

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**LARISSA DE ANDRADE COMANN**

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO EM  
SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO NATURAL E SUA INFLUÊNCIA NA  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO  
2017**

**LARISSA DE ANDRADE COMANN**

**ANÁLISE DO USO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO EM  
SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO NATURAL E SUA INFLUÊNCIA NA  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.  
Orientadora Prof. Msc. Eloise Langaro.

PATO BRANCO  
2017

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS E CONCRETO EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO NATURAL E SUA INFLUÊNCIA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

**Larissa de Andrade Comann**

No dia 24 de novembro de 2017, às 16h30min, na sala Q002 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após arguição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº 46-TCC/2017.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Msc. ELOISE APARECIDA LANGARO (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof. Dr. VOLMIR SABBI (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Dr. MARIO ARLINDO PAZ IRRIGARAY (DACOC/UTFPR-PB)

## AGRADECIMENTOS

Durante a realização desse trabalho e no decorrer da faculdade muitas pessoas me ajudaram e tornaram o caminho um pouco mais fácil. Sendo assim, posso dizer que esse estudo é resultado da influência de todas essas pessoas.

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha família, principalmente meus pais que nunca mediram esforços por mim, e agradeço também as minhas irmãs, que com certeza são as pessoas mais importantes da minha vida.

Um agradecimento especial à minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Msc<sup>a</sup>. Eloíse Aparecida Langaro por todas as conversas, as correrias, as reuniões, por toda a ajuda e principalmente por todo conhecimento e calma transmitidos.

Agradeço também a Claudia Baldin, técnica do laboratório de materiais da UTFPR-PB, juntamente as estagiárias Karolyne e Jesiane, por todo a auxílio prestado e todas as noites em que fizeram hora extra no laboratório para eu poder realizar esta pesquisa. Ao colega e mestrando Roberto Carneiro, por todo o auxílio prestado no canteiro de obras.

Estendo meus agradecimentos a todos os meus amigos que sempre estiveram do meu lado, aos que encontrei no começo do curso e aos que nos encontramos na metade do caminho, meu muito obrigado por tudo.

## RESUMO

COMANN, Larissa de Andrade. **Análise do uso de agregados reciclados de concreto em substituição ao agregado natural e sua influência na resistência à compressão.** 2017.96p. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Pato Branco, 2017.

Vista como uma das maiores geradoras de resíduos sólidos, a construção civil vem buscando alternativas cada vez mais voltadas para sustentabilidade. Dessa maneira pensando na redução de entulhos gerados por esse setor, vem sendo desenvolvida pesquisas que tratam da reutilização de materiais que eram descartados, para geração de novos. Para a produção de concretos a partir de agregados reciclados é necessário atingir uma resistência boa para uso, ligado ao fator resistência existe também a porosidade do concreto. Um dos fatores que interfere na resistência é a relação água/cimento, sendo assim quanto maior a relação água/cimento menor é a resistência. Este consumo de água está relacionado ao índice de vazios do concreto no estado endurecido, ou seja, quanto mais água o concreto consumir, maior será a influência no índice de vazios. Isso pode ser explicado, pois no processo de cura, bolhas de ar incorporadas ficam aprisionadas no interior da massa do concreto, em geral interligadas umas às outras, facilitando assim a penetração de agentes agressivos e conseqüentemente criando pontos de fragilidade. Concretos reciclados e empregados como agregados, absorvem mais água que concretos convencionais, tornando-o menos resistentes, por isso é necessário todo um estudo na incorporação desses agregados. O presente trabalho tem por objetivo a substituição do agregado graúdo natural pelo agregado reciclado na produção de concretos, avaliando assim sua resistência mecânica e porosidade. Algumas porcentagens de utilização foram avaliadas e mostraram que concretos produzidos somente com agregados graúdos reciclados não atingem resistência significativa se comparados com o concreto feito de forma convencional. Diante disso, buscou-se melhorar sua incorporação utilizando um método de empacotamento de partículas, que visava trabalhar com várias granulometrias diferentes, para preencher os vazios com partículas cada vez menores, sendo possível diminuir sua porosidade e conseqüentemente aumentar sua resistência.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade. Concreto. Agregado reciclado. Empacotamento de partículas.

## ABSTRACT

COMANN, Larissa de Andrade. **Analysis of the use of recycled aggregates of concrete to replace the natural aggregate and its influence on the compressive strength.** 2017. 96p. Civil Engineering Course Completion Work – Academic Construction Department, Federal Technological University of Paraná – UTFPR, Pato Branco.

Viewed as one of the largest solid waste generators, a construction company has been looking for alternatives that are increasingly focused on sustainability. In this way, thinking about the reduction of enthusiasts generated by this sector, researches have been developed that deal with the reuse of materials that are discarded, for the generation of new ones. For a production of concrete from recycled aggregates and necessary for a good quality for use, linked to the resistance factor there is also the porosity of the concrete. One of the factors that interfere in the resistance and a relation water / cement, thus being greater the relation water / cement smaller and the resistance. This water consumption is related to the void index of the concrete without hardened state, that is, the more water the concrete consumes, the greater will be an influence without voids index. This can be explained because there is no curing process, incorporated air bubbles are trapped without interior of the mass of the concrete, in general interconnected to each other, facilitating a penetration of aggressive agents and consequently creating fragility points. Recycled concrete and used as aggregates, absorb more water than conventional concrete, making it less resistant, so a whole study is needed on the incorporation of aggregates. The present work aims at replacing the natural aggregate by recycled aggregate in concrete production, thus evaluating its mechanical strength and porosity. The percentages of use were evaluated and presented with concretes produced only with products aggregated without prescription. In view of this, it was sought to improve its incorporation using a particle packing method, which aimed to work with several different particle sizes, to solve the voids with smaller and smaller particles, being possible to reduce its porosity and consequently to increase its resistance.

**Keywords:** Sustainability. Concrete. Recycled aggregate. Particle Packing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estimativa da geração de RCC em alguns países .....	24
Figura 2 - Quantidade de RCC coletados em 2009 e 2010 nas regiões do país .....	25
Figura 3 - Diagrama das atividades a serem realizadas na pesquisa .....	36
Figura 4 - Britador .....	40
Figura 5 - Agregado natural Brita 1 .....	39
Figura 6 – Agregado reciclado Brita 1 .....	41
Figura 7 - Pré-molhagem de agregados reciclados .....	45
Figura 8 - Ensaio de abatimento do concreto .....	46
Figura 10 - Equipamento utilizado para romper os corpos de prova.....	47
Figura 11 - Determinação da massa submersa dos corpos de prova .....	48
Figura 12 - Corpos de prova na estufa .....	48
Figura 13 - Envolvimento de partículas de cimento por partículas mais finas.....	49
Figura 14 – Corpos de prova após rompimento .....	52
Figura 15 - Corpo de prova aberto .....	53
Figura 16 - CP com agregado 100% natural .....	54
Figura 17 – CP com agregado reciclado .....	55

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica areia.....	38
Gráfico 2 - Distribuição granulométrica brita 1.....	39
Gráfico 3 - Distribuição granulométrica brita 1 reciclada .....	42
Gráfico 4 - Comparativo da distribuição granulométrica brita 1 natural e reciclada ..	42
Gráfico 5 - Distribuição granulométrica brita 0 reciclada .....	43
Gráfico 6 - Resultado do ensaio de abatimento.....	51
Gráfico 7 - Resistência do concreto .....	52
Gráfico 8 - Comparação entre absorção e porosidade .....	55
Gráfico 9 - Curva granulométrica ideal .....	57
Gráfico 10 - Curva granulométrica brita 1, areia e ideal .....	58
Gráfico 11 - Curva da soma dos materiais e curva ideal .....	58
Gráfico 12 - Curva granulométricas brita 1, brita 0, areia e ideal .....	59
Gráfico 13 - Curva da soma dos materiais e curva ideal .....	59
Gráfico 14 - Aumento da resistência dos concretos após empacotamento .....	65
Gráfico 15 - Absorção e porosidade após empacotamento .....	66
Gráfico 16 - Comparativo dos traços .....	67



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Módulo de finura e dimensão máxima característica dos agregados.....	38
Tabela 2 - Massa específica agregados.....	38
Tabela 3 - Módulo de finura e dimensão máxima característica agregado reciclado	43
Tabela 4 - Massa específica agregados reciclados .....	43
Tabela 5 - Porcentagens da variação de agregados no traço .....	44
Tabela 6 - Resultados do ensaio de abatimento .....	51
Tabela 7 - Resistência à compressão do concreto .....	52
Tabela 8 - Massa específica do concreto .....	54
Tabela 9 - Absorção e índice de vazios.....	54
Tabela 10 – Porcentagem ideal do modelo de Funk e Dinger .....	56
Tabela 11 - Cálculo da porcentagem ideal do modelo para primeiro empacotamento .....	60
Tabela 12 - Porcentagem de material para utilizar no primeiro empacotamento .....	60
Tabela 13 - Cálculo da porcentagem ideal do modelo para segundo empacotamento .....	61
Tabela 14 - Porcentagem de material para utilizar no segundo empacotamento .....	61
Tabela 15 - Porcentagens encontradas pelo método de Funk e Dinger .....	61
Tabela 16 - Parâmetros para primeiro empacotamento pelo modelo de Toufar .....	62
Tabela 17 - Empacotamento máximo pelo modelo de Toufar .....	62
Tabela 18 - Parâmetros para segundo empacotamento pelo modelo de Toufar .....	63
Tabela 19 - Empacotamento máximo pelo modelo de Toufar .....	63
Tabela 20 - Resistência à compressão dos concretos após empacotamento .....	64
Tabela 21 - Massa específica após empacotamento .....	65
Tabela 22 - Absorção e porosidade após empacotamento .....	65
Tabela 23 - Comparação de resultados .....	66
Tabela 24 - Granulometria areia.....	79
Tabela 25 - Granulometria brita natural 1 .....	79
Tabela 26 - Granulometria brita 1 reciclada .....	80
Tabela 27 - Granulometria brita 0 reciclada .....	80
Tabela 28 - Resultados do ensaio de resistência a compressão do concreto .....	81
Tabela 29 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para primeiro empacotamento .....	82
Tabela 30 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para primeiro empacotamento .....	82
Tabela 31 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para primeiro empacotamento .....	82
Tabela 32 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para primeiro empacotamento .....	83
Tabela 33 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para primeiro empacotamento .....	83
Tabela 34- Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para primeiro empacotamento .....	83

Tabela 35 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para primeiro empacotamento .....	84
Tabela 36 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para primeiro empacotamento .....	84
Tabela 37 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	85
Tabela 38 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	85
Tabela 39 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	85
Tabela 40 -Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	86
Tabela 41 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	86
Tabela 42 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	86
Tabela 43 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	87
Tabela 44 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	87
Tabela 45 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	87
Tabela 46 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	88
Tabela 47 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	88
Tabela 48 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	88
Tabela 49 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	89
Tabela 50 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	89
Tabela 51 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	89
Tabela 52- Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	90
Tabela 53 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	90
Tabela 54 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	90
Tabela 55 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento.....	91
Tabela 56 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento .....	92

Tabela 57 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento .....	92
Tabela 58 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento .....	92
Tabela 59 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento .....	92
Tabela 60 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento .....	92
Tabela 61 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento .....	93
Tabela 62 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento .....	93
Tabela 63 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento .....	93
Tabela 64 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento .....	93
Tabela 65 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento .....	93
Tabela 66 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento .....	93
Tabela 67 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento .....	94
Tabela 68- Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento .....	94
Tabela 69 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento .....	94
Tabela 70 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento .....	94
Tabela 71 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento .....	94
Tabela 72 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento .....	95
Tabela 73 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento .....	95
Tabela 74 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento .....	95
Tabela 75 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento .....	95
Tabela 76 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento .....	95
Tabela 77 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento .....	96
Tabela 78 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento .....	96

Tabela 79 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento .....	96
Tabela 80 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento .....	96

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>4</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>6</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.1.1 Objetivo Geral .....	16
1.1.2 Objetivos Específicos: .....	16
1.2 JUSTIFICATIVA .....	16
<b>2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO</b> .....	<b>18</b>
2.1 CONCRETO CONVENCIONAL .....	18
2.1.1 Agregados.....	18
2.1.2 Relação água/cimento.....	19
2.1.3 Cura do concreto.....	20
2.1.4 Resistência característica do concreto (fck) .....	20
2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	21
2.2.1 Trabalhabilidade.....	21
2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	21
2.3.1 Resistência do Concreto .....	21
2.3.2 Porosidade .....	22
2.3.3 Durabilidade do Concreto.....	22
2.4 RESÍDUOS GERADOS PELA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	23
2.5 AGREGADOS RECICLADOS .....	25
2.5.1 Processo de produção de agregados reciclados e sua granulometria .....	26
2.6 CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS .....	27
2.6.1 Relação água/cimento.....	28
2.7 PROPRIEDADES DO CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS .....	28
2.7.1 Resistência .....	28
2.7.2 Porosidade .....	29
2.7.3 Durabilidade de concretos com agregados reciclados.....	29
2.8 MÉTODOS PARA MELHORAR O USO DOS AGREGADOS RECICLADOS EM CONCRETOS .....	30
2.8.1 Empacotamento de Partículas .....	30

2.8.1.1 Modelo de Funk e Dinger .....	31
2.8.1.2 Modelo de Toufar .....	32
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>35</b>
3.1 MATERIAIS.....	37
3.1.1 Cimento.....	37
3.1.2 Agregado natural.....	37
3.1.3 Agregado graúdo reciclado .....	39
3.2 MÉTODOS.....	44
3.2.1 Ensaio de abatimento (Slump Test) .....	46
3.2.2 Ensaio de resistência à compressão .....	46
3.2.3 Ensaio de absorção e porosidade .....	47
3.2.4 Melhoramento da resistência do concreto utilizando empacotamento de partículas .....	48
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>51</b>
4.1 ENSAIO DE ABATIMENTO (SLUMP TEST) .....	51
4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	52
4.3 ENSAIO DE ABSORÇÃO E POROSIDADE.....	54
4.4 EMPACOTAMENTO DE PARTICULAS .....	56
4.4.1 Método de Funk e Dinger .....	56
4.4.2 Modelo de Toufar .....	61
4.5 ENSAIOS CURVA GRANULOMÉTRICA OTIMIZADA .....	64
4.5.1 Resistência à compressão .....	64
4.5.2 Absorção e Porosidade .....	65
4.6 COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS APÓS APLICAR O MÉTODO DE FUNK E DINGER ENTRE TODOS OS TRAÇOS.....	66
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE A – Caracterização dos materiais .....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE B– Valores de média, desvio padrão e variância dos resultados de resistência a compressão .....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE C – Cálculos modelo Funk e Dinger para Brita 1 e Areia .....</b>	<b>82</b>
<b>APÊNDICE D – Cálculos modelo Funk e Dinger para Brita 1, Brita 0 e Areia ....</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICE E – Cálculos modelo Toufar para Brita 1 e Areia.....</b>	<b>92</b>
<b>APÊNDICE F – Cálculos modelo Toufar para Brita 1, Brita 0 e Areia .....</b>	<b>94</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A partir da 2ª guerra mundial, houve a primeira aplicação relevante de entulhos reciclados provenientes dos escombros dos edifícios demolidos que foram britados e transformados em agregados e depois empregados como novos materiais para construção (LEVY, 2001).

A construção civil produz grandes porcentagens de resíduos sólidos e a destinação irregular desses resíduos vem gerando diversos problemas principalmente na questão ambiental em todo o mundo. O assunto tem ganhado um grande destaque, pois vem se estudando cada vez mais a incorporação de práticas de sustentabilidade, principalmente para restos de concreto, que podem ser sobras das concreteiras, estruturas pré-moldadas que não foram bem-sucedidas, ou até mesmo demolição de estruturas que tem como material principal o concreto (FERREIRA, 2014).

Como é abordado por Leite (2001), o mercado da construção civil, é visto como uma das melhores alternativas para consumir materiais reciclados. Essa 'reciclagem' do concreto, proporciona melhorias significativas do ponto de vista ambiental e financeiro, além de introduzir no mercado um novo material com grande potencial de uso, ou seja, transforma o entulho novamente em matéria-prima. Para Patto (2006) a principal contribuição é mostrar que a reciclagem de resíduos de concreto pode auxiliar na produção de um novo material com um custo mais baixo, podendo vir a colaborar também para a construção de edificações mais baratas.

Conhecer as características do concreto com agregado reciclado e realizar estudos se faz necessário, uma vez que a importância de se reutilizar o concreto e empregá-lo em novos materiais está ligada diretamente à sustentabilidade e economia, tendo em vista que utiliza menos matéria-prima e de certa forma cria um novo material, com características semelhantes ao original. Sendo assim, visando a obtenção de concretos com agregados provenientes da reciclagem de outros concretos, o presente estudo visa encontrar a melhor quantidade de agregado reciclado para que o concreto atinja propriedades semelhantes ao concreto convencional, por isso existe a necessidade de discorrer sobre algumas técnicas de melhoramento das características deste agregado que está sendo reutilizado, determinando assim a viabilidade técnica e econômica da aplicação de concretos reciclados na construção civil.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da utilização de agregados reciclados de concreto, como substituto parcial e total do agregado graúdo natural, nas propriedades de concretos convencionais.

### 1.1.2 Objetivos Específicos:

- Caracterizar os agregados de concreto reciclado;
- Analisar diferentes proporções de substituição do agregado natural pelo reciclado para a produção de concretos;
- Avaliar a influência do teor de substituição dos agregados naturais por reciclados nas propriedades do concreto no estado fresco (trabalhabilidade) e endurecido (resistência à compressão e porosidade);
- Estudar um método de otimização da curva granulométrica e empacotamento de partículas a fim de melhorar a utilização do agregado reciclado e produzir concretos reciclados com propriedades semelhantes às do concreto convencional.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A construção civil faz parte do grupo de atividades que mais provocam impactos ambientais e uma das maiores geradoras de resíduos (LAURITZEN, 1994). A destinação irregular do resíduo de construção e demolição (RCD) é um problema em todo o mundo, essa destinação é uma das causas de danos ambientais em áreas urbanas, sendo estes jogados em terrenos baldios, cursos d'água ou beiras de estradas. De acordo com o IBGE (2015), apenas 5% das cidades brasileiras possuem usinas de destinação e reciclagem para o RCD, e sem essa destinação correta, a solução mais adequada seria a própria indústria da construção civil, reutilizar pelo menos parte desses materiais.

A importância da reciclagem de entulhos de concreto está relacionada na utilização de práticas sustentáveis que acompanham o crescimento global pensando no avanço social e ao mesmo tempo minimizando os possíveis impactos ambientais.



Essa reciclagem pode poupar florestas, reduzir a extração de pedras de pedreiras sob arbustos e grandes áreas verdes, poupar também a água, evitando assim que o entulho seja descartado em rios, riachos, represas e mares e ainda gera trabalho e renda (SILVA, 2006).

Patto (2006) afirma que a principal contribuição é mostrar que a reciclagem de concretos, pode auxiliar na produção de materiais de baixo custo, colaborando assim para a construção de habitações mais baratas. Sendo assim relevante pesquisar, pois a partir da reciclagem de concretos é possível se obter concretos de agregados reciclados com características próximas do concreto convencional.

Dentre os vários tipos de resíduos da construção civil, os resíduos de concreto são os que possuem um dos maiores potenciais de reutilização, devido principalmente ao conhecimento de suas características básicas (fck, idade, etc), e seu menor grau de contaminação por outros materiais (GONÇALVES, 2001).

As maneiras mais tradicionais de utilização do agregado reciclado, são em materiais sem função estrutural, como em argamassas de assentamento e revestimento, contrapisos, reforço de base, sub-base e subleito de pavimentos e, correção topográfica de terrenos. No entanto, algumas indústrias, ou mesmo as usinas de reciclagem, também produzem com os agregados reciclados artefatos como: blocos de vedação, contramarcos e vergas para janelas, vigas para lajes pré-moldadas e elementos decorativos (MIRANDA, 2005).

Como muitos traços já foram estudados com diferentes análises e conclusões, este trabalho, objetiva originalmente, encontrar a porcentagem de agregado reciclado que mais se adequa para a utilização deste concreto reciclado, destacando qual seria sua melhor aplicabilidade. E ao fim do estudo, com o traço que obteve melhor desempenho, buscar algum tratamento no agregado que proporcione um melhoramento nas suas propriedades, como o método de empacotamento de partículas.

## 2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Nos itens a seguir são apresentadas contribuições teóricas sobre o tema pesquisado e com o objetivo de conceituar determinados tópicos que se fazem necessários para entendimento da pesquisa. Esses tópicos estão relacionados aos problemas ambientais gerados pela construção civil. Serão elencados também definições, quantificação, origem e características dos agregados provenientes de concretos reciclados, e por fim, métodos alternativos que buscam um melhoramento do agregado para aumentar a resistência do concreto reciclado.

### 2.1 CONCRETO CONVENCIONAL

O concreto surgiu da necessidade de aliar a durabilidade de materiais, e suas vantagens estão ligadas ao fato do material composto poder assumir qualquer forma, com rapidez e facilidade, sendo assim o material mais utilizado na construção civil. O concreto normalmente feito da mistura de cimento Portland com areia, pedra e água (MEHTA;MONTEIRO, 2008).

Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2006), concreto pode ser definido como o material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados graúdos e miúdos, e água, com ou sem incorporação de outros componentes como aditivos.

Concreto hidráulico é um material obtido através da mistura de um aglomerante com um ou mais materiais inertes e água. Logo após ser misturado, deve oferecer condições tais de plasticidade que facilitem as operações de manuseio indispensáveis ao lançamento nas formas, adquirindo, com o tempo, pelas reações que então se processarem entre aglomerante e água, coesão e resistência (PETRUCCI, 2005).

#### 2.1.1 Agregados

O agregado pode ser definido como um componente inerte que desempenha a função de material de enchimento e resistente, constituído por partículas que devem ser cimentadas entre si pela pasta, e usualmente ocupa entre 60% e 80% do volume total do concreto (GIAMMUSSO, 1992).

Neville e Brooks (2013) também consideram que aproximadamente  $\frac{3}{4}$  do volume de concreto são ocupados pelos agregados, então eles desempenham uma importância significativa, sendo necessário existir qualidade do material. Os agregados não só limitam a resistência do concreto, como também suas propriedades afetam significativamente a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto.

A granulometria do agregado usado no concreto pode variar muito, dependendo do tamanho da partícula. Basicamente são divididos em agregado miúdo, com dimensões não maior que 4,8mm, como por exemplo a areia; e agregado graúdo, com dimensões maiores que 4,8 mm, como por exemplo britas (NEVILLE, 1997).

