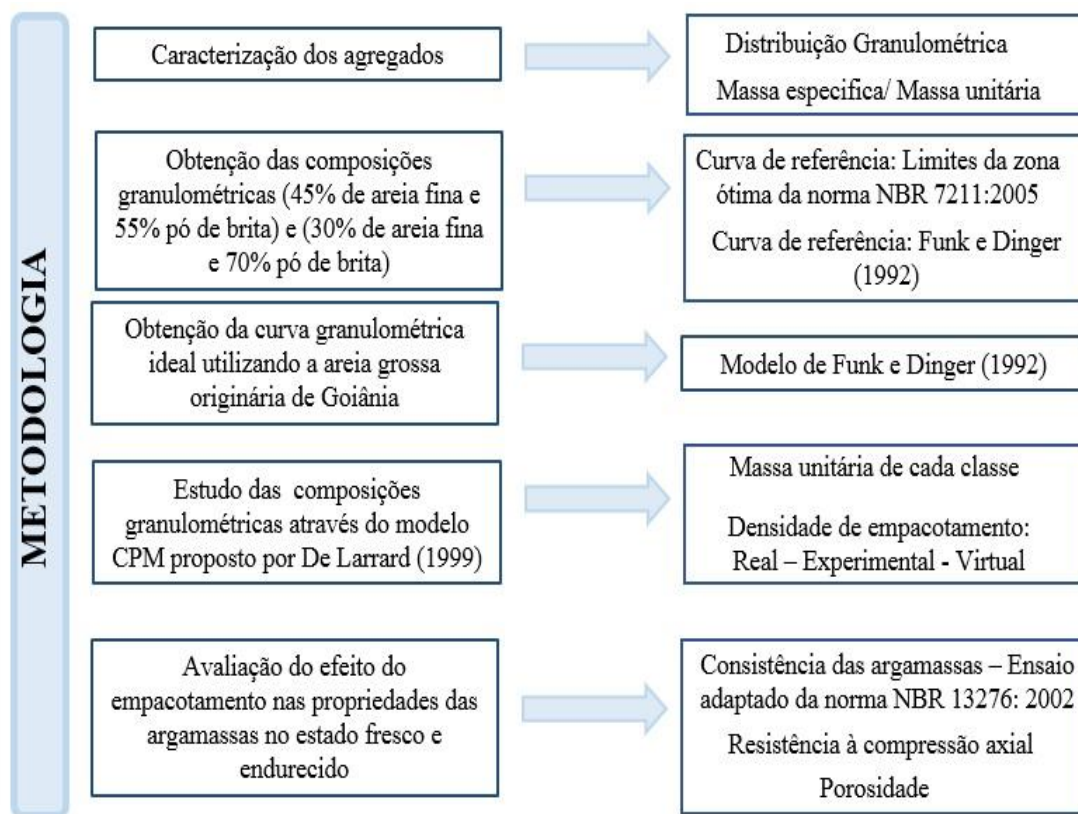
Fonte: A autora

Após a obtenção da proporção (30% areia fina e 70% de pó de brita), foi realizada a mistura e a homogeneização dos agregados para, por fim, fazer os ensaios de massa específica e massa unitária.

3.2 Métodos

Os procedimentos empregados para realização deste estudo são apresentados de forma sintetizada na Figura 9, sendo detalhadas nos subitens seguintes. Os ensaios foram realizados no laboratório da Universidade Federal do Oeste da Bahia, na cidade de Barreiras.

Figura 9 - Metodologia de estudo para análise dos efeitos de empacotamento de partículas de agregados miúdos destinados à execução de argamassas.



Fonte: A autora

3.2.1 Obtenção da curva granulométrica ideal

O modelo proposto por Funk e Dinger (1992) requer o estabelecimento da dimensão da maior e da menor partícula contida na amostra de agregado, conforme consta

na Equação 9, para estabelecer a curva granulométrica que resulta, teoricamente, na maior densidade de empacotamento. Desse modo, esse modelo é o que mais se aproxima da realidade dos conjuntos granulares, portanto, para realização deste estudo, com o intuito de obter uma curva granulométrica ideal, com maior densidade de empacotamento, foi utilizado o modelo proposto por Funk e Dinger (1992), o qual tem um coeficiente de distribuição (q) igual a 0,37.

$$CPFT = \left(\frac{D_P^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \times 100 \quad (9)$$

Em que:

CPFT = Porcentagem acumulada de partículas menores que D_p (%);

D_p = Diâmetro da partícula (mm);

D_S = Diâmetro de menor partícula (mm);

D_L = Diâmetro da maior partícula (mm);

q = Coeficiente de distribuição (0,37).

O agregado miúdo utilizado, para obtenção da curva granulométrica ideal, foi a areia grossa (agregado 2), originária da região de Goiânia - GO. Após a realização da distribuição granulométrica desta areia (Figura 5), percebeu-se que esta ficava retida nas peneiras com abertura de malha: 2,36 mm; 1,18 mm; 0,60 mm; 0,30 mm; 0,15 mm e 0,09 mm. Com base nesta distribuição granulométrica, aplicando a Equação 3, foi possível determinar a curva granulométrica ideal, a partir do modelo de Funk e Dinger (1992), utilizando as dimensões máxima e mínima decorrentes da distribuição granulométrica do referido agregado. A Tabela 6 apresenta os resultados do modelo de Funk e Dinger (1992) e a Figura 10 apresenta a curva granulométrica ideal e as curvas que delimitam a zona ótima e a zona utilizável recomendada pela norma NBR 7.211:2005.

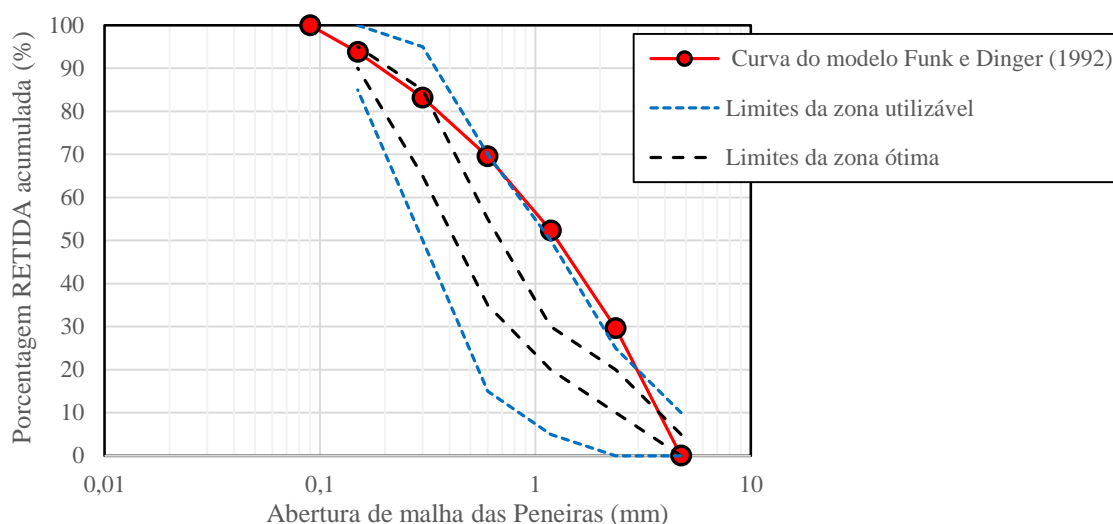
Tabela 6 - Análise granulométrica do agregado 2, segundo modelo de empacotamento proposto por Funk e Dinger (1992)

Análise Granulométrica da agregado 2			
Peneiras	Coefficiente	CPFT ⁴ (%)	Retida acumulada (%)
4,75	0,37	100,00	0,00
2,36	0,37	70,37	29,63
1,18	0,37	47,67	52,33
0,6	0,37	30,49	69,51
0,3	0,37	16,81	83,19
0,15	0,37	6,23	93,77
0,09	0,37	0,00	100,00

4. CPFT = A porcentagem acumulada de partículas menores que D_p

Fonte: A autora

Figura 10 - Curva granulométrica obtida através do modelo de empacotamento proposto por Funk e Dinger (1992) e as curvas limite da zona ótima e zona utilizável recomendadas pela norma NBR 7.211: 2005.



Fonte: A autora

Observa-se que a curva obtida pelo modelo de Funk e Dinger (1992) não está inserida na zona ótima, tampouco atende a zona utilizável, propostas pela norma NBR 7211:2005. A distribuição granulométrica idealizada por Funk e Dinger reduz a quantidade de partículas mais finas, resultando em uma distribuição granulométrica com partículas de maior dimensão em relação às distribuições delimitadas pelas zonas propostas na norma NBR 7211:2005.

3.2.2 Estudos das composições granulométricas através do modelo CPM

Para aplicação do modelo com (Compressible Packing Model – Modelo de Empacotamento Compressível), proposto por De Larrard (1999), primeiramente foi necessário separar todas as classes de grãos envolvidas de cada um dos agregados estudados. Assim sendo, para cada agregado miúdo utilizado no estudo foi realizada o fracionamento por peneiramento, separando as diferentes classes de grãos retidas nas peneiras 2,36 mm; 1,18 mm; 0,60 mm; 0,30 mm; 0,15 mm e 0,09 mm, resultado em 6 classes, exceto para a areia fina, a qual não dispõe de partículas de dimensão 2,36 mm e 1,18 mm e, conseqüentemente, dispõe de 4 classes de grãos.

Posteriormente, foi determinada a massa unitária no estado solto, em triplicata, de cada uma das classes de grãos utilizando um recipiente de volume igual 527,8 ml, como pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Ensaio de massa unitária no estado solto



Fonte: A autora

A densidade de empacotamento (β) de cada classe foi calculada conforme a Equação 10.

$$\beta_i = 1 - v = 1 - \left(\frac{\rho_{ag} - m_{ag}}{\rho_{ag}} \right) \quad (10)$$

v = índice de vazios

ρ_{ag} = Massa específica do agregado (g/cm^3);

m_{ag} = Massa unitária do agregado da classe i (g/cm^3).

Posteriormente foi calculado o efeito de afastamento (a_{ij}) e o efeito parede (b_{ij}) de acordo com as Equação 11 e Equação 12.

$$a_{ij} = \sqrt{1 - (1 - d_j/d_i)^{1,02}} \quad (11)$$

$$b_{ij} = \sqrt{1 - (1 - d_i/d_j)^{1,50}} \quad (12)$$

d_i = diâmetro das partículas da classe i (μm);

d_j = diâmetro das partículas da classe j (μm);

Após, a determinação do efeito parede e do efeito de afastamento pode-se determinar as densidades de empacotamento virtuais (γ) de cada uma das classes de um determinado agregado, escolhendo-se o menor valor como o representativo da densidade de empacotamento virtual (γ) deste agregado, conforme equação 13.

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

$$\gamma = \text{Min} (\gamma_i)$$

Em que:

γ_i = Densidade de empacotamento virtual da mistura quando a classe i ;

γ = Densidade de empacotamento virtual da mistura;

y_j = Volume relativo da classe j ;

β_i = Densidade de empacotamento da classe i ;

a_{ij} e b_{ij} = Coeficientes referentes ao efeito de afastamento e ao efeito parede, respectivamente;

A última etapa consistiu na determinação das densidades de empacotamento reais (Φ), por meio da Equação 14, escolhendo-se o menor valor como o representativo da densidade de empacotamento real do agregado.

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{y_i/\beta_i}{1/\Phi - 1/\gamma_i} \quad (14)$$

Em que:

K = índice de compactação, dado pela Tabela 1.

γ_i = Densidade de empacotamento virtual da mistura quando a classe i é dominante;

y_i = Volume relativo da classe i ;

Φ = Densidade de empacotamento real;

Observa-se que medida que a quantidade de classes se eleva, a Equação 14 torna-se complexa, pois a variável (Φ) se encontra no denominador, gerando equações de n graus. Dessa forma foi utilizado o Software matemático *Maple* 2016¹, para resolução dessa equação. O índice de compactação K foi referente ao lançamento simples da amostra que é igual a 4,1.

No apêndice B é apresentado a rotina de cálculo para o agregado miúdo preparado a partir do agregado 2. Para os outros agregados o processo é análogo.

3.2.3 Proporção dos componentes e mistura das argamassas de cimento Portland.

A proporção de mistura para as argamassas foi mantida fixa independentemente do agregado miúdo utilizado. A determinação desta proporção de mistura foi realizada por meio de ensaios prévios utilizando a areia fina (agregado 1). A relação água/cimento de 0,55 foi pré-fixada como o objetivo de permitir a incorporação de considerável quantidade de agregado miúdo e garantir adequada fluidez das argamassas. Em virtude de restrições laboratoriais, ou seja, deficiência de infraestrutura institucional, o espalhamento da argamassa foi realizado sem a aplicação dos golpes preconizados na norma NBR 13.276: 2002 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Desta forma, foi necessário adequar a proporção de mistura das argamassas para que fosse possível determinar o espalhamento das mesmas sob carregamento, única e exclusivamente, do seu peso próprio. A proporção de mistura resultante do estudo preliminar consta na Tabela 7.

¹ Disponível em: <https://www.maplesoft.com/products/maple/academic/>. Acesso em: 16 de janeiro 2018.

Tabela 7 - Proporção de mistura das argamassas (massa)

Cimento Portland CP II – Z -32	1,00
Agregado miúdo	1,50
Relação água/cimento	0,55

Fonte: A autora

A mistura foi realizada, conforme o procedimento recomendado pela norma NBR 7.215: 1996 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão, item 3.5.1.2, utilizando uma argamassadeira, apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Argamassadeira utilizada na mistura das argamassas



Fonte: A autora

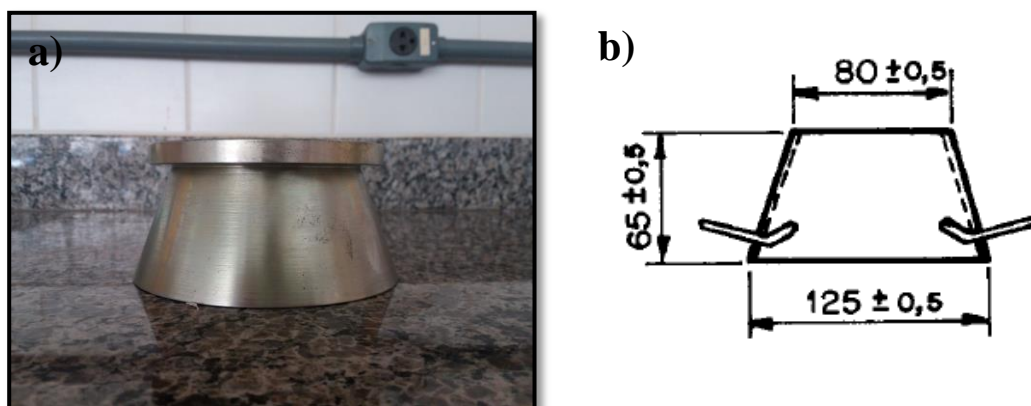
3.2.4 Ensaio de consistência das argamassas

Após a mistura das argamassas, com o objetivo de determinar a consistência das mesmas, foi realizado o ensaio de determinação do índice de consistência de forma adaptada ao proposto pela NBR 13276: 2002. A Instituição não dispõe de mesa de consistência e, desta forma, não foi possível aplicar os golpes preconizados pela referida norma para que ocorresse o espalhamento da argamassa. A fôrma tronco-cônica foi assentada sobre placa de vidro lubrificada com óleo e o lançamento e adensamento da argamassa nesta fôrma foi realizado conforme as recomendações normativas. Ao término do adensamento, a fôrma tronco-cônica foi retirada lentamente, permitindo o espalhamento

da argamassa. Na sequência foram medidos, ortogonalmente, quatro diâmetros da base da argamassa, o que está relacionado com a consistência da mesma.

A fôrma tronco-cônica possui as seguintes dimensões: diâmetro da base de 125,0 mm, diâmetro do topo de 80,0 mm e altura de 65,0 mm. Na Figura 13 está apresentada a fôrma utilizada e as especificações dimensionais da mesma.

Figura 13 - a). Fôrma tronco-cônica utilizada para determinar a consistência da argamassa. b) Dimensões da fôrma tronco-cônica.



Fonte: a) A autora. b) Norma NBR 7215:1996

O preenchimento da fôrma tronco-cônica ocorreu em 3 (três) camadas com espessura aproximadamente iguais. Na primeira camada foi aplicado 15 golpes de adensamento com o auxílio de soquete padrão. Na segunda e terceira camadas foram aplicados, respectivamente, 10 e 5 golpes. O topo foi nivelado com auxílio de uma espátula para, então, realizar-se a retirada vertical da fôrma.

3.2.5 Moldagem dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova, de dimensões $\varnothing 5 \times 10$ cm, foram moldados conforme as recomendações da norma NBR 7215:1996.

