

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE
AGREGADOS RECICLADOS PARA USO EM CONCRETO**

JÉSSICA FERNANDES TAVARES

**ORIENTADOR: CLÁUDIO HENRIQUE DE ALMEIDA
FEITOSA PEREIRA**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM SISTEMAS
CONSTRUTIVOS E MATERIAIS**

BRASÍLIA/DF: JULHO/2016

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

**ESTUDO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE
AGREGADOS RECICLADOS PARA USO EM CONCRETO**

JÉSSICA FERNANDES TAVARES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

**CLÁUDIO HENRIQUE DE ALMEIDA FEITOSA PEREIRA, Dsc. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**JOÃO HENRIQUE DA SILVA RÊGO, Dsc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**MARCUS VINICIUS ARAÚJO DA SILVA MENDES Msc (IFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 04 de JULHO de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

TAVARES, JÉSSICA FERNANDES

Estudo da composição granulométrica de agregados reciclados para uso em concreto [Distrito Federal] 2016.

xiv, 111 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2016)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| 1. Agregados reciclados | 2. RCC |
| 3. Composição granulométrica | 4. Concretos não estruturais |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TAVARES, J.F. (2016). Estudo da composição granulométrica de agregados reciclados para uso em concreto. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Jéssica Fernandes Tavares

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Estudo da composição granulométrica de agregados reciclados para uso em concreto.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2016

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

Jéssica Fernandes Tavares
SQN 304, Bloco G, apto. 302, Asa Norte
70736-070 - Brasília/DF - Brasil

RESUMO

A indústria da construção civil desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico e social do país. No entanto, trata-se também de uma atividade responsável por gerar grandes impactos ambientais, principalmente devido ao grande volume de resíduos sólidos produzidos e acumulados em aterros e depósitos irregulares. Como alternativa para solução deste problema, tem-se a reciclagem destes resíduos e a possibilidade de utilização na produção de concretos. Com isso, o objetivo desse estudo é a verificação da aplicabilidade de agregados (grãos e miúdos), compostos por material natural e reciclado, quanto à granulometria. De modo que, foi desenvolvido, inicialmente, uma revisão bibliográfica de artigos científicos, livros, dissertações e teses nacionais e internacionais, para embasamento teórico a respeito do assunto em questão. Depois disso, determinou-se uma metodologia para definição das composições a serem estudadas, as quais foram resultados de substituição parcial de agregado natural por reciclados, em diferentes proporções em relação à massa e ao volume. Tais métodos de substituição foram analisados e comparados, em busca não só do melhor método, mas também da verificação dos impactos quando se opta por um em detrimento do outro. Para tanto, ensaios laboratoriais de caracterização dos materiais estudados é de extrema importância, uma vez que, por apresentar origem diversa, o agregado reciclado apresenta certa variação em suas propriedades. Desse modo, desenvolveram-se estudos de caso com agregados reciclados produzido no Distrito Federal, levando-se em conta a caracterização dos materiais com resultados atuais e de coletas anteriores. Os resultados obtidos foram satisfatórios e possibilitaram concluir que os dois métodos de substituição adotados fornecem bons resultados, com pequenas diferenças por conta da diferença de massa específica e de distribuição granulométrica.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. OBJETIVOS	02
1.1.1 Objetivo geral	02
1.1.2 Objetivos específicos	02
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	03
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E RECICLAGEM	04
2.1.1 Resíduos da Construção Civil no Brasil	05
2.1.2 Cenário do RCC no Distrito Federal	10
2.2 PROCESSO DE RECICLAGEM DO RCC: PRODUÇÃO DE	13
AGREGADOS	
2.3 PROPRIEDADE DOS AGREGADOS RECICLADOS	14
3 METODOLOGIA	19
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	20
3.1.1 Amostragem	20
3.1.2 Ensaio em laboratório	22
3.1.2.1 Determinação da Composição Granulométrica	23
3.1.2.2 Massa específica e absorção dos agregados	25
3.1.2.3 Massa unitária	28
3.2 ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS PARA	29
PRODUÇÃO DE CONCRETO	
3.1.1 Substituição em massa	30
3.1.2 Substituição em volume	31
4 RESULTADOS E ANÁLISES	34
4.1 Massa específica e absorção dos agregados	34
4.1.1 Agregado miúdo natural	34
4.1.2 Agregado miúdo reciclado	34
4.1.3 Agregado graúdo natural	36

4.1.4	Agregado graúdo reciclado	37
4.2	Massa unitária	37
4.2.1	Agregado miúdo natural	38
4.2.2	Agregado miúdo reciclado	38
4.2.3	Agregado graúdo natural	39
4.2.4	Agregado graúdo reciclado	39
4.3	Determinação da Composição Granulométrica	39
4.3.1	Agregado miúdo natural	39
4.3.2	Agregado miúdo reciclado	41
4.3.3	Agregado graúdo natural	43
4.3.4	Agregado graúdo reciclado	44
4.4	Estudo da composição	46
4.4.1	Agregado miúdo	46
4.4.1.1	Caso 1 - Agregado miúdo reciclado atual - Substituição em massa	47
4.4.1.2	Caso 1 – Agregado miúdo reciclado atual - Substituição em volume	51
4.4.1.3	Caso 1 – Agregado miúdo reciclado atual - Comparação entre os métodos	53
4.4.1.4	Caso 2 – Substituição em massa - Agregado miúdo reciclado de Sousa e Soares (2013) -	55
4.4.1.5	Caso 2 – Substituição em volume - Agregado miúdo reciclado de Sousa e Soares (2013) -	58
4.4.1.6	Caso 2 – Comparação entre os métodos - Agregado miúdo reciclado de Sousa e Soares (2013) -	61
4.4.2	Agregado graúdo	63
4.4.2.1	Caso 3 – Agregado graúdo reciclado “brita b” – Substituição em massa	63
4.4.2.2	Caso 3 – Agregado graúdo reciclado “brita b” – Substituição em volume	66
4.4.2.3	Caso 3 – Agregado graúdo reciclado “brita b” – Comparação entre os métodos	69
4.4.2.4	Caso 4 – Agregado graúdo reciclado “brita a” – Substituição em massa	70
4.4.2.5	Caso 4 – Agregado graúdo reciclado “brita a” –	73

Substituição em volume
4.4.2.6 Caso 4 – Agregado graúdo reciclado “brita a” –
Comparação entre os métodos

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	93
6	CRONOGRAMA	94
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
8	ANEXOS	
8.1	Anexo A	88
8.2	Anexo B	91
8.3	Anexo C	94
8.4	Anexo D	97
8.5	Anexo E	100
8.6	Anexo F	103
8.7	Anexo G	106
8.8	Anexo H	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Geração diária de RCC e participação em massa nos RSUs. (IPEA, 2012).	06
Tabela 2.2: Fontes geradoras e componentes dos RCC em % (LEVY, 2009 Apud SANTOS, 2009).	08
Tabela 2.3: Comparação da absorção de água entre agregado reciclado e agregado natural de acordo com diferentes autores. (MIRANDA, 2014).	16
Tabela 4.1 Determinação da massa específica do agregado miúdo reciclado – frasco de Chapman.	32
Tabela 4.2 Determinação da absorção do agregado miúdo reciclado.	33
Tabela 4.3 Determinação da massa específica e absorção do agregado graúdo reciclado – “brita a”.	35
Tabela 4.4 Determinação da massa específica e absorção do agregado graúdo reciclado – “brita b”.	35
Tabela 4.5: Determinação da massa unitária do agregado miúdo reciclado.	36
Tabela 4.6: Determinação da massa unitária do agregado graúdo reciclado – “brita a”.	37
Tabela 4.7: Determinação da massa unitária do agregado graúdo reciclado – “brita b”.	37
Tabela 4.8: Composição granulométrica do agregado miúdo natural.	38
Tabela 4.9: Composição granulométrica do agregado miúdo reciclado.	39
Tabela 4.10: Composição granulométrica do agregado graúdo natural.	41
Tabela 4.11: Composição granulométrica do agregado graúdo reciclado – “brita a”.	42
Tabela 4.12: Composição granulométrica do agregado graúdo reciclado – “brita b”.	42
Tabela 4.13: Composições na zona ótima e utilizável – agregado miúdo reciclado.	49
Tabela 4.14: Composições na zona ótima e utilizável – agregado miúdo reciclado.	52
Tabela 4.15 Comparação entre as composições na zona ótima e utilizável para substituição em relação a massa e ao volume.	54

Tabela 4.16 Composições na zona ótima e utilizável com agregado reciclado de Sousa e Soares (2013).	57
Tabela 4.17: Composições na zona ótima e utilizável – agregado miúdo reciclado (caso 2).	60
Tabela 4.18 Comparação entre as composições na zona ótima e utilizável para substituição em relação a massa e ao volume – agregado reciclado do caso 2.	62
Tabela 4.19 Composições no intervalo de aceitação – agregado graúdo reciclado (caso 3).	65
Tabela 4.20: Composições no intervalo de aceitação – substituição em volume de agregado graúdo reciclado natural por agregado graúdo reciclado “brita b”.	67
Tabela 4.21: Comparação entre as composições no intervalo de aceitação para substituição em relação a massa e ao volume – caso 3.	69
Tabela 4.22: Intervalo de aceitação como brita 1 e brita 0 – composições com relação à massa – caso 4.	72
Tabela 4.23 Intervalo de aceitação como brita 1 e brita 0 – caso 4 .	75
Tabela 4.24 Intervalo de aceitação como brita 0 – comparação das composições para o intervalo de aceitação – caso 4.	77
Tabela 4.25 Intervalo de aceitação como brita 1 – comparação das composições para o intervalo de aceitação como brita 1 – caso 4.	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Fonte geradora de RCC para municípios brasileiros. (Adaptado de LIMA e LIMA – S.D.)	05
Figura 2.2: Total de RCC coletados no Brasil e regiões (ABRELPE, 2014).	07
Figura 2.3: Tipo de processamento feito nos municípios brasileiros com serviço de manejo de RCC. Fonte: PNSB (IBGE, 2010).	09
Figura 2.4: Regiões de “bota-fora” no DF (I&T Informações Técnicas, 2008, Técnicas, 2008, apud PIGRCC, 2013).	11
Figura 2.5: Aterro do Jóquei. (BELTRÃO, 2014)	12
Figura 2.6: Planta de reciclagem da Fornecedora de Areia Bela Vista (BELTRÃO, 2014).	14
Figura 3.1: Fluxograma das atividades realizadas - Parte 1.	19
Figura 3.2: Fluxograma das atividades realizadas - Parte 2.	20
Figura 3.3: (a) Entulho de RCC classe A pronto para britagem, (b) britador da empresa Areia Bela Vista.	21
Figura 3.4: Pilhas de agregados reciclados (a) graúdo e (b) miúdo. (c) Coleta de agregado miúdo.	22
Figura 3.5: Separação das amostras de agregado (a) miúdo e (b) graúdo.	23
Figura 3.6: (a) Série de peneiras utilizadas para ensaio do agregado miúdo, (b) série de peneiras para ensaio de agregado graúdo em agitador mecânico.	24
Figura 3.7 (a) frasco de Chapman vazio, (b) Agitação da água e agregado miúdo, (c) Água e agregado em repouso para leitura.	25
Figura 3.8: (a) secagem superficial com pano úmido até a condição saturada superfície seca, (b) Pesagem da amostra na condição saturada superfície seca, (c) detalhe do material colocado em balança hidrostática antes da pesagem, (d) Submersão do material para pesagem na balaça hidrostática.	27
Figura 3.9: (a) Aplicação dos golpes no molde, (b) Aspecto da areia na condição saturada superfície seca	28
Figura 3.10: Ensaio de massa unitária agregado miúdo (a) agregado sendo despejado no recipiente, (b) determinação da massa do agregado.	29
Figura 4.1 Variação da massa específica (g/cm ³).	35

Figura 4.2: Absorção de agregado miúdo (%).	36
Figura 4.3 Resultados de massa unitária agregado miúdo (g/cm ³).	38
Figura 4.4: Curva granulométrica do agregado miúdo natural	40
Figura 4.5: Curva granulométrica do agregado miúdo reciclado.	42
Figura 4.6: Curva granulométrica do agregado graúdo natural.	44
Figura 4.7: Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado – “brita a”.	45
Figura 4.8: Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado – “brita b”.	45
Figura 4.9: Curva granulométrica para diferentes teores de substituição em massa de agregado miúdo natural por reciclado.	47
Figura 4.10: Curva granulométrica agregado miúdo natural (0% de substituição) e reciclado (teor de 100%).	48
Figura 4.11: Curva granulométrica teor de substituição de 7% e 100% em relação a massa.	50
Figura 4.12 Curva granulométrica para diferentes teores de substituição em volume de agregado miúdo natural por reciclado.	51
Figura 4.13: Curvas granulométricas - teor de substituição de 7% e 100% em relação ao volume.	53
Figura 4.14: Curva granulométrica agregado miúdo natural (0% de substituição) e reciclado (teor de 100%) – estudo de Sousa e Soares (2013).	55
Figura 4.15: Curva granulométrica para diferentes teores de substituição em massa de agregado miúdo natural por reciclado de Sousa e Soares (2013).	56
Figura 4.16: Curva granulométrica teor de substituição de 29% e 86% - agregado reciclado de Sousa e Soares (2013).	58
Figura 4.17: Curva granulométrica para diferentes teores de substituição, em volume, de agregado miúdo natural por reciclado – caso 2.	59
Figura 4.18: Curvas granulométricas - teor de substituição de 7% e 100% em relação ao volume (caso 2).	61
Figura 4.19: Curva granulométrica agregado graúdo natural (0% de substituição) e agregado graúdo reciclado (teor de 100%) “brita a”.	64
Figura 4.20: Curva granulométrica para diferentes teores de substituição em massa de agregado graúdo natural por reciclado – caso 3.	65
Figura 4.21: Curvas granulométricas - teor de substituição de 0% e 40% em relação à massa (caso 3).	66

Figura 4.22: Curva granulométrica para diferentes teores de substituição em volume de agregado graúdo natural por reciclado – caso 3.	67
Figura 4.23: Curvas granulométricas - teor de substituição de 0% e 40% em relação ao volume de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado “brita a”.	68
Figura 4.24: Curva granulométrica agregado graúdo natural (0% de substituição) e agregado graúdo reciclado (teor de 100%) – caso 4.	70
Figura 4.25: Curva granulométrica para diferentes teores de substituição em massa de agregado graúdo natural por reciclado – caso 4.	71
Figura 4.26: Curvas granulométricas - teor de substituição de 0% e 3%, em relação à massa – caso 4.	73
Figura 4.27 Curva granulométrica para diferentes teores de substituição em volume – caso 4.	74
Figura 4.28: Curvas granulométricas - teor de substituição de 0% e 3%, em volume - caso 4.	

LISTA DE EQUAÇÕES

3.1: Massa específica pelo frasco de Chapman	25
3.2 Massa específica do agregado graúdo	26
3.3: Absorção do agregado graúdo	28
3.4: Massa unitária	29
3.5: Massa retida em cada peneira	30
3.6: Percentual retido acumulado	31
3.7: Massa do agregado reciclado	30
3.8: Massa do agregado natural	32
3.9: Massa total da composição	33
3.10: Massa retida acumulada em cada peneira	33

LISTA DE SIMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÖES

a/c	Relação gua/cimento
ABRELPE	Associao Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Sólidos
ARC	Agregado de Resíduo de Concreto
ARM	Agregado de Resíduo Misto
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CORC	Comitê Gestor de Resíduos da Construo Civil
DF	Distrito Federal
I&T	Informações Técnicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPEA	Instituto de Pesquisa Econmica Aplicada
NBR	Norma Brasileira
PIB	Produto Interno Bruto
PIGRCC Volumosos	Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construo Civil e Resíduos
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
RCC	Resíduos Sólidos da Construo Civil
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SLU	Serviço de Limpeza Urbana
t/dia	Tonelada por dia

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico e social do país. De acordo com IBGE (2012) a construção civil teve participação de 5,7% do PIB brasileiro. No entanto, esta indústria é também responsável por gerar grandes impactos ambientais em todas as etapas envolvidas em suas atividades, como na extração e consumo dos recursos naturais, na modificação da paisagem natural e na geração de resíduos.