Se tratando da resistência mecânica do agregado, em geral é sempre maior que a resistência mecânica do próprio concreto. Já a porosidade, que interfere diretamente na consistência e resistência do concreto, deve ser uma característica conhecida do agregado, pois os minerais que formam o agregado podem ter vazios internos provocando uma absorção de água (GIAMMUSSO, 1992).

O agregado influencia diretamente na resistência do concreto, pois agregados com propriedades indesejáveis podem não apenas produzir um concreto pouco resistente, mas também pode comprometer o desempenho estrutural do mesmo (NEVILLE, 1997).

### 2.1.2 Relação água/cimento

A água tem um papel de destaque dentro do concreto, e a relação entre a massa da água e a massa do cimento dentro de uma mistura recebeu o nome: fator água cimento ( $a/c$ ). Pode-se dizer que este fator é a base para a definição de todas as misturas compostas com cimento e água, devendo ser muito bem compreendido por todos aqueles que trabalham com o concreto, pois tem influência na resistência (NEVILLE, 1997).

A quantidade de água empregada deve ser estritamente necessária para envolver os grãos, que permita a hidratação e cristalização do cimento. Deve-se ressaltar também, que a relação água/cimento determina a porosidade da pasta de cimento endurecida, em qualquer estágio da hidratação e quando o concreto está plenamente adensado, considera-se sua resistência como inversamente proporcional à esta relação (NEVILLE, 1997).

Conforme Dantas (2012), apesar de todos os materiais serem importantes, a água merece um cuidado especial “Quanto mais água você adiciona, mais fraco fica o concreto e mais ele irá se retrair e fissurar”. Porém, muitas vezes, na prática isso é ignorado e simplesmente se adiciona água em quantidades não calculadas, para tentar melhorar a trabalhabilidade.

A relação a/c, é definida como a razão entre duas substâncias, e geralmente gira em torno de valores entre 0,4 e 0,7. A NBR 7212 (ABNT, 2012), explicita que ao verificar que o concreto apresenta abatimento dentro da classe de consistência especificada, não se admite adição suplementar de água. Ou seja, não admite que a quantidade de água adicionada ao concreto ultrapasse a prevista na dosagem.

### 2.1.3 Cura do concreto

A cura do concreto, tem o objetivo de evitar uma evaporação antecipada da água necessária a hidratação do cimento. Algumas condições, como temperatura e umidade, interferem nas propriedades do concreto endurecido (PETRUCCI, 2005).

Para o prosseguimento das reações de hidratação, é necessário que a umidade relativa dos poros do concreto permaneça igual ou superior a 80%. Isso raramente é conseguido em um ambiente natural, devido à incidência de ventos, variações de temperatura, diferenças entre as temperaturas do ar e do concreto, entre outros fatores, fazendo-se praticamente indispensáveis procedimentos artificiais de cura (NEVILLE, 1997).

Vários tipos de cura podem ser empregados como: manter as peças imersas em água, molhar continuamente as peças com dispositivos apropriados, cobrir as peças com sacos de aniagem mantidos sempre úmidos, manter as peças nas fôrmas, entre outros (PETRUCCI, 2005).

### 2.1.4 Resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ )

Chama-se de  $f_{ck}$  a resistência característica do concreto à compressão, que é a resistência adotada para fins de cálculo, onde se admite a probabilidade da ocorrência de apenas 5% de resistência à compressão menor do que ela. O concreto de acordo com seu  $f_{ck}$  ficará mais barato ou mais caro, e a necessidade será determinada no momento do cálculo estrutural que será feito pelo engenheiro (NEVILLE; BROOKS, 2013).

## 2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

### 2.2.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é umas das principais propriedades do concreto fresco, levando em conta a execução de estruturas e lançamento de concreto. Podendo ser definida como a propriedade que facilita a mistura, aplicação e acabamento em uma condição íntegra e homogênea do concreto (CARASEK, 2004).

Os fatores que interferem a trabalhabilidade são: a consistência, proporção entre cimento e agregado, proporção entre agregado miúdo e graúdo, forma dos grãos dos agregados e o tipo de aditivo (PETRUCCI, 2005).

A fim de se mensurar essa trabalhabilidade o Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone - *Slump Test* - mede a consistência do concreto indiretamente, fornecendo uma metodologia simples para controle de uniformidade de produção do concreto em diferentes betonadas. Sugere, também, se a dosagem foi realizada na forma correta, onde o desempenho do abatimento indicará a uniformidade da trabalhabilidade (GEYER, 2006).

## 2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

### 2.3.1 Resistência do Concreto

Considerada a propriedade mais importante do concreto, a resistência pode ser descrita como a capacidade do concreto endurecido em resistir às diversas condições de carregamento a que possa estar sujeito quando solicitado. Muito embora, a resistência dependa de outros fatores, ainda é importante sua especificação para fins de aceitação (NEVILLE, 1997).

A principal propriedade do concreto endurecido é a sua resistência à compressão. E por ser um material frágil, possui uma ótima resistência à compressão, enquanto sua resistência à tração é bem reduzida (PETRUCCI, 2005).

Resistência pode ser definida como a medida da tensão exigida para romper o material. No projeto de estruturas do concreto, considera-se o mesmo como o material mais adequado para resistir à carga de compressão. Geralmente as resistências à tração e a flexão típica do concreto são de 10% e 15%, respectivamente, da resistência à compressão. A explicação para esta grande diferença entre tração e

compressão é atribuída a estrutura heterogênea e complexa do concreto. Ou seja, é possível entender que sob carga de compressão, tanto o agregado quanto a pasta, testada separadamente romperia elasticamente, enquanto o concreto mostra um comportamento inelástico antes da fratura (MEHTA, 1994).

As ações mecânicas, físicas e químicas atuando de forma isolada ou combinada por meio do intemperismo natural ou resultante de resíduos industriais, contribuem para a redução da vida útil do concreto. A redução da permeabilidade do concreto é uma medida importantíssima do ponto de vista do aumento da durabilidade do concreto. O emprego de cimentos resistentes a sulfatos e com baixos teores de C3A, também aumenta a vida útil do concreto (EFFTING, 2014).

Os fatores que influenciam a resistência do concreto podem ser elencados como: relação água/cimento, porosidade, influência dos agregados, a idade, a qualidade do material utilizado, a cura, bem como o meio em que o concreto é submetido (NEVILLE, 1997).

### 2.3.2 Porosidade

De acordo com Mehta (1994), tamanho, volume e continuidade dos poros na estrutura de concreto determinam a porosidade, e assim, a sua permeabilidade e absorção, que é definida com a quantidade de água que pode ser incorporada aos poros permeáveis.

A porosidade de um sólido é inversamente proporcional a sua resistência mecânica, então a correta determinação desta porosidade é um controle para o desempenho mecânico da estrutura (CALLISTER, 2012).

Conforme a NM 53 (ABNT, 2009), os agregados naturais como brita, areia, entre outros, já são controlados desta forma, pois a granulometria e massa específica aparente refletem na porosidade.

A porosidade do concreto pode ser definida a partir de alguns fatores, como: relação água/cimento, falhas no adensamento, quantidade de ar incorporado e, ainda, a porosidade dos agregados. Esta última auxilia na determinação da porosidade e qualidade final de concretos produzidos a partir deles (DAMIELI, 2007).

### 2.3.3 Durabilidade do Concreto

A durabilidade do concreto é uma de suas propriedades mais importante, pois é essencial que ele seja capaz de suportar as condições para as quais foi projetado durante a vida da estrutura. A durabilidade depende basicamente de 3 fatores: permeabilidade, agentes agressivos e armadura (MEHTA, 1994).

A água é o principal agente de transporte de fluidos dentro do concreto, esta água pode estar pura ou conter agentes agressivos, tais como o oxigênio e o dióxido de carbono. O deslocamento desses elementos no concreto vai depender da estrutura da pasta de cimento hidratado (NEVILLE, 1997).

O concreto, quando submetido à condições normais de exposição, os procedimentos de dosagem ignoram durabilidade, porque a resistência é considerada como um índice geral de durabilidade. No entanto, quando está sob condições que possam reduzir a vida útil do concreto empregado nas estruturas, a durabilidade deve ser levada em consideração nos processos de dosagem do concreto (MEHTA, 1994).

Mehta (1994), afirma ainda que durabilidade é definida como a vida útil de um material sob dadas condições. E ele afirma, ainda, que concretos permeáveis são menos duráveis, pois a permeabilidade do concreto além de depender das proporções da mistura, da compactação e da cura, depende, também, das microfissuras causadas pela temperatura e umidade.

## 2.4 RESÍDUOS GERADOS PELA CONSTRUÇÃO CIVIL

A construção civil é uma das maiores geradoras de resíduos, que são provenientes de reformas, demolições, construções, sobras, entre outros (CONAMA, 2002).

A classificação desses resíduos é feita através da resolução CONAMA 307/2002 e suas modificações. Essa resolução estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção, visando encontrar formas de minimizar os impactos ambientais. O artigo terceiro da Resolução de número 307 diz:

Os resíduos da construção civil deverão ser classificados, para efeito desta Resolução, da seguinte forma:

**I – Classe A** – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

- b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras; (CONAMA, 2002, Art 3º).

Para uma análise da estimativa nacional do montante dos resíduos da construção civil, é interessante a comparação entre o Brasil e outros países, como mostra a Figura 1, que apresenta uma estimativa de geração de RCC em diferentes países. A autora ainda ressalta que devido à variação de datas dos dados, é difícil estabelecer a análise da geração dos RCC e pode-se concluir que, apesar de apresentar números significativos, a geração de 31 milhões de t/ano no Brasil encontra-se abaixo da de outros países, tais como Japão, Estados Unidos, Itália e Alemanha (ABRELPE, 2011)

País	Quantidade anual		Fonte
	Em milhões t/ano	Em kg/habitante/ano	
Suécia	1,2 - 6	136 - 680	Tolstoy, Boriklund e Carlson (1998) e EU (1999)
Holanda	12,8 - 20,2	820 - 1.300	Lauritzen (1998), Brossink, Brouwers e Van Kessel (1996) e EU (1999)
Estados Unidos	136 - 171	463 - 584	EPA (1998), Peng, Grosskopf e Kibert (1994)
Reino Unido	50 - 70	880 - 1.120	Detr (1998) e Lauritzen (1998)
Bélgica	7,5 - 34,7	735 - 3.359	
Dinamarca	2,3 - 10,7	440 - 2.010	Lauritzen (1998) e EU (1999)
Itália	35 - 40	600 - 690	
Alemanha	79 - 300	963 - 3.658	
Japão	99	785	Kasai (1998)
Portugal	3,2 - 4,4	325 - 447	EU (1999) e Ruivo e Veiga (apud Marques Neto, 2009)
Brasil	31	230 - 760	Abrelpe (2011), Pinto (1999), Carneiro et al. (2001) e Pinto e González (2005)

**Figura 1 - Estimativa da geração de RCC em alguns países**  
**Fonte: Ipea (2012) apud Fernandes (2012).**

O estudo da Abrelpe (2011) apresenta a quantidade de RCC coletada diariamente por região, em 2009 e 2010, como se pode verificar na Figura 2.



**Quantidade de RCC coletados (2009 e 2010)**  
(Em t/dia)

Região	2009	2010
	RCC coletado (t/dia)	RCC coletado (t/dia)
Norte	3.405	3.514
Nordeste	15.663	17.995
Centro-Oeste	10.997	11.525
Sudeste	46.990	51.582
Sul	14.389	14.738

**Figura 2 - Quantidade de RCC coletados em 2009 e 2010 nas regiões do país**  
**Fonte: Abrelpe (2011).**

## 2.5 AGREGADOS RECICLADOS

Pode-se dizer que o agregado reciclado a partir de concretos antigos é um material proveniente de moagem, e por motivo deste processo ele possui uma formação particular de argamassa aderida ao agregado natural usado na produção do concreto antigo. Por isso, com essas características estudadas, este material possui aplicações importantes na construção civil, diminuindo a deposição deste material em locais não adequados (QIAN, 2014).

Diversos estudos já foram realizados com o uso de agregados reciclados em substituição ao agregado natural. Segundo Soutsos *et al.* (2011), os níveis de substituição ideais para agregados reciclados em blocos de vedação são de 60% para a fração de 6 mm e 20% para fração abaixo de 4 mm. Essa recomendação é para que não haja qualquer redução significativa da resistência mecânica à compressão axial e, para que não haja necessidade de aumentar o teor de cimento. Na sua pesquisa observou-se também que a maior porcentagem de substituição de agregado graúdo reciclado, com menor consumo de cimento e maior resistência mecânica à compressão axial, variam entre 30% e 60%, semelhante ao concreto convencional de agregados naturais.

Alguns pesquisadores como Boegh e Hansen (1985) e Sousa (2001) não recomendam o emprego de agregados miúdos reciclados, pela elevada absorção de água e por mostrarem grande influência nas deficiências mecânicas apresentadas pelos blocos.

Os agregados naturais que são utilizados em concretos apresentam valores de absorção de água muito baixo e sua influência na produção de concretos não é considerada. Em contrapartida, quando se utiliza agregados mais porosos, como é o

caso dos reciclados, deve-se considerar a quantidade de água adicionada a fim de minimizar os efeitos dessa absorção. Esse é um fator que pode gerar expansão no umedecimento e retração na secagem do concreto (LEITE, 2001).

Seguindo essa mesma ideia Hermann (2016), observa que como o agregado reciclado apresenta uma elevada absorção de água, substituições de agregado naturais em concreto acima de 50%, são mais críticas, mesmo para agregados reciclados de concreto, chamados ARC.

### 2.5.1 Processo de produção de agregados reciclados e sua granulometria

As características do agregado reciclado podem variar de acordo com método de produção que foi gerado. Quanto melhor for o processo produtivo, melhor será também a qualidade do agregado. Um dos principais resultados esperados com a reciclagem é a geração de um material mais homogêneo e a produção do maior número de materiais diferentes (FERREIRA, 2014).

Atualmente existem diversos processos de produção de agregados reciclados, o mais comum consiste em utilizar um britador. Na primeira etapa é feito o transporte do material a ser britado, normalmente por pá carregadeira ou retroescavadeira, até um alimentador vibratório. Na entrada desse britador, uma grelha retira os materiais indesejáveis e que, por sua vez, são removidos por um transportador de correia. Esse processo inicial evita o desgaste desnecessário do britador (MAPRE, 2014).

Buttler (2003) recomenda que a quantidade mínima de partículas menores que 0,3 mm deve estar entre 12% a 15%, em volume, incluindo o cimento. Essa limitação é o que proporciona boa trabalhabilidade, facilidade no adensamento e coesão. No entanto, porcentagens menores ou maiores aumentarão a porosidade, absorção de água, permeabilidade e diminuirão a estabilidade do sólido, podendo ainda afetar a resistência mecânica à compressão.

Soltsos, Tang e Milliard (2011) mostram que os agregados reciclados miúdos têm uma influência ainda maior na absorção de água de peças pré-moldadas, apresentando uma absorção maior que dos agregados reciclados graúdos, devido a maior superfície específica.

## 2.6 CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS

O concreto é considerado o material mais nobre encontrado em RCC, principalmente pela sua composição conter elevado teor de material pétreo e pelo fato de poder ser então melhor reutilizado para produção de novos concretos (HENDRIKS, 2001).

Desta forma, essa reciclagem pode representar uma forma de converter um resíduo em uma matéria-prima, tendo um potencial grande de redução de resíduos dispostos em aterros, ao mesmo tempo em que se preservam as fontes de material virgem, sem problemas ambientais (MARINKOVIÄ et al., 2012).

Os agregados reciclados têm sido utilizados na fabricação de concretos com baixa resistência mecânica, ou aplicados como aterros e sub-bases para estradas. Embora a utilização desses agregados seja permitida em alguns países na fabricação de concretos estruturais, a quantidade utilizada permanece próxima a 1% de agregados reciclados (MARINKOVIÄ et al., 2012).

Alguns problemas quanto à utilização de brita reciclada em concreto são observadas por Hendriks (2001). A resistência do concreto quando todo agregado gráudo é trocado por agregado reciclado é geralmente de 80 a 100% da resistência do concreto feito com agregado natural. Sua desvantagem é a menor densidade e a porosidade maior. Com isto, mais água é necessária para atingir total saturação do agregado.

A composição granulométrica dos agregados reciclados tem uma grande influência sobre a trabalhabilidade dos concretos em seu estado fresco. Esses agregados tem uma tendência a formar no concreto uma composição mais grossa, do que os agregados naturais, o que acaba sendo um fator importante para dosar a quantidade certa das misturas recicladas (BATISTA, 2009).

Dentre as características mais importantes a serem estudadas para utilização de agregados reciclados em concretos estão: a granulometria, a absorção de água, a forma e a textura, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias presentes nos materiais (LEITE, 2001).

A utilização de agregado reciclado no concreto, em proporções devidamente controladas, não afeta a resistência nem a durabilidade do concreto com relação à corrosão das armaduras. Inclusive se consegue observar melhoras em algumas

propriedades. É possível afirmar, também, que há fortes indícios da economia gerada a partir da utilização do agregado reciclado (KATZ, 2002)

O uso de agregados reciclados em concreto promove uma promissora solução para o problema de gerenciamento de resíduos, além de uma diminuição com custos e impactos ambientais de matéria-prima de agregados. Porém, as propriedades do concreto com agregado reciclado são afetadas e, por isso, devem ser analisadas (RAO; JHAB; MISRAA,2007).

### 2.6.1 Relação água/cimento

No ano de 1998 foi lançado o código alemão “Concreto com agregado reciclado de concreto”, que foi publicado pelo Comitê Alemão do Concreto Armado (*DafSt*). Neste código, recomenda-se uma compensação ao valor da absorção de água referente a 10 minutos de contato do material com a água antes da confecção do concreto, tempo suficiente para o agregado reciclado absorver cerca de 90% do total de água absorvida em 24 horas.

Devido a este fato, desde o momento da mistura até a utilização do concreto, a consistência pode variar se o processo de pré-molhagem não for realizado. Sendo que não se recomenda adicionar água para melhorar esta propriedade e sim, compensar estas mudanças com o uso de aditivos superplastificantes (LEITE, 2001).

Conforme aborda Barra (1996), quanto menor e mais poroso for o agregado reciclado e, quanto maior a fluidez da pasta, maior será a quantidade de pasta e/ou água absorvida. Em contrapartida, se o agregado reciclado for pré-umedecido em água, ocorrerá o maior percentual de absorção desta água pelo agregado antes da mistura no concreto e a probabilidade de o agregado absorver água da pasta é menor. Nesse caso é possível que ocorra o fenômeno inverso, ou seja, o agregado pode devolver parte da água absorvida para a mistura (BARRA, 1996).

## 2.7 PROPRIEDADES DO CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS

### 2.7.1 Resistência

A diminuição da resistência dos concretos reciclados está ligada diretamente à alta taxa de absorção de água dos agregados e isso está sendo alvo de muitas discussões. Limbachiya (2000) e Levy (2001), afirmam que o decréscimo da

resistência nos concretos com agregados reciclados se dá, principalmente, devido à alteração da relação entre água e cimento A/C. Por ser um agregado mais poroso, certamente precisará de mais água para atingir a mesma trabalhabilidade dos concretos convencionais.

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

### 2.7.2 Porosidade

A absorção de água em agregados reciclados varia de 3 a 12%, e o valor vai depender do tipo de concreto usado para produção do agregado (RAO, JHAB; MISRAA, 2007).

Nota-se que este valor é bem maior que o determinado para agregados naturais, onde a absorção é em torno 0,5-1% (RAO, JHAB; MISRAA, 2007). A alta porosidade dos agregados reciclados é a responsável pela alta absorção comparada aos agregados naturais. Essa porosidade elevada pode ser atribuída ao resíduo de argamassa aderida ao agregado original. Essa argamassa aderida varia de uma porcentagem de 25 a 65% do peso do agregado (JUAN; GUTIERREZ, 2009).

### 2.7.3 Durabilidade de concretos com agregados reciclados

Considerado um dos fatores mais preocupantes na vida útil dos concretos e estruturas, as vulnerabilidades do concreto diante das condições de agressividade do meio trazem sérias complicações, pois uma durabilidade inadequada pode comprometer a utilização da estrutura (BATISTA, 2009).

Segundo estudos que realizaram a substituição de agregados naturais por reciclados, os resultados mostraram que a durabilidade diminui à proporção que aumenta o percentual de substituição. No entanto, houve algumas melhoras com o aumento da idade do concreto e com percentuais limitados em torno de 50% de agregados reciclados na mistura.

## 2.8 MÉTODOS PARA MELHORAR O USO DOS AGREGADOS RECICLADOS EM CONCRETOS

Geralmente concretos com agregados reciclados possuem bons desempenhos desde que atendam os parâmetros citados anteriormente. Entretanto, existem algumas contraindicações quanto ao uso de concreto com agregado reciclado, como por exemplo, concreto com função estrutural (tanto em fundações quanto em estruturas superiores), concretos armados em serviços com presença de umidade ou até mesmo na fabricação de peças pré-moldadas (LEITE, 2001).

A maioria das pesquisas tratam de sua resistência à compressão. Porém, para que um bom resultado seja alcançado, antes da concretagem é necessário que o agregado reciclado passe por um tratamento, que na maioria das vezes é a lavagem para diminuir a porcentagem de finos nas amostras, ou até mesmo um empacotamento de partículas (HERMANN, 2016).

Na pesquisa de Chen et al. (2003), desenvolvida a partir de concretos, utilizaram agregados graúdos reciclados, lavados e não lavados. Os resultados mostraram que concretos reciclados obtidos a partir dos agregados graúdos lavados, tiveram valores em torno de 90% da resistência a compressão e flexão de concretos com referência, já para concretos de agregados reciclados não lavados, os valores não atingiram mais que 75%.

Já no procedimento utilizado por Leite (2001) que tinha como base a pré-molhagem dos agregados um pouco antes da concretagem, possibilitou uma melhora na trabalhabilidade e conseqüentemente no valor do abatimento.

### 2.8.1 Empacotamento de Partículas

Uma variável importante e determinante no desempenho de concretos é a distribuição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos, tanto no que se referem as proporções adequadas de tamanhos, mas também no que se refere à morfologia e textura das partículas (SILVA, 2006).

Em 1892, Féret publicou o primeiro estudo sobre o empacotamento de partículas em concreto, onde a equação apresentada mostrou que quanto maior a densidade de empacotamento, e conseqüentemente menor a porosidade do concreto, maior seria sua resistência (FENNIS, 2011 apud HERMANN, 2016).

O empacotamento de partículas explicado por OLIVEIRA et al. (2000) pode ser definido como sendo 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.