A argamassa foi lançada nos moldes em quatro camadas, sendo compactadas, a cada camada, com 30 golpes aplicados por meio do soquete padrão. Ao término do adensamento, os topos dos corpos-de-prova foram rasados com o auxílio de espátula. Na Figura 14 estão apresentados os corpos-de-prova após a moldagem da argamassa que contém o agregado 5.

Após transcorrido 24 horas da moldagem das argamassas, as mesmas foram retiradas das fôrmas e submetidas à cura submersa em água saturada com cal. Nas idades de ensaio (3; 7 e 28 dias), os corpos-de-prova foram retirados da cura submersa e submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial e porosidade.

Figura 14 - corpos-de-prova após a moldagem



Fonte: A autora

3.2.6 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados em prensa hidráulica da marca EMIC, modelo PC 200C, de acordo com a norma NBR 7.215:1996. Na Figura 15 é apresentada a disposição de corpo-de-prova na prensa para a realização do ensaio de resistência à compressão axial.

Figura 15 - Prensa hidráulica para ensaio de resistência à compressão



Fonte: A autora

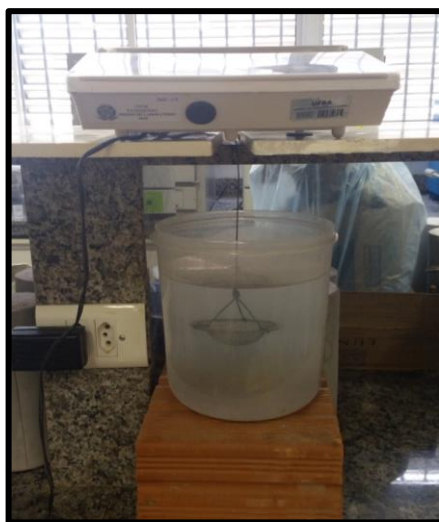
As irregularidades da base e topo dos corpos-de-prova foram minimizadas por meio da utilização de pratos metálicos que acomodam no seu interior discos de neoprene. Desta forma a distribuição de carga nas áreas de carregamento do corpo-de-prova ocorre de forma mais homogênea.

3.2.7 Porosidade das argamassas

Após o ensaio de resistência à compressão, dos corpos-de-prova rompidos foram retiradas amostras, com o auxílio de marreta e talhadeira, do terço médio para a realização do ensaio de porosidade. De cada corpo-de-prova foram retiradas 3 (três) amostras com aresta próxima a 5,0 mm.

Após extração das amostras, estas foram imediatamente submersas em água para ficarem saturadas novamente e mantidas nesta condição por aproximadamente 1,0 hora. Transcorrido o período de saturação, foram determinadas a massa saturada superfície seca (M_{SSS}) e a massa submersa (M_{sub}). Para a determinação da massa submersa foi utilizada uma balança hidrostática, como apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Balança hidrostática utilizada na determinação da massa submersa das amostras extraídas dos corpos-de-prova das argamassas.



Fonte: A autora

Na sequência as amostras foram estocadas em um recipiente polimérico com tampa e submetidas ao congelamento em ultrafreezer da marca Indrel, modelo CPS 10D (Figura 17), o qual mantém a temperatura entre -27 °C e -30 °C, com o intuito de paralisar as

reações de hidratação do material cimentício. As amostras permaneceram no ultrafreezer por um período mínimo de 24 horas para, então, serem submetidas ao processo de secagem por liofilização (sublimação), durante 16 horas, em equipamento da marca Terroni, modelo LS 3000. O liofilizador utilizado é apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Ultrafreezer utilizado para congelamento das amostras extraídas dos corpos-de-prova das argamassas.



Fonte: A autora

Figura 18 - Liofilizador utilizado para secagem das amostras extraídas dos corpos-de-prova das argamassas.



Fonte: A autora

Após a liofilização, a massa seca foi determinada (M_s) e pôde-se então, calcular a porosidade aparente das amostras, de acordo com a Equação 15.

$$P = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_{SSS} - M_{Sub}} \times 100 \quad (15)$$

Em que:

P = porosidade aparente (%)

M_{SSS} = Massa saturada superfície seca (g)

M_s = Massa seca (g)

M_{Sub} = Massa submersa (g)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

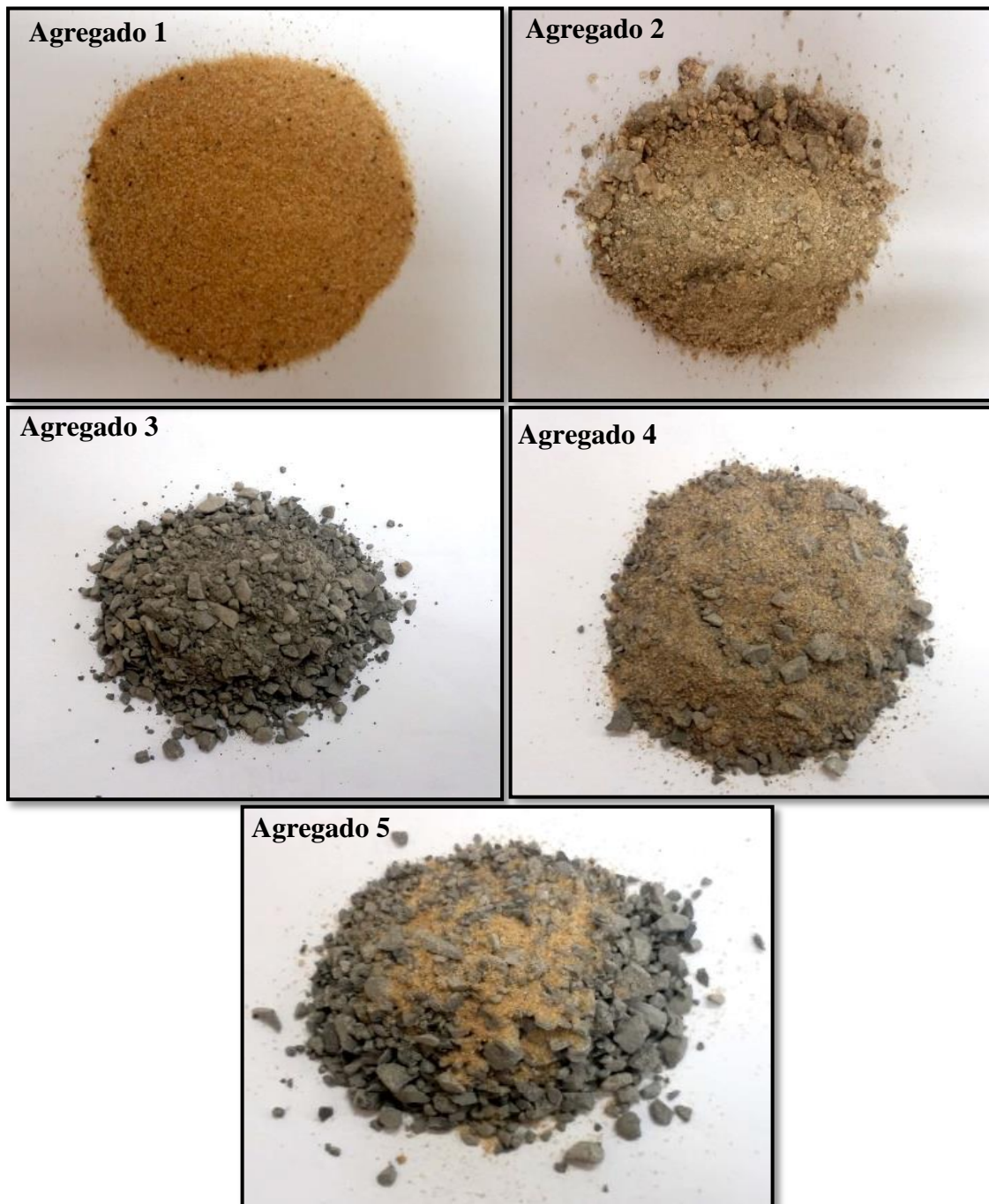
Este capítulo visa apresentar os resultados dos métodos analíticos e dos ensaios realizados, cuja apresentação foi feita no planejamento experimental deste trabalho.

4.1 Aspecto visual dos agregados miúdos utilizados no estudo das argamassas

Na Figura 19 são apresentados os agregados miúdos utilizados no estudo de empacotamento de partículas para a posterior execução de argamassas. O agregado 1 e o agregado 3 representam os agregados miúdo disponíveis comercialmente na região de Barreiras, Bahia. O agregado 2 foi composta a partir de amostra de agregado comercializado na região de Goiânia, Goiás. Essa composição visou adequar a distribuição granulométrica à curva ideal proposta pelo modelo de Funk e Dinger (1992). As composições obtidas com o agregado 1 com o agregado 3 foram adequadas para: **1.** Obtenção de distribuição granulométrica que estivesse contida dentro da faixa ótima conforme diretrizes da norma NBR 7211:2005, o que resultou na proporção de 45% de areia fina e 55% de pó de brita (areia 4); e **2.** Obtenção de distribuição granulométrica similar à curva ideal de Funk e Dinger (1992), considerando a dimensão máxima de 4,75 mm e a mínima de 0,09 mm, o que resultou na proporção de 30% de areia fina e 70% de pó de brita peneirado (areia 5). O peneiramento excluiu partículas menores que 0,60 mm.

O agregado 1 é constituída de grãos no intervalo de 0,60 mm a 0,09 mm, determinada por ensaio granulométrico, além de uma fração retida no fundo. Isso evidencia que a areia regional não é adequada para a execução de concreto, pois há carência de partículas entre 0,60 e 4,75 mm. Desta forma há que se buscar meios para repor essas partículas quando do interesse de utilizar este agregado para a execução de concreto. Uma das alternativas é a realização de composição com o agregado 3, disponível na região. Desta forma, justifica-se o estudo das composições de agregado 1 com o agregado 3.

Figura 19 – Aspecto visual dos agregados miúdos utilizados no estudo de argamassas.



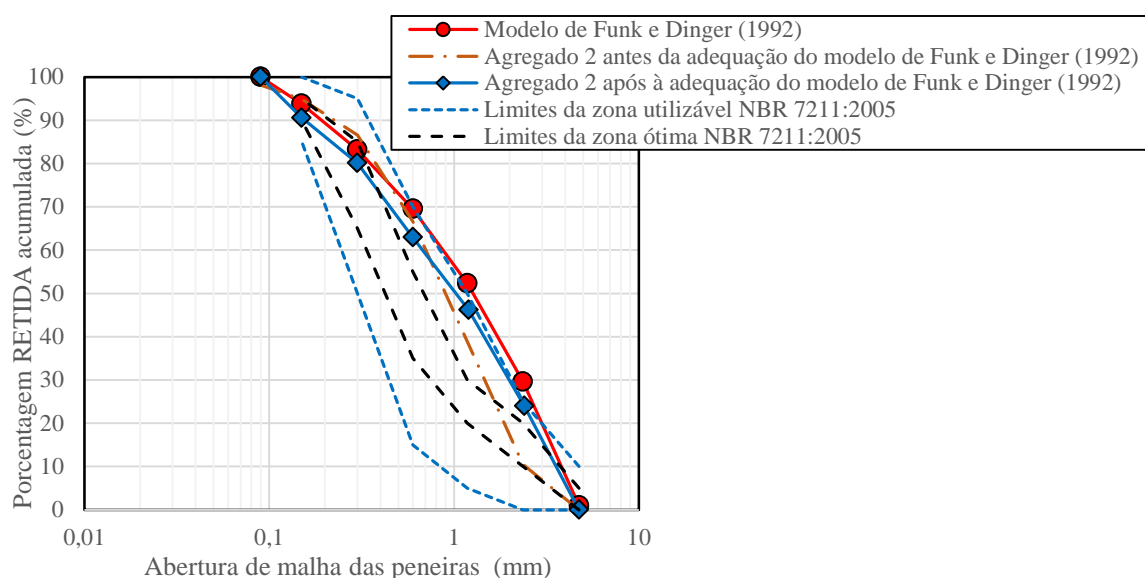
Fonte: A autora

4.2 Curvas granulométricas

O modelo proposto por Funk e Dinger (1992) foi utilizado para realização da otimização da distribuição granulométrica do agregado 2. A Figura 20 apresenta a curva

idealizada do modelo de Funk e Dinger (1992) para a amplitude de grãos entre 4,75 mm e 0,09 mm, além da distribuição granulométrica do agregado 2 antes e após a adequação ao modelo. Previamente à adequação, a densidade de empacotamento experimental do agregado 2 era de 54 % e, após a adequação, esta passou a ser de 58 %. Este agregado miúdo (agregado 2 adequada ao modelo de Funk e Dinger (1992)) representa a referência para os demais agregados miúdos estudados. Convém salientar que o estudo se ateve, única e exclusivamente, ao empacotamento teórico, sem considerar a morfologia e textura superficial dos grãos dos agregados.

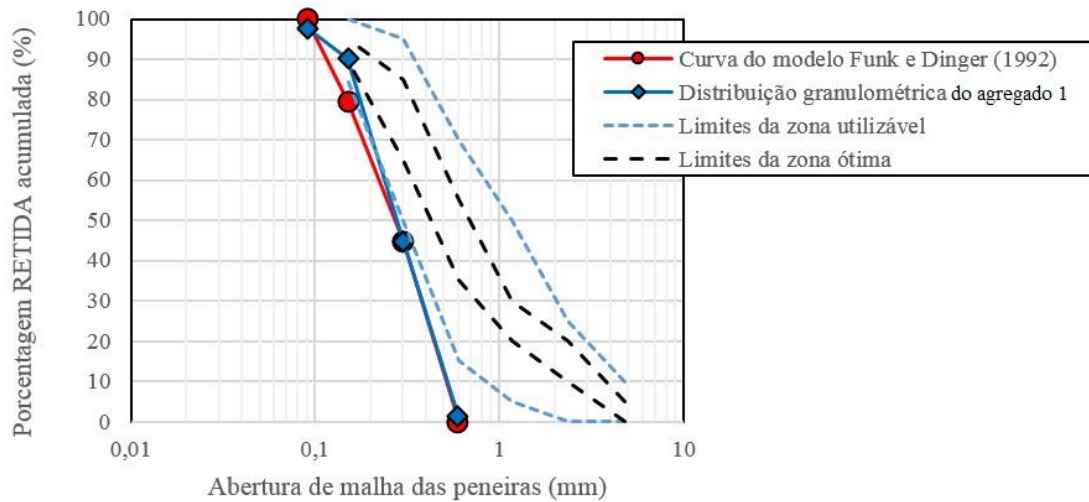
Figura 20 – Curva idealizada do modelo de Funk e Dinger (1992), considerando a dimensão máxima dos grãos de 4,75 mm e mínima de 0,09 mm, e distribuição granulométrica do agregado 2 antes e após a adequação ao modelo para a obtenção de máximo



Fonte: A autora

O agregado 1, apesar de não estar contida na faixa de zona ótima, nem tampouco na faixa de zona utilizável, conforme diretrizes da norma NBR 7.211:2005, quando avaliada a partir do modelo de Funk e Dinger (1992), considerando a dimensão máxima dos grãos de 0,60 mm e mínima de 0,09 mm, apresenta uma densidade de empacotamento de 60%, superior à observada na areia grossa. A Figura 21 apresenta a distribuição granulométrica da areia 1, a curva oriunda do modelo de Funk e Dinger (1992) e as curvas limites das zonas ótima e utilizável conforme diretrizes da norma NBR 7211:2015.

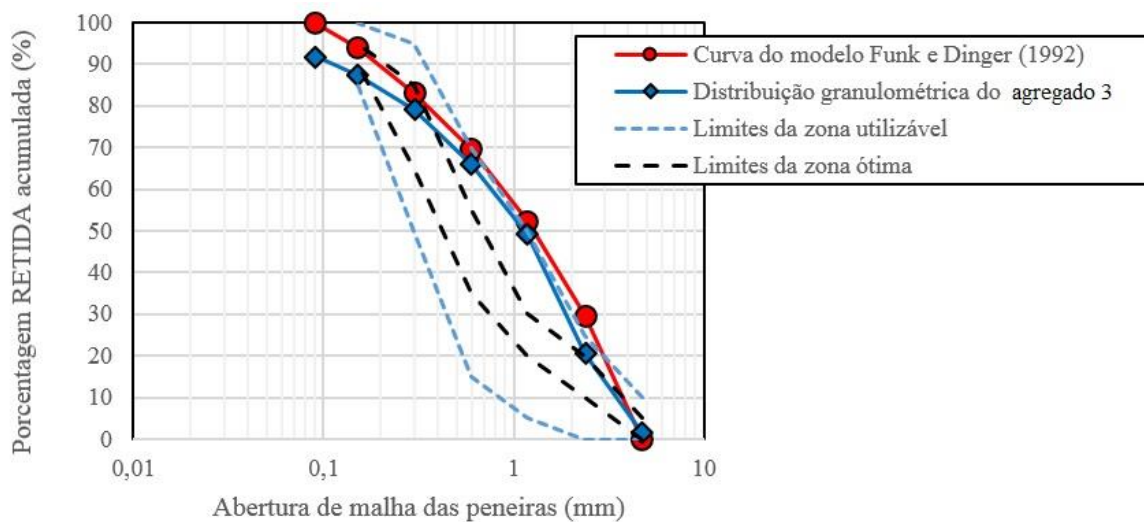
Figura 21 - Curva idealizada do modelo de Funk e Dinger (1992), considerando a dimensão máxima dos grãos de 0,60 mm e mínima de 0,09 mm, distribuição granulométrica do agregado 1 e curvas limites das zonas ótima e utilizável conforme diretrizes da norma NBR 7211:2005.