Neste contexto, a geração de resíduos sólidos da construção civil (RCC), tanto resultantes da construção quanto demolição, merecem destaque. Segundo Lima et al. (2010), o RCC constitui uma grande porcentagem do total de resíduos produzidos no mundo, gerando impactos ambientais quando armazenado em aterros ou quando despejados em locais irregulares.

No Brasil, os números refletem esse panorama: de acordo com uma pesquisa realizada em 2005 pelo Ministério da cidade em parceria com o Ministério do Meio Ambiente, o volume de RCC representa de 50 a 70% do total de resíduos sólidos urbanos. Em 2014, segundo ABRELPE (2014), foram coletados mais de 23 milhões de toneladas de RCC no Brasil, quantidade que vem crescendo comparada a anos anteriores - no referido ano de 2014, houve um aumento de 4,11% em relação a 2013.

Este enorme volume de material produzido tem sido gerenciado no Brasil de forma inadequada, sendo acumulado nos aterros ou, comumente, despejados em locais irregulares, atuando na proliferação de vetores nocivos à saúde e contribuindo para a degradação do ambiente urbano, por exemplo.

Como solução do problema, a reutilização ou reciclagem desses resíduos é considerada uma alternativa importante. Neste contexto, cabe destaque o uso deste material para produção de concreto reciclado, uma vez que, segundo Meyer (2009), o concreto é o material de construção mais utilizado, com produção mundial a nível de 10 bilhões de toneladas por ano. Sabe-se que o concreto é produzido a partir da mistura, com dosagem adequada, de agregados graúdos e miúdos (pedras britadas, areia e pedregulhos), aglomerantes (cimento Portland), água e, se necessário, aditivos e adições. De forma que, após beneficiamento, pode-se

reutilizar os RCC como agregados para a produção de concreto com substituição total ou parcial dos agregados graúdos e/ou miúdos.

No entanto, o uso deste material reciclado requer um estudo a respeito de suas propriedades, devendo ser sempre caracterizado, uma vez que se trata de um material heterogêneo, constituído por restos de praticamente todos os materiais de construção, com propriedades que podem variar bastante. Tais propriedades influenciam tanto o desempenho quanto a durabilidade do novo material produzido.

Levando-se em consideração ao exposto acima, nota-se a importância de estudos de viabilidade técnica e econômica para reciclagem e uso dos resíduos sólidos da construção civil para produção de concretos, uma vez que se trata de uma solução para um problema gerador de grandes impactos ambientais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Sugerir estudo a respeito da distribuição granulométrica de agregados com composições resultantes da substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado, com relação à massa e ao volume.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver metodologia para obtenção e caracterização de agregados reciclados;
- Analisar, por meio de ensaios de caracterização, o agregado reciclado produzido no Distrito Federal, verificando a adequabilidade do seu uso em concretos não estruturais em obras civis.
- Comparar o material caracterizado com o produzido, na mesma região, em coletas anteriores;
- Determinar as composições estudadas e os teores de substituição adotados em relação à massa e ao volume;

- Analisar e comparar os métodos de substituição estudados, quanto às características granulométricas e a adequação a zonas de interesse, para uso em concreto.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A primeira parte do trabalho é composta por uma introdução, na qual é dada uma visão geral sobre o assunto, mostrando a motivação para realização do estudo. Além disso, encontra-se também os objetivos gerais e específicos da pesquisa. Então, tem-se a revisão bibliográfica do assunto, subdividida em três principais partes, fornecendo embasamento teórico para desenvolvimento do trabalho. De modo que a primeira parte, refere-se aos resíduos da construção civil, com um panorama da situação dos RCC no mundo, no Brasil e no Distrito Federal. Já a segunda parte, conta com a explicação do processo produção de agregados reciclados, em que é possível entender como é realizada a produção dos agregados reciclados a partir dos resíduos. Por fim, encontra-se na revisão um estudo das propriedades relevantes para este trabalho. Segue-se, então, para a metodologia, em que é definido o programa experimental para caracterização dos materiais e como será desenvolvido o estudo proposto. Depois disso, tem-se os resultados obtidos e suas análises. Por fim, as considerações finais com as principais conclusões, seguidas pelo cronograma de desenvolvimento do trabalho e as referências bibliográficas utilizadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E RECICLAGEM

De acordo com Miranda (2014), os resíduos sólidos da construção civil (RCC) começaram a ser reciclados e utilizados no final da Segunda Guerra Mundial, período em que se tinha uma elevada escassez de material para produção de concreto, mas grande quantidade de escombros, oriundos de demolições de pavimentos, fundações e estruturas de edifícios de concreto.

Atualmente, diante da preocupação com questões ambientais e da busca por alternativas sustentáveis, a reciclagem e o uso desses resíduos é um tema relevante. A construção civil tem papel ativo como geradora de impactos ambientais, já que além de ser responsável por uma excessiva utilização dos recursos naturais, de degradação e da crescente deterioração do espaço onde realiza suas atividades, ela contribui significativamente na geração de resíduos, os quais vêm aumentando com a urbanização, industrialização e crescimento populacional.

Os resíduos sólidos da construção civil (RCC) correspondem a aproximadamente 35% do total de resíduos industriais produzidos a nível mundial, de acordo com Guzmán et al. (2009). Atualmente, mesmo com essa elevada produção, as taxas de reaproveitamento e valorização dos RCC variam muito de país para país – por exemplo, segundo Miranda (2014), apesar da média europeia ser de apenas 25%, ela atinge valores superiores a 80% em países como Dinamarca ou Holanda.

Tam (2009) estudou o uso de concretos reciclados em indústrias da construção civil na Austrália e no Japão. Neste país, 68% das empresas de construção aderem a políticas de reciclagem do concreto, em que o governo exige um plano detalhado de reciclagem de material antes do início de qualquer edificação. Já na Austrália, 48% das empresas de construção aderem a políticas de reciclagem do concreto, de forma que 57% dos RCC produzidos são reciclados.

Segundo dados gerais sobre a reciclagem no mundo fornecido por *World Business Council For Sustainable Development* (2009): na Holanda todo resíduo de concreto é reciclado; nos

Estados Unidos, trinta e oito estados utilizam os agregados reciclados em sub-bases de estradas.

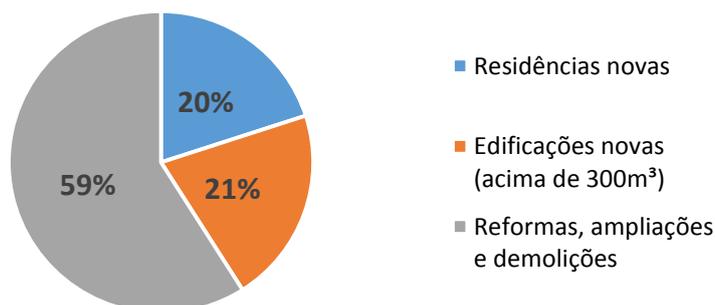
Frente a esse contexto mundial, o Brasil encontra-se ainda atrasado: tem-se elevada produção de resíduos e o mau gerenciamento deles. O país conta com a norma NBR 15116 que dispõem de requisitos para a utilização dos agregados reciclados de resíduos da construção civil para uso em pavimentação e em concreto sem função estrutural.

2.1.1 Resíduos da construção civil no Brasil

A construção civil representa um importante segmento da indústria brasileira, tratada pelo decreto nº 7.404/2011 como um indicativo de desenvolvimento econômico e social do país, responsável por gerar também significativos impactos ambientais. Tais impactos ambientais se mostram presentes em todas as etapas da cadeia produtiva da construção civil: na extração das matérias primas, na produção dos materiais, na construção, no uso e na demolição. Nesse contexto tem-se grande destaque os resíduos sólidos da construção civil (RCC) produzidos nestas três últimas etapas.

A resolução CONAMA nº 307/2002 define os diferentes tipos de Resíduos da Construção Civil (RCC) como aqueles provenientes de construção, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos. De acordo com Tavares (2007) *apud* Santos (2009), a estimativa média de fonte geradora para municípios brasileiros é dada conforme mostrado na Figura 2.1. Nota-se neste gráfico que a maior parte dos RCC produzidos vêm de reformas.

Figura 2.1: Fonte geradora de RCC para municípios brasileiros (Adaptado de Lima e Lima – S.D.).



Observa-se que a resolução do CONAMA nº 307/2002 classifica os resíduos reutilizáveis ou reciclados como classe A, tais como agregados da construção demolição, reformas e reparos de pavimentação e outras obras de infraestrutura, de componentes cerâmicos, argamassa e concreto e do processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concretos produzidos nos canteiros de obras. Além disso, classifica como classe B resíduos recicláveis para outras destinações como plástico, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros. Como classe C, materiais que não podem ser reciclados e na classe D, resíduos tóxicos como tintas, solventes e óleos.

O Ministério das Cidades em parceria com o Ministério do Meio Ambiente realizaram uma pesquisa em 2005 que mostrou que o volume de RCC gerado pode representar de 50 a 70% da massa de resíduos sólidos urbanos (RSU). A Tabela 2.1 dada pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), em 2012, construída levando-se em consideração diferentes municípios, mostra esse panorama.

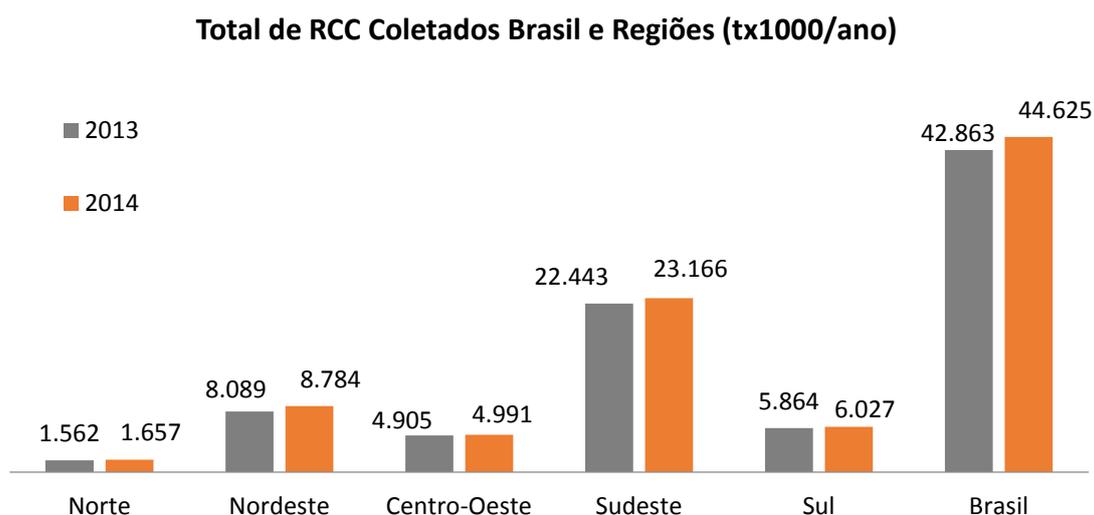
Tabela 2.1: Geração diária de RCC e participação em massa nos Resíduos Sólidos Urbanos (IPEA, 2012).

Município	Geração diária (t)	Participação em relação aos RSUs (%)	Fonte
São Paulo	17.240	55	I&T (2003)
Guarulhos	1.308	50	I&T (2001)
Diadema	458	57	I&T (2001)
Campinas	1.800	64	PMC (1996)
Piracicaba	620	67	I&T (2001)
São José dos Campos	733	67	I&T (1995)
Ribeirão Preto	1.043	70	I&T (1995)
Jundiaí	712	62	I&T (1997)
São José do Rio Preto	687	58	I&T (1997)
Santo André	1.013	54	I&T (1997)
Salvador	1.700	37	Karpinsk (2009)
Vitória da Conquista	1.200	51	Karpinsk (2009)

Analisando-se a Tabela 2.1, percebe-se que foram contabilizados dados para diferentes anos (de 1997 a 2009) para diferentes municípios brasileiros, nos quais a geração diária variou de 310 toneladas por dia em Belo Horizonte a 17240 toneladas por dia no município de São Paulo. Sendo que, exceto Salvador, todos os outros municípios apresentaram uma participação conforme intervalo comentado na participação em relação aos Resíduos Sólidos Urbanos (RSUs).

Com relação as regiões brasileiras e a produção total de RCC no país, a Figura 2.2 mostra o volume de RCC coletado em 2013 e 2014, de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Sólidos (ABRELPE).

Figura 2.2: Total de RCC coletados no Brasil e regiões (ABRELPE, 2014).



Analisando-se a Figura 2.2, nota-se que a região Sudeste foi a maior produtora de RCC coletado no Brasil nos anos de 2013 e 2014, chegando-se a coletar 23.166.000 toneladas no último ano. Esta região é seguida pela região Nordeste, Sul, Centro-Oeste e Norte, resultando em um total de 44.625.000 toneladas de RCC coletados no Brasil em 2014, segundo a ABRELPE. Além disso, percebe-se, de forma geral, que houve um aumento de material coletado entre os anos de 2013 e 2014 em todas as regiões brasileiras nos anos analisados. Isso mostra a elevada quantidade de resíduos produzidos recentemente, que parecem estar aumentando.

De acordo com Karpinsk (2009), de forma geral, tais resíduos são de baixa periculosidade, provocando impacto ambiental, principalmente, devido ao grande volume gerado. De forma que, conforme John e Agopyan (2013), o problema principal é a deposição irregular dessa grande quantidade de material em locais clandestinos conhecidos como “bota-fora”, localizados às margens de rios e córregos ou em terrenos baldios, podendo trazer consequências como enchentes, proliferação de vetores nocivos à saúde, interdição parcial de vias e degradação do ambiente urbano.

Conforme Silva Filho (2005) apud Santos (2009), os materiais de RCC de obras no Brasil são compostos em média por 63% de argamassa, 29% de concretos e blocos, 1% de materiais orgânicos e 7% outros materiais. De forma que a fonte geradora e componentes dos RCC são mostrados em porcentagem na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Fontes geradoras e componentes dos RCC em % (Levy, 2009 apud Santos, 2009).

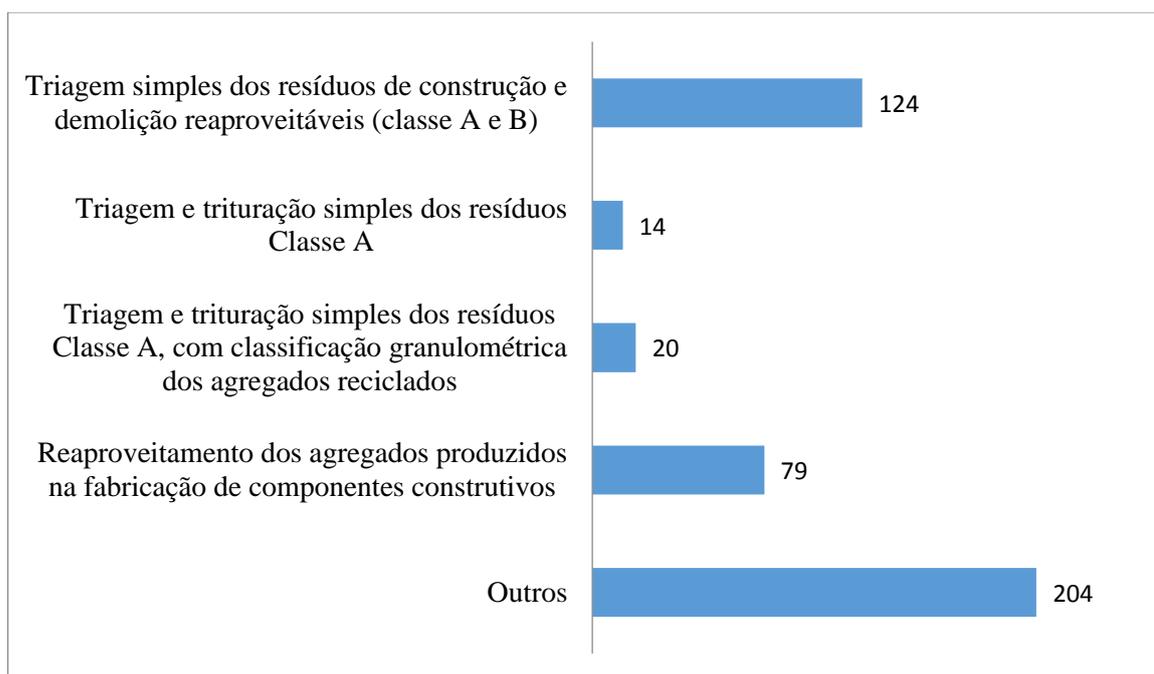
Componentes	Trabalhos rodoviários	Escavações	Sobras de demolições	Obras diversas	Sobras de limpeza
Concreto	48	6,1	54,3	17,5	18,4
Tijolo	-	0,3	6,3	12,0	5,0
Areia	4,6	9,6	1,4	3,3	1,7
Solo, poeira, lama	16,8	48,9	11,9	16,1	30,5
Rocha	7,0	32,5	11,4	23,1	23,9
Asfalto	23,6	-	1,6	1	0,1
Metais	-	0,5	3,4	6,1	4,4
Madeira	0,1	1,1	1,6	2,7	3,5
Papel/material orgânico	-	1,0	1,6	2,7	3,5
Outros	-	-	0,9	0,9	2,0

É possível perceber, a partir da Tabela 2.2, que as fontes geradoras de RCC que produzem resíduos compostos de grande parte concreto são os trabalhos rodoviários (48% do total é concreto) e sobras de demolição (54,3% do total). Já escavações, quase 50% dos RCC produzidos são compostos por solo, poeira e lama. Por fim, as obras diversas e sobras de

limpezas são compostos uma quantidade mais diversificada de materiais, como mostrado na Tabela 2.2.