Assim sendo, um material com densidade de empacotamento teórica máxima possuiria ausência de vazios. Esta condição poderia ser alcançada, porém devido à irregularidade no formato das partículas e na distribuição granulométrica, torna-se muito difícil reproduzir o máximo empacotamento teórico para misturas granulares como o concreto. Mesmo assim, é possível aumentar a densidade de empacotamento do concreto para melhorar sua qualidade (SILVA, 2006).

A densidade de empacotamento é dada pela porcentagem de sólidos presentes em uma unidade de volume. Já em concretos, a seleção e combinação dos agregados apresenta influência dominante na qualidade do mesmo. Isto acontece porque os agregados representam mais da metade do volume total do concreto (DE LARRARD, 2009).

Hermann (2016) afirma também que dentre os benefícios do empacotamento de agregados em concretos pode-se citar: a elevação da resistência mecânica, o aumento do módulo de elasticidade, redução da exsudação, redução da fluência, redução da retração e maior durabilidade.

Há diversos modelos de empacotamento de partículas. No presente trabalho, será utilizado e aplicado o método de Funk e Dinger, que trabalha com a curva granulométrica otimizada. E também, a apresentação de cálculos pelo modelo de Toufar, que trabalha com a densidade de empacotamento.

#### 2.8.1.1 Modelo de Funk e Dinger

Conhecido também como modelo de Alfred, o modelo de Funk e Dinger é um aperfeiçoamento dos modelos de Furnas (1929) e de Andreasen e Andersen (1930). Esse modelo tem a proposta de introduzir o conceito do tamanho mínimo de partículas na equação de Andreasen e Andersen e revisar matematicamente o modelo de Furnas (OLIVEIRA et al., 2000).

Após uma análise comparativa entre dois modelos (Andreasen e Furnas) de abordagens distintas (discreta e contínua), em 1980 Funk e Dinger provaram que

matematicamente as equações dos dois modelos convergem para a equação abaixo (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

$$CPTF = 100 \times \left( \frac{D_q^p - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right)$$

Onde:

*CPFT*: é porcentagem acumulada de partículas menores que DP;

*DP*: é o diâmetro da partícula;

*D<sub>s</sub>*: é o diâmetro da menor partícula;

*D<sub>L</sub>*: é o diâmetro da maior partícula;

*q*: é o coeficiente de distribuição.

Por meio de simulações computacionais e métodos matemáticos, Funk e Dinger determinaram que, para maximizar o empacotamento o valor do coeficiente da distribuição (*q*) deve ser 0,37. Porém esse valor ainda é questionável quanto a se representa o empacotamento máximo (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Segundo Oliveira *et al.* (2000) valores de '*q*' menores que 0,37 aumentam a fluidez dos concretos por permitir maior distanciamento entre as partículas de agregado, aumentando a quantidade de matriz. Sendo assim, é recomendado pela maioria dos autores um '*q*' entre 0,35 e 0,4 para concretos mais secos, como é o caso do concreto com agregados reciclados.

#### 2.8.1.2 Modelo de Toufar

De acordo com Fennis (2011), o modelo de Toufar descreve o cálculo de misturas de duas classes de agregados (finos e grossos) considerando esféricos e de mesmo diâmetro. A otimização do empacotamento se dá pela condição que a pasta de cimento ocupará os vazios deixados pelos agregados.

Quando necessário a mistura de 3 classes de materiais, ou seja, agregados finos, médios e grossos, o cálculo do empacotamento é feito pelo modelo de Toufar modificado. Na primeira parte é considerado 2 tipos de agregados, já na outra etapa, é utilizado uma mistura otimizada da primeira parte com o terceiro tipo de agregado (FENNIS, 2011).

O modelo de Toufar considera que as partículas finas são posicionadas entre quatro partículas grossas. Porém, as comparações com ensaios mostraram que este modelo prevê que a densidade de empacotamento de uma amostra de partículas mais



grossas, não aumenta quando uma pequena quantidade de partículas finas é adicionada. Isto se dá devido, à suposição de que cada partícula fina é colocada num espaço, que é limitado por quatro das partículas grossas, então foi criado um modelo de Toufar modificado para corrigir esta consideração irreal (FENNIS, 2011).

O cálculo da densidade pelo modelo de Toufar é expresso na equação abaixo:

$$\alpha_t = \frac{1}{\frac{r_1}{\alpha_1} + \frac{r_2}{\alpha_2} r_2 \left( \frac{1}{\alpha_2} - 1 \right) k_d k_s}$$

Com:

$$k_d = \left( \frac{d_2 - d_1}{d_2 + d_1} \right)$$

$$k_s = 1 - \left[ \frac{1 - 4x}{(1 + 4x)^4} \right]$$

$$x = \frac{r_1}{r_2} \frac{\alpha_2}{\alpha_1 (1 - \alpha_2)}$$

Onde:

$k_d$  = relação de diâmetro de duas classes de partículas;

$k_s$  = probabilidade estatística do número de interstícios entre as partículas grossas;

$d_1$  = diâmetro da menor partícula;

$d_2$  = diâmetro da maior partícula;

$r_1$  = volume da menor partícula;

$r_2$  = volume da maior partícula;

$\alpha_t$  = densidade da mistura;

$\alpha_1$  = densidade da menor partícula;

$\alpha_2$  = densidade da maior partícula; e,

$x$  = relação de empacotamento entre as partículas.

Para a modificação do modelo de Toufar, alterou apenas as equações quando  $x$  for maior ou igual a 0,4753.

$$k_s = 1 - \left[ \frac{1 - 4x}{(1 + x)^4} \right]$$

$$k_s = \frac{0,3881x}{0,4753}$$

### 3 METODOLOGIA

De acordo com Gil (1994), os objetivos da pesquisa a classificam com uma pesquisa explicativa, pois esse é o tipo de pesquisa que aprofunda o conhecimento da realidade por utilizar métodos experimentais nos procedimentos técnicos. Ainda segundo Gil (1994), a pesquisa em questão pode ter uma abordagem quantitativa e qualitativa, pois permite recolher mais informações.

No decorrer deste trabalho foram realizados ensaios e tratamento de agregados reciclados britados de concretos antigos, para identificação das características dos mesmos, bem como a resistência do concreto produzido com esses agregados.

É de fundamental importância a definição dos ensaios a serem realizados a fim de se obter os dados necessários para análise dos resultados. Portanto, para elucidação do problema em questão, os procedimentos necessários seguem as normas (NBR's) pertinentes a cada etapa. Já os materiais usados para a confecção desse concreto são da própria universidade, assim como as sobras de concreto que recolhidas dos materiais descartados pelo laboratório da Universidade e foram britados, transformando-se assim em agregado graúdo para fabricação de novos concretos.

Abaixo, segue um diagrama que traz uma melhor visualização da metodologia utilizada no presente trabalho.

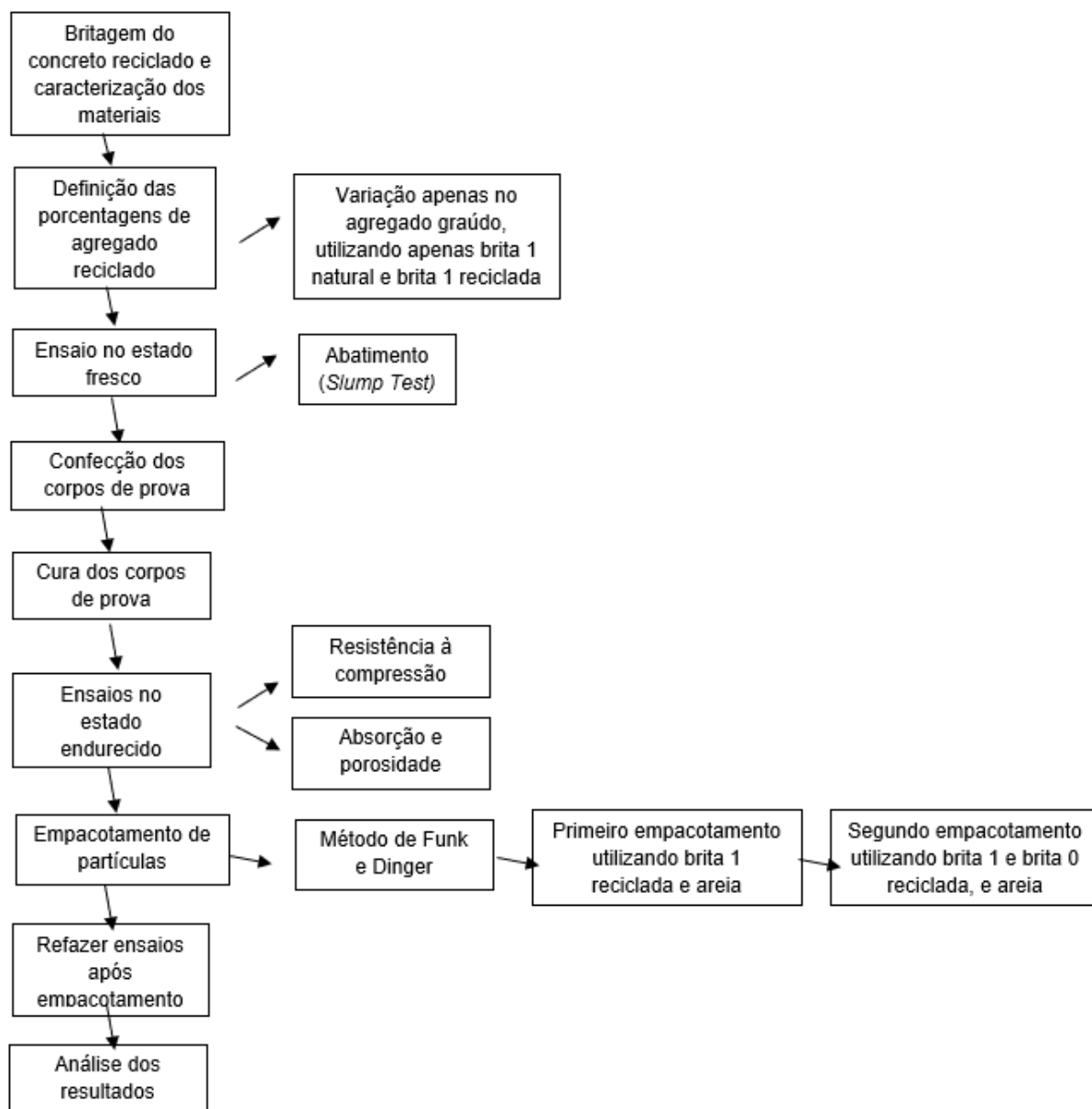


Figura 3 - Diagrama das atividades a serem realizadas na pesquisa  
Fonte: Autoria própria (2017).

### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a pesquisa foram: areia média seca, brita 1, brita zero, cimento Portland CII – Z – 32, agregados reciclados a partir de concretos e água. A caracterização dos materiais está descrita nos próximos itens. Com o objetivo de conhecer as características dos materiais utilizados para a pesquisa, é de suma importância fazer uma caracterização dos mesmos, ou seja, fazer análises geralmente amparadas por normas para empregar os materiais de forma correta. Sendo assim, cada material passou pelos procedimentos necessários para ter suas características conhecidas.

#### 3.1.1 Cimento

Para o estudo, optou-se por utilizar o CP-II-Z-32, que contém adição de material pozolânico que varia de 6% a 14% em massa, o que confere ao cimento menor permeabilidade. Este tipo de cimento também pode conter adição de material carbonático (fíler) no limite máximo de 10% em massa.

Optou-se por utilizar esse cimento, pois a resistência do mesmo não é tão elevada, não interferindo assim nos resultados, pois o enfoque da pesquisa são os agregados.

Os dados do cimento foram fornecidos pelo fabricante e estão no Anexo A. A massa específica que consta no laudo técnico é de 3,0 g/cm<sup>3</sup>.

#### 3.1.2 Agregado natural

Para a composição dos materiais utilizados no concreto foi utilizada a areia natural média e foi realizado o ensaio de granulometria, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009) e massa específica, de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2002).

É necessário determinar a composição granulométrica do agregado graúdo, para assim obter as porcentagens máximas e mínimas passantes nas peneiras.

Com a composição granulométrica pode-se obter indícios da potencial trabalhabilidade do agregado a partir de concreto reciclado, e ter parâmetros comparativos com agregados já conhecidos.

Este ensaio é normalizado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), e foram verificados os valores de massa retida, % retida e % acumulada para todas as amostras.

Para se determinar as características e propriedades do material foram necessários os ensaios: de determinação da massa específica dos agregados e absorção de água, onde foram seguidos os parâmetros da NBR NM 53 (ABNT, 2003).

Os dados de granulometria e massa específica estão contidos nas tabelas abaixo.

**Tabela 1 - Módulo de finura e dimensão máxima característica dos agregados**

Material	Módulo de finura (mm)	Dimensão máxima característica (mm)
Areia	1,86	2,4
Brita 1	3,07	9,5

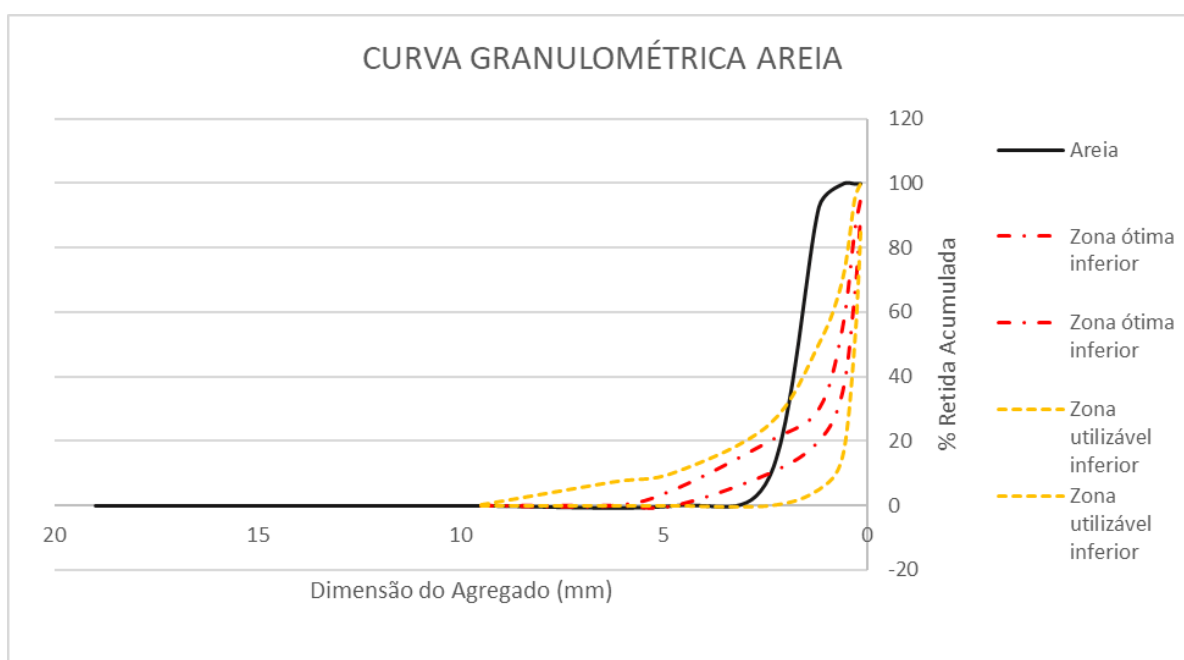
Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 2 - Massa específica agregados**

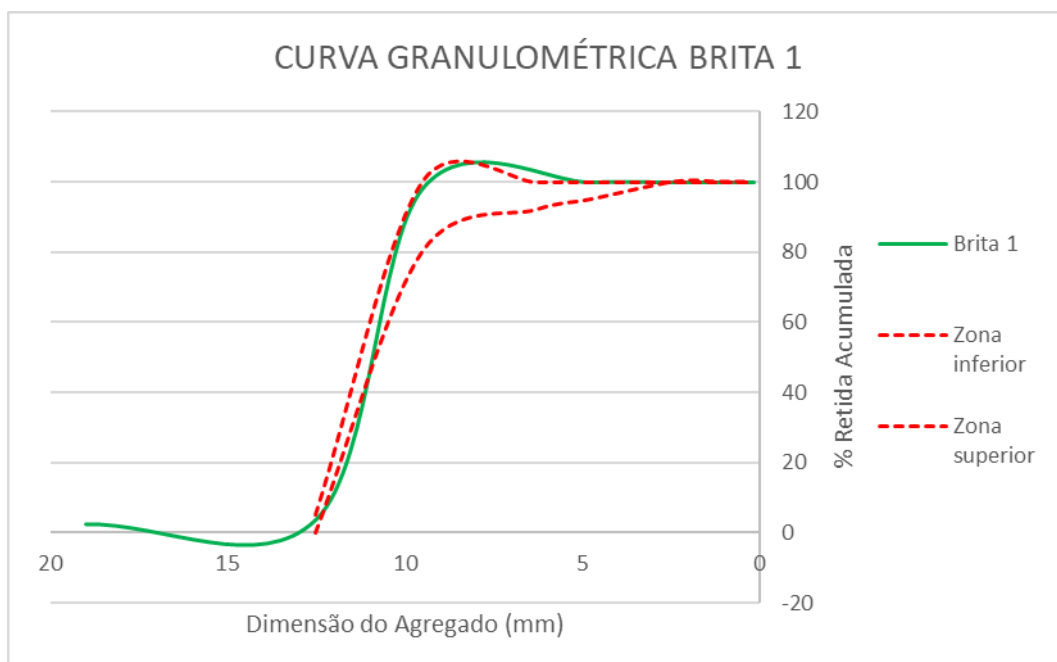
Material	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Areia	2,63
Brita 1	2,88

Fonte: Autoria própria (2017).

Os Gráficos 1 e 2 mostram o comportamento da curva granulométrica do agregado miúdo e graúdo.



**Gráfico 1 - Distribuição granulométrica areia**  
Fonte: Autoria própria (2017).



**Gráfico 2 - Distribuição granulométrica brita 1**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**

### 3.1.3 Agregado graúdo reciclado

Visando a produção de concretos que utilizam o agregado graúdo na substituição de agregados naturais, foram coletadas sobras de concreto do laboratório de materiais. Para tornar possível a utilização do material, o mesmo teve que ser triturado de forma homogênea no triturador disponível no canteiro de obras da Universidade.

A moagem do concreto a ser reciclado, foi feita através do britador da Universidade, como mostra a Figura 4. O intuito foi alcançar uma granulometria similar a brita 1 e brita 0, a mais usualmente utilizada em obras cotidianas, com uma dimensão máxima de 19mm.

Com a composição granulométrica pode-se obter indícios da potencial trabalhabilidade do agregado a partir de concreto reciclado, e ter parâmetros comparativos com agregados já conhecidos.



**Figura 4 - Britador**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**

Alguns cuidados devem ser tomados com a composição granulométrica dos agregados reciclados para possibilitar a produção de misturas de concreto trabalháveis. Visando um melhor desempenho do material, o agregado proveniente de concreto reciclado foi submetido aos mesmos ensaios de caracterização do que os agregados graúdos naturais, explicitados nos itens anteriores. No entanto, durante o processo de moagem, muitos finos e agregados de dimensões reduzidas foram produzidos, sendo assim, para a granulometria desses materiais, algumas faixas das peneiras menores foram eliminadas

Para utilizar o concreto reciclado equivalente a Brita 1, houve um cuidado na amostragem da brita reciclada. A granulometria foi separada para que ficasse comparável com a brita natural 1 (Figuras 5 e 6).





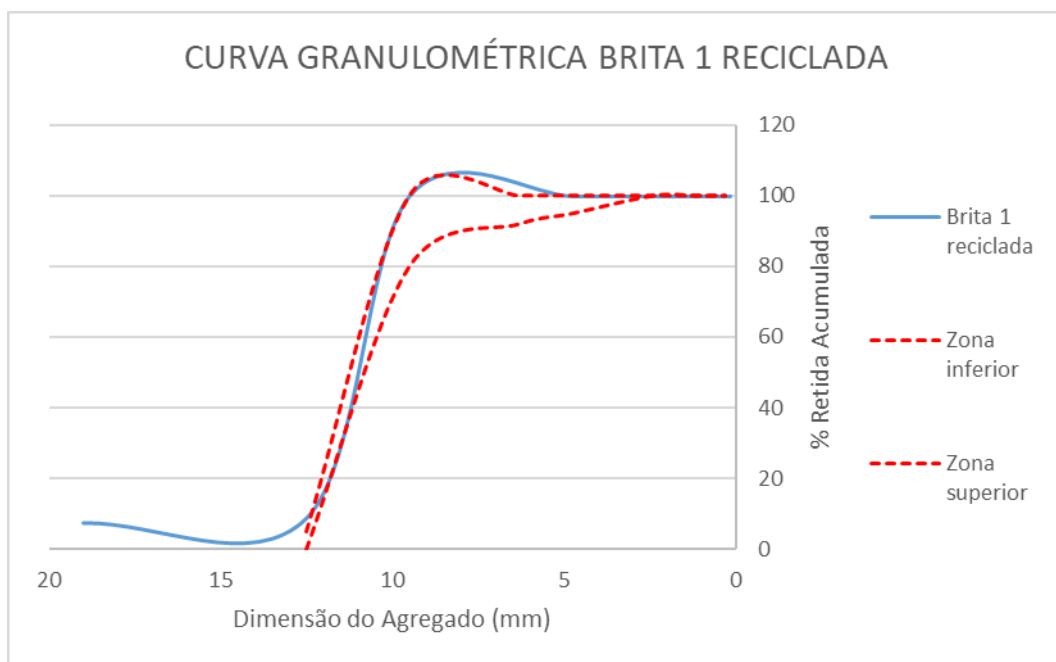
**Figura 5 - Agregado natural Brita 1**  
Fonte: Autoria própria (2017).