Fonte: A autora

O agregado 3 dispõe de distribuição granulométrica que está contida nos limites da zona utilizável conforme a norma NBR 7.211:2005 e, diante do modelo de Funk e Dinger (1992), sua granulometria encontra-se próxima à curva ideal, conforme observado na Figura 21. A densidade de empacotamento do agregado 3, determinada experimentalmente, foi de 61%.

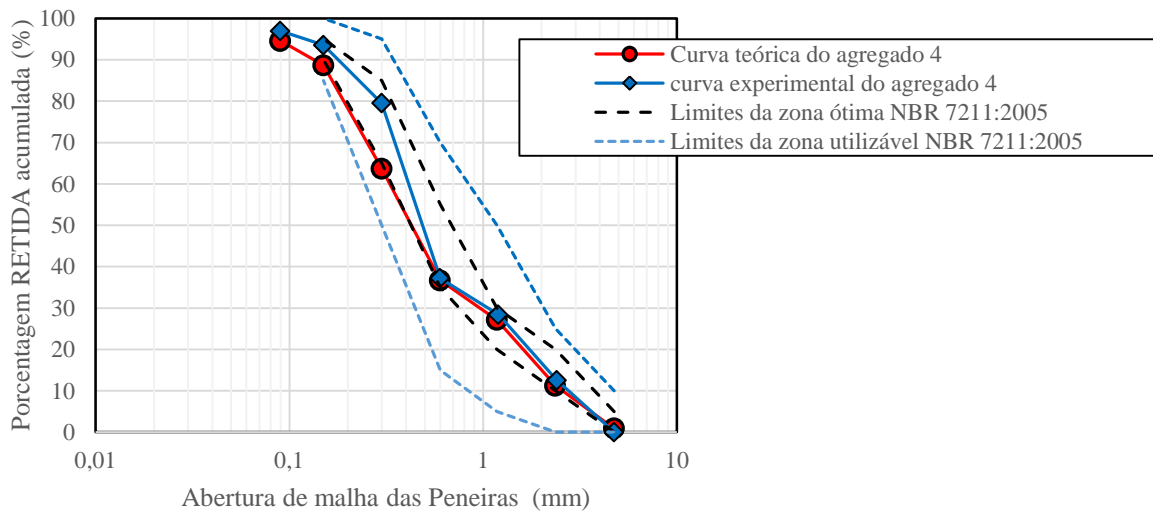
Figura 22 - Curva idealizada do modelo de Funk e Dinger (1992), considerando a dimensão máxima dos grãos de 4,75 mm e mínima de 0,09 mm, distribuição granulométrica do agregado 3 e curvas limites das zonas ótima e utilizável conforme diretrizes da norma NBR 7211:2005.



Fonte: A autora

O agregado 4, idealizada para estar compreendido entre os limites da zona ótima da norma NBR 7211:2005, tem a distribuição granulométrica teórica e experimental apresentadas na Figura 23. É possível observar que a curva teórica, determinada a partir da distribuição granulométrica dos materiais (areia fina e pó de brita) difere da curva experimental, determinada após a mistura e homogeneização dos materiais. Apesar desta discrepância, a distribuição granulométrica experimental manteve-se dentro da faixa limite da zona ótima.

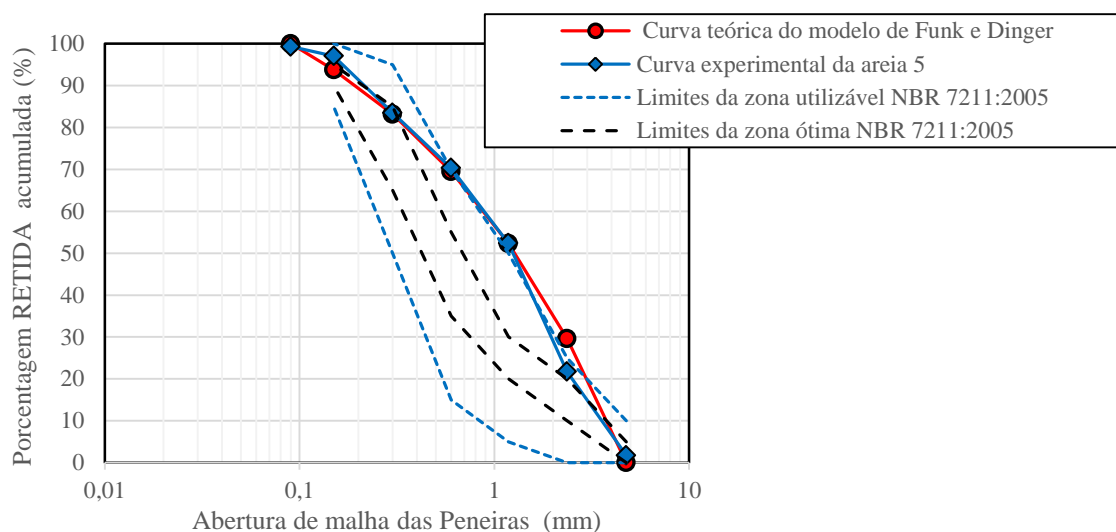
Figura 23 - Distribuição granulométrica do agregado 4 e curvas limites da zona ótima e zona utilizável conforme diretrizes da norma NBR 7211:2005.



Fonte: A autora

O agregado 5, idealizado para atender a distribuição granulométrica obtida pelo modelo de Funk e Dinger (1992), tem a curva granulométrica apresentada na Figura 24. De fato, a composição cumpre o objetivo proposto, ou seja, sua distribuição granulométrica é similar à curva ideal para a obtenção da máxima densidade de empacotamento.

Figura 24 - Curva idealizada do modelo de Funk e Dinger (1992), considerando a dimensão máxima dos grãos de 4,75 mm e mínima de 0,09 mm e distribuição granulométrica do agregado 5.



Fonte: A autora

A análise geral das distribuições granulométricas experimentais dos agregados miúdos evidencia que há concordância com as respectivas curvas determinadas por meio do modelo de Funk e Dinger (1992), exceto para o agregado 4. Salienta-se que esta composição foi idealizada para atender os limites da zona ótima da norma NBR 7211:2005 e, desta forma, sua discrepância em relação à curva idealizada já era esperada.

4.3 Densidade de empacotamento

A determinação da densidade de empacotamento do agregado miúdo de forma teórica requer a determinação experimental da densidade de empacotamento de cada uma das classes (tamanho de grãos) que compõem o material granular para, posteriormente, aplicar o modelo CPM de De Larrard (1999) para a obtenção da densidade de empacotamento virtual e densidade de empacotamento real. Assim sendo, serão apresentados, no próximo item, os resultados da densidade de empacotamento experimental de cada uma das classes que compõem os diferentes agregados miúdos estudados. Posteriormente, em um próximo item, serão apresentados os resultados obtidos teoricamente para a densidade de empacotamento virtual e real.

4.3.1 Densidade de empacotamento experimental de cada uma das classes (tamanho de partícula) que compõem o agregado miúdo

Os resultados de massa unitária no estado solto, e os respectivos desvios padrão decorrentes da realização do ensaio em triplicata, de cada uma das classes que compõem o agregado 1, além das correspondentes densidades de empacotamento, são apresentadas na Tabela 8. A massa específica considerada para a determinação das respectivas densidades de empacotamento das classes foi de $2,62 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 8- Massa unitária no estado solto e densidade de empacotamento das classes do agregado 1

Propriedade	Classe (mm)			
	0,60	0,30	0,15	0,09
Massa unitária no estado solto (g/cm^3)	1,51	1,59	1,52	1,48
Desvio Padrão (g/cm^3)	0,0076	0,0041	0,0036	0,0025
Densidade de empacotamento (β)	0,575	0,607	0,581	0,563

Fonte: A autora

Observa-se que as densidades de empacotamento das classes que compõem o agregado 1 não obedeceram um padrão relacionado ao decréscimo do tamanho dos grãos, ou seja, as classes dos grãos retidos nas peneiras de abertura 0,30 mm e 0,15 mm apresentaram as maiores densidades. Cabe enfatizar que entre uma classe e outra existem grãos de diferentes tamanhos, o que interfere na densidade de empacotamento da referida classe. A morfologia e a textura superficial dos grãos também interferem na densidade de empacotamento, porém estas características físicas não foram avaliadas no presente estudo. A variação na densidade de empacotamento entre as classes da areia fina variou de 56,3% a 60,7%.

Os resultados de massa unitária no estado solto, e os respectivos desvios padrão, de cada uma das classes que compõem o agregado 2, além das correspondentes densidades de empacotamento, são apresentadas na Tabela 9. A massa específica considerada para a determinação das respectivas densidades de empacotamento das classes foi de $2,61 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 9 - Massa unitária no estado solto e densidade de empacotamento das classes do agregado 2

Propriedade	Classe (mm)					
	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,09
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,29	1,27	1,25	1,21	1,10	1,02
Desvio Padrão (g/cm ³)	0,0130	0,0032	0,0056	0,0044	0,0038	0,0013
Densidade de empacotamento (β)	0,499	0,492	0,485	0,465	0,420	0,385

Fonte: A autora

A análise dos resultados apresentados na Tabela 9 evidenciam que houve redução da massa unitária no estado solto à medida que os grãos diminuíram de tamanho e, conseqüentemente, a densidade de empacotamento também diminuiu. A variação na densidade de empacotamento das classes do agregado 2 variou entre 38,5% e 49,9%. A análise comparativa com as densidades de empacotamento das classes da areia 1 evidencia que as classes do agregado 2 apresentam densidade de empacotamento consideravelmente inferiores. Isto pode estar relacionado com a morfologia dos grãos, o que impacta para o aumento da quantidade de vazios no sistema granular.

Os resultados de massa unitária no estado solto, e os respectivos desvios padrão, de cada uma das classes que compõem o agregado 3, além das correspondentes densidades de empacotamento, são apresentadas na Tabela 10. A massa específica considerada para a determinação das respectivas densidades de empacotamento das classes foi de 2,69 g/cm³.

Tabela 10 - Massa unitária no estado solto e densidade de empacotamento das classes do agregado 3

Propriedade	Classe (mm)					
	2,36	1,18	0,60	0,30	0,15	0,09
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,40	1,38	1,37	1,35	1,24	1,22
Desvio Padrão (g/cm ³)	0,0057	0,0021	0,0044	0,0018	0,0144	0,0061
Densidade de empacotamento (β)	0,520	0,513	0,509	0,501	0,461	0,453

Fonte: A autora

As densidades de empacotamento das classes do agregado 3 variaram entre 45,3% e 52,0%. O agregado 3, por ser originário do processo de britagem, possuem partículas mais angulosas, sendo assim, teoricamente, as partículas teriam mais dificuldades em se acomodar uma relação à outra e, desta forma, os espaços vazios do sistema granular tendem a aumentar. Em comparação com do agregado 2, o agregado 3 apresentou melhor densidade de empacotamento em todas as classes, o que é um indício de que a morfologia

e textura superficial de seus grãos são menos angulosos e rugosos que os grãos do agregado 2.

Os resultados de massa unitária no estado solto, e os respectivos desvios padrão, de cada uma das classes do agregado 4, além das correspondentes densidades de empacotamento, são apresentadas na Tabela 11. A massa específica considerada para a determinação das respectivas densidades de empacotamento das classes foi de 2,66 g/cm³.

Tabela 11 - Massa unitária no estado solto e densidade de empacotamento das classes do agregado 4.

Propriedade	Classe (mm)					
	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,09
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,39	1,37	1,35	1,51	1,46	1,33
Desvio Padrão (g/cm ³)	0,0020	0,0061	0,0012	0,0030	0,0005	0,0037
Densidade de empacotamento (β)	0,521	0,515	0,509	0,567	0,548	0,501

Fonte: A autora

As densidades de empacotamento das diferentes classes do agregado 4 variou de 50,1% a 56,7%.

Os resultados de massa unitária no estado solto, e os respectivos desvios padrão, de cada uma das classes que compõem o agregado 5, além das correspondentes densidades de empacotamento, são apresentadas na Tabela 12.

A massa específica considerada para a determinação das respectivas densidades de empacotamento das classes foi de 2,65 g/cm³.

Tabela 12 - Massa unitária no estado solto e densidade de empacotamento das classes do agregado 5.

Propriedade	Classe (mm)					
	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,09
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,40	1,38	1,37	1,55	1,52	1,42
Desvio Padrão (g/cm ³)	0,0057	0,0021	0,0044	0,0005	0,0024	0,0046
Densidade de empacotamento (β)	0,528	0,521	0,517	0,586	0,573	0,534

Fonte: A autora

As densidades de empacotamento das classes do agregado 5 variou entre 51,7% e 58,6%.

De maneira geral, o agregado 1 apresentou as maiores densidades de empacotamento das classes que a compõem, entretanto, esse agregado miúdo não dispõe de partículas entre 0,60 e 4,75 mm, tornando-se deficiente para a execução de concretos. A correção da granulometria do agregado 1 por meio de mistura com o agregado 3 propiciou densidades de empacotamento das classes superiores a 50,1%, enquanto que o agregado 2 apresentou densidades de empacotamento por classes superiores a 38,5% e, no do agregado 3, superiores a 45,3%. *A priori* os agregados compostos por agregado 1 e agregado 3, com dimensão dos grãos entre 0,09 mm e 4,75 mm tendem a apresentar as maiores densidades de empacotamento.

4.3.2 Densidades de empacotamento real e virtual dos agregados miúdos

As densidades de empacotamento virtual e real dos agregados miúdos foram determinadas pelo modelo CPM de De Larrard (1999). A aplicação deste modelo requer a determinação prévia das densidades de empacotamento de cada uma das classes que compõem o agregado miúdo. Tais determinações foram apresentadas no item anterior.

Na Tabela 13 está apresentada a porcentagem de massa retidas em função das classes de partículas que constituem os agregados miúdos e os respectivos resultados normalizados.

Tabela 13 - Porcentagem de massa retidas em função das classes de partículas que constituem os agregados miúdos e os respectivos resultados normalizados.

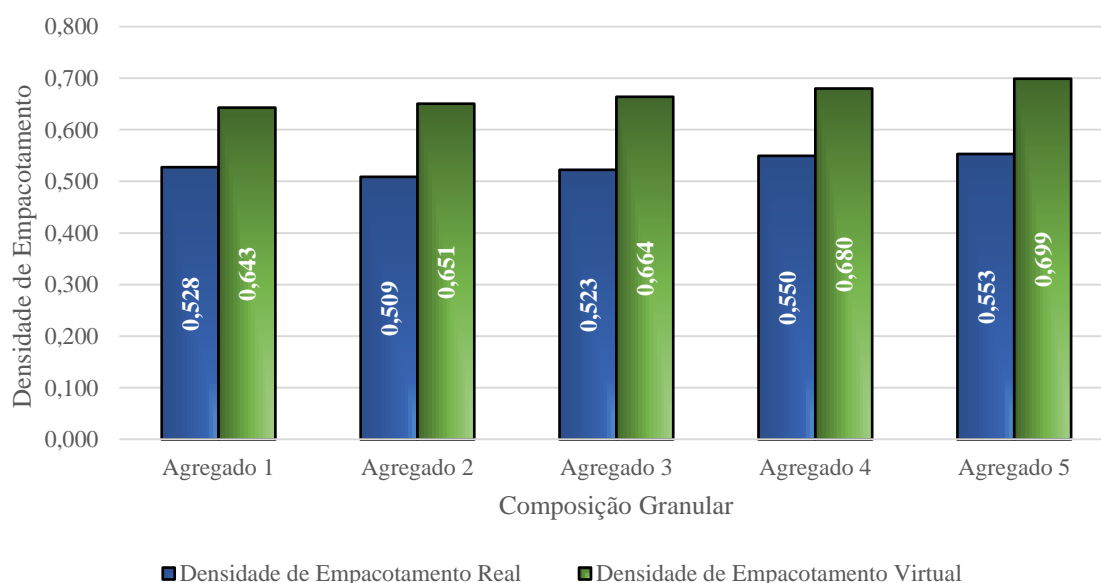
Composição Granular	Proporção de cada fração (%)						Total
	2,36	1,18	0,60	0,30	0,15	0,09	
Agregado 1	-	-	0,98 (1,00)	43,93 (44,97)	45,31 (46,38)	7,47 (7,64)	97,68 (100,00)
Agregado 2	29,63	22,69	17,19	13,67	10,58	6,23	100,00
Agregado 3	18,81 (20,84)	28,82 (31,92)	16,59 (18,38)	13,15 (14,56)	8,33 (9,23)	4,58 (5,07)	90,29 (100,00)
Agregado 4	10,35 (11,05)	15,87 (16,95)	9,57 (10,22)	27,00 (28,84)	24,97 (26,67)	5,88 (6,28)	93,64 (100,00)
Agregado 5	21,73 (21,88)	30,64 (30,86)	17,93 (18,05)	13,18 (13,27)	13,59 (13,69)	2,24 (2,26)	99,31 (100,00)

Fonte: Autora

A realização dos ensaios de distribuição granulométrica dos agregados evidenciou que havia partículas retidas no fundo, ou seja, partículas abaixo de 0,09 mm. Como essas partículas não foram caracterizadas para fins de aplicação do modelo de empacotamento, os resultados das massas retidas em cada peneira foram normalizados para que os resultados totalizassem 100%, ou seja, foi feita uma redistribuição, dividindo os valores percentuais de cada fração, pela soma total atingida (resultados em parênteses). Esse procedimento foi necessário, pois, é um requisito indispensável para aplicação do modelo Analítico CPM.