Ressalta-se que a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307/2002 estabelece que o gerador é o responsável pelo gerenciamento dos resíduos, devendo encaminhar tais resíduos para reciclagem e disposição final adequada, conforme classificação estabelecida. No entanto, de acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) realizada pelo IBGE em 2010, do total de 5.564 municípios brasileiros, 72,44% (4.301 municípios) apresentam serviços de manejo dos RCC, mas apenas 9,7% (392 municípios) possuem alguma forma de processamento dos RCC. O tipo de processamento destes 392 municípios estão detalhados na Figura 2.3.

Figura 2.3: Tipo de processamento feito nos municípios brasileiros com serviço de manejo de RCC.



Fonte: PNSB (IBGE, 2010).

Analisando-se a figura acima, nota-se que do total de 392 municípios brasileiros que possuem alguma forma de processamento dos RCC, 204 municípios realizam um outro tipo de processamento não analisado. Além disso, 124 são feitos por triagem simples dos resíduos de construção e demolição reaproveitáveis relativos as classes A e B. Sem contar que, somente em 14 municípios (0,25%) existe a triagem e trituração simples dos resíduos classe A, 20

municípios fazem triagem e trituração simples dos resíduos Classe A com classificação granulométrica dos agregados reciclagem e apenas 79 municípios fazem o reaproveitamento dos agregados produzidos na fabricação de componentes construtivos. Dessa forma, nota-se que, no Brasil, a maior parte do RCC produzido não é reciclado.

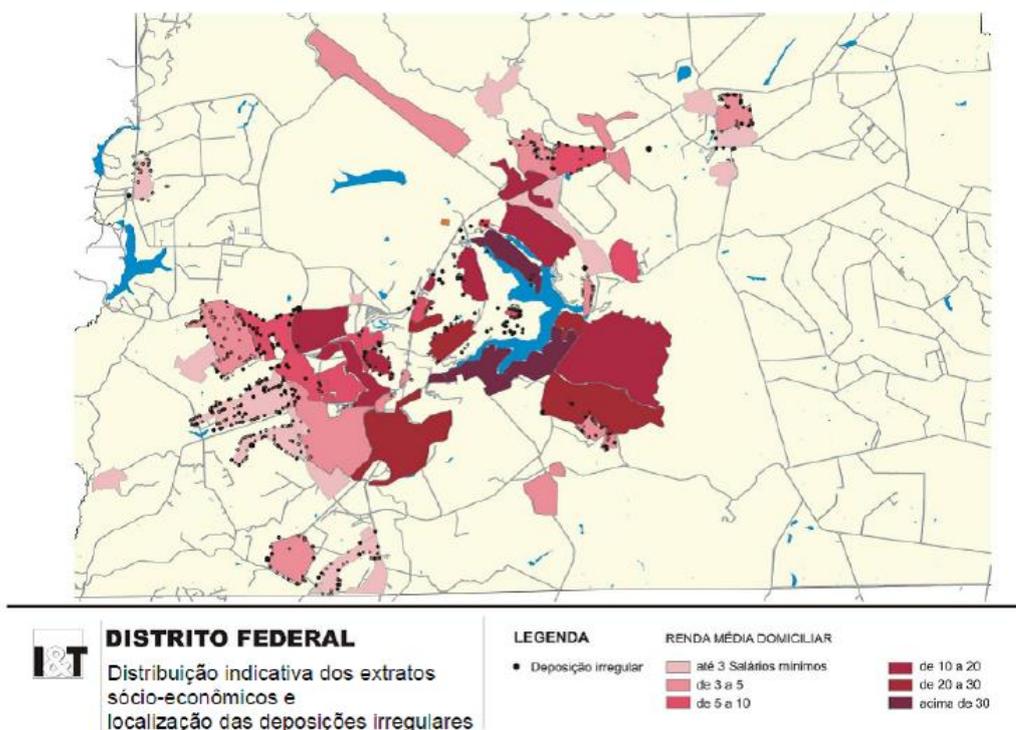
2.1.2 Cenário do RCC no Distrito Federal

No Distrito Federal, a gestão dos resíduos sólidos ainda não se encontra de acordo com o previsto pela Resolução CONAMA nº 307/2002, a qual delega a função de elaborar e implementar os Planos Municipais de Gestão de RCC aos municípios e ao Distrito Federal. Embora a Resolução tenha estabelecido um prazo de um ano a partir de sua publicação, o Distrito Federal não implementou as medidas necessárias para regularização da situação, estando atrasado nesse prazo há mais de uma década, esperando, de acordo com o Comitê Gestor de Resíduos da Construção Civil – CORC, atender a esta exigência no primeiro semestre de 2016.

Com isso, foi aprovada a lei distrital nº 4.704/2011 a respeito da gestão integrada de RCC, estabelecendo a elaboração do Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos (PIGRCC), o qual estabelece ações de curto, médio e longo prazo para serem implantadas no DF e entorno a fim de reestruturar a infraestrutura de coleta, tratamento e destinação final, mas aguarda ainda aprovação.

Como consequência da má gestão de RCC no Distrito Federal, tem-se a destinação final desses resíduos feita de forma ilegal em locais conhecidos como “bota-fora”. Estima-se que 40% da quantidade de RCC depositada no aterro do Jóquei é retirada de cerca de 600 pontos clandestinos de conhecimento da população e tradicionais no DF. Tais regiões de destinação ilegal apresentam-se em maior densidade em locais com menor renda média domiciliar, como mostrado na Figura 2.4, onde regiões com renda de até três salários mínimo são as regiões com maior quantidade de pontos de “bota-fora” enquanto regiões com renda média domiciliar superior a 30 salários mínimo apresentam somente três pontos clandestinos, localizados no final do Lago Norte.

Figura 2.4: Regiões de “bota-fora” no DF (I&T Informações Técnicas, 2008, *apud* PIGRCC, 2013).



A partir do mapa mostrado na Figura 2.4, é possível notar que a região Oeste do Distrito Federal apresenta maior quantidade e concentração de “bota-fora”, onde tem destaque a cidade de Samambaia como a que apresenta maiores quantidades de pontos clandestinos, seguida por Ceilândia, Recanto das Emas, Santa Maria e Taguatinga. Já para a região Norte e Nordeste do DF, tem-se três principais áreas situadas entre Sobradinho I e II e Planaltina. Em Brasília, tais áreas clandestinas estão localizadas principalmente nos Setores de Clube Norte e Sul.

Conforme dados do SLU (Serviço de Limpeza Urbana) e I&T (2008) *apud* PIGRCC (2013), o RCC encontrado nessas regiões tem origem principalmente em pequenas obras e reformas, que geram pouco volume, sendo coletado por carroceiros (50% do volume total), automóveis particulares (13%) ou empresas (37%).

De acordo com as informações fornecidas pelo PIGRCC do DF, o SLU divulgou que 2.600 toneladas de RCC são depositadas por dia nesses depósitos irregulares, correspondendo a

85% do total de resíduos encontrados nos “bota-fora”. Como consequência, de acordo com o SLU, cerca de 13 milhões de reais são gastos por ano para coletar entulho dos “bota-fora”.

Encontra-se atualmente três formas de descarte do RCC no Distrito Federal: aterro de Santa Maria, Aterro do Jóquei e os que são enviados para reciclagem. De forma que o descarte no Aterro do Jóquei (popularmente conhecido como Lixão da Estrutural) é a prática mais frequente, embora vetado pela Lei nº 12.305 de 2010. Segundo Beltrão (2014), em visita ao lixão, o descarte de RCC por empresas particulares é de 600 caminhões por dia e o resíduo da coleta dos “bota-fora” de RCC é de 1.500 t/dia enquanto o resíduo orgânico é de apenas 2.700 t/dia.

Figura 2.5: Aterro do Jóquei (Beltrão, 2014).



A Figura 2.5 mostra o Aterro do Jóquei em um local de deposição dos chamados lixos secos, onde é possível observar a prevalência de materiais oriundos da construção civil, estimados pelos trabalhadores do aterro como 90% do lixo seco. Cabe destacar que este valor tende a aumentar consideravelmente, como resultado da falta de gerenciamento desse material e das 6.500 toneladas de RCC que chegam ao aterro por dia.

Com relação à reciclagem do RCC, o Distrito Federal conta com apenas uma empresa que trabalha com isso para posterior revenda: a Fornecedora de Areia Bela Vista, localizada em Sobradinho, no Setor Habitacional Grande Colorado. Ela recebe materiais de empreendimentos espalhados pelo Distrito Federal, já que trabalha com empresas parceiras, as quais são responsáveis pelo transporte do material à Areia Bela Vista.

De forma geral e resumida, a partir de dados fornecidos pelo SLU e I&T, para o Distrito Federal, tem-se o seguinte panorama de gerenciamento: a região produz em torno de 567.458 t/ano de RCC (SLU, 2012), com origem em grandes obras (21%), pequenas obras (20%) e reformas (59%). De modo que estes resíduos são transportados por empresas (37%), particulares (13%) e carroceiros (50%), tendo como descarte final o Aterro de Santa Maria (1400 t/dia), o Aterro do Jóquei (6500 t/dia) ou a reciclagem (400-500 t/dia), com reentrada de apenas 300 a 500 t/dia do RCC produzido.

2.2 PROCESSO DE RECICLAGEM DO RCC: PRODUÇÃO DE AGREGADOS

Quando se tem processos de reciclagem para resíduos de concreto, existem vários processos que podem ser aplicados. De maneira geral, os processos de produção de agregados reciclados são feitos em usinas de tratamento similares aos utilizados na produção de agregados convencionais, podendo ter também diferentes elementos para remoção das impurezas e eletroímãs para a separação dos aços, segundo Ache (2006). Antes de iniciar o processo, é necessária a separação dos resíduos de acordo com a classe (A, B C ou D), conforme estabelecido pela Resolução CONAMA nº 307/2012. Em seguida, o material é levado para as usinas de beneficiamento do material.

Existem diferentes usinas de produção de agregados reciclados, as quais podem ser classificadas, de acordo com a sua mobilidade, em móveis, semifixas e fixas. As usinas móveis, transportam-se até o local onde se encontram os resíduos (obra ou área da demolição) e, de forma geral, tem apenas uma única entrada de alimentação, uma cinta transportadora, uma britadeira e uma ou duas peneiras. Já as plantas fixas são instalações permanentes com cintas e elementos transportadores, vários peneiros e normalmente dois tipos de britadeiras, podendo-se utilizar as trituradoras de mandíbulas, de impacto ou de cones.

Como exemplo deste sistema de produção dos agregados reciclados por meio de plantas fixas, tem-se a Fornecedora de Areia Bela Vista localizada no Distrito Federal, conforme apresentado anteriormente. No caso dessa empresa, ela estabelece que a separação do material seja feita na própria obra, antes de ser transportado, e somente resíduos de classe A são

recebidos. Depois da britagem, o material britado é levado por uma correia à peneira vibratória, a qual separa o material grosso do fino.

Então, tem-se o transporte interno do material, que passa em seguida pelo processo de britagem, trituração, moagem e lavagem. Por fim, conforme característica do material produzido, ele é classificado e empilhado.

Figura 2.6: Planta de reciclagem da Fornecedora de Areia Bela Vista (Beltrão, 2014).



Assim, o material produzido tem uma granulometria conforme desejada, dependendo fundamentalmente do sistema de trituração submetido para produção desse material. Conforme Miranda (2014), em geral, as trituradoras de impacto são as que possibilitam obter reduzidos tamanhos nos agregados, resultando em uma maior quantidade de finos. De acordo com Gayarre (2008), tem-se as britadoras rotativas e as trituradoras de mandíbulas com uma menor produção de finos.

2.3 PROPRIEDADE DOS AGREGADOS RECICLADOS

Levy (2001) aponta a importância de se estudar os agregados isoladamente, uma vez 75% do volume do concreto é composto por agregados. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que as propriedades do agregado afetam o comportamento do concreto nos estados fresco e endurecido.

Como explicado anteriormente, os agregados reciclados têm sua origem em resíduos da construção e demolição, o que, por consequência, faz com que ele seja um material

heterogêneo, sendo sempre importante a sua caracterização, já que suas propriedades podem variar bastante. Cabe destacar que a origem dos resíduos implica nas propriedades dos agregados resultantes da reciclagem destes materiais. Neste contexto, a ABNT NBR 15116 classifica os resíduos sólidos da construção civil, classe A, reciclados para produção de agregados, em dois tipos: Agregado de Resíduo de Concreto (ARC) e Agregado de Resíduo Misto (ARM).

O ARC é definido como agregado reciclado com composição da fração gráuda de, pelo menos, 90% em massa de partículas à base de cimento Portland e rochas. A referida norma fornece procedimentos, baseados em análise visual, para determinação deste percentual. Já o ARM tem definição contrária ao do ARC, ou seja, é o agregado reciclado com fração gráuda composta por menos de 90% em massa de cimento Portland e rochas, sendo a composição determinada pelo mesmo processo de classificação como ARC.

Levando-se em consideração os agregados reciclados de concreto, segundo Miranda (2014), eles são constituídos por agregado natural e impurezas aderidas, de forma que o principal fator que influencia sua característica é a qualidade e a quantidade de impurezas aderidas. Hansen (1992) afirma que tanto os agregados finos quanto os grossos apresentam um aspecto rugoso e anguloso devido a pasta de cimento aderida à superfície. Conforme Carrijo (2005), esta camada de argamassa aderida confere maior porosidade ao agregado.

Além disso, no concreto convencional, entre o agregado gráudo natural e a pasta de cimento há uma camada conhecida como zona de transição, a qual também contribui para o aumento da porosidade do ARC. Quando um novo concreto é produzido com este material reciclado, cria-se uma outra zona de transição, o que faz com que o concreto reciclado tenha porosidade e permeabilidade maior que o concreto convencional. Segundo Gonçalves (2004) a porosidade dos agregados influencia negativamente a resistência à compressão, a resistência à abrasão, e o módulo de elasticidade dos concretos, podendo afetar também sua durabilidade.

Além disso, uma importante propriedade decorrente da porosidade é a absorção de água. Trata-se, segundo a ABNT NBR NM 30:2000, de um processo de condução de líquido em um corpo sólido poroso, tendendo a ocupar poros permeáveis. De forma geral, a absorção de água

é muito mais elevada em agregados reciclados do que agregados naturais, como é possível notar na Tabela 2.3 desenvolvida por Miranda (2014), em dissertação de mestrado.

Tabela 2.3: Comparação da absorção de água entre agregado reciclado e agregado natural de acordo com diferentes autores (Miranda, 2014).