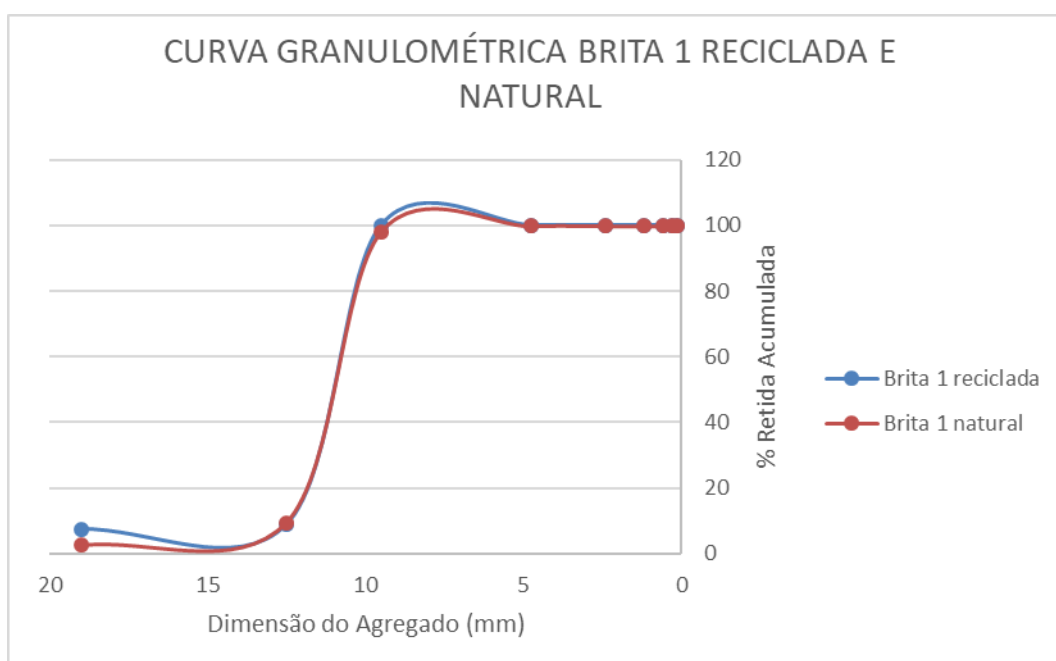
**Figura 6 – Agregado reciclado Brita 1**  
Fonte: Autoria própria (2017).

Para essa composição granulométrica, optou-se por eliminar os materiais retidos em peneiras menores, ou seja, os finos e material pulverulento, para que o concreto não ficasse muito seco. Então todos os materiais utilizados na produção do concreto foram separados um a um, de forma a utilizar apenas a granulometria menor.

Analisando o Gráfico 4, é possível comparar a distribuição granulométrica do agregado natural e reciclado equivalente a brita 1 e percebe-se que as curvas dos dois materiais são bem parecidas.



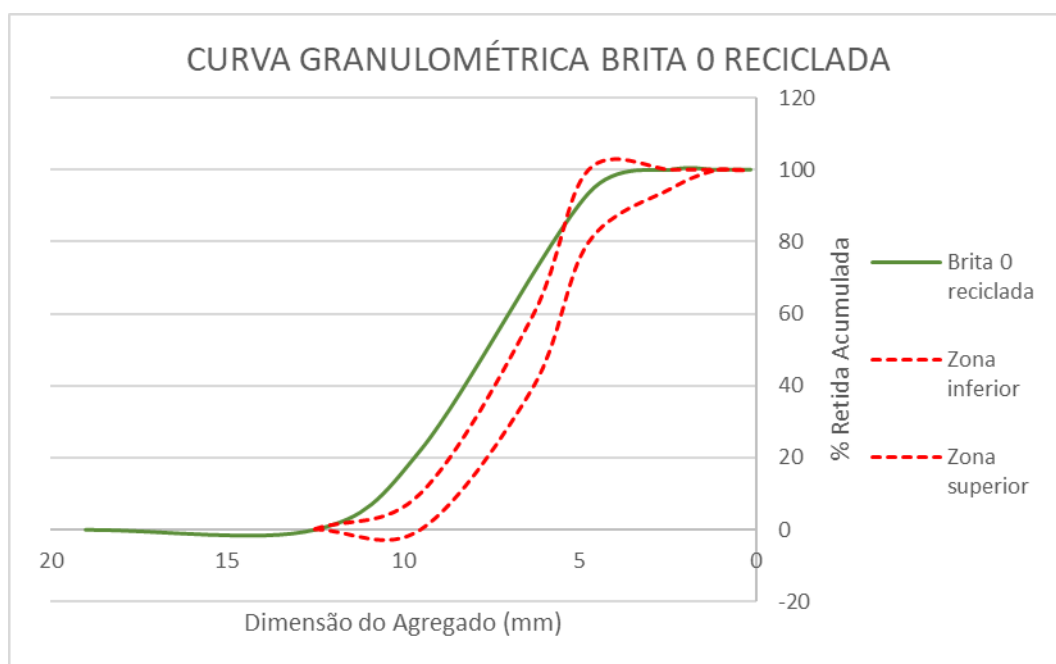
**Gráfico 3 - Distribuição granulométrica brita 1 reciclada**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**



**Gráfico 4 - Comparativo da distribuição granulométrica brita 1 natural e reciclada**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**

Na primeira etapa do trabalho, foi utilizado apenas o agregado reciclado equivalente a brita 1. Como na etapa de empacotamento de partículas seria utilizado o agregado reciclado equivalente a brita 0, foi necessário determinar a composição granulométrica deste agregado também.

Da mesma forma como foi feito com a brita 1 reciclada, para a brita 0 reciclada foram eliminados os materiais finos, e utilizou-se apenas os materiais retidos nas peneiras de maior dimensão.



**Gráfico 5 - Distribuição granulométrica brita 0 reciclada**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**

Da mesma forma como foi feito para os agregados naturais, foi possível determinar módulo de finura, dimensão máxima característica e massa específica dos agregados reciclados, como mostram as tabelas abaixo.

**Tabela 3 - Módulo de finura e dimensão máxima característica agregado reciclado**

Material	Módulo de finura (mm)	Dimensão máxima característica (mm)
Brita 1 reciclada	1,16	19
Brita 0 reciclada	0,966	9,5

**Fonte: Autoria própria (2017).**

**Tabela 4 - Massa específica agregados reciclados**

Material	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Brita 1 reciclada	2,75
Brita 0 reciclada	2,69

**Fonte: Autoria própria (2017).**

### 3.2 MÉTODOS

Como não existe um método de dosagem para concreto com agregados reciclados, utiliza-se um traço genérico, que serve tanto para a fabricação do concreto convencional, como para as variações na porcentagem de substituição do agregado natural por agregado reciclado.

Para esta pesquisa optou-se por utilizar um traço usualmente empregado em concreteiras, ou até mesmo ensaios de laboratório, sendo o traço utilizado (em massa) para confecção do concreto:

$$1 : 2 : 3 : 0.50$$

Onde o primeiro termo significa a quantidade de cimento, o segundo termo indica a quantidade de areia, o terceiro termo a quantidade de pedra brita, e o último termo a quantidade de água.

A partir do traço foram definidas as substituições reais dos concretos de agregados reciclados em estudo, com teores de substituição de 0% (concreto convencional, como traço de referência), 20%, 50%, 80% e 100% do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto (Tabela 5).

**Tabela 5 - Porcentagens da variação de agregados no traço**

Traço	Nome	Porcentagem em agregado natural	Porcentagem em agregado reciclado
Traço 1	T100N0R	100%	0%
Traço 2	T80N20R	80%	20%
Traço 3	T50N50R	50%	50%
Traço 4	T20N80R	20%	80%
Traço 5	T0N100R	0%	100%

**Fonte: Autoria própria.**

Conforme as pesquisas já elaboradas com o uso de agregados reciclados, alguns autores recomendam, que é necessário fazer uma pré-molhagem antes da produção de concreto. Para este trabalho foi feita uma pré-molhagem 10 minutos antes da utilização deste material (Figura 07), que tem por função saturar o agregado em 90%, para que não absorva a água presente no traço.



**Figura 7 - Pré-molhagem de agregados reciclados**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**

Após feita essa pré-molhagem e a imprimação da betoneira, o concreto foi produzido de acordo com as recomendações da NBR 12655 (2006). Os corpos de prova foram moldados e mantidos sob condições de cura submersa, e a idade para rompimento dos corpos de prova foi de 21 dias.

Conforme define-se em norma na NBR 5738 (ABNT, 2003), estipulou-se um total de 6 corpos de prova para cada variação no traço, resultando assim em 30 corpos de prova, com o intuito de comparar as propriedades mecânicas entre os lotes. Destes 6 corpos de prova para cada traço, 3 foram usados para o ensaio de resistência à compressão e os outros 3 para o ensaio de absorção.

Depois de 21 dias, o concreto foi retirado da cura e retificado para ser submetido aos ensaios. Os ensaios realizados na presente pesquisa, tanto os ensaios com o concreto fresco, como no endurecido, estão apresentados a seguir.

### 3.2.1 Ensaio de abatimento (*Slump Test*)

Este ensaio é normalizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998) e fornece parâmetro sobre a trabalhabilidade do concreto. Realizado durante o processo de produção do concreto para obter valores de consistência, essa consistência é verificada pelo abatimento do tronco de cone, (Figura 08).

Após a verificação e medida da consistência, inicia-se a moldagem dos corpos-de-prova, os quais posteriormente foram colocados em cura para realização dos demais ensaios.



**Figura 8 - Ensaio de abatimento do concreto**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**

### 3.2.2 Ensaio de resistência à compressão

A principal propriedade do concreto é a sua resistência à compressão. Para este ensaio é utilizada como base a NBR 5739 (2007). Os corpos de prova moldados foram rompidos aos 21 dias, utilizando uma prensa hidráulica (Figura 09), a qual possui um acionamento elétrico, com capacidade máxima de 200 toneladas. O processamento e controle de dados são obtidos através do programa computacional.



**Figura 9 - Equipamento utilizado para romper os corpos de prova**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**

### 3.2.3 Ensaio de absorção e porosidade

O ensaio de absorção foi feito de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 1987), e, basicamente, o ensaio consistiu em determinar a massa saturada dos corpos de prova, a massa submersa, como mostra a Figura 9. E após isso, colocar eles em estufa para determinação da massa seca (Figura 10). Este ensaio foi realizado na mesma idade de rompimento dos corpos de prova (21 dias) a fim de verificar a porosidade atingida e correlacioná-la com os resultados de resistência mecânica obtidos.



**Figura 10 - Determinação da massa submersa dos corpos de prova**  
**Fonte: Autorial própria(2017).**



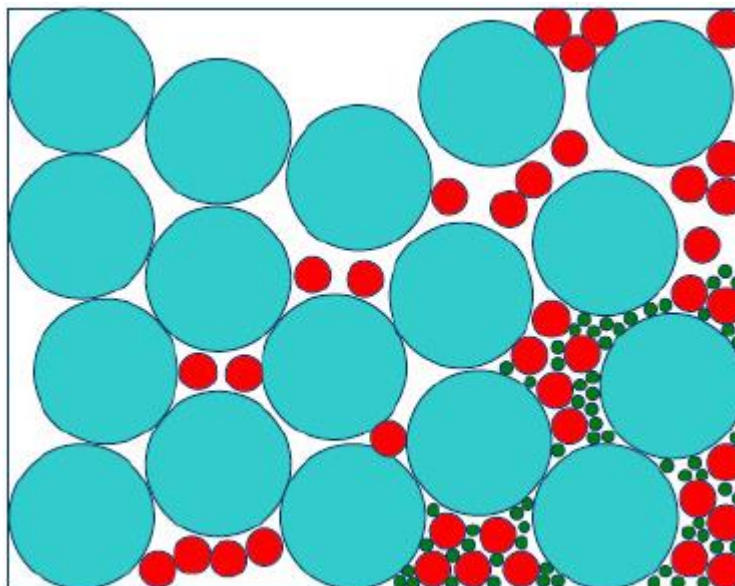
**Figura 11 - Corpos de prova na estufa**  
**Fonte: Autorial própria (2017).**

### 3.2.4 Melhoria da resistência do concreto utilizando empacotamento de partículas

Após obter os resultados para os ensaios anteriores, foi proposto um método de melhoria na resistência do pior resultado. Ou seja, o traço que obteve a resistência à compressão mais baixa, será repetido a partir do método de empacotamento de partículas.

Este empacotamento consiste, basicamente, em proporcionar uma correta seleção da granulometria e da quantidade de materiais finos, para que os grandes vazios sejam preenchidos por materiais menores.





**Figura 12 - Envolvimento de partículas de cimento por partículas mais finas**  
Fonte: Adaptado de MAZER (2013).

Para tentar melhorar a resistência e diminuir o índice de vazios do concreto com agregados graúdos reciclados, são utilizados alguns modelos matemáticos de empacotamentos de partículas.

Para este estudo, foram utilizados cálculos e aplicações do método de Funk e Dinger para o traço com 100% de agregados reciclados. Porém, entende-se que o método de Funk e Dinger trabalha com curvas granulométricas apenas, e como a bibliografia cita, esse não é o melhor modelo nos dias de hoje. Para comparar os resultados foram feitos cálculos pelo método de Toufar também, que trabalha com densidades de empacotamento.

O empacotamento foi realizado com o mesmo consumo de cimento, trabalhando apenas com a granulometria dos agregados, para fins comparativos com o traço referência. Esse procedimento foi feito, para determinar se a utilização de concretos reciclados pode ser realmente confiável, e se a resistência do mesmo pode ser elevada.

Sendo assim, para a porcentagem que apresentou o pior desempenho mecânico, que foi a que tinha em sua composição 100% de agregado graúdo reciclado, foi calculado a porcentagem ideal de agregados que deveriam ser utilizados na produção de concreto.

O método consistiu em basicamente duas etapas. A primeira foi calcular para areia e concreto reciclado equivalente às dimensões da brita 1 as porcentagens ideais de cada material para utilizar e produzir concretos com essas porcentagens. Já a

segunda etapa, foi calcular para areia, concreto reciclado equivalente a brita 1 e concreto reciclado equivalente a brita 0, para conseguir determinar qual deles apresentaria um melhor empacotamento.

Para o desenvolvimento do método de Funk e Dinger, que trabalha com a curva granulométrica otimizada, o procedimento consistiu em calcular a diferença entre o percentual passante de cada fração dos materiais e do modelo. O coeficiente de distribuição 'q' adotado para a construção da curva ideal do modelo de Funk e Dinger foi de 0,37. Segundo a bibliografia, por meio de simulações computacionais, foi verificado que valores de 'q' menores ou iguais a 0,37 podem favorecer o empacotamento máximo para distribuições infinitas, enquanto que para valores acima de 0,37, verifica-se sempre uma porosidade residual.

O modelo de Toufar, que já tem um método um pouco diferente, pois trabalha com densidade de empacotamento, foi feito para ter um parâmetro comparativo com os resultados obtidos pelo método de Funk e Dinger. O processo, basicamente, consistiu em calcular para 2 classes de agregados e depois para 3 classes, o melhor empacotamento para otimizar a resistência do concreto.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

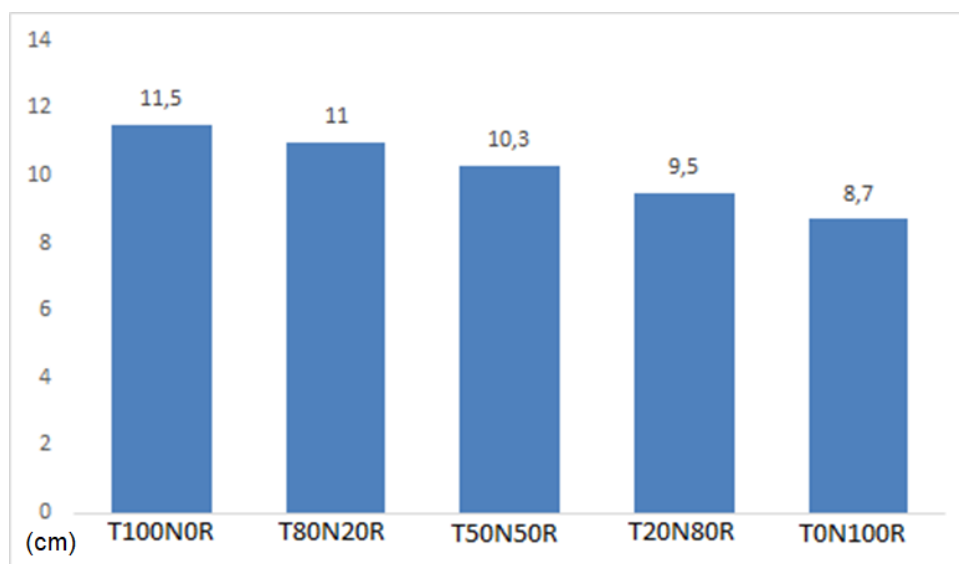
### 4.1 ENSAIO DE ABATIMENTO (*SLUMP TEST*)

Com base neste ensaio foi possível obter os valores de abatimento do concreto fresco, parâmetro utilizado para análise da consistência e trabalhabilidade do mesmo. Os valores correspondentes a este ensaio estão mostrados na Tabela 6 a seguir.

**Tabela 6 - Resultados do ensaio de abatimento**

Traço	Abatimento (cm)
T100N0R	11,5
T80N20R	11
T50N50R	10,3
T20N80R	9,5
TON100R	8,7

Fonte: Autoria própria (2017).



**Gráfico 6 - Resultado do ensaio de abatimento**

Fonte: Autoria própria (2017).

É possível perceber, que conforme foi aumentando a porcentagem de agregado reciclado e diminuindo a quantidade de agregado natural, o valor do abatimento foi diminuindo. Isso pode ser explicado porque, como a bibliografia aponta, quando se utiliza agregados reciclados, o concreto tende a ficar mais seco, e, conseqüentemente, seu abatimento será menor. Mesmo com o processo de pré-

molhagem dos agregados, nota-se que ainda houve uma parcela de absorção de água por parte dos mesmos.

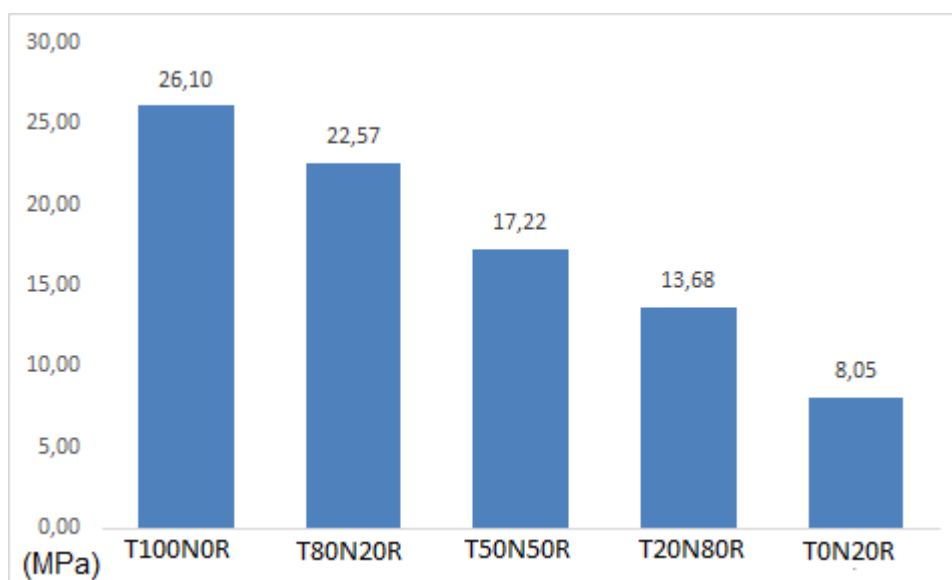
#### 4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Com o ensaio da resistência à compressão, pode-se perceber que as porcentagens mais elevadas de agregado reciclado adicionadas ao concreto tiveram como consequência a diminuição da resistência do concreto (Gráfico 7). Os resultados contidos na Tabela 7 são as resistências médias, os dados de todos os corpos de prova estão no Apêndice B.

**Tabela 7 - Resistência à compressão do concreto**

Traço	Resistência (Mpa)
T100N0R	26,10
T80N20R	22,57
T50N50R	17,22
T20N80R	13,68
TON100R	8,05

**Fonte: Autoria própria (2017).**



**Gráfico 7 - Resistência do concreto**

**Fonte: Autoria própria (2017).**

Em relação ao traço de referência T100N0R, ou seja, com 100% de agregados graúdos naturais, os valores das resistências dos demais traços confeccionados com agregados reciclados foram decrescendo em relação a ordem de adição.

Comparando o traço T50R50N que é constituído de 50% de agregado natural e 50% de agregado reciclado, com o traço de referência T100N0R, nota-se uma diferença de aproximadamente 10 Mpa. Já para o traço T0N100R que é constituído de 100% com agregados graúdos reciclados, é visível o quanto a resistência diminuiu, em aproximadamente 69%

Após o rompimento dos corpos de prova, os mesmos não apresentavam deformações excessivas e nem rompiam externamente, o único defeito que apresentaram foram pequenas fissuras como mostra a Figura 14.

Para entender onde exatamente os corpos de prova estavam rompendo internamente, foi necessário quebrar alguns pedaços das fissuras. Como mostra a Figura 15, nota-se que na maioria dos casos os corpos de prova romperam no agregado reciclado ou onde havia mais porosidade.

Quando ocorreu a ruptura do corpo de prova, o rompimento interno foi na capa de argamassa que envolve o agregado, ela tem uma resistência menor que o agregado e diferente do concreto produzido. Outro ponto importante, é que não se tem muitas informações sobre o concreto usado para a britagem e confecção dos agregados reciclados, como por exemplo, resistência mecânica e idade. Isto também pode interferir no rompimento, porém é algo que a utilização deste tipo de agregado acaba trazendo como característica negativa, uma vez que numa usina chega diversos tipos de concretos de vários lugares diferentes.



Figura 13 – Corpos de prova após rompimento  
Fonte: Aatoria própria (2017).



Figura 14 - Corpo de prova aberto  
Fonte: Aatoria própria (2017).

Foi possível determinar também pela relação da massa do corpo de prova e volume do mesmo, a massa específica do concreto, onde percebe-se também que conforme foi utilizado mais agregado reciclado, a massa específica foi diminuindo, tornando o concreto mais leve.

**Tabela 8 - Massa específica do concreto**

Traço	Massa específica do concreto (Kg/m <sup>3</sup> )
T100N0R	2458,33
T80N20R	2291,67
T50N50R	2220,83
T20N80R	2250,00
TON100R	2056,25

**Fonte: Autoria própria (2017).**

#### 4.3 ENSAIO DE ABSORÇÃO E POROSIDADE

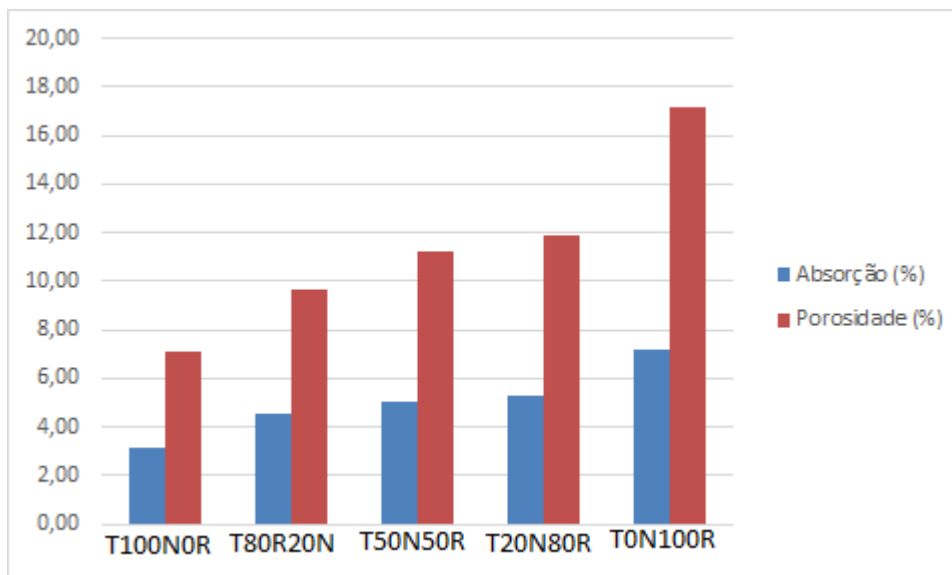
De acordo com a bibliografia, concretos produzidos a partir de concretos reciclados tendem a apresentar maior porosidade, ou seja, um maior índice de vazios.