Utilizando as proporções de cada fração (Tabela 13), a densidade de empacotamento (β) de cada uma das classes dos grãos, os dados referentes ao efeito parede e ao efeito de afastamento, pôde-se aplicar o modelo analítico CPM proposto por De Larrard (1999), obtendo-se, assim, as densidades de empacotamento real e virtual. Os resultados obtidos através por meio modelo estão apresentados na Figura 25.

Figura 25 - Densidades de empacotamento real e virtual dos agregados miúdos estudados.



Fonte: A autora

Com base nos resultados apresentados na Figura 25, observa-se que as composições mistas (areia fina + pó de brita) apresentaram as maiores densidades de empacotamento, sendo que o agregado 5 (30% de areia fina e 70% de pó de brita peneirado) apresentou densidade de empacotamento real de 0,553 (55,3%) e densidade de empacotamento virtual de 0,699 (69,9%). O agregado 4 (45% de areia fina e 55% de pó de brita) apresentou

densidade de empacotamento real de 0,550 (55,0%) e densidade de empacotamento virtual de 0,680 (68,0%). As densidades de empacotamento real dos agregados compostos pelo agregado 1 e agregado 3 são, praticamente, iguais e representam os melhores empacotamentos dentre os materiais particulados estudados.

O agregado 2 otimizada por meio do modelo de empacotamento de Funk e Dinger (1992) foi o agregado cuja densidade de empacotamento real apresentou o menor valor (50,9%), contrariando a hipótese inicial de que este material possuiria um dos melhores resultados, por ser uma areia bem graduada e otimizada por um modelo de empacotamento eficiente. Verificou-se, então, que a forma do agregado poderia estar influenciando neste resultando, pois segundo Oliveira (2000), quanto mais afastada do formato esférico a partícula for, menor é a densidade de empacotamento da mistura, causado pelo atrito, que surge pelo contato das superfícies irregulares da mesma.

O agregado 1, apesar de possuir poucas classes de grãos, possui um bom empacotamento, sendo o real de 0,528 (52,8%) e o virtual de 0,643 (64,3%). Percebe-se, então, que este agregado está mais próximo da forma esférica, quando comparado como o agregado 2.

4.3.3 Densidades de empacotamento experimental dos agregados miúdos

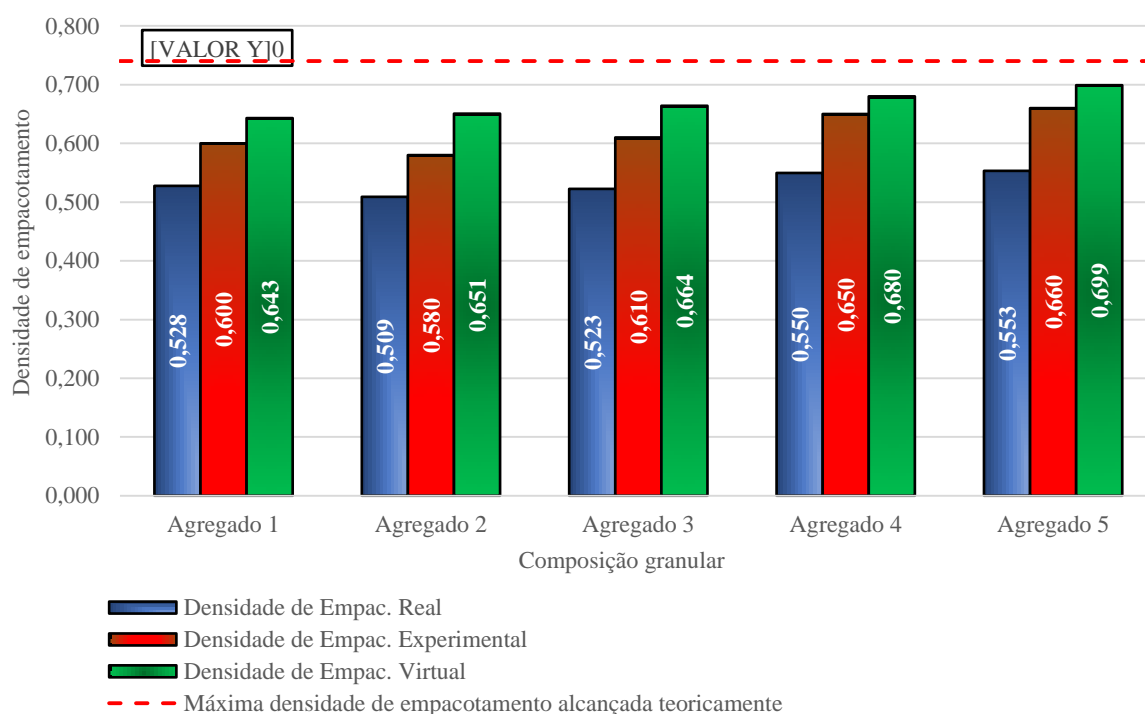
Na Figura 26 estão representados os resultados das densidades de empacotamento experimental das composições granulares e também estão representadas as respectivas densidades de empacotamento real e virtual, determinados por meio do modelo analítico CPM de De Larrard (1999), além da máxima densidade de empacotamento possível (74,0%), obtida por meio da disposição uma a uma de partículas esféricas no volume considerado.

Segundo Londero *et al* (2017), a comparação da densidade de empacotamento experimental deve ser feita com a densidade de empacotamento real, pois esta é calculada utilizando o índice de compactação K, correspondente ao método de compactação utilizado na determinação experimental. A comparação de dados experimentais não pode ser feita com a densidade de empacotamento virtual, pois esta não considera os efeitos de compactação que existem na prática.

Os resultados das densidades de empacotamento experimental, apresentados na Figura 26, evidenciam que esta é superior, em todas os agregados miúdos, quando

comparadas com a densidade de empacotamento real, determinadas teoricamente. Esse comportamento foi observado nos estudos de Londero *et al* (2017) e nos estudos de Lenz (2016). Londero *et al* (2017) relatam, que é natural variações entre as densidades de empacotamento real e experimental, pois os modelos são elaborados a partir de simplificações e os dados experimentais, são obtidos por meio de ensaios com as misturas granulares.

Figura 26 - Densidades de empacotamento real, experimental e virtual dos agregados miúdos estudados.



Fonte: A autora

As densidades de empacotamento experimental foram superiores às respectivas densidades de empacotamento real, variando entre 7,1% e 10,7%. O agregado 5 apresentou a maior densidade de empacotamento experimental, atingindo 66,0%. Já o agregado 4 apresentou densidade de empacotamento experimental de 65,0%. Cabe enfatizar que o agregado 5 demandou peneiramento do pó de brita para remoção das partículas inferiores a 0,60 mm. Assim sendo, após a análise dos resultados de densidade de empacotamento experimental, conclui-se que o agregado 4 torna-se mais viável, pois não requer qualquer tratamento prévio à mistura e homogeneização. O agregado 3 apresentou densidade de empacotamento de 61,0%, valor 4,0% inferior aos agregados compostos de areia fina e pó

de brita (agregado 4 e agregado 5). Na sequência, o agregado 1 apresentou o melhor empacotamento (60,0%) e, por fim, o agregado 2 (58,0%).

De fato, a mistura do agregado 1 com o agregado 3 aumentou a densidade de empacotamento quando comparado aos materiais isolados. Assim sendo, a mistura destes agregados aumenta amplitude granulométrica da composição resultante e a sua densidade de empacotamento, de forma que sua utilização na execução de concreto seja mais adequada. Os efeitos dos diferentes agregados, com diferentes densidades de empacotamento, sobre a consistência da argamassa, resistência à compressão e porosidade serão apresentados a seguir.

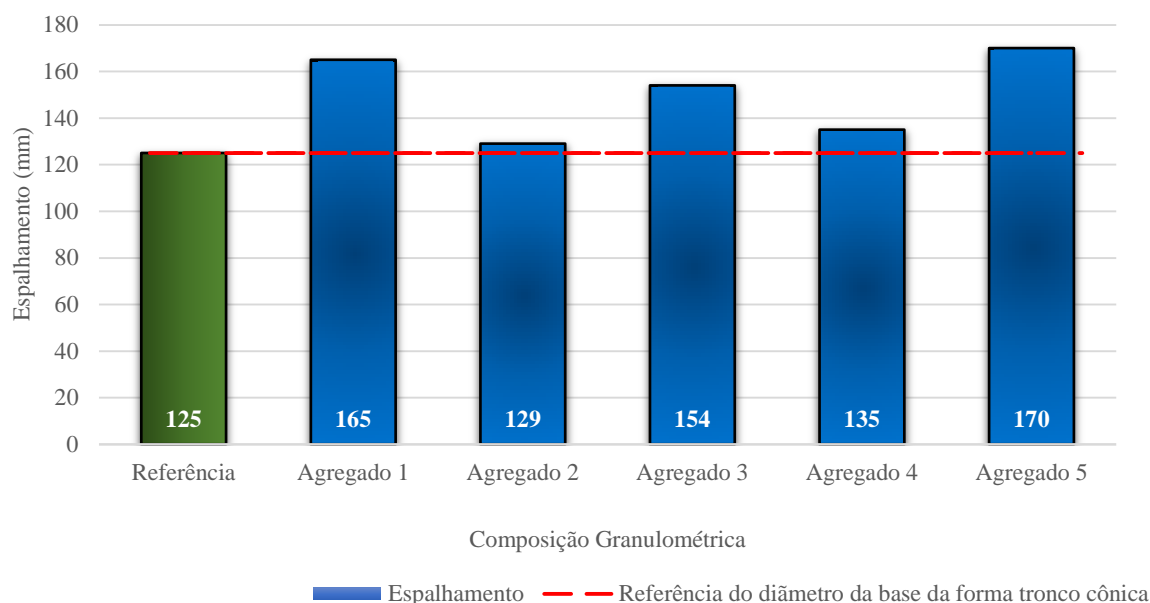
4.4 Consistência das argamassas

Segundo Silva *et al* (2005), o comportamento da argamassa no estado fresco é medido indiretamente através de uma correlação com a consistência e de acordo com Carasek *et al* (2016), a consistência das argamassas, no estado fresco, para uma mesma relação água/cimento, pode ser influenciada por parâmetros como: ângulo de atrito e fator de empacotamento dos grãos.

A consistência das argamassas, misturadas com os diferentes agregados miúdos, foi determinada após transcorridos 11 minutos da mistura do cimento com a água. Esta foi determinada por meio do espalhamento da argamassa em decorrência do seu peso próprio, ou seja, não foi aplicado qualquer golpe que favorecesse o escoamento.

Na Figura 27 são apresentados os valores de consistência (espalhamento) correspondente à média de quatro leituras para cada argamassa misturada com os diferentes agregados miúdos estudados.

Figura 27 - Espalhamento das argamassas



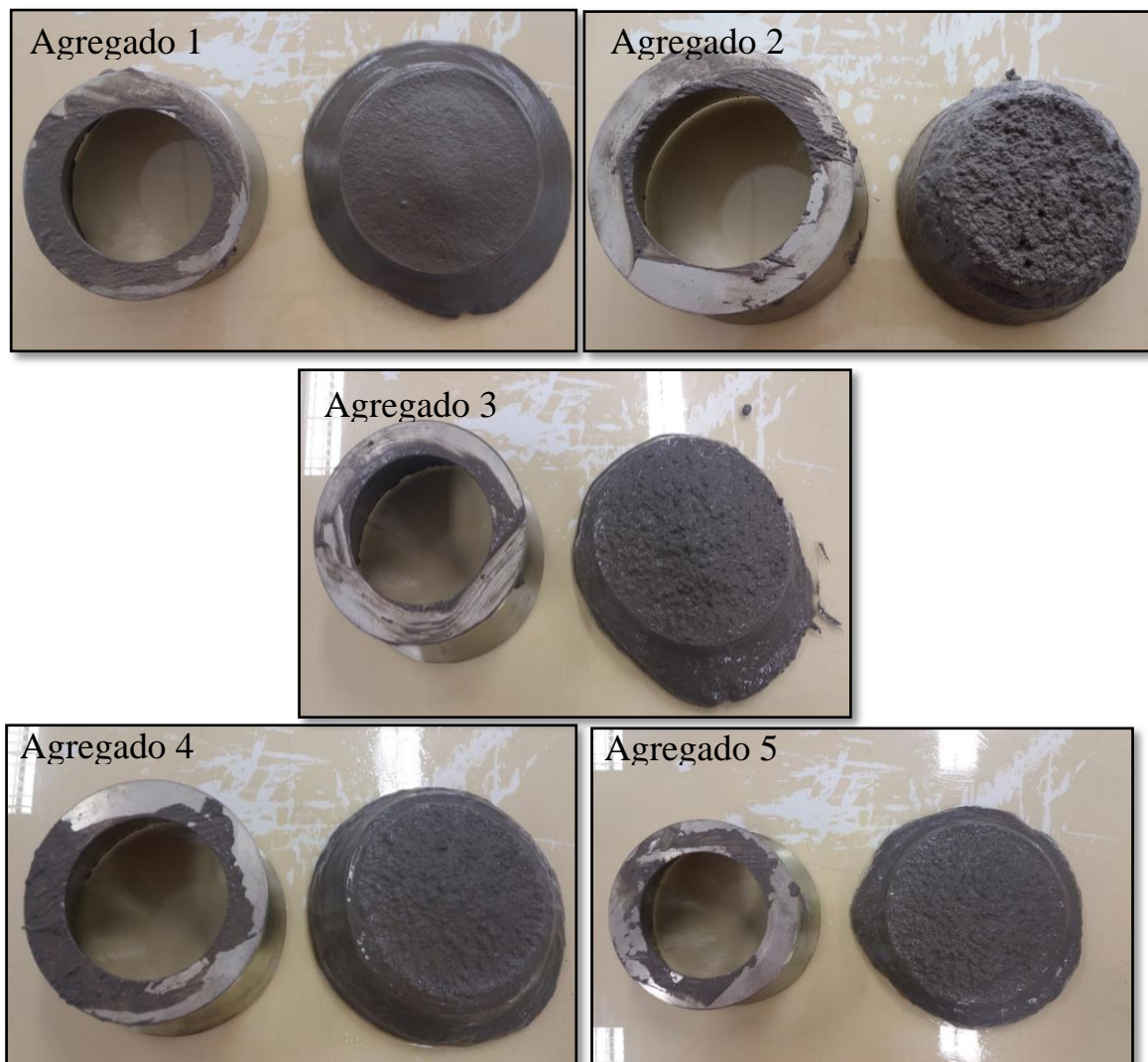
Fonte: A autora

De acordo com a Figura 27, o maior espalhamento, ou seja, a argamassa de maior fluidez, foi aquela correspondente ao agregado 5, seguido da argamassa executada com o agregado 1. Na sequência, os espalhamentos seguiram a seguinte ordem: agregado 3, agregado 4 e o agregado 2. A argamassa executada com o agregado 2 adequada ao modelo de Funk e Dinger (1992) praticamente não apresentou mobilidade. Este fato decorre da morfologia e textura superficial dos grãos que compõem esse agregado que, por serem irregulares e angulosos, propiciam atrito interno e, conseqüentemente, restringe o escoamento da mistura.

A Figura 28 apresenta o aspecto visual do espalhamento das diferentes argamassas. Observa-se que o aspecto visual das argamassas (Figura 28) evidencia que a utilização do agregado 2 praticamente inviabilizou o escoamento do material, apesar do agregado apresentar distribuição granulométrica que atribui ao mesmo um empacotamento otimizado. De fato, tal comportamento decorre da morfologia dos grãos.

A argamassa executada com agregado 1, apesar da maior área superficial, foi uma das que apresentou maior mobilidade dentre os materiais estudados. Esse agregado, apesar da ausência de grãos entre 0,60 mm e 4,75 mm, apresentou empacotamento similar aos materiais correspondentes ao agregado 3 e o agregado 5 e, desta forma, a maior fluidez decorre da forma dos grãos, que tendem a ser arredondados.