Referência	Tamanho (mm)	Absorção (%)	
		Agregado reciclado	Agregado natural
Barra (1996)	5/10	7,6	1,62
	10/20	7,7	0,86
B. González Fonteboa (2008)	4/12	4,82	0,07
	10/25	4,59	0,17
Chi-Sun Poon (2007)	10	4,3	1,1
	20	3,5	1,1
Corinaldesi (2010)	15	7,5	1,8
Farid Debieb (2010)	0/4	9,2	0,28
	4/14	4,92	0,37-1,20
	14/20	6	0,36
L. Evangelista (2007)	0,074/1,19	13,1	0,8
M. Casuccio (2008)	30	3,8-3,9	0,5

A Tabela 2.3 relaciona a dimensão do grãos com a absorção do agregado reciclado e do agregado natural. Nota-se que, em todos os resultados, a absorção do agregado reciclado é bem maior que o natural (convencional), chegando a ser mais de 32 vezes maior por parte do agregado reciclado, de acordo com Debieb (2010).

Esta elevação da absorção de água em agregados reciclados tem significativo impacto quando este agregado é aplicado na produção de concreto e comparado ao concreto convencional, uma vez que para manter a relação água/cimento (a/c), o consumo de cimento aumenta proporcionalmente ao de água. Segundo Cabral (2010), deve-se levar em consideração a relação a/c do concreto reciclado, uma vez que este é um dos principais fatores que afeta a sua resistência à compressão. Isto também é verificado por Juan (2005), o qual afirma que, para uma mesma resistência e consistência de um concreto convencional, o concreto reciclado

precisa de uma maior quantidade de água, o que resulta também em uma maior quantidade de cimento consumido.

Com isso, a trabalhabilidade do concreto produzido com agregados reciclados é afetada. Segundo Cabral (2007), observa-se uma perda de trabalhabilidade do concreto reciclado em relação ao concreto convencional, já que, por ser poroso, o agregado reciclado utiliza água livre da pasta de cimento, resultando numa rápida perda de consistência. Com isso, os agregados reciclados retiram água do processo que seria usado no cimento tendo como consequência uma menor trabalhabilidade do conjunto. Assim, em geral, tem-se uma redução no valor do abatimento de tronco de cone com o aumento do teor de agregado reciclado na mistura.

Levando-se em consideração ao exposto, nota-se que a influência da absorção dos agregados reciclados para uso em concreto. Ela é mensurada a partir de ensaios laboratoriais segundo procedimentos descritos pela ABNT NBR NM 53:2009 para agregados graúdos e ABNT NBR NM 30/2001 para agregados miúdos. Outra importante característica também mensurada por meio de ensaios laboratoriais é a massa específica.

Mehta e Monteiro (2014) colocam que a massa específica do concreto no estado fresco depende da massa específica do agregado e de sua porosidade, além da textura, forma e tamanho das partículas. Sendo que, de forma geral, esta propriedade para concretos reciclados apresenta valores menores do que para os concretos convencionais. Isto está relacionado principalmente à porosidade, ao formato das partículas sólidas e à natureza do material utilizado, os quais nos concretos reciclados podem promover uma maior relação a/c e maior consumo de água, conforme explicado acima, resultando na diminuição da massa específica, conforme Leite (2001), Buttler (2003), Carrijo (2005) e Yaprak (2011).

De forma geral, conforme Cabral (2007) e Leite (2001), o agregado miúdo reciclado de RCC produz menores efeitos nas propriedades mecânicas do concreto quando comparado aos agregados graúdos.

Sendo que o efeito do uso de agregado reciclado em concreto mais relevante é na resistência à compressão. Segundo Hansen (1992), a substituição do agregado natural (graúdo ou miúdo)

por agregados reciclados resulta em uma queda na resistência à compressão compreendida entre 10% e 50%. Souza, Assis, Souto (2014) aponta que esta diferença de valores esteja relacionada ao processo de britagem e origem do material, além da qualidade do material, podendo resultar no surgimento de vazios comprometendo a sua resistência. Além disso, como mencionado, na produção do concreto reciclado cria-se uma outra zona de transição, onde encontra-se impurezas e uma pasta de cimento velha criando uma união fraca.

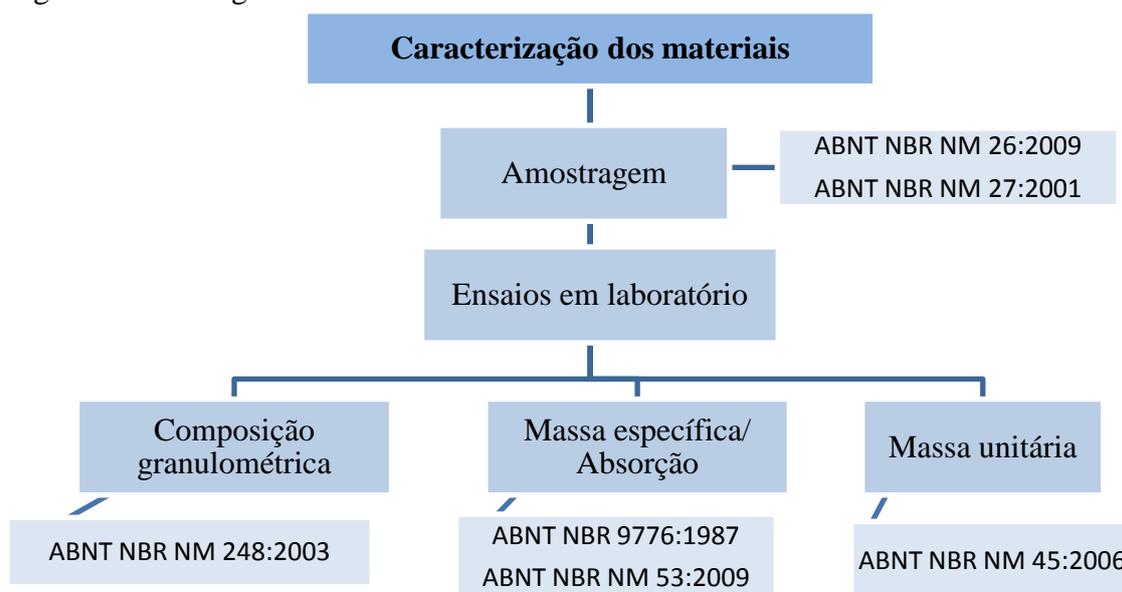
De acordo com Etxeberria, Vázquez, Marí e Barra (2007), o concreto produzido com 100% de agregado graúdo reciclado tem uma resistência a compressão de 20% a 25% menor que um concreto convencional, aos 28 dias, produzido com a mesma quantidade de cimento e a mesma relação água/cimento efetiva. Entretanto, conforme Rao, Bhattacharyya e Barai (2011) se a substituição for de apenas 25% do agregado graúdo natural por agregado reciclado, percebe-se a resistência a compressão não é muito alterada.

Portanto, levando-se em consideração ao apresentado, conclui-se que existem diferenças consideráveis entre os agregados naturais e reciclados, principalmente considerando seus efeitos quando usados na fabricação de concreto. Tais diferenças são consequências das diversas origens de materiais utilizados na reciclagem, com características distintas. No entanto, é importante ressaltar que isto não invalida a utilização destes materiais para uso em concreto, apenas constata a necessidade de caracterização do material reciclado para verificação de sua aplicabilidade.

3. METODOLOGIA

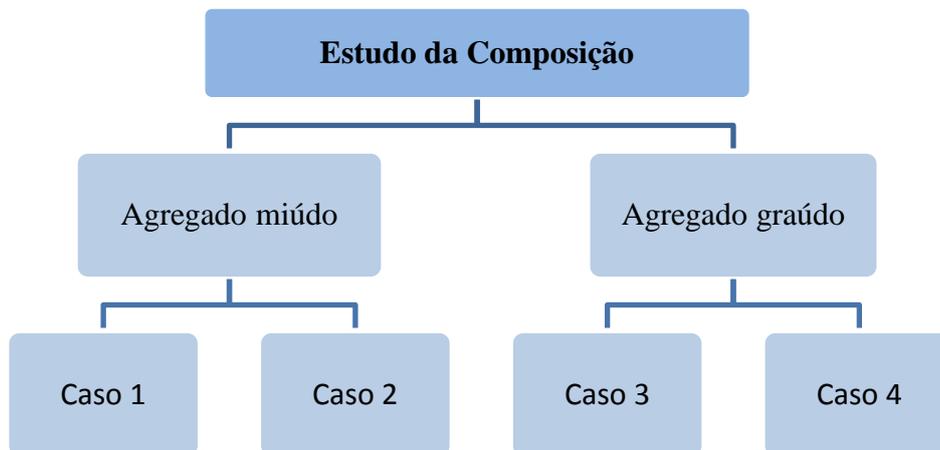
Este programa experimental foi desenvolvido de forma a permitir o estudo da composição de agregados para uso na produção de concreto, a partir de materiais naturais (convencional) e reciclados. Tal composição refere-se a mistura destes materiais, resultantes da substituição de parte do agregado natural por reciclado. Tal substituição pode ser feita com relação à massa do agregado ou em relação ao volume, casos que representam diferentes situações, uma vez que os materiais apresentam diferentes massas específicas. Com isso, a fim de se analisar estas situações, este programa experimental está dividido em duas principais partes: caracterização dos materiais e estudo da composição dos agregados para produção de concreto, conforme mostrado no fluxograma da Figura 3.1 e 3.2.

Figura 3.1: Fluxograma das atividades realizadas - Parte 1.



A primeira etapa consiste, de forma geral, na obtenção de amostras e ensaios laboratoriais para caracterização dos materiais quanto a composição granulométrica, massa específica, absorção de água e massa unitária, conforme fluxograma da Figura x.x. Já a segunda etapa, consiste, basicamente, na determinação e estudo, quanto a distribuição granulométrica, de novas composições resultantes da substituição parcial de agregado natural por reciclado, segundo o método de substituição adotado. O fluxograma da segunda parte está colocado na Figura 3.2.

Figura 3.2: Fluxograma das atividades realizadas - Parte 2.



Além disso, cabe destacar que, serão também considerados e avaliados os resultados obtidos em Monografia de Projeto Final de Sousa e Soares (2013) e Beltrão (2014), uma vez que estes trabalhos também analisaram agregados reciclados produzidos no Distrito Federal pela Fornecedora de Areia Bela Vista, única empresa na região que produz este tipo de material.

Beltrão (2014) realizou ensaios somente para o agregado miúdo natural produzido pela empresa. Enquanto que, Sousa e Soares (2013) fizeram ensaios com material reciclado produzido pela Fornecedora - tanto agregado miúdo quanto graúdo (brita 1) – e, com material natural fornecido pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil (LEM/UnB) – sendo o agregado miúdo do tipo areia de leito de rio e o agregado graúdo proveniente de rocha britada, do tipo litológico calcário, com graduação 1, atendendo limites da ABNT NBR 7211:2009.

Com isso, como base de comparação e referência em relação ao material natural, neste trabalho serão adotados os resultados obtidos por Sousa e Soares (2013), já que, por se tratar de um material convencional, apresenta resultados mais padronizados.

3.1 Caracterização dos materiais

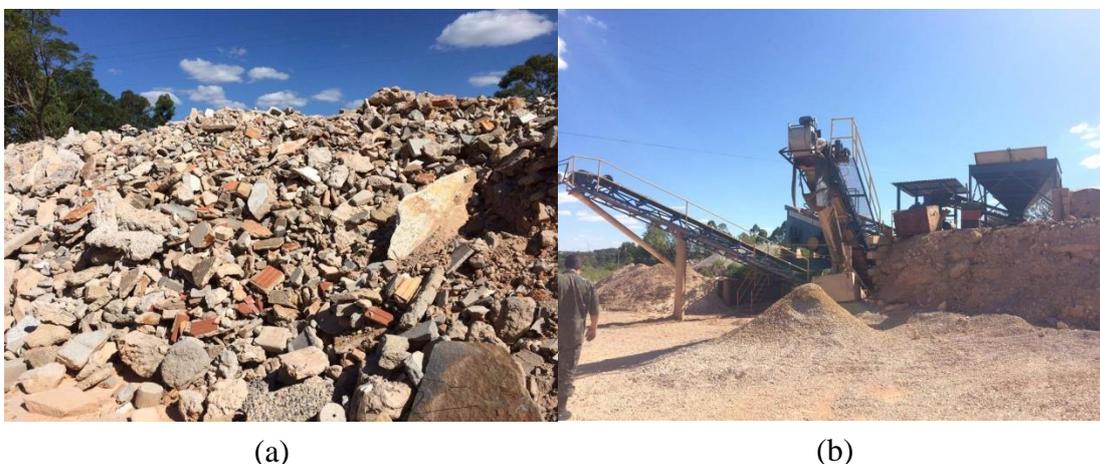
3.1.1 Amostragem

A primeira etapa consiste na caracterização dos materiais utilizados por meio de ensaios laboratoriais, para determinação de suas propriedades. Para tanto, é preciso, inicialmente,

obter os materiais utilizados para desenvolvimento do trabalho: agregado miúdo reciclado e agregado graúdo reciclado.

O material reciclado utilizado será o material britado e pronto para uso produzido pela Fornecedora de Areia Bela Vista, a qual recebe resíduos de construção civil provenientes de diversas partes do Distrito Federal e utiliza um britador de mandíbulas para reciclagem do resíduo de classe A. A Figura 3.3 mostra uma pilha de entulho pronta para ser britada e o britador, encontrados na fornecedora.

Figura 3.3: (a) Entulho de RCC classe A pronto para britagem, (b) britador da empresa Areia Bela Vista.



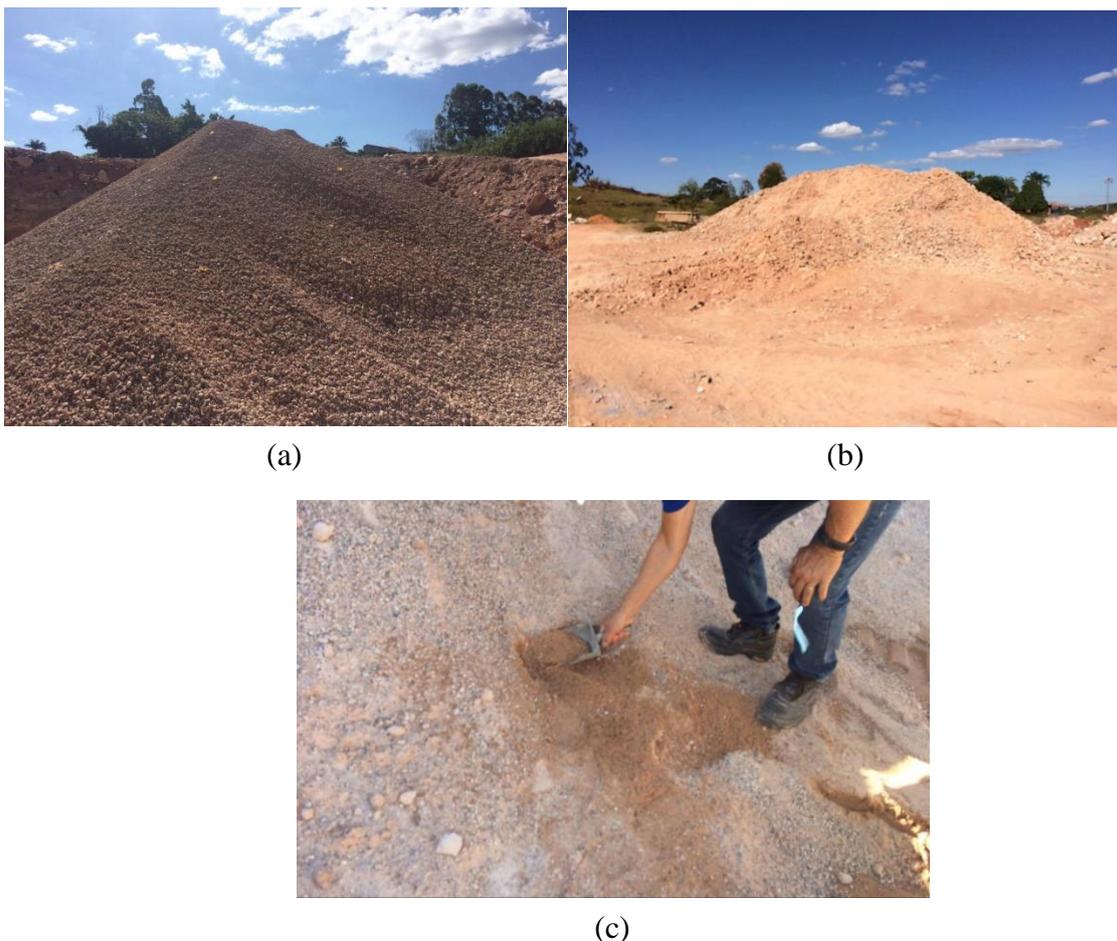
De forma geral, serão consideradas as condições estabelecidas pelas seguintes normas para coleta desses materiais:

- ABNT NBR NM 26:2009 – Agregados: Amostragem;
- ABNT NBR NM 27:2001 – Agregados: Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.