Nesta etapa o ensaio de absorção por imersão comprovou exatamente isso. É possível perceber que no traço de referência T100N0R, teve uma menor absorção de água e menos índice de vazios do que os traços com porcentagens de agregado graúdo reciclado. A Tabela 9 abaixo traz elencado os traços e seus respectivos resultados médios em porcentagens.

**Tabela 9 - Absorção e índice de vazios**

Traço	Absorção (%)	Índice de vazios (%)
T100N0R	3,15	7,14
T80N20R	4,56	9,68
T50N50R	5,03	11,26
T20N80R	5,26	11,92
TON100R	7,17	17,19

**Fonte: Autoria própria (2017).**



**Gráfico 8 - Comparação entre absorção e porosidade**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**

Nas Figuras 16 e 17, nota-se a diferença entre os corpos de prova de concreto feitos a partir de agregado natural e agregado reciclado. Percebe-se também uma quantidade maior de poros, assim como o ensaio de índice de vazios indicou que havia mais poros em concretos feitos com agregados reciclados.



**Figura 15 - CP com agregado 100% natural**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**



**Figura 16 - CP com agregado reciclado**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**

Analisando as propriedades do concreto e comparando os valores encontrados, pode-se concluir que conforme for aumentando a quantidade de agregados reciclados, a resistência mecânica vai diminuindo. Uma das causas disso é a porosidade, pois um concreto com agregados reciclados se mostrou mais poroso que um concreto somente com agregados naturais, pois absorve mais água.

#### 4.4 EMPACOTAMENTO DE PARTICULAS

A segunda etapa deste trabalho consistiu em melhorar a resistência à compressão do concreto obtido com 100% de agregado reciclado com a finalidade de tentar aproveitar ao máximo esse resíduo da construção civil.

Em um primeiro momento apenas a brita 1 foi utilizada para o cálculo e, posteriormente, utilizou-se também a brita 0 para tentar melhorar as lacunas existentes e obter uma curva granulométrica mais otimizada.

Abaixo, seguem os cálculos de cada modelo para determinação das porcentagens ideais de cada agregado.

##### 4.4.1 Método de Funk e Dinger

Esse modelo tem por objetivo analisar a menor diferença entre a curva do traço e a curva granulométrica ideal apresentada pelo modelo de empacotamento máximo.

Para a construção da Tabela 9, utilizou-se as equações e métodos explicitados em metodologia e foi possível encontrar a porcentagem ideal de material para cada granulometria diferente.

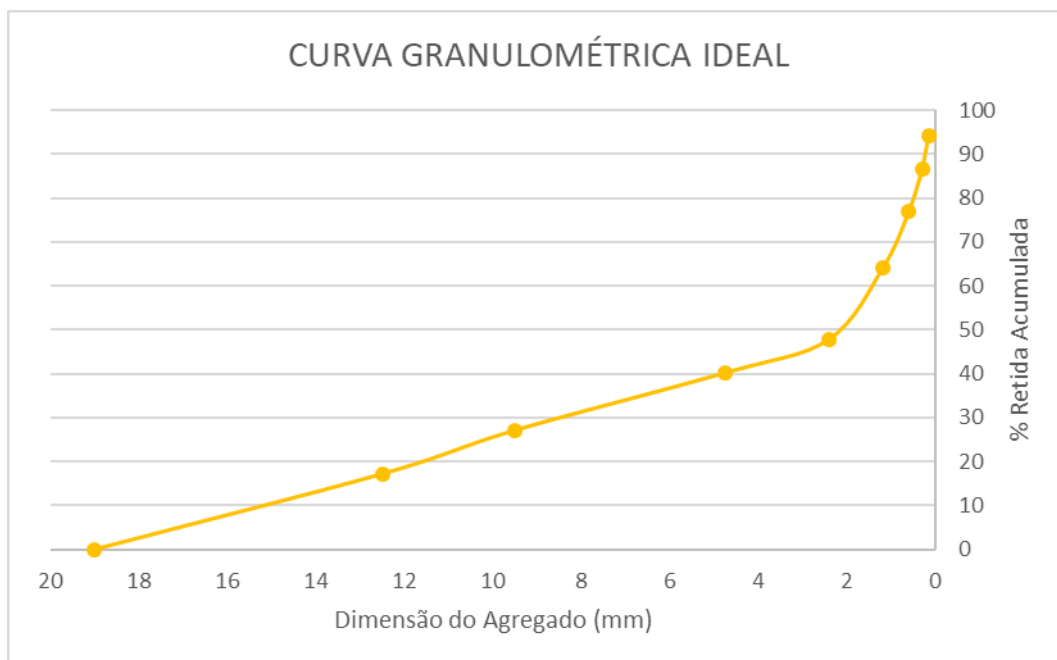
**Tabela 10 – Porcentagem ideal do modelo de Funk e Dinger**

MODELO FUNK E DINGER						
Abertura peneira (mm)	(%) ideal	q	(%) retida	%Passante	%Acumulada Retida	% Acumulada passante
19	100,00	0,37	0,00	100	0,00	100,00
12,5	82,78	0,37	17,22	82,78	17,22	82,78
9,5	72,85	0,37	9,92	90,08	27,15	72,85
4,75	59,76	0,37	13,09	86,91	40,24	59,76
2,4	52,12	0,37	7,64	92,37	47,88	52,12
1,18	35,81	0,37	16,32	83,68	64,19	35,81
0,6	23,18	0,37	12,63	87,38	76,82	23,18
0,3	13,41	0,37	9,77	90,23	86,59	13,41
0,15	5,85	0,37	7,56	92,44	94,15	5,85
Fundo	0,00	0,37	5,85	94,14	100,00	0,00

Fonte: Autoria própria (2017).

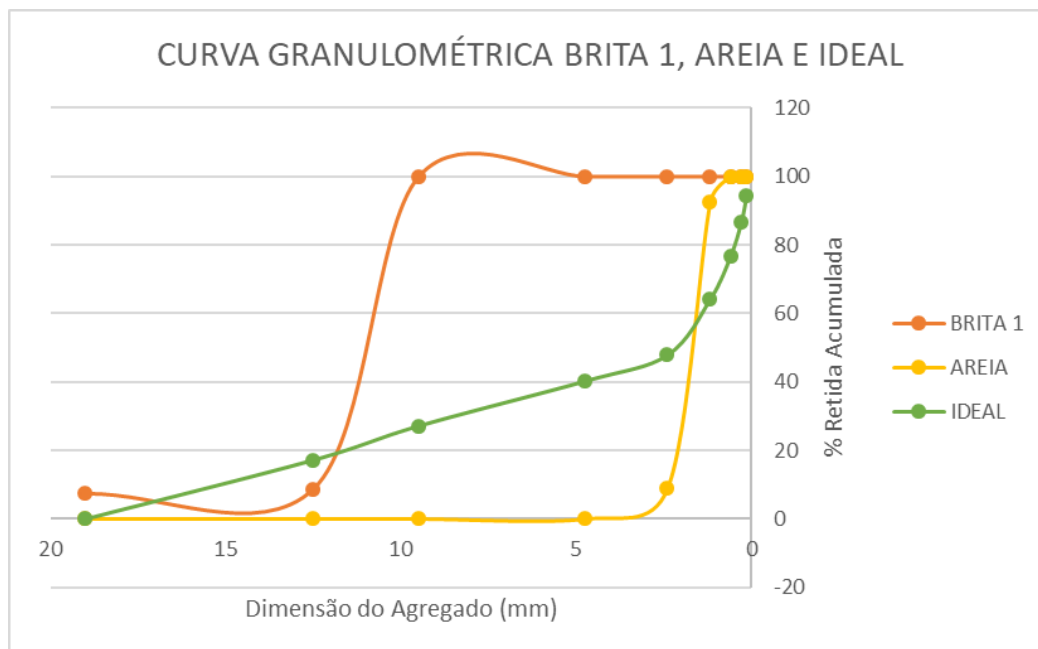


Com a porcentagem ideal de cada peneira determinada, foi feito o Gráfico 9 que representa a curva de distribuição granulométrica ideal, ou seja, a porcentagem ideal de cada granulometria que deveria ficar retida em cada peneira. Essa curva granulométrica ideal garante que todos os agregados se complementaríamos deixando o mínimo possível de espaços vazios entre eles.

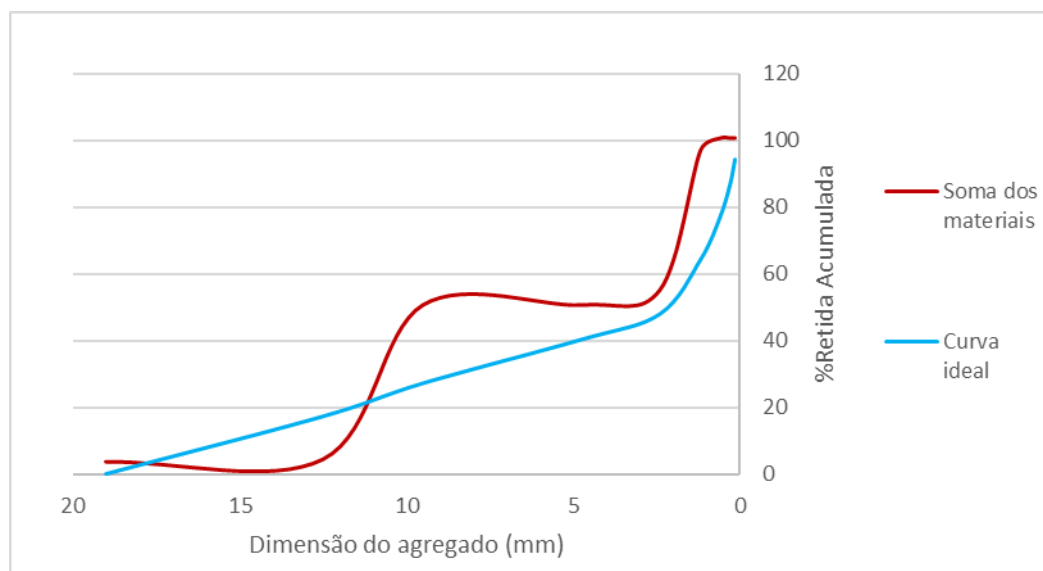


**Gráfico 9 - Curva granulométrica ideal**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**

Sendo assim, comparando a curva ideal com as curvas granulométricas da areia e brita 1 reciclada, foi possível visualizar essas curvas em um único gráfico (Gráfico 10) o qual mostra a disparidade entre as curvas de cada material.

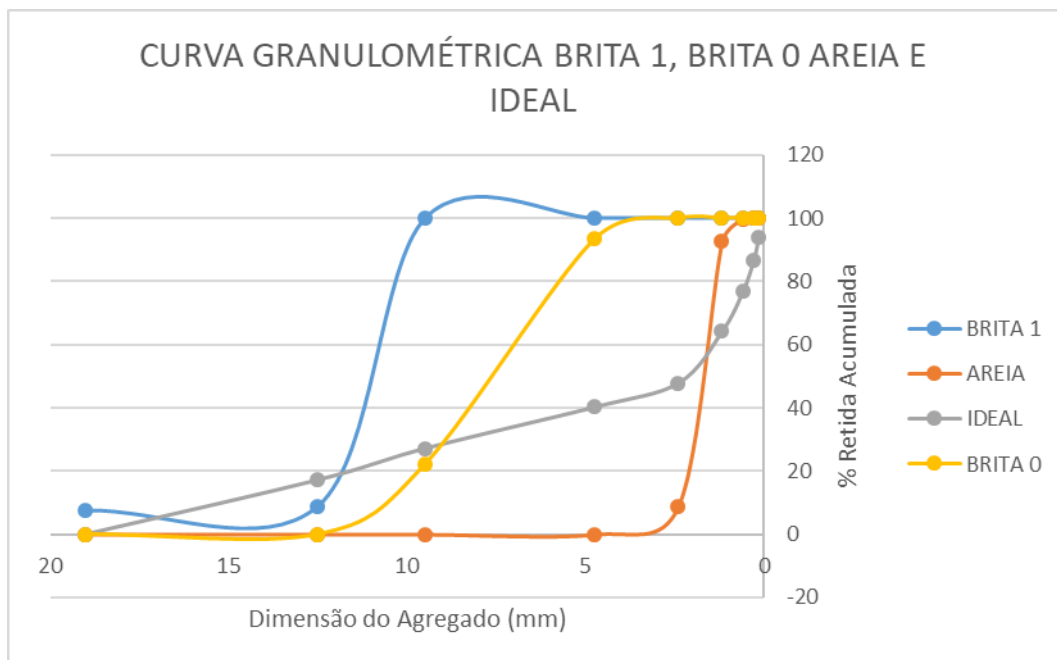


**Gráfico 10 - Curva granulométrica brita 1, areia e ideal**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**

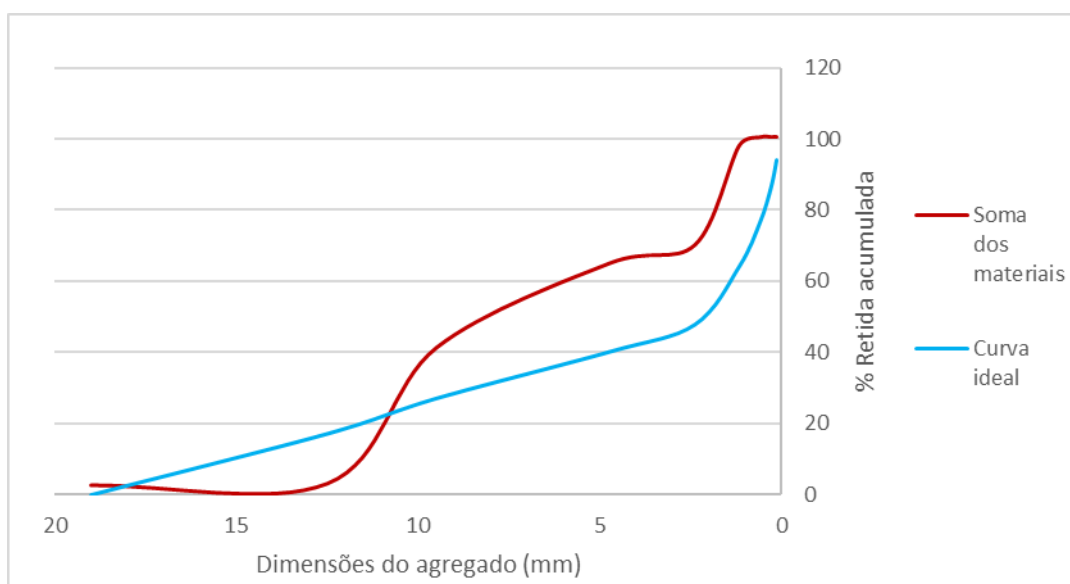


**Gráfico 11 - Curva da soma dos materiais e curva ideal**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**

Da mesma forma foi feito para o segundo empacotamento proposto. Então foram unidas as curvas no Gráfico 9, para ficar visível o quanto seria necessário excluir e adicionar de cada material.



**Gráfico 12 - Curva granulométricas brita 1, brita 0, areia e ideal**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**



**Gráfico 13 - Curva da soma dos materiais e curva ideal**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**

Como trabalhar no canteiro de obras, utilizando as porcentagens de massas exatas de cada peneira seria inviável, foi encontrada uma maneira através de cálculos de determinar a porcentagem total de agregado necessário para que ocorresse a otimização da curva.

Sendo assim, para a construção da Tabela 11 que apresenta os traços obtidos por meio deste modelo e, conseqüentemente, das curvas granulométricas, baseou-se nos dados do APÊNDICE C utilizados para o cálculo do modelo.

**Tabela 11 - Cálculo da porcentagem ideal do modelo para primeiro empacotamento**

Abertura peneira (mm)	%PASSANTE		COMPOSIÇÃO		% PASSANTE x COMPOSIÇÃO		SOMATÓRIO	% ACUMULADA DO MODELO	%MODELO - SOMATORIO
	Brita 1	Areia	Brita 1	Areia	Brita 1	Areia			
19	92,59%	100,00%	40,00%	60,00%	37,04%	60,00%	97,04%	100,00%	2,96%
12,5	98,62%	100,00%	40,00%	60,00%	39,45%	60,00%	99,45%	82,77%	-16,68%
9,5	8,80%	100,00%	40,00%	60,00%	3,52%	60,00%	63,52%	72,85%	9,33%
4,75	0,00%	100,00%	40,00%	60,00%	0,00%	60,00%	60,00%	59,75%	-0,25%
2,4	0,00%	91,04%	40,00%	60,00%	0,00%	54,62%	54,62%	52,12%	-2,50%
1,18	0,00%	7,34%	40,00%	60,00%	0,00%	4,40%	4,40%	35,80%	31,40%
0,6	0,00%	0,18%	40,00%	60,00%	0,00%	0,11%	0,11%	23,17%	23,06%
0,3	0,00%	0,40%	40,00%	60,00%	0,00%	0,24%	0,24%	13,40%	13,16%
0,15	0,00%	0,20%	40,00%	60,00%	0,00%	0,12%	0,12%	5,84%	5,72%
Fundo	0,00%	0,00%	40,00%	60,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

105,06%

**Fonte: Autoria própria (2017).**

Então o traço ideal encontrado para otimização da curva granulométrica de brita 1 reciclada e areia, foi de 40% e 60%, respectivamente, como mostra a Tabela 12. Lembrando que essas porcentagens se referem apenas aos agregados. Não foi alterada a quantidade de cimento e nem modificada a relação água/cimento.

Na Tabela 13, e nas demais presentes no Apêndice C e D, fica evidente que a peneira de abertura 1,18mm foi a que apresentou os piores resultados, pois sempre tinha as porcentagens mais elevadas.

**Tabela 12 - Porcentagem de material para utilizar no primeiro empacotamento**

TRAÇO BRITA+AREIA	
Brita 1	Areia
40%	60%

**Fonte: Autoria própria (2017).**

Da mesma forma, foram feitos os cálculos para o segundo caso proposto, contendo brita 1 reciclada, brita 0 reciclada e areia, e os cálculos para chegar até a diferença de porcentagem mínima possível, presente na Tabela 14 estão em anexo no Apêndice D.

**Tabela 13 - Cálculo da porcentagem ideal do modelo para segundo empacotamento**

Abertura peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMATÓRIO	% ACUM. DO MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	25,00%	17,00%	58,00%	23,15%	17,00%	58,00%	98,15%	100,00%	1,85%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	25,00%	17,00%	58,00%	24,66%	17,00%	58,00%	99,66%	82,77%	-16,89%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	25,00%	17,00%	58,00%	2,20%	13,22%	58,00%	73,42%	72,85%	-0,57%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	25,00%	17,00%	58,00%	0,00%	1,12%	58,00%	59,12%	59,75%	0,63%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	25,00%	17,00%	58,00%	0,00%	0,00%	52,80%	52,80%	52,12%	-0,68%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	25,00%	17,00%	58,00%	0,00%	0,00%	4,26%	4,26%	35,80%	31,54%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	25,00%	17,00%	58,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,10%	23,17%	23,07%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	25,00%	17,00%	58,00%	0,00%	0,00%	0,23%	0,23%	13,40%	13,17%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	25,00%	17,00%	58,00%	0,00%	0,00%	0,12%	0,12%	5,84%	5,72%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	25,00%	17,00%	58,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
												94,12%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 14 - Porcentagem de material para utilizar no segundo empacotamento**

TRAÇO BRITA+AREIA+BRITAO		
Brita 1	Areia	Brita 0
25%	58%	17%

Fonte: Autoria própria (2017).

Sendo assim, foi possível determinar a porcentagem exata de cada material para este traço como mostra a Tabela 15.

A partir destes cálculos foram calculadas as quantidades de materiais dos traços para rodar em canteiro de obras. O traço T100R-EMP1 é o traço do primeiro empacotamento apenas com brita 1 reciclada e areia, e o T100R-EMP2 é o traço do segundo empacotamento, com brita 1 reciclada, brita 0 reciclada e areia.

**Tabela 15 - Porcentagens encontradas pelo método de Funk e Dinger**

Traço	Areia	Brita 1 reciclada	Brita 0 reciclada
T100R-EMP1	60%	40%	
T100R-EMP2	58%	25%	17%

Fonte: Autoria própria (2017).

#### 4.4.2 Modelo de Toufar

Nesta etapa, o modelo de Toufar foi utilizado para uma comparação das porcentagens obtidas pelo método Funk e Dinger. Não foi feito na prática utilizando os resultados do método de Toufar, mas sim apenas o de Funk e Dinger.

Primeiramente foi necessário determinar o empacotamento de cada material isolado, para então calcular a densidade de empacotamento dos materiais quando

dispostos juntos. A Tabela 16 mostra os dados iniciais da densidade de empacotamento de cada material.

**Tabela 16 - Parâmetros para primeiro empacotamento pelo modelo de Toufar**

Dados dos materiais	Brita 1	Areia
$\beta_i$	0,5018	0,532

**Fonte: Autoria própria (2017).**

Posteriormente a partir das equações do modelo, e dos intervalos das porcentagens determinadas para cada material, calculou-se o empacotamento máximo dos materiais (Tabela 17). A variação foi de 0 a 100%, fazendo as iterações de 10 em 10% até chegar no valor de empacotamento máximo. Quando esse valor era encontrado então foi necessário abrir aquele intervalo onde o empacotamento estava de 1 em 1%.

Os cálculos para encontrar esses valores presentes na Tabela 17, encontram-se no Apêndice E.

**Tabela 17 - Empacotamento máximo pelo modelo de Toufar**

Tabela	1 - Areia	2 - Brita 1	Empacotamento
1	0%	100%	0,502
2	100%	0%	0,5323
3	90%	10%	0,567
4	85%	15%	0,587
5	83%	17%	0,594
6	82%	18%	0,812
7	81%	19%	0,810
8	80%	20%	0,807
9	79%	21%	0,801
10	75%	25%	0,778
11	70%	30%	0,745
12	60%	40%	0,685
13	50%	50%	0,637

**Fonte: Autoria própria (2017).**

Para o primeiro caso, quando utilizado a otimização da curva granulométrica pelo método de Funk e Dinger, o percentual ideal foi de 40% brita 1 e 60% areia. Já pelo modelo de Toufar, o empacotamento máximo seria com percentuais de 18% de brita 1 e 82% de areia.