Figura 28 - Aspecto visual do ensaio de consistência das argamassas com: agregado 1; agregado 2; agregado 3; agregado 4 e agregado 5.

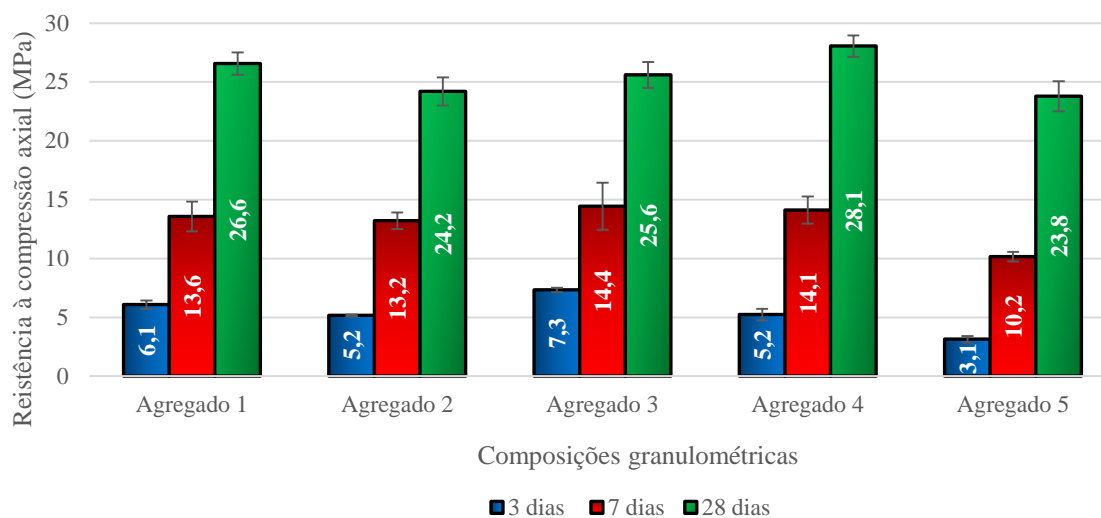


Fonte: A autora

4.5 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado nas idades de 3, 7 e 28 dias. Para cada uma das argamassas, executadas com os diferentes agregados miúdos, foram ensaiados 4 corpos de prova para cada idade. A resistência à compressão é representada pela média aritmética dos resultados obtidos. A resistência à compressão das diferentes argamassas é apresentada na Figura 29. As tabelas com os referidos resultados seguidos do desvio padrão e os coeficientes de variação constam do Apêndice C.

Figura 29 - Resistência à compressão das argamassas nas idades de 3, 7 e 28 dias



Fonte: A autora

A partir dos resultados apresentados na Figura 29, é possível observar que houve alteração na resistência à compressão em função do tipo de agregado miúdo utilizado na execução das argamassas. A variação na resistência à compressão foi bastante evidente na idade de 3 dias, onde a relação entre a menor e a maior resistência à compressão foi de 0,42, ou seja, a argamassa executada com a areia 5 (3,1 MPa) apresentou resistência à compressão equivalente a 42% da resistência da argamassa executada com o agregado 4 (7,3 MPa). Aos 7 dias, a resistência à compressão das argamassas variou entre 13,2 MPa e 14,4 MPa, exceto a argamassa com o agregado 5, a qual apresentou resistência de 10,2 MPa. Na idade de 28 dias, há uma tendência de equiparação na resistência à compressão das argamassas executadas com o agregado 1, com o agregado 3 e com o agregado 4. Essas argamassas apresentam resistência à compressão variando de 25,0 a 28,0 MPa. Já as argamassas executadas com o agregado 2 e com o agregado 5 apresentaram, em média, 24,0 MPa aos 28 dias.

O trabalho de Santana (2017), a qual utilizou o mesmo cimento e areia fina de distribuição granulométrica próxima para a execução das argamassas, porém com relação cimento/agregado distinta (1,00/2,05), resultou em resistência à compressão de 14,9 MPa aos 7 dias e 24,4 MPa aos 28 dias, para a relação água/cimento de 0,55. No estudo de Silva (2017), para o mesmo cimento e areia fina de distribuição granulométrica próxima, porém com relação cimento/agregado 1,00/1,35, a resistência à compressão da

argamassa foi de 18,7 MPa aos 7 dias e 23,6 MPa aos 28 dias, para a relação água/cimento de 0,55. Apesar da discrepância em relação à resistência à compressão aos 7 dias do trabalho de Silva (2017), os demais resultados se assemelham aos observados neste estudo.

4.6 Porosidade das argamassas

Os valores resultantes da porosidade das argamassas estudadas, para as diferentes idades, estão listados na Tabela 14. Os respectivos resultados com o coeficiente de variação estão dispostos no Apêndice D.

Tabela 14 - Porosidade das argamassas nas diferentes idades estudadas.

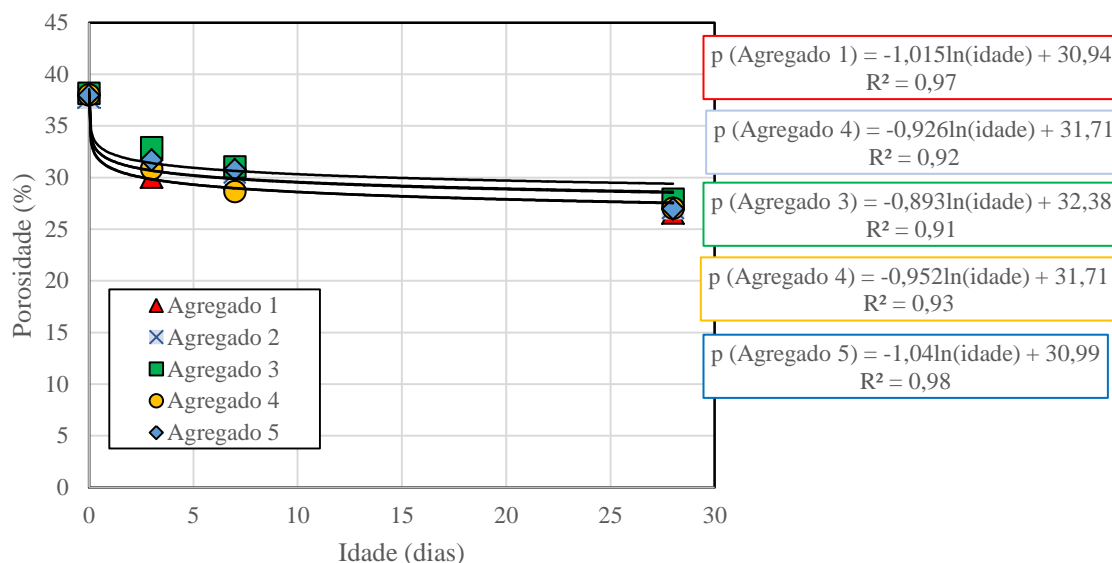
Composição granulométrica	Porosidade Inicial teórica (%)	3 dias		7 dias		28 dias	
		Porosidade (%)	Desvio Padrão (%)	Porosidade (%)	Desvio Padrão (%)	Porosidade (%)	Desvio Padrão (%)
Agregado 1	37,78	30,03	1,32	29,94	1,71	26,57	0,73
Agregado 2	37,72	32,08	1,58	30,48	1,75	27,03	0,99
Agregado 3	38,17	32,89	0,77	31,02	2,21	27,91	1,10
Agregado 4	38,00	30,84	2,19	28,65	0,95	27,02	1,48
Agregado 5	37,95	31,68	1,22	30,76	0,58	26,97	2,19

Fonte: A autora

A porosidade inicial teórica foi determinada a partir da relação entre o volume de água de mistura e o somatório dos volumes dos materiais que compõem as respectivas argamassas.

As curvas de evolução da porosidade das argamassas produzidas com diferentes composições granulares estão apresentadas na Figura 30.

Figura 30 - Evolução da porosidade das argamassas produzidas com diferentes composições granulares.



Fonte: A autora

A porosidade inicial teórica das argamassas variou entre 37,72% e 38,17% (Tabela 14). Essa variação é resultado das diferentes massas específicas dos agregados miúdos. Com a evolução das reações de hidratação, o volume de vazios é reduzido gradativamente ao longo do tempo.

As argamassas executadas apresentaram comportamento similar em relação à variação da porosidade ao longo do tempo. A porosidade inicial teórica destas argamassas era da ordem de 38% e, com a evolução da hidratação, foi reduzida para, em média, 27,1% aos 28 dias. Cabe enfatizar que a argamassa com agregado 1 apresentou a menor porosidade em relação às outras argamassas, com um valor de 26,57%.

A argamassa executada com o agregado 1, apesar de apresentar a menor porosidade aos 28 dias, não apresentou a maior resistência à compressão. A maior resistência à compressão foi observada na argamassa executada com o agregado 4. Da mesma forma, a argamassa executada com o agregado 5, apresentou a menor resistência à compressão aos 28 dias dentre as argamassas estudadas, no entanto, não apresentou a maior porosidade. A maior porosidade foi observada na argamassa executada com o agregado 3, o qual tem a resistência um pouco superior em relação ao agregado 2 e ao agregado 5. Portanto, a porosidade não é o único fator a influenciar na resistência à compressão. De fato, a distribuição do diâmetro dos poros interfere na resistência à compressão, porém esta

caracterização não foi realizada no presente estudo em decorrência da falta de infraestrutura da instituição.

Por fim, cabe destacar que o método utilizado para a determinação da porosidade possui limitações, além de não ser muito preciso. Além disso, as amostras de argamassas retiradas dos corpos de prova rompidos podem apresentar heterogeneidades, ou seja, possui maior ou menor teor de agregado, o que altera a determinação do volume de vazios contido na amostra. Portanto, as curvas obtidas representam uma tendência comportamental e podem variar de forma a aumentar ou reduzir a porosidade do material.

4.7 Empacotamento de partículas *versus* propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido

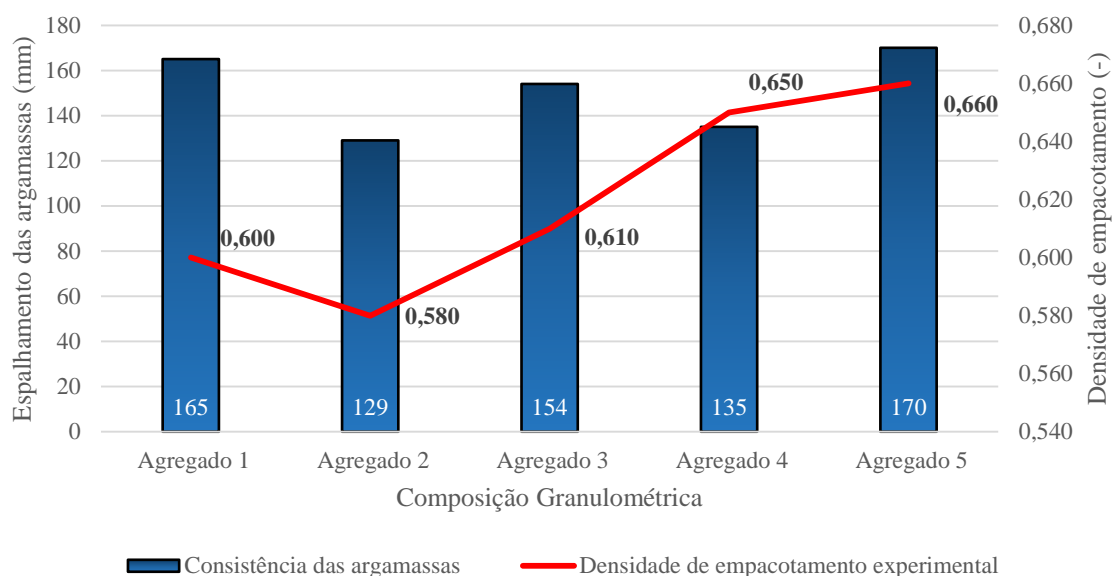
O empacotamento de partículas propõe reduzir a quantidade de vazios de uma mistura granular, melhorando as propriedades do concreto e das argamassas, tanto no estado fresco quanto no endurecido.

Pensando nisto, com intuito, de alcançar o objetivo da pesquisa, foi feito um comparativo entre o empacotamento de partículas das misturas granulares estudadas e a influência que este exerce na consistência, na resistência à compressão axial e na porosidade das argamassas.

4.7.1 Empacotamento experimental de partículas *versus* consistência das argamassas

A Figura 31, apresenta o comparativo da consistência das argamassas e a densidade de empacotamento experimental das misturas granulares. Conforme a Figura 31, observa-se que a densidade de empacotamento dos grãos exerceu influência na consistência das argamassas. Segundo Daminieli, Pileggi e John (2017), o controle da quantidade de vazios entre as partículas é fundamental, pois permite que a fluidez da mistura seja atingida com menores quantidades de água.

Figura 31 - Comparativo da densidade de empacotamento experimental *versus* consistência das argamassas.



Fonte: A autora

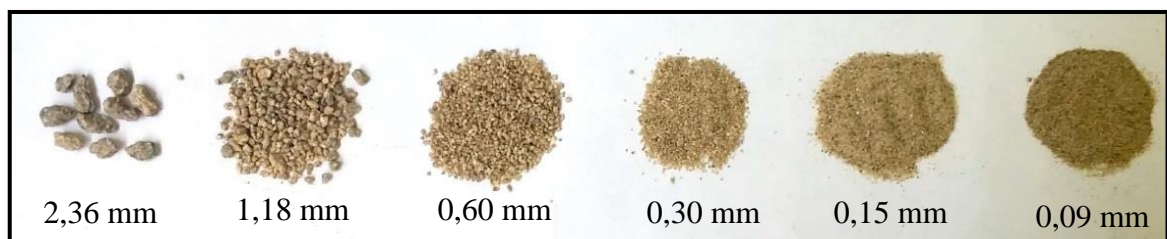
Com base na afirmação dos referidos autores, verificou-se que a argamassa executada com o agregado 2, por possuir maior quantidade de vazios (42,0%) entre as misturas, apresentou o menor espalhamento. Por outro lado, a argamassa executada com o agregado 4, de densidade de empacotamento experimental de 65,0% e, conseqüentemente, com índice de vazios de 35,0%, apresentou um dos menores espalhamentos dentre as argamassas estudadas. Assim sendo, a justificativa para tal comportamento se deve, sobretudo, pela maior quantidade de material fino na composição deste último agregado, já que este foi composto para estar situado dentro dos limites da zona ótima da norma NBR 7.211:2005. Logo, este agregado possui maior área de superfície dos grãos, o que demanda maior percentual de água de molhagem e, conseqüentemente, houve redução do espalhamento.

A argamassa executada com o agregado 3, de densidade de empacotamento experimental de 61,0% (porosidade granular de 39,0%) deveria apresentar maior espalhamento que o agregado 1, com porosidade de 40,0%, em virtude desta possuir grãos de menor dimensão e, conseqüentemente, maior área de superfície. Os resultados experimentais de espalhamento não seguiram esta lógica. A justificativa para esta divergência decorre da morfologia dos grãos, os quais são mais esféricos no agregado 1, enquanto que no agregado 3, estes são irregulares e angulosos.

A argamassa de maior espalhamento foi aquela executada com o agregado 5. De fato, este agregado apresentou a maior densidade de empacotamento experimental (66,0%). A amplitude granulométrica deste agregado variou de 0,09 mm a 4,75 mm, o que também ocorreu com o agregado 2 e com o agregado 3, porém, nestes agregados a densidade de empacotamento foi menor, apesar da adequação da granulometria ao modelo de Funk e Dinger (1992). A justificativa para a menor densidade de empacotamento se deve à morfologia e textura superficial dos grãos destes agregados. Embora o agregado 5 disponha de grãos irregulares e angulosos decorrente do pó de brita (agregado 3), as partículas de maior esfericidade do agregado 1 contribuíram para a maior mobilidade da argamassa. Desta forma, fica evidente que a distribuição granulométrica adequada ao modelo de Funk e Dinger (1992) não obrigatoriamente garante o maior espalhamento da argamassa, pois a morfologia e a textura superficial dos grãos também são preponderantes para a fluidez do material.

A morfologia dos grãos do agregado 2 pode ser visualizada, com restrições, na Figura 32. É possível notar, principalmente nos grãos de maior dimensão, que há irregularidade e angulosidade nos mesmos, além de considerável rugosidade superficial, o que irá influenciar no atrito interno dos constituintes da argamassa quando em movimento, impactando no resultado de espalhamento.

Figura 32 - Morfologia das classes dos grãos do agregado 2.