Sendo que, na Fornecedora de Areia Bela Vista, os materiais foram encontrados em pilhas como mostrado na Figura 3.4. Conforme a ABNT NBR NM 26:2009 isso dificulta garantir a coleta de amostras representativas para os agregados miúdos, uma vez que se tem segregação do material mais grosso na parte externa da pilha, devendo-se remover uma camada externa para coleta da amostra abaixo dessa camada, além de ser necessário retirar amostras de diferentes partes da pilha. Já para o agregado graúdo, como não se tinha equipamento

mecânico, foram coletadas três amostras parciais retiradas do topo, meio e base da pilha. Assim, seguindo-se as recomendações da norma, foram coletadas as amostras necessárias do agregado miúdo e gráúdo reciclado. A Figura 3.4 apresenta as pilhas de agregados reciclados gráúdo e miúdo encontrados na fornecedora e a coleta da amostra.

Figura 3.4: Pilhas de agregados reciclados (a) gráúdo e (b) miúdo. (c) Coleta de agregado miúdo.



3.1.2 Ensaio em laboratório

Então, segue-se para a caracterização dos materiais obtidos, feita por meio de ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UnB (LEM/UnB). Tais ensaios foram feitos para as amostras de agregados reciclados, de forma separada para gráudos e miúdos, caracterizando quanto a composição granulométrica, a massa específica, a absorção de água e a massa unitária. Inicialmente, as amostras foram reduzidas, no laboratório, a

quantidades pretendidas por cada ensaio, utilizando-se o Método “A” –Separador Mecânico, conforme a ABNT NBR NM 27:2000, conforme ilustrado na Figura 3.5.

Figura 3.5: Separação das amostras de agregado (a) miúdo e (b) graúdo.



3.1.2.1 Determinação da Composição Granulométrica

A granulometria das frações graúda e miúda dos agregados foi determinada separadamente, segundo a norma ABNT NBR NM 248:2003 e com uso das peneiras descritas na ABNT NBR NM ISO 565:1997. De forma que, as peneiras foram encaixadas como mostrado na Figura 3.6 e o material foi colocado sobre o conjunto de peneiras, as quais foram agitadas, conforme previsto, separando o material.

Em seguida, pesou-se a massa retida em cada peneira e com estes dados traçou-se a curva granulométrica do agregado, a qual foi comparada com os intervalos permitidos pela ABNT NBR NM 7211:2009, verificando-se a adequação dos agregados dentro dos limites adequados estabelecidos para uso em concreto.

Figura 3.6: (a) Série de peneiras utilizadas para ensaio do agregado miúdo, (b) série de peneiras para ensaio de agregado graúdo em agitador mecânico.



(a)



(b)

Além disso, determinou-se também, segundo a ABNT NBR NM 248:2003, o módulo de finura e a dimensão máxima característica dos agregados. Sendo o módulo de finura dado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. Já a dimensão máxima do agregado refere-se à peneira, em mm, da série normal ou intermediária, onde ficou retido acumulado uma porcentagem igual ou imediatamente inferior a 5% da massa inicial da amostra.

Para o agregado miúdo, após secagem em estufa a 105°C por 24 horas e elas esfriarem à temperatura ambiente, colocou-se 1 kg da amostra sobre o conjunto de peneiras de 6,3 mm a 0,075 mm, limpas e devidamente encaixadas, conforme a ABNT NBR 7211:2005. Então, repetiu-se o processo para uma amostra 2 também de 1kg.

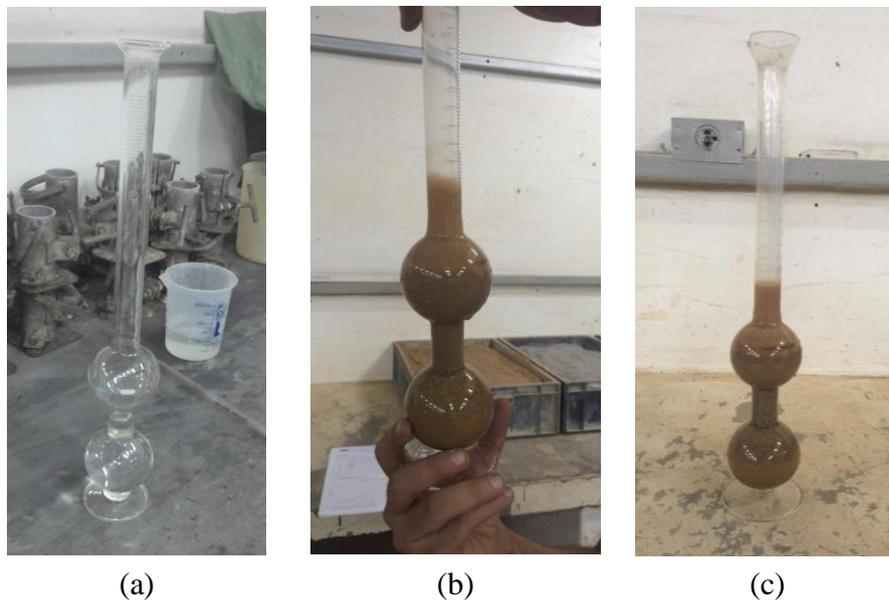
Já para o agregado graúdo reciclado, utilizou-se uma amostra seca de 10 kg, que foi colocada em um conjunto de peneiras de 25 mm a 1,2 mm, repetindo-se o procedimento para uma segunda amostra.

3.1.2.2 Massa específica e absorção dos agregados

A massa específica para os agregados miúdos foi obtida de acordo com a ABNT NBR 9776:1987 - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman, que é a mais usada atualmente, embora esta norma tenha sido substituída pela ABNT NBR 52:2009. Já para os agregados graúdos, utilizou-se a norma ABNT NBR NM 53:2009.

De forma geral, para os agregados miúdos, o ensaio consiste em colocar água até a marca de 200 cm³ no frasco de Chapman e, em seguida, inserir cautelosamente 500 gramas de agregado seco. Então, agita-se o frasco para que o ar seja eliminado. Por fim, é feita a leitura do volume de água e agregado no frasco, colocando-se o valor encontrado na fórmula fornecida pela norma e obtendo-se, assim, a massa específica do material. Os procedimentos realizados estão ilustrados na Figura 3.7.

Figura 3.7 (a) frasco de Chapman vazio, (b) Agitação da água e agregado miúdo, (c) Água e agregado em repouso para leitura.



A fórmula em questão fornecida pela norma para determinação da massa específica é dada por:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200}$$

(Equação 3.1: Massa específica pelo frasco de Chapman)

Em que,

γ = massa específica do agregado miúdo, em g/cm³;

L = leitura do frasco.

Foram feitas duas determinações consecutivas para duas amostras, conforme estipulado pela ABNT NBR 9776/1987, sendo que as amostras não devem diferir mais de 0,05 g/cm³. O resultado é dado pela média das duas medições.

Para os agregados graúdos, cabe destacar que o ensaio de determinação da massa específica também fornece a absorção dos agregados. De forma geral, o procedimento é feito com o peneiramento de uma amostra de 3,5 kg na peneira de 4,75 mm. Então, o material retido nesta peneira, depois de lavado para retirada do pó da superfície, é colocado para secar em estufa por 24 horas. Em seguida, 3 kg do material é submergido em água por 24 horas. Após isso, o material é secado superficialmente com um pano úmido. Por fim, a amostra é pesada em balança hidrostrática e novamente seca em estufa. Com os dados obtidos, determina-se a massa específica e absorção dos agregados de acordo com as Equações 3.2 e 3.3. A sequência de procedimentos está ilustrada na Figura 3.6.

$$\gamma_{esp} = \frac{M}{M - M_s} \quad (\text{Equação 3.2 Massa específica do agregado graúdo})$$

Em que,

γ_{esp} = massa específica;

M = massa seca;

M_s = massa saturada superfície seca;

Figura 3.8: (a) secagem superficial com pano úmido até a condição saturada superfície seca, (b) Pesagem da amostra na condição saturada superfície seca, (c) detalhe do material colocado em balança hidrostática antes da pesagem, (d) Submersão do material para pesagem na balaça hidrostática.



(a)



(b)



(c)



(d)

O ensaio de absorção para o agregado miúdo foi realizado de acordo com a ABNT NBR NM 30:2001. De forma geral, o procedimento inicia-se com a pesagem de 1 kg de amostra seca, que logo em seguida é submergida em água por 24 horas. Então, retira-se o excesso de água e espera-se até que a amostra atinja a condição de saturada superfície seca, a qual é aferida pela colocação de parte do agregado no molde tronco cônico, seguido da

aplicação de 25 golpes leves, atingindo-se a condição saturada de superfície seca quando o agregado desmoronar após retirada do molde. Dessa forma, com o peso dessa amostra calcula-se a absorção do agregado por meio da equação a seguir fornecida pela ABNT NBR NM 30:2001. Os procedimentos realizados estão mostrados na Figura 3.9.

$$A = \frac{M_s - M}{M} \quad (\text{Equação 3.3: Absorção do agregado graúdo})$$

Em que,

M = massa seca;

M_S = massa saturada superfície seca.

Figura 3.9: (a) Aplicação dos golpes no molde, (b) Aspecto da areia na condição saturada superfície seca



(a)



(b)

3.1.2.3 Massa unitária

A determinação da massa unitária foi feita para os agregados miúdo e graúdo, separadamente, de acordo com a ABNT NBR NM 45:2006, a qual fornece os procedimentos necessários para determinação da densidade a granel e do volume de vazios de agregados miúdos, graúdos ou de mistura dos dois, em estado compactado ou solto. De modo que foi utilizado o “método C” da Norma, empregado para determinação da massa unitária de material no estado solto.

O ensaio consiste em encher um recipiente com volume previamente conhecido, até que ele transborde, com o uso de uma pá ou concha, de forma cautelosa para se evitar ao máximo a segregação dos agregados da amostra. Além disso, é necessário que o agregado seja despejado

a uma altura máxima de 50 mm acima da borda superior do recipiente. Por fim, nivela-se a camada superficial do agregado com auxílio de uma espátula e determina-se sua massa, com a massa do recipiente previamente zerada na balança.

A Figura 3.10 ilustra a sequência de procedimentos desenvolvidos neste ensaio. Cabe destacar ainda que, conforme recomendado pela norma, o ensaio foi feito para três amostras sendo o valor da massa unitária dada pela média simples entre os três resultados individuais dividido pelo volume, como mostrado na Equação 3.4.

Figura 3.10: Ensaio de massa unitária agregado miúdo (a) agregado sendo despejado no recipiente, (b) determinação da massa do agregado.



(a)



(b)

$$\gamma_{unit} = \frac{M_M}{V}$$

(Equação 3.4: Massa unitária)

Em que;

M_M = massa média;

V = volume do recipiente.

3.2 Estudo da composição dos agregados para produção de concreto

Conhecendo-se as propriedades dos materiais caracterizados na primeira etapa, segue-se para a segunda etapa, que consiste no estudo da composição dos agregados naturais e reciclados para produção de concreto. Sendo que, as formas de substituição do material natural por reciclado e as características da composição granulométrica serão o foco deste estudo. Desse

modo, para determinação da composição dos agregados, as formas de substituição consideradas serão em relação à massa e ao volume.

3.2.1 Substituição em massa

Neste caso, o novo agregado produzido será composto por uma porcentagem de agregado reciclado em relação a massa do agregado em questão, seja ele graúdo ou miúdo. Com isso, para determinação da granulometria desse novo material resultante, definiu-se, inicialmente, as possíveis proporções a serem estudadas. Para realização deste trabalho considerou-se um teor de substituição variando de 0% a 100%, sendo que 0% quer dizer que se tem apenas agregado natural, ou seja, nenhuma parcela de material natural foi substituído por reciclado; e, 100% significa que todo material natural foi substituído por material reciclado, tendo-se, portanto, somente material reciclado. Já um teor de 10%, por exemplo, significa que 10% do material é de origem reciclada e 90% é de material natural (convencional).

Esta variação do teor de substituição foi feita a cada 1% a fim de se desenvolver uma sensibilidade de percepção sobre a variação da granulometria do material resultante desta nova composição e analisar seus efeitos na curva granulométrica.

Para determinação da curva granulométrica decorrente das novas composições, é necessário obter as porcentagem retidas acumuladas em cada peneira para todas as composições. Isso é feito considerando-se o ensaio de granulometria realizado na primeira etapa, o qual forneceu, para cada peneira “i”, a massa de material retido para o agregado natural “ $m_{i0\%}$ ” (0% de substituição) e para o reciclado “ $m_{i100\%}$ ” (100% de substituição). Com isso, multiplicando-se a massa de cada peneira do agregado reciclado pelo teor de substituição “ $x\%$ ” e somando-se com a parcela restante da massa (1-x%) como agregado natural tem-se a massa total retida na peneira “i”, conforme Equação 3.5.

$$m_i = x\% * m_{i100\%} + (1 - x\%) * m_{i0\%} \quad (\text{Equação 3.5: Massa retida em cada peneira})$$

Em que,

$$m_i = \text{massa retida na peneira “i”};$$

$x\%$ = teor de substituição do agregado natural por reciclado;

$m_{i\ 100\%}$ = massa retida na peneira “i” para agregado com 100% de substituição (reciclado);

$m_{i\ 0\%}$ = massa retida na peneira “i” para agregado com 0% de substituição (natural);

Então, para determinar o percentual retido acumulado basta dividir este valor da massa retida em cada peneira pela massa total e em seguida somar o valor obtido com resultados da peneira anterior “i-1”, de acordo com a equação 3.6.

$$\% \textit{ retido acum.} = \frac{m_i}{M} + \frac{m_{i-1}}{M} \quad (\text{Equação 3.6: Percentual retido acumulado})$$

Em que

m_i = massa retida na peneira “i”;

m_{i-1} = massa retida na peneira “i - 1”;

M = massa total inicial

Dessa forma, com o percentual retido acumulado em cada peneira, é possível obter a curva granulométrica de todos os teores de substituição adotados.

3.2.2 Substituição em volume

A substituição em volume decorre do fato dos materiais naturais e reciclados utilizados para nova composição do agregado apresentarem diferentes massas específicas. Portanto, se considerada a situação apresentada no item 3.2.1 (substituição em massa), os agregados resultantes das novas composições terão diferentes volumes. Levando-se isto em consideração, para este método, o teor de substituição será em relação ao volume, mantendo-se o valor total invariável para todas as substituições.

Dessa forma, analogamente ao procedimento realizado na substituição em massa, define-se, inicialmente, as proporções de substituição a serem estudadas: de 0% a 100%, aumentando-se a cada 1% o volume de agregado reciclado substituído.