As tabelas 18 e 19 apresentam os resultados para o segundo empacotamento, que foi calculado com 3 granulometrias diferentes, brita 1 reciclada, brita 0 reciclada e areia.

**Tabela 18 - Parâmetros para segundo empacotamento pelo modelo de Toufar**

Dados dos materiais	Brita 1	Brita 0	Areia
$\beta_i$	0,5018	0,4982	0,5323

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 19 - Empacotamento máximo pelo modelo de Toufar**

Tabela	1 - Areia	2-Brita 1	3- Brita 0	Empacotamento
1	0%	0%	100%	0,5018
2	0%	100%	0%	0,4982
3	100%	0%	0%	0,532
4	90%	5%	5%	0,581
5	80%	10%	10%	0,627
6	70%	15%	15%	0,787
7	60%	20%	20%	0,731
8	50%	25%	25%	0,695
9	55%	25%	20%	0,709
10	58%	25%	17%	0,718

Fonte: Autoria própria (2017).

Para este segundo empacotamento, os valores também ficaram diferentes do que as porcentagens ideais encontradas pelo modelo de Funk e Dinger, porém mais próximos que os anteriores. Isso ocorre porque trabalha-se com 3 granulometrias diferentes. E essa diferença acontece também porque o método de Funk e Dinger procura otimizar a curva granulométrica dos materiais, enquanto o modelo de Toufar busca encontrar o empacotamento máximo de partículas.

A quantidade elevada de agregado miúdo (finos), determinaria o uso de aditivo, como por exemplo, o superplastificante, pois além de uma absorção maior de água por conta do agregado reciclado, há a presença de mais areia nesse traço, que tem maior superfície específica e como consequência demandam mais água, perdendo assim, trabalhabilidade.

Pelo método de Funk e Dinger os percentuais ideais seriam de 58% areia, 25% brita 1 reciclada e 17% brita 0 reciclada. Já pelo modelo de Toufar o empacotamento máximo girou em torno de 70% de areia e 15% de brita 1 reciclada e brita 0 reciclada.

#### 4.5 ENSAIOS CURVA GRANULOMÉTRICA OTIMIZADA

Após aplicar os valores encontrados nos cálculos do método de Funk e Dinger na produção de novos concretos, foi repetido os ensaios de resistência à compressão e absorção do concreto, para verificar se as porcentagens granulométricas ideais encontradas realmente conseguiam melhorar as características do concreto.

##### 4.5.1 Resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão, foi possível perceber que com o primeiro caso (brita 1 + areia) os valores de resistência não tiveram aumento significativo. No entanto para o traço feito a partir do segundo caso, com 3 granulometrias diferentes (brita 0+ brita 1 + areia), houve um aumento de aproximadamente 4 Mpa, a Tabela referente com todos os dados está no Apêndice B, a Tabela 20 traz apenas a resistência média.

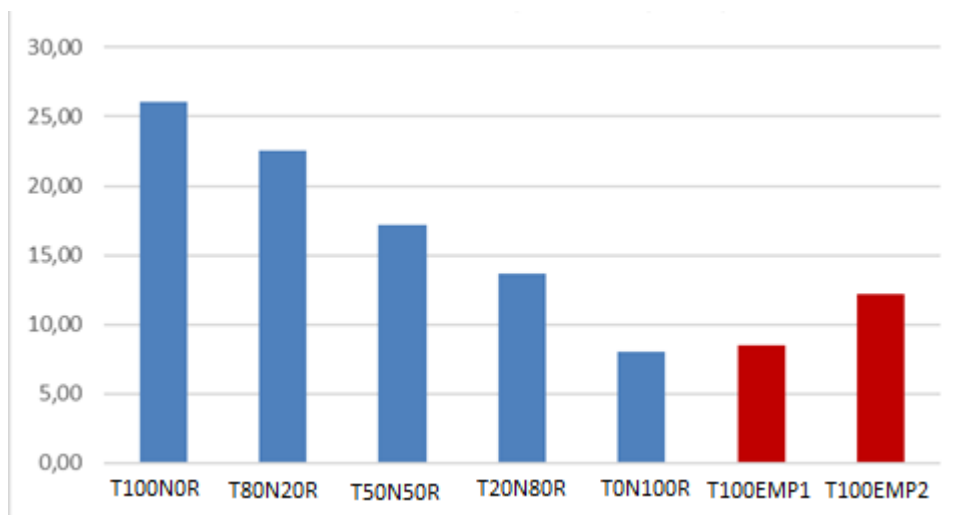
**Tabela 20 - Resistência à compressão dos concretos após empacotamento**

Traço	Resistência (MPa)
T100R-EMP1	8,51
T100R-EMP2	12,18

**Fonte: Autoria própria (2017).**

No Gráfico 12, é possível verificar o aumento da resistência dos concretos com 100% de agregados reciclados após o empacotamento. Percebe-se também que o valor encontrado no traço T100R-EMP2 ficou parecido com o traço T20N80R.





**Gráfico 14 - Aumento da resistência dos concretos após empacotamento**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**

**Tabela 21 - Massa específica após empacotamento**

Traço	Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> )
T100R-EMP1	2075
T100R-EMP2	2175

**Fonte: Autoria própria (2017).**

Os valores de massa específica encontrados nos concretos, após aplicar o método do empacotamento de partículas, resultaram em resultados parecidos com o traço T0N100R, conforme o esperado. O T100R-EMP2 teve um valor maior de massa específica, pois trabalhava além da brita 1 reciclada e areia, também com a brita 0 reciclada.

#### 4.5.2 Absorção e Porosidade

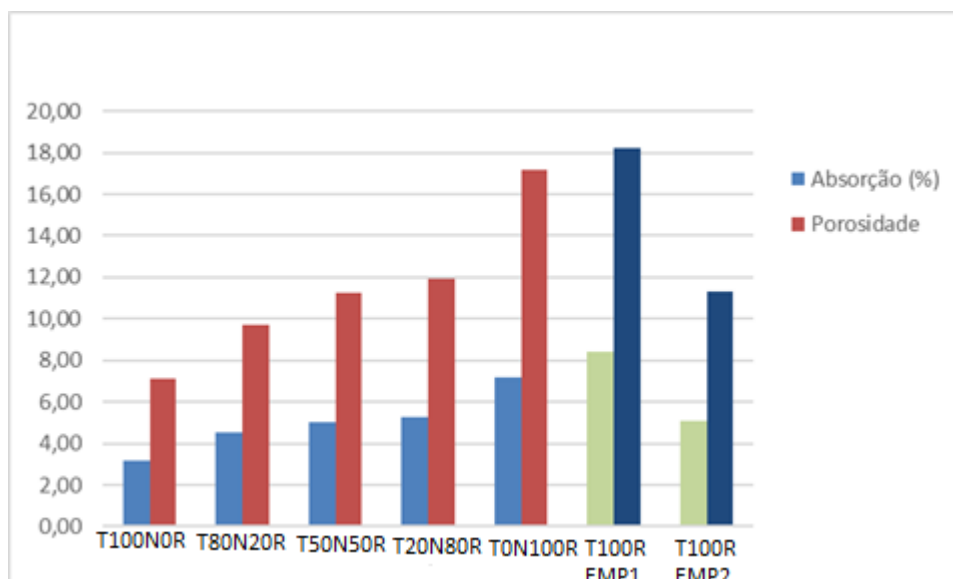
A absorção e índice de vazios obtidas após a otimização da curva no primeiro caso foram um pouco maiores do que os valores encontrados antes da aplicação do método. Isso pode ser explicado pela resistência também ter ficado próxima, e também, por ser um empacotamento com apenas duas granulometrias diferentes.

Já o valor obtido tanto para absorção quanto para o índice de vazios para o segundo empacotamento foi reduzido se comparado ao traço T0N100R.

**Tabela 22 - Absorção e porosidade após empacotamento**

Traço	Absorção (%)	Índice de vazios (%)
T100R-EMP1	8,41	18,20
T100R-EMP2	5,10	11,30

**Fonte: Autoria própria (2017).**



**Gráfico 15 - Absorção e porosidade após empacotamento**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**

É possível perceber que no traço T100R-EMP1 a absorção e índice de vazios aumentou. O esperado era que diminuísse, pois haveria um empacotamento melhor. Porém, por motivos de erros na produção, esse traço ficou mais poroso e absorveu mais água.

Já no traço T100R-EMP2, a absorção e porosidade diminuiu, chegando a valores próximos ao traço que continha agregado natural também T20N80R.

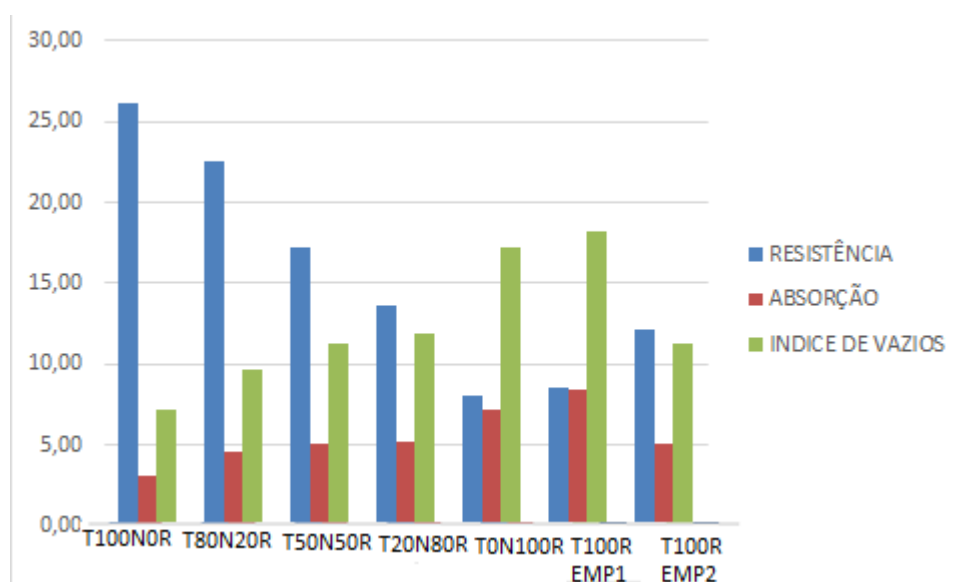
#### 4.6 COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS APÓS APLICAR O MÉTODO DE FUNK E DINGER ENTRE TODOS OS TRAÇOS

Na Tabela 23 estão elencados a resistência, absorção e índice de vazios de todos os traços para um melhor entendimento dos resultados obtidos.

Traço	Resistência (Mpa)	Absorção (%)	Índice de vazios (%)
T100N0R	26,1	3,15	7,14
T80N20R	22,57	4,56	9,68
T50N50R	17,22	5,03	11,26
T20N80R	13,68	5,26	11,92
TON100R	8,05	7,17	17,19
T100R-EMP1	8,51	8,41	18,2
T100R-EMP2	12,18	5,1	11,3

**Fonte: Autoria própria (2017).**

No Gráfico 14 está a disposição dos traços em relação ao índice de vazios, absorção e resistência. Nele fica perceptível o quanto a resistência decresceu conforme foi aumentando a porcentagem de agregados reciclados e, depois, o ganho de resistência após o empacotamento de partículas. O mesmo acontece para o índice de vazios.



**Gráfico 16 - Comparativo dos traços**  
**Fonte: Autoria própria (2017).**

Analisando os resultados encontrados, conclui-se que um concreto feito com agregados reciclados vai perdendo resistência conforme utiliza-se menos material natural. Isso é consequência do índice de vazios que aumenta em concretos a partir de agregados reciclados.

Pode-se dizer que o método de Funk e Dinger foi eficiente no aumento da resistência e porosidade com a utilização de três granulometrias. Mas com duas granulometrias o método não apresentou aumento significativo na resistência, e a porosidade ainda aumentou em relação ao traço T0N100R. Isso pode ser explicado pelas lacunas em algumas dimensões de agregados. Como o método trabalha com uma curva granulométrica otimizada, todas as faixas granulométricas devem ser preenchidas para que o resultado seja efetivo. Nota-se também que a parcela mais deficiente dos agregados é justamente uma parcela fina de 1,18mm, e ao adicionar mais finos no concreto a quantidade de água para envolver todos os grãos é aumentada devido à maior superfície específica dos materiais. Como consequência

disso, tem-se, justamente, a diminuição da trabalhabilidade e, portanto, correto adensamento e em consequência a resistência mecânica final do concreto. Pode-se observar, também, que no modelo de Toufar a quantidade de agregado miúdo também se mostra mais elevada. O método é eficiente em demonstrar exatamente como as parcelas de agregados deveriam se complementar para que ocorresse o melhor empacotamento, ou seja, o melhor ajuste entre eles. Porém, como resposta, o uso de aditivos, nestes casos, seria ideal.

## 5 CONCLUSÃO

A pesquisa em questão, visando diminuir os impactos ambientais causados pela construção civil e reutilizando resíduos que não tinham destino correto, propôs verificar se um concreto feito com agregados graúdos reciclados atingiria valores significativos de resistência tornando possível seu uso.

As porcentagens de variação entre agregados graúdos naturais e reciclados escolhidas para cada traço, tinham o intuito de comparar a questão relativa a porosidade e resistência do concreto. Os resultados mostraram que os objetivos do trabalho foram satisfeitos e que conforme ia se adicionando mais agregado reciclado os valores de resistência baixaram de forma contínua. Os valores de abatimento do concreto mostram também que um concreto com agregados reciclados, tem uma trabalhabilidade menor do que concretos convencionais, o que dificulta um pouco a sua produção e utilização.

A aplicação de concreto com agregados reciclados, requer ainda mais estudos. A utilização mais tradicional destes concretos, geralmente está em materiais sem função estrutural, como argamassas de revestimento, contrapisos, em reforço de base e sub-base de pavimentos, blocos de vedação e etc. Analisando as resistências características de cada traço dos concretos, nota-se que como função estrutural apenas o traço T80N20R, que tinha em sua composição 80% de agregados graúdos naturais e 20% de agregados graúdos reciclados, poderia ser utilizado, já que foi o único que atendeu aos requisitos mínimos da NBR 6118 (ABNT, 2004), que estabelece que a resistência mínima para utilização em concreto armado é de 20MPa.

Uma das vantagens do concreto com agregados graúdos reciclados é o peso do mesmo. A massa específica do traço T100N0R, que era o traço de referência, foi de aproximadamente 2500 kg/m<sup>3</sup>. Já comparando com o traço T5, que continha somente agregados graúdos reciclados, a massa específica dele foi aproximadamente de 2000 kg/m<sup>3</sup>. Essa redução do peso próprio da estrutura, faz com que seja vantajoso de se utilizar esse concreto com agregados reciclados em funções como enchimento de lajes e também elementos de vedação.

Comparando os modelos de Funk e Dinger e Toufar, a diferença de resultados entre um e outro, é explicada pois o método de Funk e Dinger busca otimizar a curva granulométrica, enquanto o modelo de Toufar busca encontrar o empacotamento

máximo entre os agregados, independentemente da continuidade das curvas granulométricas. Para obter resultados mais precisos poderia ter se trabalhado com massas de cada agregado retidas em cada peneira. Porém, para otimizar o trabalho em canteiro de obras, optou-se por trabalhar apenas com porcentagens de cada material em relação ao volume total de agregado de acordo com o traço, uma vez que essa situação hipotética se torna difícil quando em grandes quantidades de concreto.

Cabe salientar que os modelos matemáticos para empacotamento consideram grãos perfeitamente esféricos, o que não é o caso dos utilizados neste estudo também. Mas, na questão do empacotamento ficou explícito que o empacotamento contendo três granulometrias diferentes fornece um concreto menos poroso e conseqüentemente uma resistência maior.

A curva granulométrica ideal nos dá um resultado em porcentagens ideais. Mas ficou explícito também a deficiência em uma das peneiras mais finas, ou seja, faltou grãos com dimensão em torno de 1,2 milímetros. Nota-se que a tentativa em melhorar a resistência e porosidade do concreto foi atendida, já que o empacotamento de partículas proporcionou um aumento na resistência e também na porosidade de um concreto feito com 100% de agregados graúdos reciclados.

O presente trabalho que tinha por objetivo analisar a viabilidade de utilização de agregados reciclados de concreto para produção de novos concretos, obteve em seus resultados que é possível sim a utilização destes agregados. No entanto, para o uso em concretos menos nobres. Já para atingir resistências mais altas é necessário trabalhar com porcentagens em conjunto com o agregado natural juntamente com métodos que melhorem o uso destes materiais reciclados.

## REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 5738:2003** – Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova.

\_\_\_\_ **NBR 5739:2007** – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

\_\_\_\_ **NBR 6118:2004** – Projeto de estruturas de concreto.

\_\_\_\_ **NBR 6457:1986** – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

\_\_\_\_ **NBR 7211:2009** - Agregados para concreto – Especificação.

\_\_\_\_ **NBR 7212:2012** – Execução de concreto dosado em central.

\_\_\_\_ **NBR 7222:1994** - Argamassa e Concreto – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos.

\_\_\_\_ **NBR 9776:1987** - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco.

\_\_\_\_ **NBR 9778:1987** – Argamassa e concreto endurecidos.

\_\_\_\_ **NBR 12655:2006** – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento.

\_\_\_\_ **NBR NM 52:2002** – Agregado miúdo - Determinação da massa específica.

\_\_\_\_ **NBR NM 53:2003** – Agregado graúdo - Determinação da massa específica.

\_\_\_\_ **NBR NM 67:1998** - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

\_\_\_\_ **NBR NM 248:2003** – Agregado - Determinação da composição granulométrica.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**, 2010.

AMADEI, Daysa I. B. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do município de Juranda/PR**. 2011. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011. Disponível em: <<http://www.peu.uem.br/Discertacoes/Daysa.pdf>>. Acesso em: 20 de abril de 2017.

**APOSTILA DE TECNOLOGIA DO CONCRETO.** Disponível em: <<http://site.ufvjm.edu.br/icet/files/2013/04/Concreto-02.pdf>> Acesso em: 05 de abril de 2017.

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

BATISTA, Cristiano Gonçalves. **Influência na resistência à compressão de concretos com agregados reciclados de concreto em substituição ao agregado natural.**

BOEGH, E; HANSEN, T. **Elasticity and drying shrinkage of recycled-aggregate concrete.** *Journal of American Concrete Institute Proceedings*, (1985).

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução Conama no 307**, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, 17 jul. 2002.

BUTTLER, Alexandre M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto:** influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados de concretos reciclados. 2003. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CALLISTER Jr, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais-Uma Introdução.** 8 ed. São Paulo: LTC. 2012.

CARASEK, Helena. **Argamassas.** Capítulo 26. Artigo de pós-graduação em Geotecnia e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiás, 2004.

CARNEIRO, Heldio. **Concreto de cimento portland.** Apostila do Centro de Ensino superior do Amapá.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente (2002). **Resolução nº 307**, de 5 de julho de 2002. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação. Diário Oficial da União, 17/07/2002.

DAMINELI, Bruno Luís. **Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**

DANTAS, Igor. **Concreto – ingredientes e relação água/cimento.** Disponível em <<https://engciv.wordpress.com/2012/07/16/concreto-ingredientes-e-relacao-agua-cimento/>> Acesso em: 25 de maio de 2017.

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



EFFTING, Carmeane. **Propriedades do concreto fresco e endurecido**. Disponível em: <<http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/carmeane/materiais.pdf>> Acesso em: 25 de março de 2017.

FENNIS, S. A. A. M. ; **Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization**. 2011. 256 p. Dissertação (Doutorado) –Universidade Técnica de Delft –Holanda, 2011.

FERNANDES, Antonio Vitor Barbosa, **Concreto sustentável aplicado na construção civil**. 2014. Disponível em: <<file:///C:/Users/ASUS/Downloads/1093-4559-1-PB.pdf>> Acesso em: 20 de maio de 2017.

FERREIRA, Frank Dias. **Propriedades relevantes e processos de produção do agregado reciclado, reciclado da construção civil**. 2014. Disponível em: <<https://engenhafrankcom.wordpress.com/2014/03/20/propriedades-relevantes-e-processos-de-producao-do-agregado-reciclado-reciclado-da-construcao-civil/>>. Acesso em: 20 de maio de 2017.

GEYER, André Luiz B. **Importância do controle de qualidade do concreto no estado fresco**. Informativo técnico – Realmix, Ano 2 n.2, 2006.

GIAMMUSSO, S. **Manual do Concreto**. São Paulo: PINI, 1992.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1994.

GONÇALVES, Rodrigo Dantas Casillo. **Agregados reciclados de resíduos de concreto – um novo material para dosagens estruturais**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos.

HENDRIKS, Ch. F. *Application of construction and demolition waste*. **Heron**, v 46, p 95 – 108, 2001.

HERMANN, Aline. **Empacotamento de agregados reciclados para concretos vibrocompactados**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba. Paraná.

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

JUAN, Marta Sanchez; GUTIERREZ, Pilar Alaejos. **Estudo da Influencia da Argamassa presente nos agregados reciclados**. *Construction and Building Material*, Laboratório de Estruturas e Materiais. Madri, 2009.

KATZ, A. **Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. cement and concrete reserarch. (2002)**.

LEVY, Salomon Mony. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

Disponível: <[http://www.infohab.org.br/acervos/abstract/codigoAutor/785/codigo\\_bibli\\_o/31074/cod/1](http://www.infohab.org.br/acervos/abstract/codigoAutor/785/codigo_bibli_o/31074/cod/1)>. Acesso em: 25 de março de 2017.

LAURITZEN, E. K. **Third International Rilem Symposium on Demolition and reuse of concrete and Masonry Odense**. 1994. Denmark.

LEITE, Mônica B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <[http://www.lume.ufrgs.br/bitstream\\_id/45864/000292768.pdf](http://www.lume.ufrgs.br/bitstream_id/45864/000292768.pdf)>. Acesso em: 10 de maio de 2017.

LIMBACHIYA, M. C. *Use of recycled concrete aggregate in high – strength concrete*. **Materials and Structures**, Vol 33, 2000.

MAPRE, **Equipamentos Rodoviários. Usina de Reciclagem de Entulho**. Disponível em: <<http://mapreequipamentos.com.br/usina-de-reciclagem-de-entulho/>>. Acesso em: 20 de maio de 2017.

MARINKOVIÄ, Snežana B.; IGNJATOVIÄ, Ivan S.; RADONJANIN, Vlastimir S.; MALESE, and Mirjana M. **Agregados Reciclados de Concreto para Uso Estrutural - Uma Revisão de Tecnologias, Propriedades e Aplicações**. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Belgrado. Servia, 2012.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Ed. Pini, 3ª Ed., 2008.