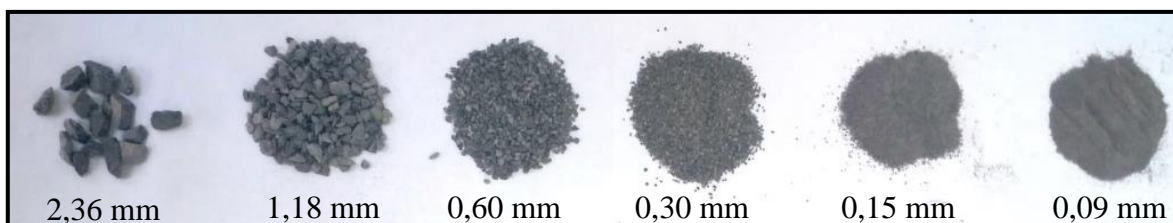


Fonte: A autora

Para fins de comparação com a morfologia do agregado 2, as partículas do agregado 3, separadas por peneiramento, são apresentadas na Figura 33. Observa-se, principalmente nos grãos de maior dimensão, que apesar da angulosidade, a rugosidade superficial do agregado 3 é menor em comparação ao agregado 2. Portanto, apesar destes agregados apresentarem distribuição granulométrica próxima ao modelo de Funk e Dinger

(1992) para o diâmetro mínimo de 0,09 mm e máximo de 4,75 mm, a argamassa com o agregado 3 apresentou maior espalhamento. Convém salientar que o agregado 3 ainda dispunha de uma fração de 8,07% de material passante na peneira de abertura de malha de 0,09 mm, o que tende a reduzir o espalhamento. Então, o que justifica a maior fluidez da argamassa com o agregado 3 foi a menor rugosidade superficial dos seus grãos.

Figura 33 - Morfologia das classes dos grãos do agregado 3.



Fonte: A autora

4.7.2 Empacotamento de partículas experimental *versus* resistência à compressão axial das argamassas.

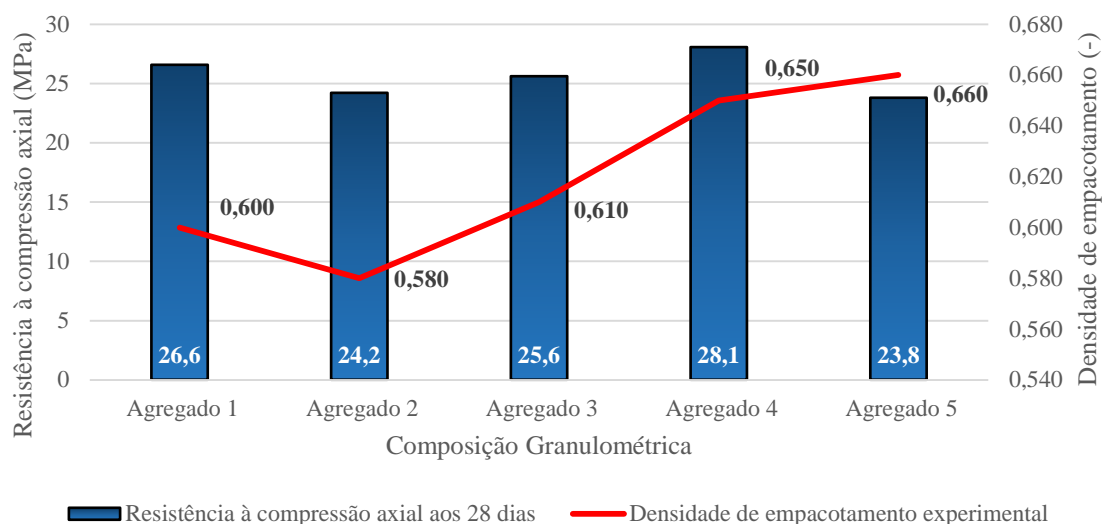
Na Figura 34 são apresentados os resultados de densidade de empacotamento experimental dos agregados miúdos utilizados e as consequentes resistências à compressão das argamassas.

De maneira geral, a densidade de empacotamento experimental dos agregados miúdos resultou em relação direta com os resultados de resistência à compressão (Figura 34), ou seja, o maior empacotamento da estrutura granular dos agregados significa que a argamassa correspondente irá apresentar a maior resistência à compressão. De acordo com Neville e Brooks (2013), a distribuição granulométrica, a qual está diretamente relacionada ao empacotamento de partículas, não exerce influência direta na resistência à compressão do material de base cimentícia. Para os autores, o fator preponderante sobre a resistência à compressão é a relação água/cimento utilizada na mistura. Apesar da afirmação dos autores acima citados, no presente estudo, mantida a relação água/cimento constante, houve uma pequena variação na resistência à compressão e esta variação, na maioria das argamassas, está em conformidade com a densidade de empacotamento dos agregados utilizados.

A argamassa de maior densidade de empacotamento experimental do agregado foi àquela executada o agregado 5, entretanto esta resultou, aos 28 dias, na menor resistência à

compressão (23,8 MPa). Esta argamassa constituiu a única exceção à tendência de relação direta da densidade de empacotamento experimental e resistência à compressão.

Figura 34 - Comparativo da densidade de empacotamento experimental *versus* resistência à compressão axial aos 28 dias

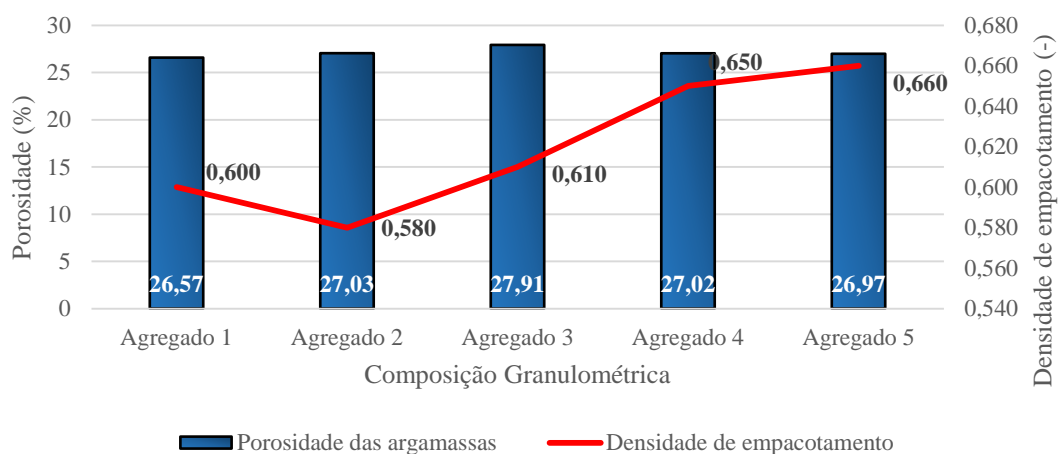


Fonte: A autora

4.7.3 Empacotamento de partículas experimental *versus* porosidade das argamassas.

A porosidade das argamassas aos 28 dias e as respectivas densidades experimentais de empacotamento são apresentadas na Figura 35.

Figura 35 - Comparativo da densidade de empacotamento experimental *versus* porosidade aos 28 dias



Fonte: A autora

De fato, a redução gradual da porosidade ao longo do tempo depende, única e exclusivamente, da hidratação do cimento Portland. Os resultados de porosidade aos 28 dias indicam que não houve variação significativa entre as argamassas. Essa variação pode ocorrer por heterogeneidade das amostras no que se refere à relação pasta/agregado, o que impacta na determinação do volume de vazios, além das limitações da técnica utilizada para a determinação das variáveis (massa seca, massa saturada superfície seca e massa submersa) necessárias para o cálculo da porosidade.

Como pode ser visto, a variação da densidade de empacotamento experimental entre os agregados estudados não influenciou na porosidade da das argamassas aos 28 dias.

4.8 Consumo de cimento para cada composição granulométrica

O consumo de cimento em concretos e argamassas de cimento Portland é um assunto relevante pois está diretamente relacionado com os impactos ambientais decorrentes da extração de matéria prima e produção de clínquer. Assim sendo, estudos que visem reduzir o consumo de cimento Portland por unidade volumétrica de concreto ou argamassa merecem especial atenção. Os consumos de cimento Portland por metro cúbico das argamassas estudadas são apresentados na Tabela 15. No presente estudo, as consistências das argamassas variaram, ou seja, o espalhamento passou a ser uma consequência do empacotamento de partículas. Desta forma, como observado na Tabela 15, o consumo de cimento por unidade volumétrica de material (m^3) praticamente não se alterou. A variação de $5,0 \text{ kg}/m^3$ decorreu exclusivamente da variação da massa específica dos agregados miúdos utilizados.

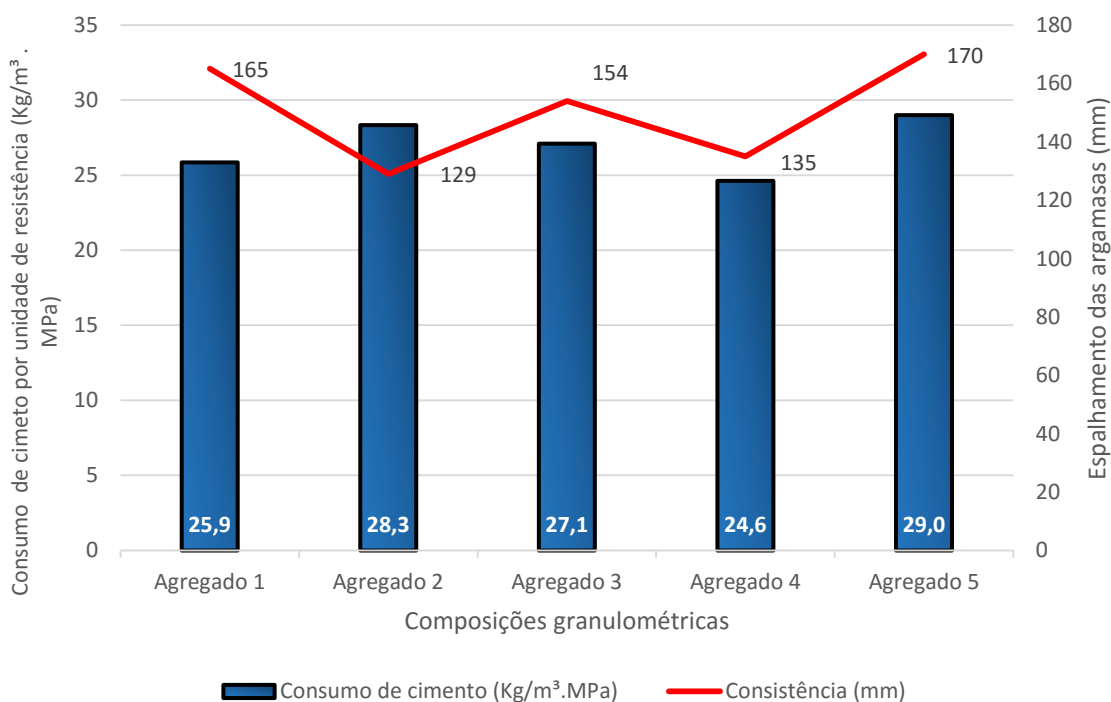
Tabela 15 – Consumo do cimento Portland por metro cúbico de argamassa em relação à massa específica de cada agregado miúdo estudado.

Composição granulométrica	Massa específica do agregado miúdo (kg/dm^3)	Consumo de cimento (Kg/m^3)
Agregado 1	2,62	687
Agregado 2	2,61	686
Agregado 3	2,69	694
Agregado 4	2,66	691
Agregado 5	2,65	690

Fonte: A autora

A partir do consumo de cimento por metro cúbico de argamassa é possível estabelecer o consumo de cimento por unidade de resistência à compressão e, desta forma, avaliar a relação custo *versus* benefício das argamassas. Na Figura 36 são apresentados os consumos de cimento por unidade de resistência à compressão aos 28 dias das argamassas e os seus respectivos espalhamentos.

Figura 36 – Consumo de cimento Portland em Kg/m³.MPa para produzir argamassa de 1MPa.



Fonte: A autora

A maior eficiência em relação ao consumo de cimento por unidade de resistência à compressão aos 28 dias foi observada na argamassa executada com o agregado 4. Entretanto, essa argamassa apresentou baixa fluidez, similar à observada quando da utilização como agregado 2. Os demais agregados atribuíram maior mobilidade às respectivas argamassas, porém o consumo de cimento por unidade de resistência foi maior. Como exceção pode-se citar a argamassa misturada com o agregado 1, a qual apresentou consumo de cimento por unidade de resistência similar ao observado com o agregado 4, porém com maior espalhamento. Apesar deste agregado (agregado 1) mostrar-se viabilidade técnica, quando da aplicação na execução de concreto, a sua distribuição granulométrica não é adequada. Desta forma, com base na viabilidade técnica e na

disponibilidade de materiais regionais (areia fina e pó de brita) recomenda-se a utilização do agregado 4.

A escolha desta composição também deve estar pautada no custo dos materiais. Atualmente (março de 2018) o pó de brita (agregado 3) possui valor agregado 20% superior ao da areia fina (agregado 1) no comércio local (Barreiras – BA). Portanto, a utilização do agregado 3 ou do agregado 5 irá aumentar o custo de aquisição do agregado miúdo, além de que as argamassas misturas com estes agregados apresentaram maior consumo de cimento por unidade de resistência à compressão aos 28 dias.

Convém salientar que o agregado 5 requer peneiramento do pó de brita para adequação da distribuição granulométrica para obtenção da densidade de empacotamento experimental obtida neste estudo. Esta retirada dos finos do agregado 3 também representa custo a ser incorporado no valor final da argamassa.

Observa-se que o agregado 4 foi feito para ficar inserido dentro dos limites da zona ótima preconizada na norma NBR 7211:2005, em relação aos agregados adequados a distribuição granulométrica proposta pelo modelo de Funk e Dinger (1992) o agregado inserido no limite da zona ótima tem uma maior quantidade de finos. A partir dos resultados obtidos, levando em consideração a escolha do agregado 4 para correção da distribuição granulométrica da areia fina, pode-se dizer então, que os limites da zona ótima possuem uma boa referência para distribuição granulométrica adequada.

4.9 Volume de vazios do agregado miúdo *versus* volume de pasta contido nas argamassas

Como a proporção de mistura utilizada para a execução das cinco argamassas não foi ajustada conforme uma consistência pré-estabelecida, houve um excesso de volume de pasta em relação ao volume de vazios do agregado. Na Tabela 16 estão apresentados, para cada argamassa, o consumo de agregado miúdo, o consumo de água, o volume de vazios do agregado, o volume de pasta de cada argamassa e a relação entre o volume de pasta e o volume de vazios do agregado.

Tabela 16 – Consumo de agregado e de água, volume de vazios, volume de pasta e relação entre o volume de pasta e o volume de vazios do agregado.

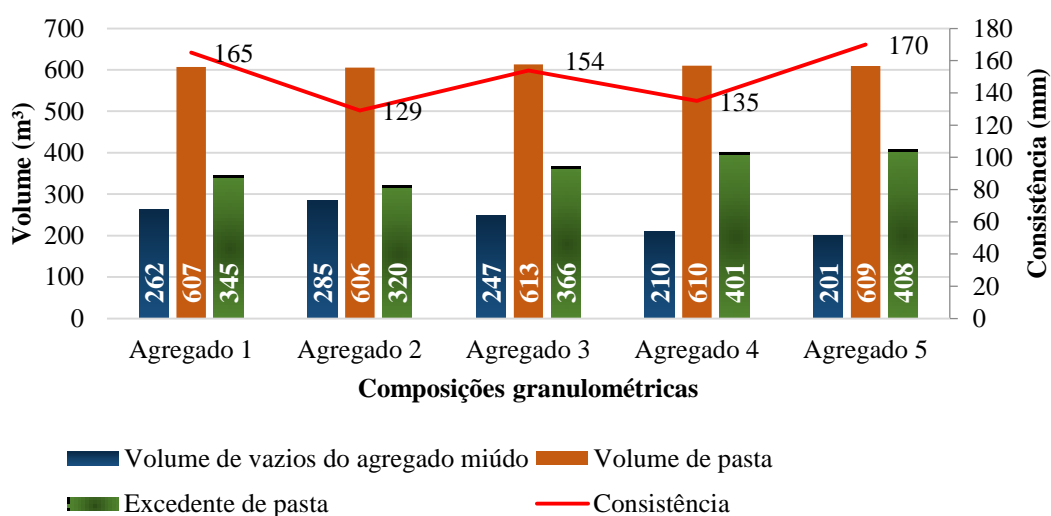
Composição granulométrica	Consumo de agregado miúdo (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Vazios agregado (L)	Volume de pasta (L)	Volume de pasta / Volume de vazios do agregado (L/L)
Agregado 1	1030	378	262	607	2,31
Agregado 2	1029	377	285	606	2,12
Agregado 3	1041	382	247	613	2,48
Agregado 4	1036	380	210	610	2,91
Agregado 5	1035	379	201	609	3,03

Fonte: A autora

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 16, observa-se que o volume de pasta não variou significativamente entre as argamassas estudadas, sendo esta variação de 7 L. Sendo assim, há uma tendência de que as porosidades das matrizes hidratadas das argamassas apresentem resultados próximos, o que de fato ocorreu.