Feito isso, é necessário determinar a massa das novas composições obtidas, uma vez que a planilha de dosagem é feita em massa. Para isso, são necessárias a massa específica tanto dos agregados naturais (γ_n) quanto dos agregados reciclados (γ_{rcc}). De forma que, a partir de iguais volumes iniciais de agregado natural e reciclado,

A parcela de agregado reciclado é obtido pelo volume inicial (dado pela razão entre a massa total e a massa específica) multiplicado pelo teor de substituição (R%). Então, para determinação da massa correspondente a este volume, multiplica-se o valor encontrado pela massa específica do agregado reciclado γ_{rcc} , conforme Equação 3.7.

$$M_{rcc} = \frac{M_i}{\gamma_n} \times R\% \times \gamma_{rcc} \quad (\text{Equação 3.7: Massa do agregado reciclado})$$

Em que,

M_i = Massa do agregado natural no concreto de referência;

γ_n = Massa específica do agregado natural;

R% = Teor de agregado reciclado na composição;

γ_{rcc} = Massa específica do agregado reciclado;

Além disso, pode-se determinar também a parcela do agregado natural na composição. O volume é dado pela multiplicação do volume inicial (dado pela razão entre a massa total e a massa específica) pelo teor de agregado natural na composição (N%), o qual é o percentual complementar do teor de substituição. Em seguida, para transformação do valor obtido em massa, basta multiplicar pela massa específica dos agregados naturais (γ_n), como mostrado na Equação 3.8.

$$M_{nat} = \frac{M_i}{\gamma_n} * N\% * \gamma_n = M_i * (1 - R\%) \quad (\text{Equação 3.8: Massa do agregado natural})$$

Em que,

M_{nat} = Massa do agregado natural na composição;

γ_n = Massa específica do agregado natural;

N% = Teor de agregado natural na composição;

M_i = Massa do agregado natural no concreto de referência;

$R\%$ = Teor de agregado reciclado na composição;

Com isso, a massa total da composição é obtida pela soma das massas de agregado natural com reciclado, conforme Equação 3.9.

$$M_t = M_{nat} + M_{rcc} \quad (\text{Equação 3.9: Massa total da composição})$$

Em que:

M_{nat} = Massa do agregado natural na composição;

M_{rcc} = Massa do agregado reciclado na composição;

M_t = massa total da composição.

Então, pode-se obter a massa retida em cada peneira “i” para as novas composições, basta multiplicar a massa de agregado natural e reciclado na composição pelo percentual retido em cada peneira (obtido nos respectivos ensaios de caracterização), somando-se a massa retida dos materiais envolvidos, de acordo com a Equação 3.10.

$$m_i = M_{nat} * m_{i\ 0\%} + M_{rcc} * m_{i\ 100\%} \quad (\text{Equação 3.10: Massa retida acumulada em cada peneira})$$

Em que:

m_i = Massa retida na peneira “i”;

$m_{i\ 0\%}$ = Percentual retido na peneira “i” para agregado com 0% de substituição (natural);

$m_{i\ 100\%}$ = Percentual retido na peneira “i” para agregado com 100% de substituição (reciclado);

M_{nat} = Massa do agregado natural na composição;

M_{rcc} = Massa do agregado reciclado na composição;

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Massa específica e absorção dos agregados

4.1.1 Agregado miúdo natural

Sousa e Soares (2013) realizaram ensaio de massa específica e absorção de agregado miúdo natural e, por se tratar de um material convencional, os resultados obtidos por eles serão usados com referência neste trabalho para análises e comparações. Os procedimentos dos ensaios foram os mesmos descritos no item 3.1.2.2, obtendo-se a massa específica de 2,632 g/cm³ e a absorção de 1,66%.

4.1.2 Agregado miúdo reciclado

Seguindo os procedimentos descritos no item 3.1.2.2, obtiveram-se os resultados colocados na Tabela 4.1 para determinação da massa específica.

Tabela 4.1 Determinação da massa específica do agregado miúdo reciclado – frasco de Chapman.

	1a Determinação	2a Determinação	Média
Massa (g)	500	500	500
L (cm ³)	387	386	386,5
γ (g/cm ³)	2,674	2,688	2,681

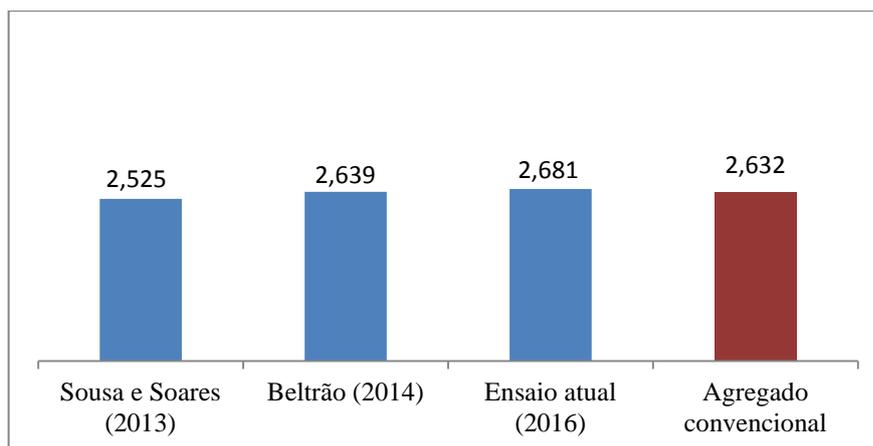
Sendo que a massa específica do agregado miúdo reciclado foi calculada com a Expressão 3.1.

$$\gamma = \frac{500}{386,5 - 200} = 2,681 \text{ g/cm}^3$$

Com a tabela e a equação acima, nota-se que a massa específica do agregado miúdo reciclado é de 2,681g/cm³. Comparando-se com o agregado reciclado natural, nota-se que os resultados são próximos, sendo o material reciclado, aproximadamente, 1,86% maior que o natural.

Além disso, este resultado pode ser também comparado com o obtido por Sousa e Soares (2013) e Beltrão (2014), que, conforme descrito na metodologia, também fizeram ensaios com material reciclado produzidos pela mesma fornecedora. A Figura 4.1 apresenta os resultados obtidos.

Figura 4.1 Variação da massa específica (g/cm^3).



De acordo com a Figura 4.1, é possível perceber que a massa específica do agregado miúdo reciclado produzido pela fornecedora de Areia Bela Vista, conforme amostras estudadas, é 4,5% superior para a amostra analisada por Beltrão (2014) em relação a amostra coletada por Souza e Soares (2013). Comparando-se isso ao agregado miúdo natural, nota-se que a massa específica varia para mais e para menos, com diferença máxima de aproximadamente 4%.

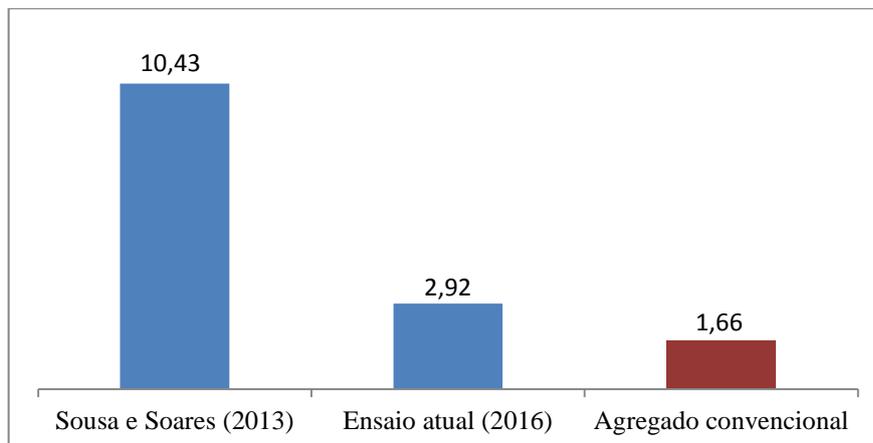
Além disso, para o ensaio de absorção, também descrito no item 3.1.2.2, tem-se os resultados colocados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Determinação da absorção do agregado miúdo reciclado.

	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	Absorção
Amostra 1	419,25	406,7	2,99%
Amostra 2	498,30	484,15	2,84%
		Média	2,92%

Sendo assim, o agregado miúdo reciclado estudado apresentou uma absorção de 2,92%. Pode-se também comparar este resultado com o obtido por Sousa e Soares (2013) e com o agregado miúdo convencional, conforme colocado no Figura 4.2.

Figura 4.2: Absorção de agregado miúdo (%).



A partir dos resultados apresentados, nota-se que, no geral, a absorção dos agregados miúdos reciclados é superior a absorção dos agregados naturais (convencional). Outra observação importante é a variação significativa do resultado obtido em 2013 comparado com o encontrado em 2016: o ensaio atual apresenta um resultado de absorção mais do que três vezes menor que do agregado reciclado analisado em 2013, sendo que este resultado atual se aproxima mais da absorção do agregado miúdo convencional.

De acordo com a ABNT NBR 15116:2004, para que o agregado reciclado possa ser utilizado na produção do concreto sem função estrutural, é necessário que a absorção de água seja inferior a 12% para materiais classificados como Agregado de Resíduo de Concreto (ARC) e, para materiais classificados com Agregado de Resíduo Misto (ARM), seja menor que 17%. Dessa forma, como a absorção do agregado reciclado analisado neste estudo é menor que todos os limites definidos pela norma, pode-se concluir que o agregado miúdo reciclado é adequado para uso na produção de concreto sem função estrutural levando em conta a absorção.

4.1.3 Agregado graúdo natural

Sousa e Soares (2013) realizaram ensaio com agregado graúdo natural, de acordo com os procedimentos descritos no item 3.1.2.2, sendo o resultado obtido por eles utilizado neste trabalho, já que se trata de um material convencional. O valor da massa específica encontrada é de $2,70 \text{ g/cm}^3$ e de absorção de 0,49%.

4.1.4 Agregado graúdo reciclado

Foram coletadas amostras de agregados graúdos com diferentes dimensões, nomeados neste trabalho como “brita a” e “brita b” para diferenciação. Sendo assim, a partir dos procedimentos descritos no item 3.1.2.2, tem-se os resultados do ensaio de massa específica e absorção para o agregado graúdo reciclado colocados a seguir.

Tabela 4.3 Determinação da massa específica e absorção do agregado graúdo reciclado – “brita a”.

	1a Determinação (g)	2a Determinação (g)	Média (g)	Absorção (%)	Massa específica (g/cm³)
m	918,1	933,2	925,65	8,0%	2,66
ms	1000	1000	1000,00		
ma	577,9	577,1	577,50		

Tabela 4.4 Determinação da massa específica e absorção do agregado graúdo reciclado – “brita b”.

	1a Determinação (g)	2a Determinação (g)	Média (g)	Absorção (%)	Massa específica (g/cm³)
m	1909,8	1912,2	1911,00	4,7%	2,65
ms	2000,5	2000,6	2000,55		
ma	1189,3	1192,9	1191,10		

A partir das Tabelas 4.3 e 4.4, é possível notar que, embora os agregados graúdos reciclados analisados apresentassem dimensões diferentes, o resultado de massa específica foi muito próximo. No entanto, para a absorção, verifica-se uma variação mais significativa: a “brita a” apresenta absorção, aproximadamente, 40% maior. Além disso, cabe comparar também com o agregado graúdo natural: para a massa específica, tem-se resultados muito próximos, com variação inferior a 2%; já para a absorção, no entanto, a variação é muito grande – a “brita a” apresenta resultado mais do que 16 vezes superior ao agregado graúdo natural.

4.2 Massa unitária

4.2.1 Agregado miúdo natural

Segundo ensaio realizado por Sousa e Soares (2013), conforme procedimentos descritos no item 3.1.2.3, a massa unitária do agregado miúdo natural é de 1,52 g/cm³. Por se tratar de um material convencional, este resultado será considerado neste trabalho.

4.2.2. Agregado miúdo reciclado

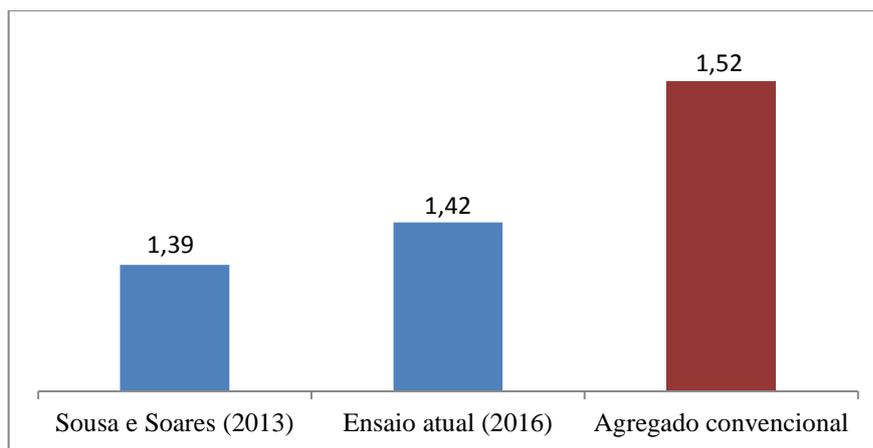
De acordo com os procedimentos descritos no item 3.1.2.3, tem-se os resultados para o agregado miúdo reciclado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Determinação da massa unitária do agregado miúdo reciclado.

	Massa (kg)	Massa média (kg)	Vol. Recipiente	Massa unitária
Amostra 1	21,37	21,33	15,00 litros	1,42 g/cm ³
Amostra 2	21,37			
Amostra 3	21,25			

$$\gamma_{unit} = \frac{Massa\ média}{Vol.\ Recipiente} = \frac{21,33}{15} = 1,42\ g/cm^3$$

Figura 4.3 Resultados de massa unitária agregado miúdo (g/cm³).



A partir da Figura 4.3, nota-se que a massa unitária dos agregados miúdos reciclados estudados apresentaram valores inferiores ao agregado miúdo convencional, com uma

diferença máxima de 8,5%. Além disso, comparando-se os resultados dos agregados reciclados, verifica-se uma proximidade de valores, com variação de, aproximadamente, 2%.

4.2.3 Agregado gráudo natural

Considerando-se o resultado obtido por Sousa e Soares (2013), determinado por meio dos procedimentos descritos no item 3.1.2.3, a massa unitária do agregado miúdo natural é de 1,37 g/cm³.

4.2.4 Agregado gráudo reciclado

De acordo com os procedimentos descritos no item 3.1.2.3, tem-se os resultados para os agregados gráudos reciclados na Tabela 4.6 (“brita a”) e Tabela 4.7 (“brita b”).

Tabela 4.6: Determinação da massa unitária do agregado gráudo reciclado – “brita a”.

	Massa (kg)	Massa média (kg)	Vol. Recipiente	Massa unitária
Amostra 1	24,199	24,26	20 litros	1,21 g/cm ³
Amostra 2	24,240			
Amostra 3	24,345			

$$\gamma_{unit \text{ "brita a"}} = \frac{Massa \text{ média}}{Vol. \text{ Recipiente}} = \frac{24,26}{20} = 1,21 \text{ g/cm}^3$$

Tabela 4.7: Determinação da massa unitária do agregado gráudo reciclado – “brita b”.

	Massa (kg)	Massa média (kg)	Vol. Recipiente	Massa unitária
Amostra 1	25,53	25,68	20 litros	1,28 g/cm ³
Amostra 2	25,54			
Amostra 3	25,96			

$$\gamma_{unit \text{ "brita b"}} = \frac{Massa \text{ média}}{Vol. \text{ Recipiente}} = \frac{25,68}{20} = 1,28 \text{ g/cm}^3$$

A partir dos resultados obtidos, é possível observar uma proximidade da massa unitária para os agregados estudados, com variação de aproximadamente 5%. Comparando-se o agregado gráudo reciclado com o agregado gráudo natural, percebe-se uma diferença mais significativa (máxima diferença em torno de 12%).