METHA, Povindar Kumar, **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, 1994.

MIRANDA, Leonardo F. R. **Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos classe A da construção civil**. 2005. 438 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <[http://www.prppg.ufpr.br/ppgcc/sites/www.prppg.ufpr.br/ppgcc/files/documentos/tese\\_leonardo\\_miranda.pdf](http://www.prppg.ufpr.br/ppgcc/sites/www.prppg.ufpr.br/ppgcc/files/documentos/tese_leonardo_miranda.pdf)>. Acesso em: 30 de março de 2017.

NEVILLE, Adam M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2 ed., Porto Alegre. Bookman, 448p., 2013

NEVILLE, Adam M.; **Propriedades do Concreto**. 2 ed., São Paulo: Pini. 1997.

OLIVEIRA, Ivone R.; STUDART, André R.; PILEGGI, Rafael G.; PANDOLFELLI, Victor C. **Dispersão e Empacotamento de Partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000.

PATTO, Andre Luiz Duqui Brunini. **Minimização de impactos ambientais com a utilização de resíduos de construção e demolição como agregados**. Taubaté, SP: 2006.

PETRUCCI, Eladio Geraldo Requião; PAULON, Vladimir Antonio. **Concreto de cimento Portland**. 14 ed. 307p. Porto Alegre, 2005.

QIAN, Xin. **Estudo de Tratamento de Ácido Fraco em Agregados Reciclados Graúdos**. Programa de Pós Graduação da Universidade do Alabama, 2014).

RAO, Akash; JHAB, Kumar N. MISRAA, Sudhir. **Uso de Agregados Reciclados de Resíduo de Construção e Demolição de Concreto**. Departamento de Engenharia Civil do IIT Kanpur. India, 2007.

SILVA, Narciso Gonçalves da. **Influência dos finos e da cal nas propriedades da argamassa**. 2006. Disponível em: <[http://paginapessoal.utfpr.edu.br/ngsilva/links-2/noticias/ENTAC2006\\_Finos.pdf](http://paginapessoal.utfpr.edu.br/ngsilva/links-2/noticias/ENTAC2006_Finos.pdf)>. Acesso em: 20 de maio de 2017.

SOUSA, José G. G. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto: aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado**. 2001. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília, 2001. Disponível em: <[http://estruturas.unb.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=112%3Ateses-e-dissertacoes-2001&catid=51&Itemid=80&lang=pt](http://estruturas.unb.br/index.php?option=com_content&view=article&id=112%3Ateses-e-dissertacoes-2001&catid=51&Itemid=80&lang=pt)>. Acesso em: 02 de junho de 2017.

SOUTSOS, Marios N.; TANG, Kangkang; MILLARD, Stephen G. Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate. **Construction and Building Materials** **25**. 726– 735, 2011a.

## **ANEXOS**

## ANEXO A

# Boletim de Ensaios de Cimento



Atualizado em: **10/11/2017** Produto: **CPIIZ-32 Todas Obras** Norma: **NBR 11578**  
 Mês e ano de referência: **out/17** Marca: **Votoran** Unidade: **Rio Branco**

Ensaio	Químicos				Físicos e mecânicos											
	Teores (%)				Finura(%)		Blaine	Água de	Tempo Pega		Expansib. a	Resist. à Compressão (MPa)				
	PF	MgO	SO <sub>3</sub>	RI	#200	#325	(cm <sup>2</sup> /g)	consist.(%)	Início (min)	Fim (min)	quente (mm)	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias	
Limites de Norma	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 16,0	≤ 12,0	N/A	≥ 2600	N/A	≥ 60	≤ 600	≤ 5,0	N/A	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0 ; ≤ 49,0	
01/10/2017																
02/10/2017	4,7	5,4	3,3	12,9	1,6	14,6	3450	26,6	290	360	1,0	14,7	26,3	33,0	40,0	
03/10/2017	4,5	5,5	3,3	11,8	1,8	13,6	3390	26,8	270	340	0,0	15,3	26,7	33,2	40,2	
04/10/2017	4,9	5,3	3,2	12,3	1,8	12,9	3530	27,4	290	355	0,5	13,0	26,7	31,0	39,8	
05/10/2017	5,1	5,3	3,4	13,8	1,8	13,4	3340	27,8	310	385	0,5	12,5	26,0	31,5	38,2	
06/10/2017	5,3	5,2	3,4	14,2	1,8	13,4	3470	27,6	280	350	0,0	13,0	24,0	30,6	38,6	
07/10/2017																
08/10/2017																
09/10/2017	5,3	5,3	3,4	13,2	1,6	13,5	3390	27,6	280	350	0,0	12,6	26,0	30,7	39,4	
10/10/2017	5,3	5,2	3,4	14,8	1,8	12,8	3530	27,2	280	355	0,0	12,7	26,2	30,6		
11/10/2017																
12/10/2017																
13/10/2017	5,1	5,3	3,3	14,4	1,7	11,9	3630	28,0	280	350	0,5	14,2	24,7	30,0		
14/10/2017																
15/10/2017																
16/10/2017	4,9	5,3	3,1	14,5	1,3	12,7	3390	27,8	280	350	0,0	14,9	25,3	31,9		
17/10/2017	4,9	5,3	3,3	11,9	1,6	13,8	3760	27,2	270	340	0,0	13,9	25,0	32,0		
18/10/2017	4,7	5,4	3,2	12,4	1,6	13,2	3450	28,1	300	375	0,0	11,1	24,3	31,3		
19/10/2017	5,0	5,4	3,4	12,6	1,7	12,3	3600	27,2	300	375	0,0	12,0	26,3	31,8		
20/10/2017	5,2	5,2	3,4	14,2	1,6	11,9	3660	28,2	310	385	0,0	12,4	25,6	29,6		
21/10/2017																
22/10/2017																
23/10/2017	5,1	5,3	3,3	13,2	1,7	12,1	3470	27,8	290	360	0,5	13,5	24,1	29,3		
24/10/2017	4,8	5,5	3,2	13,6	1,7	12,0	3630	28,0	300	370	0,5	12,6	24,3	30,1		
25/10/2017	5,1	5,4	3,0	14,0	1,6	11,3	3760	28,2	300	375	0,5	13,6	23,9	29,7		
26/10/2017	5,1	5,4	3,2	14,1	1,8	13,0	3600	28,0	280	350	0,5	11,8	24,1	29,6		
27/10/2017	5,3	5,3	3,3	14,0	1,8	13,6	3420	28,0	285	355	0,5	10,6	22,6	27,9		
28/10/2017																
29/10/2017																
30/10/2017	5,0	5,4	3,1	13,4	1,8	12,5	3600	28,0	280	355	0,0	13,7	24,7	30,3		
31/10/2017	5,3	5,3	3,2	14,3	1,7	13,5	3500	27,4	270	340	0,5	11,7	23,0	29,1		
<b>Média</b>	<b>5,03</b>	<b>5,33</b>	<b>3,27</b>	<b>13,48</b>	<b>1,69</b>	<b>12,90</b>	<b>3528,50</b>	<b>27,65</b>	<b>287,25</b>	<b>358,75</b>	<b>0,28</b>	<b>12,99</b>	<b>24,99</b>	<b>30,66</b>	<b>39,37</b>	
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,23</b>	<b>0,08</b>	<b>0,11</b>	<b>0,91</b>	<b>0,13</b>	<b>0,81</b>	<b>122,53</b>	<b>0,46</b>	<b>12,51</b>	<b>14,13</b>	<b>0,30</b>	<b>1,25</b>	<b>1,21</b>	<b>1,33</b>	<b>0,80</b>	
<b>Mínimo</b>	<b>4,50</b>	<b>5,21</b>	<b>3,02</b>	<b>11,81</b>	<b>1,30</b>	<b>11,30</b>	<b>3340,00</b>	<b>26,60</b>	<b>270,00</b>	<b>340,00</b>	<b>0,00</b>	<b>10,60</b>	<b>22,60</b>	<b>27,90</b>	<b>38,20</b>	
<b>Máximo</b>	<b>5,35</b>	<b>5,50</b>	<b>3,44</b>	<b>14,79</b>	<b>1,80</b>	<b>14,60</b>	<b>3760,00</b>	<b>28,20</b>	<b>310,00</b>	<b>385,00</b>	<b>1,00</b>	<b>15,30</b>	<b>26,70</b>	<b>33,20</b>	<b>40,20</b>	

## Observações:

ME= 3,00 g/cm<sup>3</sup>

Abílio Estevão Galli Junior

Nome  
Responsável Controle de Qualidade  
Votorantim Cimentos S/A

Thomas Rheinegger

Nome  
Gerente da Fábrica  
Votorantim Cimentos S/A

Central de Relacionamento com o Cliente: Capitais 4003 9894 | Demais localidades 0800 701 9894  
 Serviço de Atendimento ao Consumidor: 0800 701 9898  
 Site: [www.vcimentos.com.br](http://www.vcimentos.com.br)

## APÊNDICE

## APÊNDICE A – Caracterização dos materiais

**Tabela 24 - Granulometria areia**

AGREGADO MIÚDO - AREIA					
Abertura peneira (mm)	Massa (g)	% Retida	%Passante	%Acumulada Retida	% Acumulada passante
19	0	0	100	0	100
12,5	0	0	100	0	100
9,5	0	0	100	0	100
4,75	0	0	100	0	100
2,4	450	8,96	91,04	8,96	91,04
1,18	4205	83,7	16,3	92,66	7,34
0,6	360	7,16	99,86	99,82	0,18
0,3	7	0,14	99,86	99,96	0,04
0,15	1	0,02	99,98	99,98	0,02
Fundo	1	0,02	99,98	100	0

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 25 - Granulometria brita natural 1**

AGREGADO NATURAL BRITA 1					
Abertura peneira (mm)	Massa (g)	% Retida	%Passante	%Acumulada Retida	% Acumulada passante
19	131,4	2,59	97,41	2,59	97,41
12,5	351,00	6,86	93,14	9,45	90,55
9,5	4530,8	88,58	11,42	98,03	1,97
4,75	88,9	1,76	98,24	99,79	0,21
2,4	0,2	0,003	99,997	99,793	0,207
1,18	0	0	0	99,793	0,207
0,6	0	0	0	99,793	0,207
0,3	0	0	0	99,793	0,207
0,15	0	0	0	99,793	0,207
Fundo	12,4	0,24	99,76	100	0

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 26 - Granulometria brita 1 reciclada**

AGREGADO RECICLADO BRITA 1

Abertura peneira (mm)	Massa (g)	% Retida	%Passante	%Acumulada Retida	% Acumulada passante
19	378	7,41	92,59	7,41	92,59
12,5	70,5	1,38	98,62	8,79	91,2
9,5	4647	91,2	8,8	99,99	83,8
4,75	0	0	0	99,99	0
2,4	0	0	0	99,99	0
1,18	0	0	0	99,99	0
0,6	0	0	0	99,99	0
0,3	0	0	0	99,99	0
0,15	0	0	0	99,99	0
Fundo	0	0	0	100	0

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 27 - Granulometria brita 0 reciclada**

AGREGADO RECICLADO - BRITA 0

Abertura peneira (mm)	Massa (g)	% Retida	%Passante	%Acumulada Retida	%Acumulada Passante
19	0	0	100	0	100
12,5	0	0	100	0	100
9,5	1112	22,22	77,78	22,22	77,78
4,75	3562	71,18	28,82	93,4	6,6
2,4	330	6,59	93,4	99,99	0
1,18	0	0	0	99,99	0
0,6	0	0	0	99,99	0
0,3	0	0	0	99,99	0
0,15	0	0	0	99,99	0
Fundo	0	0	0	100,0	0

Fonte: Autoria própria (2017).



**APÊNDICE B– Valores de média, desvio padrão e variância dos resultados de resistência a compressão**

**Tabela 28 - Resultados do ensaio de resistência a compressão do concreto**

Traço	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Média (Mpa)	Desvio Padrão (Mpa)	Variância (Mpa)
T100NOR	23,67	29,86	24,78	26,10	2,69	7,26
T80N20R	22,59	20,21	24,93	22,57	1,93	3,72
T50N50R	17,07	17,21	17,38	17,22	0,12	0,02
T20N80R	13,43	13,69	13,92	13,68	0,20	0,04
TON100R	8,20	8,34	7,60	8,05	0,32	0,10
T100R-EMP1	8,20	9,71	7,60	8,51	0,89	0,79
T100R-EMP2	10,94	12,61	13,01	12,18	0,90	0,81

**Fonte: Autoria própria (2017).**



Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 32 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para primeiro empacotamento

Abertura peneira (mm)	%PASSANTE		COMPOSIÇÃO		% PASSANTE X COMPOSIÇÃO		SOMATÓRIO	% ACUMULADA DO MODELO	%MODELO - SOMATORIO
	Brita 1	Areia	Brita 1	Areia	Brita 1	Areia			
19	92,59%	100,00%	50,00%	50,00%	46,30%	50,00%	96,30%	100,00%	3,71%
12,5	98,62%	100,00%	50,00%	50,00%	49,31%	50,00%	99,31%	82,77%	-16,54%
9,5	8,80%	100,00%	50,00%	50,00%	4,40%	50,00%	54,40%	72,85%	18,45%
4,75	0,00%	100,00%	50,00%	50,00%	0,00%	50,00%	50,00%	59,75%	9,75%
2,4	0,00%	91,04%	50,00%	50,00%	0,00%	45,52%	45,52%	52,12%	6,60%
1,18	0,00%	7,34%	50,00%	50,00%	0,00%	3,67%	3,67%	35,80%	32,13%
0,6	0,00%	0,18%	50,00%	50,00%	0,00%	0,09%	0,09%	23,17%	23,08%
0,3	0,00%	0,40%	50,00%	50,00%	0,00%	0,20%	0,20%	13,40%	13,20%
0,15	0,00%	0,20%	50,00%	50,00%	0,00%	0,10%	0,10%	5,84%	5,74%
Fundo	0,00%	0,00%	50,00%	50,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
									129,20%

Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 33 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para primeiro empacotamento

Abertura peneira (mm)	%PASSANTE		COMPOSIÇÃO		% PASSANTE X COMPOSIÇÃO		SOMATÓRIO	% ACUMULADA DO MODELO	%MODELO - SOMATORIO
	Brita 1	Areia	Brita 1	Areia	Brita 1	Areia			
19	92,59%	100,00%	41,00%	59,00%	37,96%	59,00%	96,96%	100,00%	3,04%
12,5	98,62%	100,00%	41,00%	59,00%	40,43%	59,00%	99,43%	82,77%	-16,66%
9,5	8,80%	100,00%	41,00%	59,00%	3,61%	59,00%	62,61%	72,85%	10,24%
4,75	0,00%	100,00%	41,00%	59,00%	0,00%	59,00%	59,00%	59,75%	0,75%
2,4	0,00%	91,04%	41,00%	59,00%	0,00%	53,71%	53,71%	52,12%	-1,59%
1,18	0,00%	7,34%	41,00%	59,00%	0,00%	4,33%	4,33%	35,80%	31,47%
0,6	0,00%	0,18%	41,00%	59,00%	0,00%	0,11%	0,11%	23,17%	23,06%
0,3	0,00%	0,40%	41,00%	59,00%	0,00%	0,24%	0,24%	13,40%	13,16%
0,15	0,00%	0,20%	41,00%	59,00%	0,00%	0,12%	0,12%	5,84%	5,72%
Fundo	0,00%	0,00%	41,00%	59,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
									105,69%

Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 34- Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para primeiro empacotamento

Abertura peneira (mm)	%PASSANTE		COMPOSIÇÃO		% PASSANTE X COMPOSIÇÃO		SOMATÓRIO	% ACUMULADA DO MODELO	%MODELO - SOMATORIO
	Brita 1	Areia	Brita 1	Areia	Brita 1	Areia			
19	92,59%	100,00%	39,00%	61,00%	36,11%	61,00%	97,11%	100,00%	2,89%
12,5	98,62%	100,00%	39,00%	61,00%	38,46%	61,00%	99,46%	82,77%	-16,69%
9,5	8,80%	100,00%	39,00%	61,00%	3,43%	61,00%	64,43%	72,85%	8,42%
4,75	0,00%	100,00%	39,00%	61,00%	0,00%	61,00%	61,00%	59,75%	-1,25%
2,4	0,00%	91,04%	39,00%	61,00%	0,00%	55,53%	55,53%	52,12%	-3,41%
1,18	0,00%	7,34%	39,00%	61,00%	0,00%	4,48%	4,48%	35,80%	31,32%
0,6	0,00%	0,18%	39,00%	61,00%	0,00%	0,11%	0,11%	23,17%	23,06%
0,3	0,00%	0,40%	39,00%	61,00%	0,00%	0,24%	0,24%	13,40%	13,16%
0,15	0,00%	0,20%	39,00%	61,00%	0,00%	0,12%	0,12%	5,84%	5,72%
Fundo	0,00%	0,00%	39,00%	61,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
									105,92%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 35 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para primeiro empacotamento**

Abertura peneira (mm)	%PASSANTE		COMPOSIÇÃO		% PASSANTE X COMPOSIÇÃO		SOMATÓRIO	% ACUMULADA DO MODELO	%MODELO - SOMATORIO
	Brita 1	Areia	Brita 1	Areia	Brita 1	Areia			
19	92,59%	100,00%	42,00%	58,00%	38,89%	58,00%	96,89%	100,00%	3,11%
12,5	98,62%	100,00%	42,00%	58,00%	41,42%	58,00%	99,42%	82,77%	-16,65%
9,5	8,80%	100,00%	42,00%	58,00%	3,70%	58,00%	61,70%	72,85%	11,15%
4,75	0,00%	100,00%	42,00%	58,00%	0,00%	58,00%	58,00%	59,75%	1,75%
2,4	0,00%	91,04%	42,00%	58,00%	0,00%	52,80%	52,80%	52,12%	-0,68%
1,18	0,00%	7,34%	42,00%	58,00%	0,00%	4,26%	4,26%	35,80%	31,54%
0,6	0,00%	0,18%	42,00%	58,00%	0,00%	0,10%	0,10%	23,17%	23,07%
0,3	0,00%	0,40%	42,00%	58,00%	0,00%	0,23%	0,23%	13,40%	13,17%
0,15	0,00%	0,20%	42,00%	58,00%	0,00%	0,12%	0,12%	5,84%	5,72%
Fundo	0,00%	0,00%	42,00%	58,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

106,84%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 36 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para primeiro empacotamento**

Abertura peneira (mm)	%PASSANTE		COMPOSIÇÃO		% PASSANTE X COMPOSIÇÃO		SOMATÓRIO	% ACUMULADA DO MODELO	%MODELO - SOMATORIO
	Brita 1	Areia	Brita 1	Areia	Brita 1	Areia			
19	92,59%	100,00%	38,00%	62,00%	35,18%	62,00%	97,18%	100,00%	2,82%
12,5	98,62%	100,00%	38,00%	62,00%	37,48%	62,00%	99,48%	82,77%	-16,71%
9,5	8,80%	100,00%	38,00%	62,00%	3,34%	62,00%	65,34%	72,85%	7,51%
4,75	0,00%	100,00%	38,00%	62,00%	0,00%	62,00%	62,00%	59,75%	-2,25%
2,4	0,00%	91,04%	38,00%	62,00%	0,00%	56,44%	56,44%	52,12%	-4,32%
1,18	0,00%	7,34%	38,00%	62,00%	0,00%	4,55%	4,55%	35,80%	31,25%
0,6	0,00%	0,18%	38,00%	62,00%	0,00%	0,11%	0,11%	23,17%	23,06%
0,3	0,00%	0,40%	38,00%	62,00%	0,00%	0,25%	0,25%	13,40%	13,15%
0,15	0,00%	0,20%	38,00%	62,00%	0,00%	0,12%	0,12%	5,84%	5,72%
Fundo	0,00%	0,00%	38,00%	62,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

106,79%

Fonte: Autoria própria (2017).