Para uma melhor visualização estão apresentados na Figura 37 os volumes de vazios do agregado miúdo, os volumes de pasta de cada uma das argamassas estudadas e o volume de pasta excedente para o preenchimento dos vazios do agregado, bem como a consistência das argamassas. Fica evidente que o volume de pasta foi superior à demanda para o preenchimento dos vazios do agregado, de tal forma que a relação volumétrica entre o volume de pasta e o volume de vazios do agregado variou entre 2,12 e 3,03.

Figura 37 – Volume de vazios do agregado miúdo, volume de pasta contido em cada uma das argamassas e consistência.



Fonte: A autora

Por fim, observa-se que o maior volume excedente de pasta não resultou, obrigatoriamente, no maior espalhamento da argamassa, o que evidencia a influência de outros fatores, como a morfologia das partículas, a textura superficial dos grãos e o teor de finos contido na argamassa. De fato, a viscosidade da pasta é idêntica em todas as misturas e, desta forma, pode-se afirmar que a argamassa executada com o agregado 2 apresentou um dos menores espalhamentos em decorrência da angulosidade e rugosidade dos grãos. Já a argamassa executada com o agregado 4, de distribuição granulométrica contida na zona ótima da norma NBR 7211:2005, possui maior teor de finos em relação aos demais agregados, exceto em comparação ao agregado 1, o que restringiu a fluidez da mistura, ou seja, deixou-a mais consistente. A argamassa contendo o agregado 1 apresentou um dos maiores espalhamentos, apesar da maior finura dos grãos da areia, o que pode ser atribuído à esfericidade das partículas.

5. CONCLUSÃO

Os resultados decorrentes da realização do planejamento experimental proposto neste estudo permitem a apresentação das seguintes considerações:

1. O agregado 1 comumente utilizada como agregado miúdo na região de Barreiras – BA é carente de grãos superiores a 0,60 mm e, desta forma sua distribuição granulométrica extrapola os limites da zona utilizável propostos na norma NBR 7211:2005. Portanto, este agregado não é adequado para a execução de concreto. Apesar desta limitação, a sua amplitude granulométrica (0,09 mm a 0,60 mm) se adequa ao modelo de Funk e Dinger (1992), resultando em uma densidade de empacotamento experimental de 60,0%. A esfericidade dos grãos da areia fina, aliado ao empacotamento dos mesmos, atribui boa fluidez à argamassa, apesar da maior área de superfície em comparação aos demais agregados miúdos estudados. A argamassa com o agregado 1 apresentou um dos melhores resultados de resistência à compressão e um dos menores consumos de cimento por unidade de resistência à compressão aos 28 dias.

2. A adequação do agregado 2 advindo de Goiânia – GO ao modelo de empacotamento de Funk e Dinger (1992) considerando a amplitude granulométrica de 0,09 mm a 4,75 mm resultou na menor densidade de empacotamento experimental dentre os agregados miúdos estudados. Esse comportamento é justificado pela morfologia irregular dos grãos, além da rugosidade superficial. Desta forma a acomodação dos grãos em um determinado volume no estado solto foi prejudicado pelo atrito entre os grãos. O espalhamento da argamassa realizada com este agregado foi praticamente nulo ($\pm 4,0$ mm), ocasionado pelas características físicas dos grãos, já que a distribuição granulométrica foi adequada para a obtenção de um melhor empacotamento. A resistência à compressão da argamassa realizada com este agregado foi uma das menores dentre as estudadas e, conseqüentemente, o consumo de cimento por unidade de resistência de resistência à compressão foi um dos mais elevados.

3. O agregado 3, de origem calcária, comercializado na região de Barreiras – BA possui distribuição granulométrica que permite adequar a areia fina aos limites da zona ótima da norma NBR 7211:2005 ou ao modelo de empacotamento de Funk e Dinger (1992). Previamente à mistura destes agregados, foi realizado o empacotamento experimental do agregado 3 e constatado que o mesmo possui uma densidade de empacotamento de 61,0%, valor superior ao observado no agregado 2 (58,0%) adequada

para a obtenção de máximo empacotamento. A argamassa com o agregado 3, apesar da angulosidade dos grãos, apresentou maior mobilidade que a argamassa contendo agregado 2, em virtude da menor rugosidade superficial dos grãos. Em contrapartida, em comparação com a argamassa executada com agregado 1, apesar desta possuir maior área de superfície dos grãos, o espalhamento foi menor, devido a maior irregularidade granular, ou seja, partículas de baixo grau de esfericidade. No que se refere a resistência à compressão, esta argamassa configurou entre os maiores resultados dentre as estudadas. Logo, o consumo de cimento por unidade de resistência à compressão foi um dos mais baixos, de forma que sua utilização apresenta viabilidade técnica, apesar do maior custo deste material em comparação com o agregado 1.

4. O agregado 4, realizada com o intuito de ampliar a distribuição granulométrica do agregado miúdo e adequá-lo aos limites da zona ótima estabelecidos na norma NBR 7211:2005, resultou em densidade de empacotamento experimental de 65,0%, apesar desta granulometria não estar em sintonia com o modelo de Funk e Dinger (1992). A mobilidade (espalhamento) da argamassa realizada com a mistura destes agregados foi baixa, embora a areia fina tenha se mostrado adequada para conferir fluidez ao material em decorrência da esfericidade de suas partículas. A restrição ao espalhamento pode ser consequência do maior teor de finos na mistura, já que ambos os agregados dispõem de fração residual de partículas abaixo de 0,09 mm (fundo). A resistência à compressão desta argamassa foi a que atingiu maior valor aos 28 dias e, desta forma, o consumo de cimento por unidade de resistência à compressão foi o mais baixo. Posto isso, fica evidenciada a viabilidade econômica desta composição que, ao ter a distribuição granulométrica adequada para a mistura em concreto, apesar da redução da fluidez, impactou positivamente na resistência à compressão.

5. O peneiramento prévio do pó de brita (agregado 3) para a retirada dos grãos inferiores a 0,60 mm para posterior composição do agregado 5, visando ampliar a distribuição granulométrica do agregado miúdo e adequar ao modelo de Funk e Dinger (1992) para a obtenção do máximo empacotamento, resultou em uma densidade experimental de empacotamento de 66,0%, o maior valor dentre os agregados estudados. Como consequência deste empacotamento, a argamassa misturada com esta composição apresentou o maior espalhamento. Portanto, a eliminação das partículas inferiores a 0,60 mm do agregado 3 reduziu o teor de finos na mistura, o que propiciou maior fluidez à argamassa. A resistência à compressão desta argamassa atingiu o menor valor dentre as

estudadas, com redução aproximada de 15% em relação à argamassa contendo o agregado 4, a qual apresentou a maior resistência à compressão aos 28 dias. Desta forma, em virtude da baixa resistência à compressão, o consumo de cimento por unidade de resistência à compressão foi o mais elevado, onerando a utilização deste agregado, o qual requer peneiramento prévio do agregado 3 e a sua utilização em teor elevado (70%), sendo que este possui maior custo em comparação ao agregado 1.

6. Diante das conclusões apresentadas, sugere-se a correção da distribuição granulométrica do agregado 1 da região de Barreiras – Ba por meio do agregado 4, para fins de aplicação na execução de concreto.

7. O empacotamento de partículas exerce influência no comportamento reológico das argamassas, entretanto, sua eficiência pode ser prejudicada quando a morfologia e a textura superficial dos grãos não forem adequadas, ou seja, baixo grau de esfericidade e maior rugosidade da superfície dos grãos.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Utilizar as técnicas de empacotamento de partículas, fazendo a análise da redução do consumo de cimento em cada composição granulométrica para uma consistência pré-estabelecida.
- Como a composição granulométrica proveniente da mistura de 45% de areia fina e 55% de pó de brita (agregado 4) foi a mais viável para correção da distribuição granulométrica da areia fina da região, sugere-se acrescentar o agregado graúdo e avaliar as propriedades no estado fresco e no estado endurecido do concreto, englobando ensaios de durabilidade.

REFERÊNCIAS

ARNOLD, D. C. M., **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas**. Dissertação de mestrado. São Leopoldo. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935: Agregados - Terminologia**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2011.

_____ **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.

_____ **NBR 11578: Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro, 1991.

_____ **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2002.

_____ **NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2003.

_____ **NBR NM 45: Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. 1. ed. Rio de Janeiro, 2006.

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

_____ **NBR 7211: Agregados para concreto – especificações**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.

BARANHUK, A. D. **Análise da influência do empacotamento dos agregados na porosidade do concreto**. Trabalho de Conclusão de curso. Curitiba. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

BELLATO, M. N. **Análise da geração de poluentes na produção de cimento Portland com o coprocessamento de resíduos industriais**. Dissertação de Mestrado. Itajubá, Minas Gerais. Universidade Federal de Itajubá, 2013.

CAMPITELI, V. C., **Porosidade do concreto**. São Paulo, departamento de engenharia de construção civil da EPUSP, 1987

CAMPITELI, V. C; SCHULZ, S. L. **Consumo de cimento em concretos de cimento Portland: Influência da massa específica dos agregados**. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC). Foz do Iguaçu - Paraná, 2002.

CARASEK, H. *et al.* **Parâmetros de areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento.** Revista matéria, V. 21, n.3, p. 714 – 732, 2016.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. **Distribuição granulométrica para argamassas.** Revista PINI, edição 27, 1997. Disponível em <<http://piniweb17.pini.com.br/construcao/noticias/distribuicao-granulometricapara-argamassas>> Acesso em 30 de março de 2018.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil.** Revista cerâmica, V.55, P. 18-32, 2009.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas.** Tese de doutorado. São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach.** Modern Concrete Technology Series, v. 9. E&FN SPON, London, 1999.

FABRO F. *et al.*, **Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto.** Revista IBRACON de estruturas e materiais. Vol. 4. Nº 2, p. 191-212, 2011.

JACINTHO, A. E. P. G. de A.; GIONGO, J. S. **Resistência mecânica do concreto.** In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. 1. ed. São Paulo: IBRACON, Cap. 20, p. 605 – 631. v.1, 2005.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. **O Cimento Portland.** In: Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações. 1. ed. São Paulo: IBRACON. Cap. 10, p. 295-322. v. 1, 2005

LENZ, L. A. **Avaliação da influência do empacotamento do esqueleto granular no módulo de elasticidade de concretos convencionais.** Dissertação de pós-graduação em engenharia de construção civil. Curitiba. Universidade Federal do Paraná, 2016.

LIMA, S. F. S. *et al* **Estudo da Influência do Método do Empacotamento do Agregado Miúdo na Resistência do Concreto Convencional.** Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2016.

LONDERO, C. **Dosagem de concreto ecológico com base em estudo de empacotamento de partículas.** Dissertação de Mestrado. Curitiba. Universidade Federal do Paraná, 2016.

LONDERO, C., *et. Al.* **Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias.** Revista cerâmica, p. 22-33, 2017.

Manual de Estilo Acadêmico – **Trabalhos de Conclusão de Curso, dissertações e teses.** UFBA – 5ª Edição: Salvador, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: microstructure, properties and materials.** 3. ed. McGraw-Hill, 2008.

NETO, C. S. **Agregados para Concreto.** In: Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações. 1. ed. São Paulo: IBRACON. Cap. 11, p. 323-343. v. 1, 2005.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, H. M. de. **Cimento Portland.** In: Materiais de Construção 1, L.A Falcão Bauer. 5. ed. revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2016. Cap. 3, p. 35-62. V. 1.

OLIVEIRA, I. R. de *et al.* **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico.** São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 195 p.

OLIVEIRA, C. O. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas.** Dissertação de mestrado. Ilha Solteira – São Paulo. Universidade Estadual Paulista, 2013.

QUINTANILHA L. C., *et al.* **Estudo da Influência do Empacotamento do Agregado Graúdo da Resistência do Concreto Convencional.** Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2016.

RIVA, R. D. D., **Efeitos das propriedades físicas dos grãos da fração areia de solos arenosos e de agentes de cimentação no comportamento de sistemas empacotados.** Tese de doutorado. Viçosa – Minas Gerais. Universidade Federal de Viçosa, 2010.

SANTANA, L. R., **Avaliação da resistência à compressão e porosidade das argamassas com substituição parcial de cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha.** Trabalho de conclusão de curso. Barreiras – Bahia. Universidade Federal do Oeste da Bahia, 2017.

SILVA, E. C., **Argamassa de cimento Portland com incorporação de aditivo plastificante polifuncional: Influência no teor de areia incorporado, resistência à compressão e custo unitário.** Trabalho de conclusão de curso. Barreiras – Bahia. Universidade Federal do Oeste da Bahia, 2017.

SILVA, R. P., *et al.* **Avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco através dos métodos de mesa de consistência, dropping ball e squeeze flow.** VI Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas. Florianópolis, P. 106 – 120, 2005.

SOBRAL, E. S., **Propriedades do concreto fresco.** In: Materiais de Construção 1, L.A Falcão Bauer. 5. ed. revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2016. Cap. 9, p. 267-283. V. 1.

APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

Tabela A.1 Distribuição granulométrica da areia fina

Peneira (mm)	Massa (g)	% Retida	% Retida Acumulada
4,75	0,00	0,00	0,00
2,36	0,00	0,00	0,00
1,18	0,19	0,05	0,05
0,6	3,90	0,98	1,03
0,3	175,23	43,93	44,96
0,15	180,73	45,31	90,27
0,09	29,78	7,47	97,73
Fundo	9,05	2,27	100,00

Fonte: A autora

Tabela A.2 Distribuição granulométrica da areia grossa

Peneira (#) mm	Massa (g)	% Retida	% Retida Acumulada
4,75	0	0,00	0,00
2,36	52,11	10,44	10,44
1,18	142,07	28,47	38,91
0,6	138,11	27,67	66,58
0,3	99,82	20,00	86,59
0,15	41,48	8,31	94,90
0,09	15,94	3,19	98,09
Fundo	9,52	1,91	100,00

Fonte: A autora

Tabela A.3 Distribuição granulométrica do pó de brita

Peneira (mm)	Massa (g)	% Retida	% Retida Acumulada
4,75	8,15	1,64	1,64
2,36	93,69	18,81	20,45
1,18	143,52	28,82	49,27
0,6	82,63	16,59	65,86
0,3	65,49	13,15	79,01
0,15	41,5	8,33	87,35
0,09	22,81	4,58	91,93
Fundo	40,2	8,07	100,00

APÊNDICE B – ROTEIRO DE CÁLCULO DO MODELO CPM

Visando um melhor entendimento do procedimento de cálculo do modelo CPM, proposto por De Larrard (1999), segue um roteiro do desenvolvimento deste.

Para a determinação da densidade virtual é necessário, como dados de entrada, as variáveis referentes ao diâmetro de cada classe de tamanho de grãos (d_i), a densidade de empacotamento de classe, individualmente (β_i), o volume de grãos referente a cada classe (y_i), e os valores referentes ao efeito de afastamento (a_{ij}) e o efeito parede (b_{ij}).

Para exemplificar a metodologia de cálculo, será usada a composição obtida a partir da areia grossa. Os valores correspondentes ao volume referente a cada classe e as densidades de empacotamento de cada classe estão disponíveis na tabela A.1.

Tabela B.1 – Dados de entrada para aplicação do modelo CPM

Classe (n=6)	d_i (μm)	Volume de cada classe (%)	y_i	β_i
1	2360	29,63	0,2963	0,499
2	1180	22,69	0,2269	0,492
3	600	17,19	0,1719	0,485
4	300	13,67	0,1367	0,465
5	150	10,58	0,1058	0,420
6	90	6,23	0,0623	0,385

Fonte: A autora

Sendo assim, pode-se calcular, o efeito de afastamento a_{ij} , dado pela Equação (5) e o efeito parede, dado pela Equação (6). Considerando, a classe i como dominante e classe j como as demais partículas. Foi calculada, de forma detalhada, os efeitos de interação para os coeficientes a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} , e posteriormente, os coeficientes b_{11} , b_{12} , b_{21} , b_{22} .

- Cálculo do efeito de afastamento a_{ij}

$$a_{11} = \sqrt{1 - (1 - 2360/2360)^{1,02}} = 1,00$$

$$a_{12} = \sqrt{1 - (1 - 1180/2360)^{1,02}} = 0,71$$

$$a_{21} = \sqrt{1 - (1 - 2360/1180)^{1,02}} = \notin R$$

$$a_{22} = \sqrt{1 - (1 - 1180/1180)^{1,02}} = 1,00$$

- Cálculo do efeito parede b_{ij}

$$b_{11} = 1 - \left(1 - \frac{2360}{2360}\right)^{1,50} = 1,00$$

$$b_{12} = 1 - \left(1 - \frac{2360}{1180}\right)^{1,50} = \cancel{R}$$

$$b_{21} = 1 - \left(1 - \frac{1180}{2360}\right)^{1,50} = 0,65$$

$$b_{22} = 1 - \left(1 - \frac{1180}{1180}\right)^{1,50} = 1,00$$

De forma análoga, pode-se calcular os demais coeficientes. Nas tabelas A.2 e A.3 estão os coeficientes, resultantes, do efeito de afastamento das composições que possuem 6 frações e da composição que possui 4 frações, respectivamente.