4.3 Determinação da Composição Granulométrica

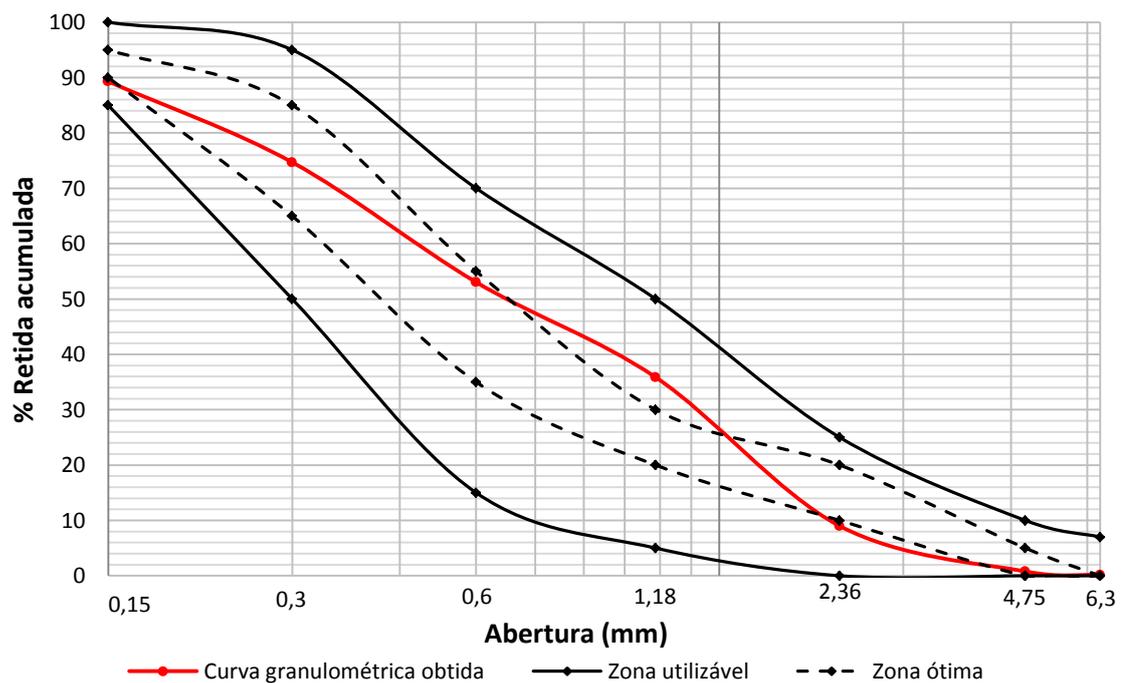
4.3.1 Agregado miúdo natural

De acordo com os procedimentos descritos no item 3.1.2.1., tem-se os resultados do ensaio do ensaio na Tabela 4.8 e na Figura 4.4.

Tabela 4.8: Composição granulométrica do agregado miúdo natural.

Peneiras (mm)	Massa Amostra (g)	% Ret. Acum.
6,3	1,68	0
4,75	6,18	1
2,36	82	9
1,18	268,34	36
0,6	171,63	53
0,3	216,51	75
0,15	145,93	89
0,075	74,73	97
Fundo	33,00	100
Total	1000	-
Módulo de finura (%)		2,63
Dimensão máxima característica (mm)		4,75 mm

Figura 4.4: Curva granulométrica do agregado miúdo natural.



4.3.2 Agregado miúdo reciclado

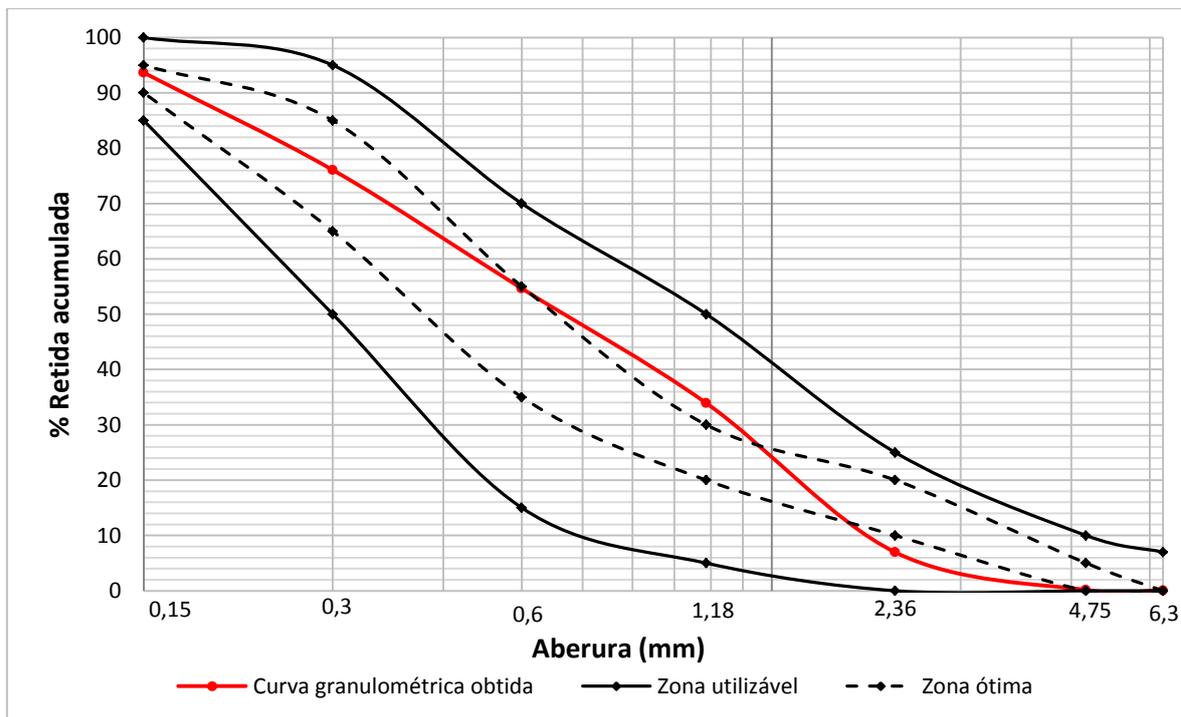
A Tabela 4.9 apresenta os resultados do ensaio de composição granulométrica do agregado miúdo reciclado conforme procedimentos descritos no item 3.1.2.1.

Tabela 4.9: Composição granulométrica do agregado miúdo reciclado.

Peneiras (mm)	Massa Amostra 1 (g)	Massa Amostra 2 (g)	% Ret. Acum. médio
6,3	0	1,68	0
4,75	0	1,43	0
2,36	73,97	62,00	7
1,18	267,89	271,20	34
0,6	206,55	207,56	55
0,3	199,32	229,04	76
0,15	182,82	168,74	94
0,075	50,66	43,29	98
Fundo	18,79	15,06	100
Total	1000,00	1000,00	-
Módulo de finura (%)		2,65	
Dimensão máxima característica (mm)		4,75 mm	

A partir dos resultados da Tabela 4.9, traçou-se a curva granulométrica do agregado miúdo reciclado, dada pela percentagem retida acumulada em cada peneira em função de sua abertura, em escala mono-log. A curva resultante está colocada na Figura 4.5.

Figura 4.5: Curva granulométrica do agregado miúdo reciclado.



A curva granulométrica do agregado miúdo reciclado mostra dois intervalos importantes dados pela ABNT NBR 7211:2009 para análise do material em relação a sua distribuição granulométrica: a zona utilizável e a zona ótima. A primeira refere-se a limites que garantem uma granulometria aceitável e o material pode ser utilizado. A outra zona tem um intervalo menor, que corresponde a limites ideais de granulometria, ou seja, um intervalo de valores desejáveis de distribuição granulométrica.

Levando-se isso em consideração, nota-se que, de forma geral, a curva granulométrica obtida do material reciclado está dentro da zona utilizável, ou seja, ele pode ser usado para produção do concreto em relação a composição granulométrica. Já para zona ótima o resultado varia de acordo com as peneiras: para a menor peneira (abertura de 0,15mm) e a de 0,3mm a curva encontra-se dentro da zona ótima; para a peneira de abertura 0,6mm, a curva encontra-se no limite superior; já na peneira de abertura 1,18mm, a curva encontra-se fora da zona ótima, com um valor acima do limite superior; por outro lado, na peneira 2,36mm a curva também está fora da zona ótima, mas com um valor menor do que o limite inferior; e, por fim, nas peneiras de 4,75mm e 6,3mm os valores encontrados são iguais ao limite inferior da zona ótima.

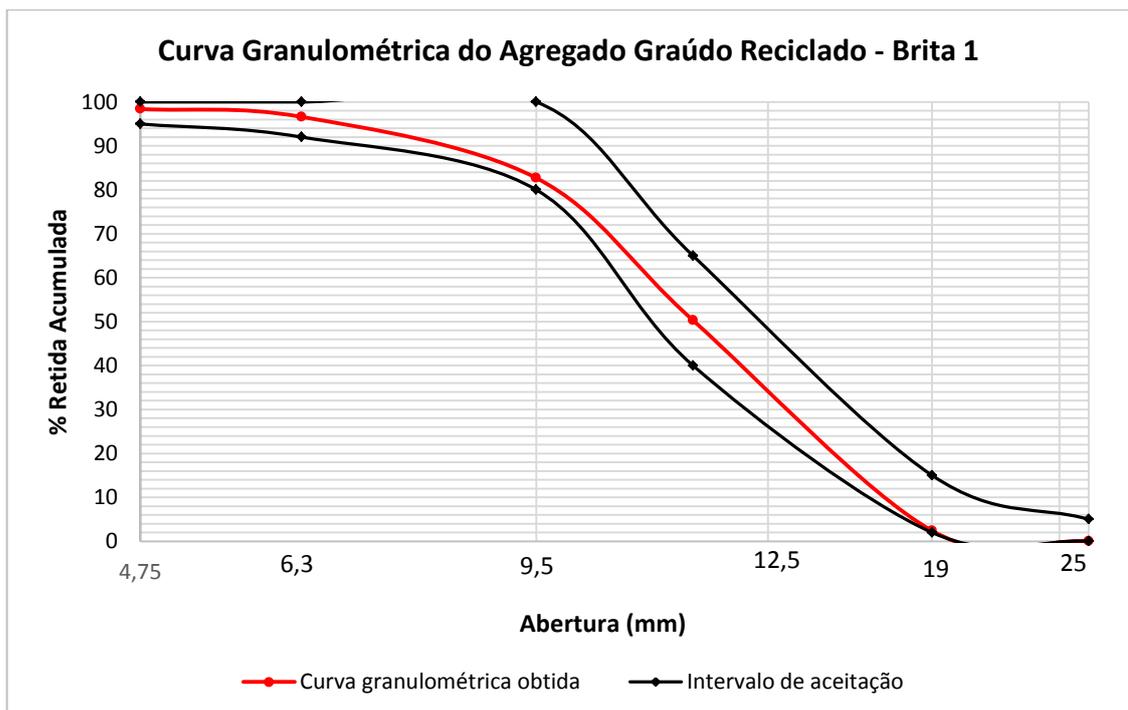
4.3.3 Agregado graúdo natural

A Tabela 4.10 apresenta os resultados do ensaio de composição granulométrica do agregado graúdo natural, conforme procedimentos descritos no item 3.1.2.1. Além disso, com os resultados encontrados nesta tabela, é possível determinar a curva granulométrica conforme Figura 4.6.

Tabela 4.10: Composição granulométrica do agregado graúdo natural.

Peneiras (mm)	Massa Amostra 1 (kg)	Massa Amostra 2 (kg)	% Ret. Acum. médio
25	0,00	0	0
19	0,15	0,09	2
12,5	2,45	2,34	50
9,5	1,62	1,62	83
6,3	0,63	0,76	97
4,75	0,08	0,10	98
Fundo	0,07	0,09	100
Total	5,00	5,00	-
Módulo de finura (%)		6,84	
Dimensão máxima característica (mm)		19 mm	

Figura 4.6: Curva granulométrica do agregado graúdo natural.



4.3.4 Agregado graúdo reciclado

O procedimento do item 3.1.2.1 foi também realizado para o agregado graúdo reciclado produzido pela fornecedora de areia Bela Vista, com diferentes dimensões características. Os resultados da “brita a” estão na Tabela 4.11 e da “brita b” na Tabela 4.12.

Tabela 4.11: Composição granulométrica do agregado graúdo reciclado – “brita a”.

Peneiras (mm)	Massa Amostra 1 (g)	Massa Amostra 2 (g)	% Ret. Acum. médio
6,3	367,70	402,2	19
4,75	775,60	793,7	59
2,4	678,40	650,8	92
1,2	89,40	79,2	96
0,6	15,43	12,99	97
0,3	15,45	11,83	97
0,15	25,84	17,1	99
Fundo	32,18	32,18	100
Total	2000,00	2000,00	-
Módulo de finura (%)		5,39	
Dimensão máxima característica (mm)		6,3 mm	

Tabela 4.12: Composição granulométrica do agregado graúdo reciclado – “brita b”.

Peneiras (mm)	Massa Amostra 1 (kg)	Massa Amostra 2 (kg)	% Ret. Acum. médio
25	0,05	0,05	1
19	1,84	2,97	25
12,5	6,76	5,98	88
9,5	0,96	0,75	97
6,3	0,31	0,17	99
4,75	0,02	0,02	99
2,4	0,01	0,00	100
1,2	0,004	0,00	100
Fundo	0,04	0,06	100,0
Total	10,00	10,00	-
Módulo de finura (%)		4,20	
Dimensão máxima característica (mm)		25 mm	

Com os resultados obtidos nas Tabelas 4.11 e 4.12, é possível determinar a curva granulométrica dos agregados conforme Figura 4.7 e 4.8.

Figura 4.7: Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado – “brita a”.

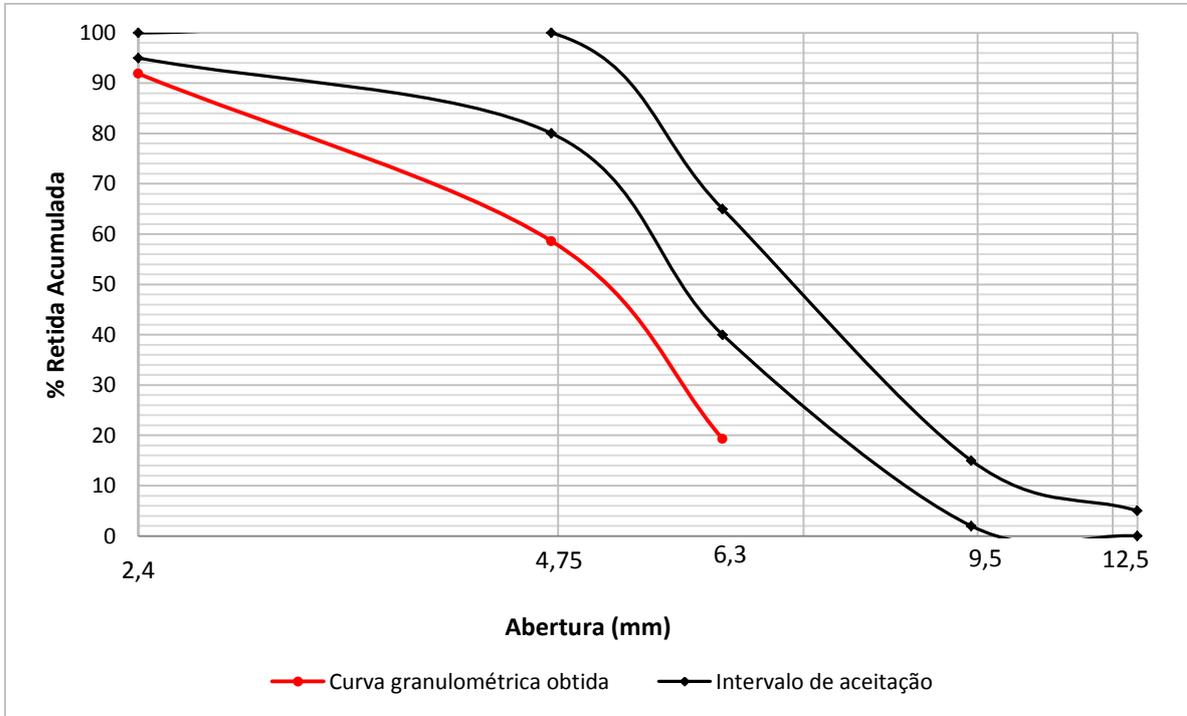
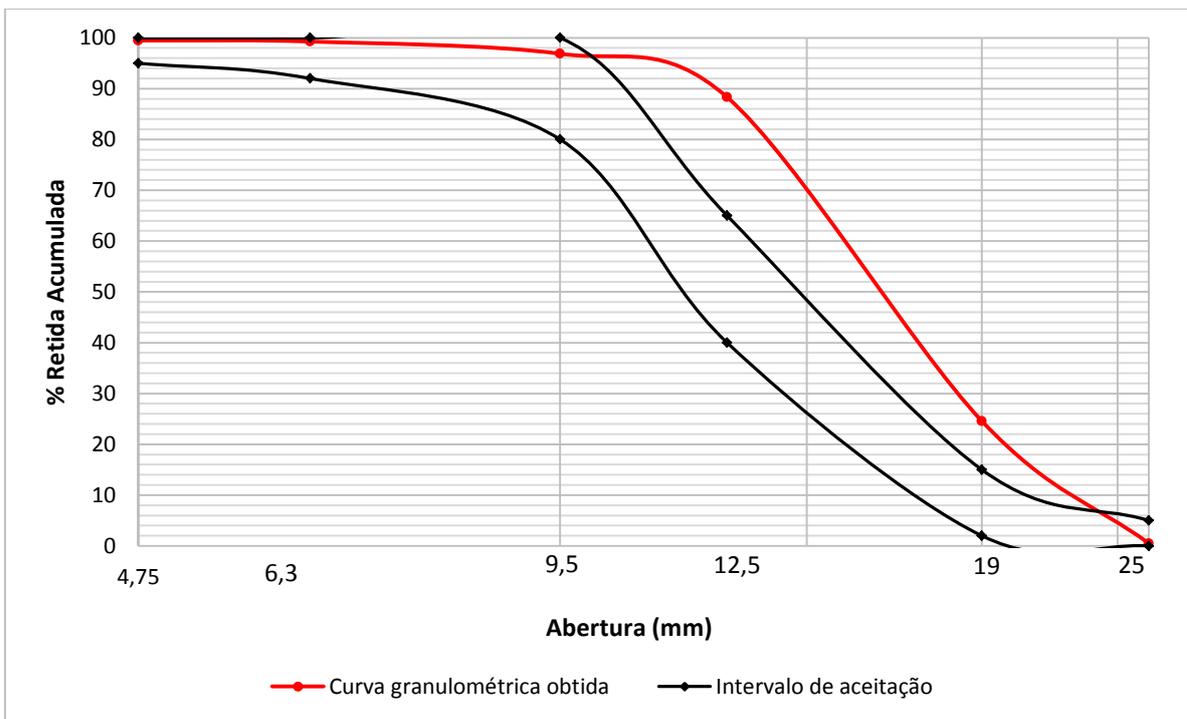


Figura 4.8: Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado – “brita b”.