## APÊNDICE D – Cálculos modelo Funk e Dinger para Brita 1, Brita 0 e Areia

**Tabela 37 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	5,00%	5,00%	90,00%	4,63%	5,00%	90,00%	99,63%	100,00%	0,37%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	5,00%	5,00%	90,00%	4,93%	5,00%	90,00%	99,93%	82,77%	-17,16%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	5,00%	5,00%	90,00%	0,44%	3,89%	90,00%	94,33%	72,85%	-21,48%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	5,00%	5,00%	90,00%	0,00%	0,33%	90,00%	90,33%	59,75%	-30,58%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	5,00%	5,00%	90,00%	0,00%	0,00%	81,94%	81,94%	52,12%	-29,82%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	5,00%	5,00%	90,00%	0,00%	0,00%	6,61%	6,61%	35,80%	29,19%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	5,00%	5,00%	90,00%	0,00%	0,00%	0,16%	0,16%	23,17%	23,01%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	5,00%	5,00%	90,00%	0,00%	0,00%	0,36%	0,36%	13,40%	13,04%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	5,00%	5,00%	90,00%	0,00%	0,00%	0,18%	0,18%	5,84%	5,66%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	5,00%	5,00%	90,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

170,31%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 38 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	10,00%	10,00%	80,00%	9,26%	10,00%	80,00%	99,26%	100,00%	0,74%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	10,00%	10,00%	80,00%	9,86%	10,00%	80,00%	99,86%	82,77%	-17,09%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	10,00%	10,00%	80,00%	0,88%	7,78%	80,00%	88,66%	72,85%	-15,81%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	10,00%	10,00%	80,00%	0,00%	0,66%	80,00%	80,66%	59,75%	-20,91%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	10,00%	10,00%	80,00%	0,00%	0,00%	72,83%	72,83%	52,12%	-20,71%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	10,00%	10,00%	80,00%	0,00%	0,00%	5,87%	5,87%	35,80%	29,93%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	10,00%	10,00%	80,00%	0,00%	0,00%	0,14%	0,14%	23,17%	23,03%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	10,00%	10,00%	80,00%	0,00%	0,00%	0,32%	0,32%	13,40%	13,08%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	10,00%	10,00%	80,00%	0,00%	0,00%	0,16%	0,16%	5,84%	5,68%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	10,00%	10,00%	80,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

146,98%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 39 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	15,00%	15,00%	70,00%	13,89%	15,00%	70,00%	98,89%	100,00%	1,11%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	15,00%	15,00%	70,00%	14,79%	15,00%	70,00%	99,79%	82,77%	-17,02%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	15,00%	15,00%	70,00%	1,32%	11,67%	70,00%	82,99%	72,85%	-10,14%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	15,00%	15,00%	70,00%	0,00%	0,99%	70,00%	70,99%	59,75%	-11,24%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	15,00%	15,00%	70,00%	0,00%	0,00%	63,73%	63,73%	52,12%	-11,61%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	15,00%	15,00%	70,00%	0,00%	0,00%	5,14%	5,14%	35,80%	30,66%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	15,00%	15,00%	70,00%	0,00%	0,00%	0,13%	0,13%	23,17%	23,04%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	15,00%	15,00%	70,00%	0,00%	0,00%	0,28%	0,28%	13,40%	13,12%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	15,00%	15,00%	70,00%	0,00%	0,00%	0,14%	0,14%	5,84%	5,70%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	15,00%	15,00%	70,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

123,64%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 40 -Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	20,00%	20,00%	60,00%	18,52%	20,00%	60,00%	98,52%	100,00%	1,48%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	20,00%	20,00%	60,00%	19,72%	20,00%	60,00%	99,72%	82,77%	-16,95%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	20,00%	20,00%	60,00%	1,76%	15,56%	60,00%	77,32%	72,85%	-4,47%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	20,00%	20,00%	60,00%	0,00%	1,32%	60,00%	61,32%	59,75%	-1,57%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	20,00%	20,00%	60,00%	0,00%	0,00%	54,62%	54,62%	52,12%	-2,50%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	20,00%	20,00%	60,00%	0,00%	0,00%	4,40%	4,40%	35,80%	31,40%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	20,00%	20,00%	60,00%	0,00%	0,00%	0,11%	0,11%	23,17%	23,06%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	20,00%	20,00%	60,00%	0,00%	0,00%	0,24%	0,24%	13,40%	13,16%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	20,00%	20,00%	60,00%	0,00%	0,00%	0,12%	0,12%	5,84%	5,72%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	20,00%	20,00%	60,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

100,31%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 41 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	25,00%	25,00%	50,00%	23,15%	25,00%	50,00%	98,15%	100,00%	1,85%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	25,00%	25,00%	50,00%	24,66%	25,00%	50,00%	99,66%	82,77%	-16,89%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	25,00%	25,00%	50,00%	2,20%	19,45%	50,00%	71,65%	72,85%	1,21%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	25,00%	25,00%	50,00%	0,00%	1,65%	50,00%	51,65%	59,75%	8,10%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	25,00%	25,00%	50,00%	0,00%	0,00%	45,52%	45,52%	52,12%	6,60%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	25,00%	25,00%	50,00%	0,00%	0,00%	3,67%	3,67%	35,80%	32,13%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	25,00%	25,00%	50,00%	0,00%	0,00%	0,09%	0,09%	23,17%	23,08%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	25,00%	25,00%	50,00%	0,00%	0,00%	0,20%	0,20%	13,40%	13,20%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	25,00%	25,00%	50,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,10%	5,84%	5,74%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	25,00%	25,00%	50,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

108,80%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 42 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	30,00%	30,00%	40,00%	27,78%	30,00%	40,00%	97,78%	100,00%	2,22%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	30,00%	30,00%	40,00%	29,59%	30,00%	40,00%	99,59%	82,77%	-16,82%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	30,00%	30,00%	40,00%	2,64%	23,33%	40,00%	65,97%	72,85%	6,88%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	30,00%	30,00%	40,00%	0,00%	1,98%	40,00%	41,98%	59,75%	17,77%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	30,00%	30,00%	40,00%	0,00%	0,00%	36,42%	36,42%	52,12%	15,70%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	30,00%	30,00%	40,00%	0,00%	0,00%	2,94%	2,94%	35,80%	32,86%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	30,00%	30,00%	40,00%	0,00%	0,00%	0,07%	0,07%	23,17%	23,10%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	30,00%	30,00%	40,00%	0,00%	0,00%	0,16%	0,16%	13,40%	13,24%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	30,00%	30,00%	40,00%	0,00%	0,00%	0,08%	0,08%	5,84%	5,76%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	30,00%	30,00%	40,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

134,35%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 43 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	15,00%	25,00%	60,00%	13,89%	25,00%	60,00%	98,89%	100,00%	1,11%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	15,00%	25,00%	60,00%	14,79%	25,00%	60,00%	99,79%	82,77%	-17,02%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	15,00%	25,00%	60,00%	1,32%	19,45%	60,00%	80,77%	72,85%	-7,91%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	15,00%	25,00%	60,00%	0,00%	1,65%	60,00%	61,65%	59,75%	-1,90%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	15,00%	25,00%	60,00%	0,00%	0,00%	54,62%	54,62%	52,12%	-2,50%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	15,00%	25,00%	60,00%	0,00%	0,00%	4,40%	4,40%	35,80%	31,40%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	15,00%	25,00%	60,00%	0,00%	0,00%	0,11%	0,11%	23,17%	23,06%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	15,00%	25,00%	60,00%	0,00%	0,00%	0,24%	0,24%	13,40%	13,16%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	15,00%	25,00%	60,00%	0,00%	0,00%	0,12%	0,12%	5,84%	5,72%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	15,00%	25,00%	60,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

103,78%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 44 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	15,00%	25,00%	60,00%	13,89%	25,00%	60,00%	98,89%	100,00%	1,11%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	15,00%	25,00%	60,00%	14,79%	25,00%	60,00%	99,79%	82,77%	-17,02%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	15,00%	25,00%	60,00%	1,32%	19,45%	60,00%	80,77%	72,85%	-7,91%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	15,00%	25,00%	60,00%	0,00%	1,65%	60,00%	61,65%	59,75%	-1,90%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	15,00%	25,00%	60,00%	0,00%	0,00%	54,62%	54,62%	52,12%	-2,50%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	15,00%	25,00%	60,00%	0,00%	0,00%	4,40%	4,40%	35,80%	31,40%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	15,00%	25,00%	60,00%	0,00%	0,00%	0,11%	0,11%	23,17%	23,06%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	15,00%	25,00%	60,00%	0,00%	0,00%	0,24%	0,24%	13,40%	13,16%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	15,00%	25,00%	60,00%	0,00%	0,00%	0,12%	0,12%	5,84%	5,72%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	15,00%	25,00%	60,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

103,78%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 45 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	20,00%	25,00%	55,00%	18,52%	25,00%	55,00%	98,52%	100,00%	1,48%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	20,00%	25,00%	55,00%	19,72%	25,00%	55,00%	99,72%	82,77%	-16,95%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	20,00%	25,00%	55,00%	1,76%	19,45%	55,00%	76,21%	72,85%	-3,36%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	20,00%	25,00%	55,00%	0,00%	1,65%	55,00%	56,65%	59,75%	3,10%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	20,00%	25,00%	55,00%	0,00%	0,00%	50,07%	50,07%	52,12%	2,05%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	20,00%	25,00%	55,00%	0,00%	0,00%	4,04%	4,04%	35,80%	31,76%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	20,00%	25,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,10%	23,17%	23,07%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	20,00%	25,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,22%	0,22%	13,40%	13,18%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	20,00%	25,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,11%	0,11%	5,84%	5,73%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	20,00%	25,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

100,68%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 46 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	25,00%	20,00%	55,00%	23,15%	20,00%	55,00%	98,15%	100,00%	1,85%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	25,00%	20,00%	55,00%	24,66%	20,00%	55,00%	99,66%	82,77%	-16,89%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	25,00%	20,00%	55,00%	2,20%	15,56%	55,00%	72,76%	72,85%	0,09%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	25,00%	20,00%	55,00%	0,00%	1,32%	55,00%	56,32%	59,75%	3,43%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	25,00%	20,00%	55,00%	0,00%	0,00%	50,07%	50,07%	52,12%	2,05%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	25,00%	20,00%	55,00%	0,00%	0,00%	4,04%	4,04%	35,80%	31,76%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	25,00%	20,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,10%	23,17%	23,07%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	25,00%	20,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,22%	0,22%	13,40%	13,18%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	25,00%	20,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,11%	0,11%	5,84%	5,73%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	25,00%	20,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

98,05%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 47 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	25,00%	19,00%	56,00%	23,15%	19,00%	56,00%	98,15%	100,00%	1,85%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	25,00%	19,00%	56,00%	24,66%	19,00%	56,00%	99,66%	82,77%	-16,89%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	25,00%	19,00%	56,00%	2,20%	14,78%	56,00%	72,98%	72,85%	-0,13%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	25,00%	19,00%	56,00%	0,00%	1,25%	56,00%	57,25%	59,75%	2,50%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	25,00%	19,00%	56,00%	0,00%	0,00%	50,98%	50,98%	52,12%	1,14%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	25,00%	19,00%	56,00%	0,00%	0,00%	4,11%	4,11%	35,80%	31,69%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	25,00%	19,00%	56,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,10%	23,17%	23,07%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	25,00%	19,00%	56,00%	0,00%	0,00%	0,22%	0,22%	13,40%	13,18%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	25,00%	19,00%	56,00%	0,00%	0,00%	0,11%	0,11%	5,84%	5,73%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	25,00%	19,00%	56,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

96,18%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 48 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	25,00%	18,00%	57,00%	23,15%	18,00%	57,00%	98,15%	100,00%	1,85%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	25,00%	18,00%	57,00%	24,66%	18,00%	57,00%	99,66%	82,77%	-16,89%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	25,00%	18,00%	57,00%	2,20%	14,00%	57,00%	73,20%	72,85%	-0,35%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	25,00%	18,00%	57,00%	0,00%	1,19%	57,00%	58,19%	59,75%	1,56%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	25,00%	18,00%	57,00%	0,00%	0,00%	51,89%	51,89%	52,12%	0,23%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	25,00%	18,00%	57,00%	0,00%	0,00%	4,18%	4,18%	35,80%	31,62%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	25,00%	18,00%	57,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,10%	23,17%	23,07%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	25,00%	18,00%	57,00%	0,00%	0,00%	0,23%	0,23%	13,40%	13,17%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	25,00%	18,00%	57,00%	0,00%	0,00%	0,11%	0,11%	5,84%	5,73%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	25,00%	18,00%	57,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

94,47%

Fonte: Autoria própria (2017).



**Tabela 49 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	25,00%	16,00%	59,00%	23,15%	16,00%	59,00%	98,15%	100,00%	1,85%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	25,00%	16,00%	59,00%	24,66%	16,00%	59,00%	99,66%	82,77%	-16,89%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	25,00%	16,00%	59,00%	2,20%	12,44%	59,00%	73,64%	72,85%	-0,79%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	25,00%	16,00%	59,00%	0,00%	1,06%	59,00%	60,06%	59,75%	-0,31%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	25,00%	16,00%	59,00%	0,00%	0,00%	53,71%	53,71%	52,12%	-1,59%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	25,00%	16,00%	59,00%	0,00%	0,00%	4,33%	4,33%	35,80%	31,47%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	25,00%	16,00%	59,00%	0,00%	0,00%	0,11%	0,11%	23,17%	23,06%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	25,00%	16,00%	59,00%	0,00%	0,00%	0,24%	0,24%	13,40%	13,16%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	25,00%	16,00%	59,00%	0,00%	0,00%	0,12%	0,12%	5,84%	5,72%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	25,00%	16,00%	59,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

94,84%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 50 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	21,00%	24,00%	55,00%	19,44%	24,00%	55,00%	98,44%	100,00%	1,56%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	21,00%	24,00%	55,00%	20,71%	24,00%	55,00%	99,71%	82,77%	-16,94%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	21,00%	24,00%	55,00%	1,85%	18,67%	55,00%	75,52%	72,85%	-2,67%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	21,00%	24,00%	55,00%	0,00%	1,58%	55,00%	56,58%	59,75%	3,17%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	21,00%	24,00%	55,00%	0,00%	0,00%	50,07%	50,07%	52,12%	2,05%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	21,00%	24,00%	55,00%	0,00%	0,00%	4,04%	4,04%	35,80%	31,76%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	21,00%	24,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,10%	23,17%	23,07%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	21,00%	24,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,22%	0,22%	13,40%	13,18%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	21,00%	24,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,11%	0,11%	5,84%	5,73%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	21,00%	24,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

100,13%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 51 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	24,00%	21,00%	55,00%	22,22%	21,00%	55,00%	98,22%	100,00%	1,78%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	24,00%	21,00%	55,00%	23,67%	21,00%	55,00%	99,67%	82,77%	-16,90%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	24,00%	21,00%	55,00%	2,11%	16,33%	55,00%	73,45%	72,85%	-0,60%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	24,00%	21,00%	55,00%	0,00%	1,39%	55,00%	56,39%	59,75%	3,36%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	24,00%	21,00%	55,00%	0,00%	0,00%	50,07%	50,07%	52,12%	2,05%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	24,00%	21,00%	55,00%	0,00%	0,00%	4,04%	4,04%	35,80%	31,76%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	24,00%	21,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,10%	23,17%	23,07%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	24,00%	21,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,22%	0,22%	13,40%	13,18%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	24,00%	21,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,11%	0,11%	5,84%	5,73%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	24,00%	21,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

98,43%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 52- Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	22,00%	23,00%	55,00%	20,37%	23,00%	55,00%	98,37%	100,00%	1,63%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	22,00%	23,00%	55,00%	21,70%	23,00%	55,00%	99,70%	82,77%	-16,93%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	22,00%	23,00%	55,00%	1,94%	17,89%	55,00%	74,83%	72,85%	-1,98%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	22,00%	23,00%	55,00%	0,00%	1,52%	55,00%	56,52%	59,75%	3,23%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	22,00%	23,00%	55,00%	0,00%	0,00%	50,07%	50,07%	52,12%	2,05%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	22,00%	23,00%	55,00%	0,00%	0,00%	4,04%	4,04%	35,80%	31,76%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	22,00%	23,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,10%	23,17%	23,07%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	22,00%	23,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,22%	0,22%	13,40%	13,18%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	22,00%	23,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,11%	0,11%	5,84%	5,73%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	22,00%	23,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

99,56%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 53 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	23,00%	22,00%	55,00%	21,30%	22,00%	55,00%	98,30%	100,00%	1,70%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	23,00%	22,00%	55,00%	22,68%	22,00%	55,00%	99,68%	82,77%	-16,91%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	23,00%	22,00%	55,00%	2,02%	17,11%	55,00%	74,14%	72,85%	-1,29%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	23,00%	22,00%	55,00%	0,00%	1,45%	55,00%	56,45%	59,75%	3,30%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	23,00%	22,00%	55,00%	0,00%	0,00%	50,07%	50,07%	52,12%	2,05%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	23,00%	22,00%	55,00%	0,00%	0,00%	4,04%	4,04%	35,80%	31,76%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	23,00%	22,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,10%	23,17%	23,07%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	23,00%	22,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,22%	0,22%	13,40%	13,18%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	23,00%	22,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,11%	0,11%	5,84%	5,73%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	23,00%	22,00%	55,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

98,99%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 54 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	24,00%	17,00%	59,00%	22,22%	17,00%	59,00%	98,22%	100,00%	1,78%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	24,00%	17,00%	59,00%	23,67%	17,00%	59,00%	99,67%	82,77%	-16,90%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	24,00%	17,00%	59,00%	2,11%	13,22%	59,00%	74,33%	72,85%	-1,48%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	24,00%	17,00%	59,00%	0,00%	1,12%	59,00%	60,12%	59,75%	-0,37%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	24,00%	17,00%	59,00%	0,00%	0,00%	53,71%	53,71%	52,12%	-1,59%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	24,00%	17,00%	59,00%	0,00%	0,00%	4,33%	4,33%	35,80%	31,47%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	24,00%	17,00%	59,00%	0,00%	0,00%	0,11%	0,11%	23,17%	23,06%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	24,00%	17,00%	59,00%	0,00%	0,00%	0,24%	0,24%	13,40%	13,16%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	24,00%	17,00%	59,00%	0,00%	0,00%	0,12%	0,12%	5,84%	5,72%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	24,00%	17,00%	59,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

95,53%

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 55 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Funk e Dinger para segundo empacotamento**

Peneira (mm)	%PASSANTE			COMPOSIÇÃO			% PASSANTE X COMPOSIÇÃO			SOMA	% ACUM. MODELO	%MODELO - SOMA
	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia	Brita 1	Brita 0	Areia			
19	92,59%	100,00%	100,00%	24,00%	18,00%	58,00%	22,22%	18,00%	58,00%	98,22%	100,00%	1,78%
12,5	98,62%	100,00%	100,00%	24,00%	18,00%	58,00%	23,67%	18,00%	58,00%	99,67%	82,77%	-16,90%
9,5	8,80%	77,78%	100,00%	24,00%	18,00%	58,00%	2,11%	14,00%	58,00%	74,11%	72,85%	-1,26%
4,75	0,00%	6,60%	100,00%	24,00%	18,00%	58,00%	0,00%	1,19%	58,00%	59,19%	59,75%	0,56%
2,4	0,00%	0,00%	91,04%	24,00%	18,00%	58,00%	0,00%	0,00%	52,80%	52,80%	52,12%	-0,68%
1,18	0,00%	0,00%	7,34%	24,00%	18,00%	58,00%	0,00%	0,00%	4,26%	4,26%	35,80%	31,54%
0,6	0,00%	0,00%	0,18%	24,00%	18,00%	58,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,10%	23,17%	23,07%
0,3	0,00%	0,00%	0,40%	24,00%	18,00%	58,00%	0,00%	0,00%	0,23%	0,23%	13,40%	13,17%
0,15	0,00%	0,00%	0,20%	24,00%	18,00%	58,00%	0,00%	0,00%	0,12%	0,12%	5,84%	5,72%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	24,00%	18,00%	58,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

94,68%

**Fonte: Autoria própria (2017).**

## APÊNDICE E – Cálculos modelo Toufar para Brita 1 e Areia

**Tabela 56 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$k_d$	$x$	$k_s$	$\gamma$
0,5323	0,90	1	0,779	0,252	0,206	0,567
0,5018	0,10	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 57 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$k_d$	$x$	$k_s$	$\gamma$
0,5323	0,85	1	0,779	0,400	0,330	0,587
0,5018	0,15	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 58 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$k_d$	$x$	$k_s$	$\gamma$
0,5323	0,83	1	0,779	0,464	0,379	0,594
0,5018	0,17	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 59 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$k_d$	$x$	$k_s$	$\gamma$
0,5323	0,82	1	0,779	0,498	1,190	0,812
0,5018	0,18	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 60 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$k_d$	$x$	$k_s$	$\gamma$
0,5323	0,81	1	0,779	0,530	1,200	0,810
0,5018	0,19	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 61 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$kd$	$x$	$ks$	$\gamma$
0,5323	0,80	1	0,779	0,567	1,210	0,807
0,5018	0,20	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 62 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$kd$	$x$	$ks$	$\gamma$
0,5323	0,79	1	0,779	0,600	1,210	0,801
0,5018	0,21	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 63 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$kd$	$x$	$ks$	$\gamma$
0,5323	0,75	1	0,779	0,756	1,210	0,778
0,5018	0,25	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 64 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$kd$	$x$	$ks$	$\gamma$
0,5323	0,70	1	0,779	0,972	1,190	0,745
0,5018	0,30	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 65 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$kd$	$x$	$ks$	$\gamma$
0,5323	0,60	1	0,779	1,510	1,130	0,685
0,5018	0,40	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 66 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para primeiro empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$kd$	$x$	$ks$	$\gamma$
0,5323	0,50	1	0,779	2,270	1,070	0,637
0,5018	0,50	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

## APÊNDICE F – Cálculos modelo Toufar para Brita 1, Brita 0 e Areia

**Tabela 67 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$k_d$	$x$	$k_s$	$\gamma$
0,5323	0,90					
0,5018	0,05	1	0,0036	2,0217	1,080	0,909
0,4982	0,05	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 68- Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$y_i$ corrigido	$\beta_i$ corrigido	$k_d$	$x$	$k_s$	$\gamma$
0,5323	0,90	1	0,90	0,5323				
0,5018	0,05	2	0,10	1,00	0,84211	0,126	0,103	0,581
0,4982	0,05							

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 69 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$k_d$	$x$	$k_s$	$\gamma$
0,5323	0,80					
0,5018	0,10	1	0,0036	2,0217	1,080	0,833
0,4982	0,10	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 70 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$y_i$ corrigido	$\beta_i$ corrigido	$k_d$	$x$	$k_s$	$\gamma$
0,5323	0,80	1	0,80	0,5323				
0,5018	0,10	2	0,20	1,00	0,66667	0,285	0,233	0,627
0,4982	0,10							

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 71 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$k_d$	$x$	$k_s$	$\gamma$
0,5323	0,70					
0,5018	0,15	1	0,0036	2,0217	1,080	0,769
0,4982	0,15	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 72 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$y_i$ corrigido	$\beta_i$ corrigido	$k_d$	$x$	$k_s$	$\gamma$
0,5323	0,70	1	0,70	0,5323				
0,5018	0,15	2	0,30	1,00	0,47059	0,488	1,190	0,787
0,4982	0,15							

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 73 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$k_d$	$x$	$k_s$	$\gamma$
0,5323	0,60					
0,5018	0,20	1	0,0036	2,0217	1,080	0,714
0,4982	0,20	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 74 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$y_i$ corrigido	$\beta_i$ corrigido	$k_d$	$x$	$k_s$	$\gamma$
0,5323	0,60	1	0,60	0,5323				
0,5018	0,20	2	0,40	1,00	0,25000	0,759	1,210	0,731
0,4982	0,20							

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 75 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$k_d$	$x$	$k_s$	$\gamma$
0,5323	0,50					
0,5018	0,25	1	0,0036	2,0217	1,080	0,666
0,4982	0,25	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 76 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$y_i$ corrigido	$\beta_i$ corrigido	$k_d$	$x$	$k_s$	$\gamma$
0,5323	0,50	1	0,50	0,5323				
0,5018	0,25	2	0,50	1,00	0,00000	1,138	1,170	0,695
0,4982	0,25							

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 77 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$kd$	$x$	$ks$	$\gamma$
0,5323	0,55					
0,5018	0,25	1	0,0036	1,6174	1,080	0,606
0,4982	0,20	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 78 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$y_i$ corrigido	$\beta_i$ corrigido	$kd$	$x$	$ks$	$\gamma$
0,5323	0,55	1	0,55	0,5323				
0,5018	0,25	2	0,45	1,00	0,12500	0,931	1,190	0,709
0,4982	0,20							

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 79 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$kd$	$x$	$ks$	$\gamma$
0,5323	0,58					
0,5018	0,25	1	0,0036	1,3748	1,080	0,552
0,4982	0,17	2				

Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 80 - Parâmetros envolvidos no cálculo do modelo de Toufar para segundo empacotamento**

$\beta_i$	$y_i$	$i$	$y_i$ corrigido	$\beta_i$ corrigido	$kd$	$x$	$ks$	$\gamma$
0,5323	0,58	1	0,58	0,5323				
0,5018	0,25	2	0,42	1,00	0,19277	0,824	1,190	0,718
0,4982	0,17							

Fonte: Autoria própria (2017).