Nas tabelas A.4 e A.5 estão os coeficientes, resultantes, do efeito parede das composições que possuem 6 classes e da composição que possui 4 classes, respectivamente.

Tabela B.2 – Resultados do coeficiente a_{ij} , referente ao efeito de afastamento: Para composições que possui 6 classes.

a_{ij}	j						
	1	2	3	4	5	6	
I	1	1,00	0,71	0,51	0,36	0,25	0,20
	2	\cancel{R}	1,00	0,72	0,51	0,36	0,28
	3	\cancel{R}	\cancel{R}	1,00	0,71	0,50	0,39
	4	\cancel{R}	\cancel{R}	\cancel{R}	1,00	0,71	0,55
	5	\cancel{R}	\cancel{R}	\cancel{R}	\cancel{R}	1,00	0,78
	6	\cancel{R}	\cancel{R}	\cancel{R}	$\cancel{R}!$	\cancel{R}	1,00

Fonte: A autora

Tabela B.3 – Resultados do coeficiente a_{ij} , referente ao efeito de afastamento: Para composições que possui 4 classes.

A_{ij}	j				
	1	2	3	4	
i	1	1,00	0,71	0,50	0,39
	2	\cancel{R}	1,00	0,71	0,55
	3	\cancel{R}	\cancel{R}	1,00	0,78
	4	\cancel{R}	\cancel{R}	\cancel{R}	1,00

Fonte: A autora

Tabela B.4 – Resultados do coeficiente a_{ij} , referente ao efeito parede: Para composições que possui 6 classes.

b_{ij}		J					
		1	2	3	4	5	6
i	1	1,00	$\neq R$	$\neq R$	$\neq R$	$\neq R$	$\neq R$
	2	0,65	1,00	$\neq R$	$\neq R$	$\neq R$	$\neq R$
	3	0,36	0,66	1,00	$\neq R$	$\neq R$	$\neq R$
	4	0,18	0,36	0,65	1,00	$\neq R$	$\neq R$
	5	0,09	0,18	0,35	0,65	1,00	$\neq R$
	6	0,06	0,11	0,22	0,41	0,75	1,00

Fonte: A autora

Tabela B.5 – Resultados do coeficiente a_{ij} , referente ao efeito parede: Para composições que possui 4 classes.

b_{ij}		j			
		1	2	3	4
I	1	1,00	$\neq R$	$\neq R$	$\neq R$
	2	0,65	1,00	$\neq R$	$\neq R$
	3	0,35	0,65	1,00	$\neq R$
	4	0,22	0,41	0,75	1,00

Fonte: A autora

Observa-se que quando há combinação cujo diâmetros são iguais ($d_i = d_j$), o resultado obtido é igual a 1 (um), isso faz com que a diagonal principal das matrizes seja igual a 1,00. Esse resultado pode ser justificado pelo fato de que grãos com dimensões iguais não provocam efeito de afastamento ou efeito parede entre si. Nota-se, também, que para alguns dados obtidos de algumas combinações de classes não pertencem ao conjunto dos números reais ($\neq R$). Para o efeito de afastamento (a_{ij}) isso pode ser justificado quando $d_i < d_j$, ou seja, o efeito de afastamento só ocorre quando há ação de partículas menores sobre partículas maiores. Já para o efeito parede observa-se o fenômeno ao contrário, ou seja, $d_i > d_j$, isso quer dizer que o efeito parede ocorre devido a ação de partículas maiores sobre partículas menores.

Como os dados expostos pode-se determinar a densidade de empacotamento virtual, a partir da Equação (7), considerando em cada etapa de cálculo uma classe de grãos dominantes, como a composição granulométrica, em exemplo, possui 6 classes de grãos, serão calculadas 6 equações.

- Cálculo da densidade de empacotamento virtual (γ)

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - \left\{ \left[1 - a_{12} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_2} \right] \cdot y_2 + \left[1 - a_{13} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_3} \right] \cdot y_3 + \left[1 - a_{14} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_4} \right] \cdot y_4 + \left[1 - a_{15} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_5} \right] \cdot y_5 + \left[1 - a_{16} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_6} \right] \cdot y_6 \right\}}$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - \left[1 - \beta_2 + b_{21} \cdot \beta_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_1} \right) \right] \cdot y_1 - \left\{ \left[1 - a_{23} \cdot \frac{\beta_2}{\beta_3} \right] \cdot y_3 + \left[1 - a_{24} \cdot \frac{\beta_2}{\beta_4} \right] \cdot y_4 + \left[1 - a_{25} \cdot \frac{\beta_2}{\beta_5} \right] \cdot y_5 + \left[1 - a_{26} \cdot \frac{\beta_2}{\beta_6} \right] \cdot y_6 \right\}}$$

$$\gamma_3 = \frac{\beta_3}{1 - \left\{ \left[1 - \beta_3 + b_{31} \cdot \beta_3 \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_1} \right) \right] \cdot y_1 + \left[1 - \beta_3 + b_{32} \cdot \beta_3 \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_2} \right) \right] \cdot y_2 \right\} - \left\{ \left[1 - a_{34} \cdot \frac{\beta_3}{\beta_4} \right] \cdot y_4 + \left[1 - a_{35} \cdot \frac{\beta_3}{\beta_5} \right] \cdot y_5 + \left[1 - a_{36} \cdot \frac{\beta_3}{\beta_6} \right] \cdot y_6 \right\}}$$

$$\gamma_4 = \frac{\beta_4}{1 - \left\{ \left[1 - \beta_4 + b_{41} \cdot \beta_4 \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_1} \right) \right] \cdot y_1 + \left[1 - \beta_4 + b_{42} \cdot \beta_5 \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_2} \right) \right] \cdot y_2 + \left[1 - \beta_4 + b_{43} \cdot \beta_5 \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_3} \right) \right] \cdot y_3 \right\} - \left\{ \left[1 - a_{45} \cdot \frac{\beta_4}{\beta_5} \right] \cdot y_5 + \left[1 - a_{46} \cdot \frac{\beta_4}{\beta_6} \right] \cdot y_6 \right\}}$$

$$\gamma_5 = \frac{\beta_5}{1 - \left\{ \left[1 - \beta_5 + b_{51} \cdot \beta_5 \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_1} \right) \right] \cdot y_1 + \left[1 - \beta_5 + b_{52} \cdot \beta_5 \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_2} \right) \right] \cdot y_2 + \left[1 - \beta_5 + b_{53} \cdot \beta_5 \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_3} \right) \right] \cdot y_3 + \left[1 - \beta_5 + b_{54} \cdot \beta_5 \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_4} \right) \right] \cdot y_4 \right\} - \left\{ \left[1 - a_{56} \cdot \frac{\beta_5}{\beta_6} \right] \cdot y_6 \right\}}$$

$$\gamma_6 = \frac{\beta_6}{1 - \left\{ \left[1 - \beta_6 + b_{61} \cdot \beta_6 \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_1} \right) \right] \cdot y_1 + \left[1 - \beta_6 + b_{62} \cdot \beta_6 \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_2} \right) \right] \cdot y_2 + \left[1 - \beta_6 + b_{63} \cdot \beta_6 \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_3} \right) \right] \cdot y_3 + \left[1 - \beta_6 + b_{64} \cdot \beta_6 \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_4} \right) \right] \cdot y_4 + \left[1 - \beta_6 + b_{65} \cdot \beta_6 \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_5} \right) \right] \cdot y_5 \right\}}$$

Substituindo os valores correspondentes nas equações, tem-se:

$$y^1 = \frac{0.499}{1 - \left\{ \left[1 - 0.71 \cdot \frac{0.499}{0.492} \right] \cdot 0.2269 + \left[1 - 0.51 \cdot \frac{0.499}{0.485} \right] \cdot 0.1719 + \left[1 - 0.36 \cdot \frac{0.499}{0.465} \right] \cdot 0.1367 + \left[1 - 0.25 \cdot \frac{0.499}{0.420} \right] \cdot 0.1058 + \left[1 - 0.20 \cdot \frac{0.499}{0.385} \right] \cdot 0.0623 \right\}} = 0,767$$

$$y^2 = \frac{0.492}{1 - \left[1 - 0.492 + 0.65 \cdot 0.492 \cdot \left(1 - \frac{1}{0.499} \right) \right] \cdot 0.2963 - \left\{ \left[1 - 0.72 \cdot \frac{0.492}{0.485} \right] \cdot 0.1719 + \left[1 - 0.51 \cdot \frac{0.492}{0.465} \right] \cdot 0.1367 + \left[1 - 0.36 \cdot \frac{0.492}{0.420} \right] \cdot 0.1058 + \left[1 - 0.28 \cdot \frac{0.492}{0.385} \right] \cdot 0.0623 \right\}} = 0,671$$

$$y^3 = \frac{0.485}{1 - \left\{ \left[1 - 0.485 + 0.36 \cdot 0.485 \cdot \left(1 - \frac{1}{0.499} \right) \right] \cdot 0.2963 + \left[1 - 0.485 + 0.66 \cdot 0.485 \cdot \left(1 - \frac{1}{0.492} \right) \right] \cdot 0.2269 \right\} - \left\{ \left[1 - 0.71 \cdot \frac{0.485}{0.465} \right] \cdot 0.1367 + \left[1 - 0.50 \cdot \frac{0.485}{0.420} \right] \cdot 0.1058 + \left[1 - 0.39 \cdot \frac{0.485}{0.385} \right] \cdot 0.0623 \right\}} = 0,650$$

$$y^4 = \frac{0.465}{1 - \left\{ \left[1 - 0.465 + 0.18 \cdot 0.465 \cdot \left(1 - \frac{1}{0.499} \right) \right] \cdot 0.2963 + \left[1 - 0.465 + 0.36 \cdot 0.465 \cdot \left(1 - \frac{1}{0.492} \right) \right] \cdot 0.2269 + \left[1 - 0.465 + 0.65 \cdot 0.465 \cdot \left(1 - \frac{1}{0.485} \right) \right] \cdot 0.1719 \right\} - \left\{ \left[1 - 0.71 \cdot \frac{0.465}{0.420} \right] \cdot 0.1058 + \left[1 - 0.55 \cdot \frac{0.465}{0.385} \right] \cdot 0.0623 \right\}} = 0,663$$

$$y^5 = \frac{0.420}{1 - \left\{ \left[1 - 0.420 + 0.09 \cdot 0.420 \cdot \left(1 - \frac{1}{0.499} \right) \right] \cdot 0.2963 + \left[1 - 0.420 + 0.18 \cdot 0.420 \cdot \left(1 - \frac{1}{0.492} \right) \right] \cdot 0.2269 + \left[1 - 0.420 + 0.35 \cdot 0.420 \cdot \left(1 - \frac{1}{0.485} \right) \right] \cdot 0.1719 + \left[1 - 0.420 + 0.65 \cdot 0.420 \cdot \left(1 - \frac{1}{0.465} \right) \right] \cdot 0.1367 \right\} - \left\{ \left[1 - 0.78 \cdot \frac{0.420}{0.385} \right] \cdot 0.0623 \right\}} = 0,691$$

$$y^6 = \frac{0.385}{1 - \left\{ \left[1 - 0.385 + 0.06 \cdot 0.385 \cdot \left(1 - \frac{1}{0.499} \right) \right] \cdot 0.2963 + \left[1 - 0.385 + 0.11 \cdot 0.385 \cdot \left(1 - \frac{1}{0.492} \right) \right] \cdot 0.2269 + \left[1 - 0.385 + 0.22 \cdot 0.385 \cdot \left(1 - \frac{1}{0.485} \right) \right] \cdot 0.1719 + \left[1 - 0.385 + 0.41 \cdot 0.385 \cdot \left(1 - \frac{1}{0.465} \right) \right] \cdot 0.1367 + \left[1 - 0.385 + 0.75 \cdot 0.385 \cdot \left(1 - \frac{1}{0.420} \right) \right] \cdot 0.1058 \right\}} = 0,737$$

$\gamma = \text{Min}(\gamma_i)$, e este corresponde ao $\gamma_3 = 0,650$

- Cálculo da densidade real (Φ)

A densidade real foi calculada de acordo com a Equação (8). Para o cálculo é necessário aplicar o valor referente a energia de compactação utilizada (K), nesse estudo, adotou-se $K = 4,1$, pois corresponde ao processo de lançamento simples da amostra.

A densidade real foi calculada utilizando o software Maple2016.

$$K = \sum_{i=1}^6 \frac{y_i/\beta_i}{1/\Phi-1/\gamma_i} = \frac{y_1/\beta_1}{1/\Phi-1/\gamma_1} + \frac{y_2/\beta_2}{1/\Phi-1/\gamma_2} + \frac{y_3/\beta_3}{1/\Phi-1/\gamma_3} + \frac{y_4/\beta_4}{1/\Phi-1/\gamma_4} + \frac{y_5/\beta_5}{1/\Phi-1/\gamma_5} + \frac{y_6/\beta_6}{1/\Phi-1/\gamma_6}$$

$$4,1 = \frac{\left(\frac{0.2963}{0.499}\right)}{\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{0.7668}\right)} + \frac{\left(\frac{0.2269}{0.492}\right)}{\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{0.6713}\right)} + \frac{\left(\frac{0.1719}{0.485}\right)}{\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{0.6506}\right)} + \frac{\left(\frac{0.1367}{0.465}\right)}{\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{0.6606}\right)} + \frac{\left(\frac{0.1058}{0.420}\right)}{\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{0.6919}\right)} + \frac{\left(\frac{0.0623}{0.385}\right)}{\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{0.7366}\right)}$$

A equação exibida, acima, é uma equação de 6º grau por representar 6 classes de grãos, dessa forma ela nos fornecerá 6 raízes. A densidade de empacotamento real (Φ) é a raiz $\in \mathbb{R}$ de menor valor, nesse caso corresponde ao valor de $(\Phi) = 0,509$.

De forma análoga, foram calculadas as densidades de empacotamento virtual e real, para as outras composições.

APÊNDICE C – RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A tabela que seguem estão apresentados os valores relativos a resistência à compressão axial nas idades de 3, 7 e 28 dias, seguido dos seu desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela C.1 – Resistência à compressão na idade de 3 dias.

Composição granulométrica	3 dias		
	Resistencia à compressão axial (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação
Areia fina	6,08	0,35	5,69
Areia grossa	5,16	0,08	1,55
Pó de brita	7,33	0,18	2,46
45% A.F. e 55% P.B.	5,23	0,49	9,39
30% A.F. e 70% P.B.	3,14	0,28	8,95

Fonte: A autora

Tabela C.2 – Resistência à compressão na idade de 7 dias.

Composição granulométrica	7 dias		
	Resistencia à compressão axial (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação
Areia fina	13,57	1,27	9,34
Areia grossa	13,21	0,70	5,30
Pó de brita	14,43	2,00	13,87
45% A.F. e 55% P.B.	14,11	1,15	8,14
30% A.F. e 70% P.B.	10,15	0,40	3,95

Fonte: A autora

Tabela C.3 – Resistência à compressão na idade de 28 dias.

Composição granulométrica	28 dias		
	Resistencia à compressão axial (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação
Areia fina	26,56	0,96	3,61
Areia grossa	24,20	1,20	4,97
Pó de brita	25,60	1,09	4,27
45% A.F. e 55% P.B.	28,06	0,91	3,26
30% A.F. e 70% P.B.	23,79	1,28	5,38

Fonte: A autora

APÊNDICE D – RESULTADOS DA POROSIDADE DAS ARGAMASSAS

As tabelas que seguem estão apresentados os valores relativos a porosidades das argamassas nas idades de 3, 7 e 28 dias, seguido dos seus desvios padrão e o coeficiente de variação.

Tabela D.1 – Porosidade das argamassas aos 3 dias.

Composição granulométrica	3 dias		
	Porosidade (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de variação
Areia fina	30,03	1,32	4,38
Areia grossa	32,08	1,58	4,93
Pó de brita	32,89	0,77	2,34
45% A.F. e 55% P.B.	30,84	2,19	7,10
30% A.F. e 70% P.B.	31,68	1,22	3,84

Fonte: A autora

Tabela D.2 – Porosidade das argamassas aos 7 dias

Composição granulométrica	7 dias		
	Porosidade (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de variação
Areia fina	29,94	1,71	5,72
Areia grossa	30,48	1,75	5,75
Pó de brita	31,02	2,21	7,12
45% A.F. e 55% P.B.	28,65	0,95	3,33
30% A.F. e 70% P.B.	30,76	0,58	1,88

Fonte: A autora

Tabela D.3 – Porosidade das argamassas aos 28 dias.

Composição granulométrica	28 dias		
	Porosidade (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de variação
Areia fina	26,57	0,73	2,74
Areia grossa	27,03	0,99	3,67
Pó de brita	27,91	1,10	3,94
45% A.F. e 55% P.B.	27,02	1,48	5,50
30% A.F. e 70% P.B.	26,97	2,19	8,13

Fonte: A autora