A partir da Figura 4.7, constata-se que o agregado graúdo reciclado “brita a” não é adequado para uso em concreto, uma vez que sua curva granulométrica encontra-se inteiramente fora do intervalo de aceitação proposto pela ABNT NBR 7211:2009.

Da mesma forma, analisando-se a figura 4.8, nota-se que o agregado reciclado “brita b” também se encontra fora do intervalo de aceitação, o que significa que, segundo intervalos limites da ABNT NBR 7211:2009, ele não tem aplicabilidade para produção de concreto.

4.4 Estudo da composição

4.4.1 Agregado miúdo

O estudo da composição levando-se em consideração a substituição de agregado natural por reciclado em relação a massa será realizado para dois casos. O primeiro será com o agregado miúdo reciclado denominado atual, que foi coletado para execução deste trabalho e devidamente caracterizado. O outro caso será com o agregado reciclado coletado e estudado por Sousa e Soares (2013), já mencionado como referência de comparação neste trabalho. É importante destacar que as substituições serão feitas com relação à massa total e para todo o material, buscando-se uma melhoria granulométrica geral, sem substituições para modificações pontuais em cada peneira.

Além disso, conforme descrito no item 3.2.2, as composições podem também ser feitas com substituição de agregado natural por reciclado em função do volume total. De forma semelhante à análise de substituição em massa, será desenvolvido o estudo da substituição em relação ao volume, para os dois casos. Sendo que será utilizado os procedimentos descritos no item 3.2.2 deste trabalho.

Após a análise dos métodos de substituição em relação à massa e ao volume, é importante comparar os resultados encontrados a fim de se determinar semelhanças, diferenças e, se possível, a definição de qual método é melhor para ser adotado quando se deseja produzir concreto com substituição parcial de agregado miúdo natural por reciclado. Para tanto, os casos serão reanalisados e comparados.

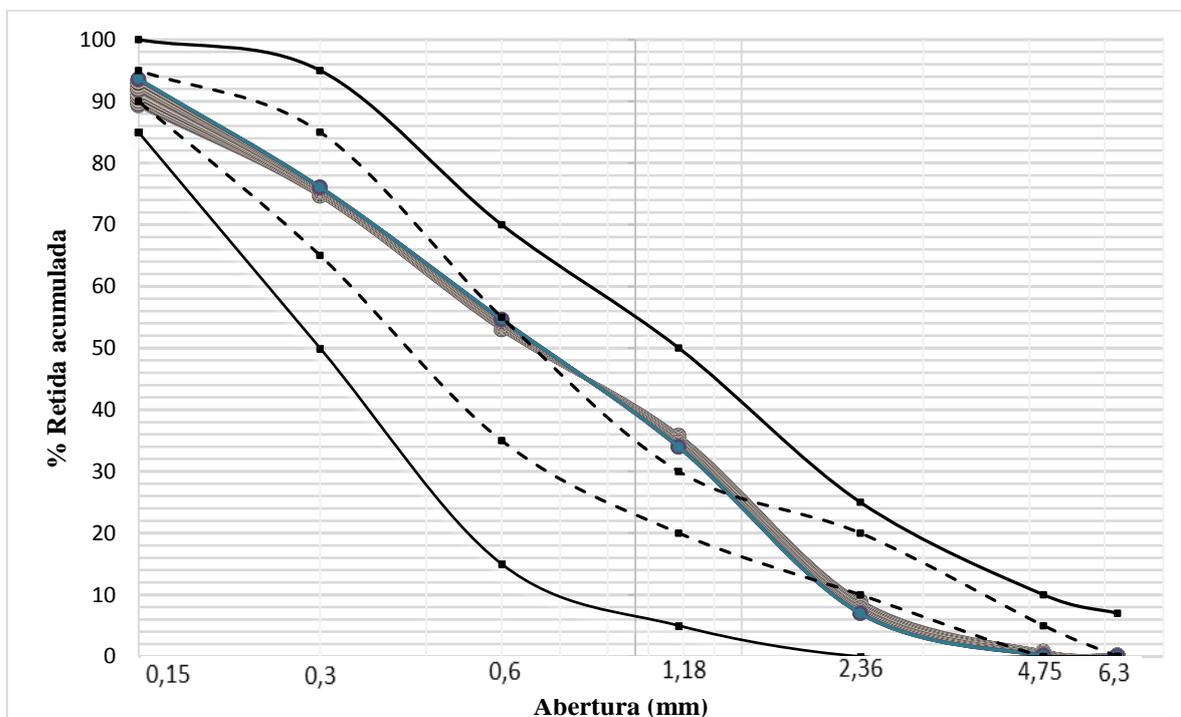
4.4.1.1 Caso 1 – Agregado miúdo reciclado atual - Substituição em massa

Este caso refere-se a composições com o agregado miúdo natural e o agregado miúdo reciclado atual, coletado para este trabalho. A partir dos resultados dos ensaios e, considerando-se os procedimentos descritos no item 3.2 da metodologia, pode-se determinar a distribuição granulométrica dos materiais com diferentes composições resultantes da variação do teor de substituição de agregado natural por reciclado.

A tabela do Anexo A apresenta o resultado desta distribuição granulométrica decorrente da substituição em massa, ou seja, a porcentagem retida acumulada em cada peneira levando-se em conta um teor de substituição em relação a massa total do agregado, conforme descrito no item 3.2.1 deste trabalho.

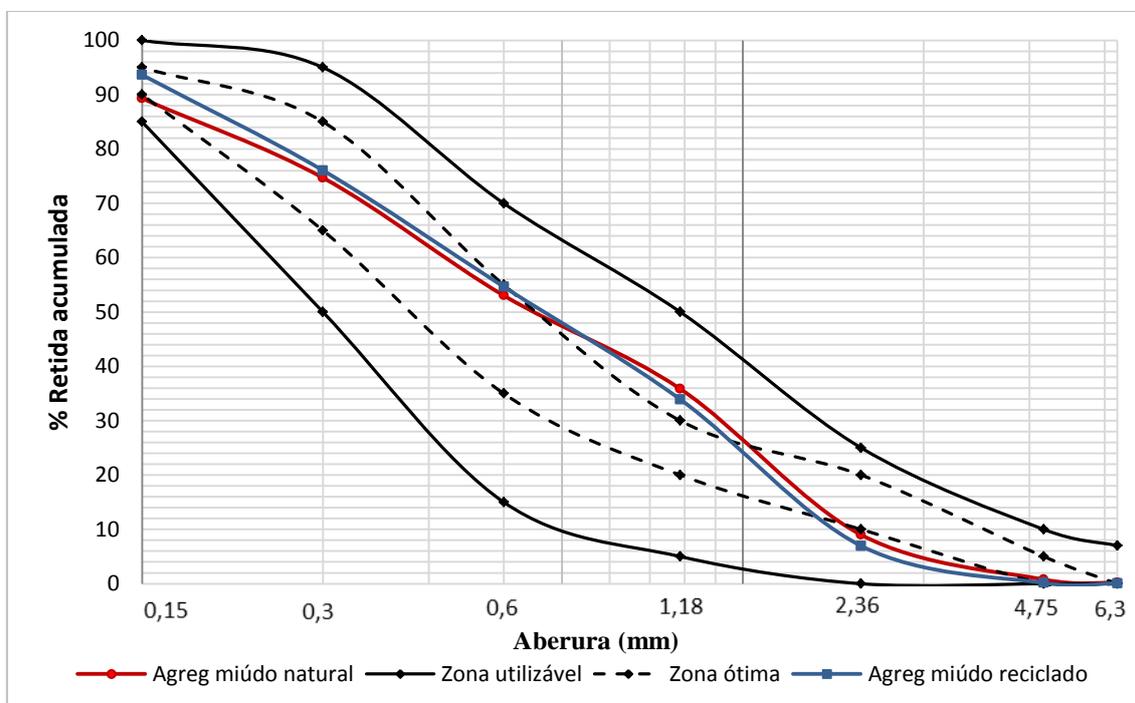
Com a distribuição granulométrica apresentada, é possível traçar a curva granulométrica de todas as composições, conforme colocado na Figura 4.9.

Figura 4.9: Curva granulométrica para diferentes teores de substituição em massa de agregado miúdo natural por reciclado.



A análise da Tabela 4.13 e da Figura 4.9 permitem observar que a porcentagem retida acumulada de cada peneira varia entre os valores do material natural e reciclado, ou seja, as novas composições (resultantes da substituição de agregado miúdo natural por reciclado em relação a massa) apresentam distribuição granulométrica intermediária entre o material natural (0% de substituição) e o reciclado (teor de 100%). Isto pode ser mais facilmente visualizado analisando-se a Figura 4.10 que apresenta a curva granulométrica do agregado miúdo natural e reciclado.

Figura 4.10: Curva granulométrica agregado miúdo natural (0% de substituição) e reciclado (teor de 100%).



Nota-se, a partir da Figura 4.10, que as curvas granulométricas do agregado miúdo natural (0% de substituição) e agregado miúdo reciclado (teor de 100%) são muito próximas. Isto explica a pouca variação das curvas para as novas composições com diferentes teores de substituição, conforme visto na Figura 4.9.

Sendo assim, como a curva granulométrica das novas composições estarão entre a curva do material natural e do reciclado, é possível concluir que quanto maior for a diferença de distribuição granulométrica entre o agregado miúdo natural e o agregado miúdo reciclado, maior será a variação da curva granulométrica para os diferentes teores de substituição.

Tal conclusão tem grande importância quando se deseja obter composições que melhor se adequam a zona ótima, uma vez que, caso as curvas granulométricas do agregado miúdo natural e agregado miúdo reciclado estejam muito próximas, é possível concluir previamente e rapidamente que as novas composições não terão variação significativa. Este fato pode ser notado nos materiais em questão, ou seja, com a proximidade das curvas granulométricas de material natural e reciclado a variação da curva granulométrica para todos os teores de substituição não é significativa. Para a peneira 1,18 mm, por exemplo, tanto para o agregado natural quanto reciclado, a porcentagem retida acumulada de material é maior que o limite superior da zona ótima e, por consequência, para todos os teores de substituição, este valor continua superior ao limite da zona ótima, não havendo adequação satisfatória para nenhum teor de substituição. De forma geral, pode-se fazer uma análise de todas as composições, para cada peneira, levando-se em consideração o intervalo de zona ótima e zona utilizável, como colocado na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Composições na zona ótima e utilizável – agregado miúdo reciclado.

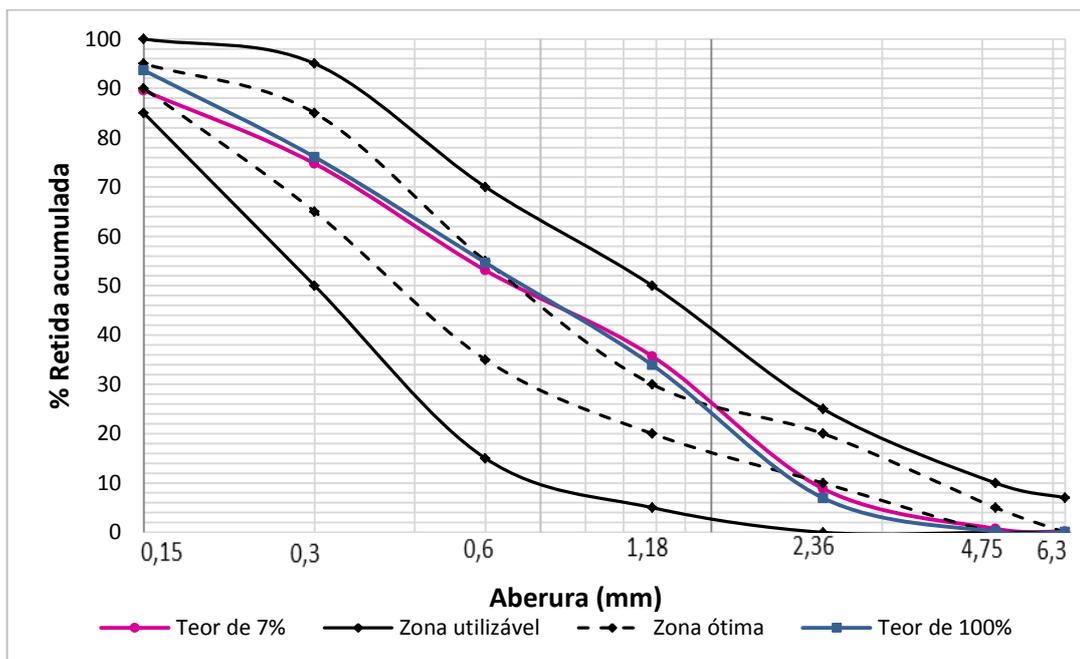
Peneira	% Zona ótima	% Zona utilizável
6,3	0% a 100%	0% a 100%
4,75	0% a 100%	0% a 100%
2,36	*	0% a 100%
1,18	*	0% a 100%
0,6	0% a 100%	0% a 100%
0,3	0% a 100%	0% a 100%
0,15	7% a 100%	0% a 100%
Melhor intervalo de substituição na zona ótima		7% a 100%
Melhor intervalo de substituição na zona utilizável		0% a 100%

* Peneiras que não apresentam composições dentro da zona em questão.

Nota-se, por meio da Tabela 4.14, que todas as composições encontram-se dentro da zona utilizável, ou seja, todas podem ser usadas para produção de concreto. Além disso, é possível observar também que, para a zona ótima, as peneiras 2,36 mm e 1,18 mm não tem nenhuma composição com curva granulométrica dentro deste intervalo. Analisando-se as outras peneiras, percebe-se que somente a peneira de 0,15 mm tem uma limitação dentro do intervalo da zona ótima, enquanto que, nas demais peneiras, todas as composições estão dentro da área em questão. De forma geral, as composições que melhor satisfazem a

adequação à zona ótima são as de teores de substituição de 7% a 100%, pois são as composições que se adequam a todas as peneiras que contem curvas granulométricas dentro da zona ótima. Levando-se isso em consideração, tem-se a curva granulométrica destes teores limites do intervalo colocados na Figura 4.11.

Figura 4.11: Curva granulométrica teor de substituição de 7% e 100% em relação a massa.



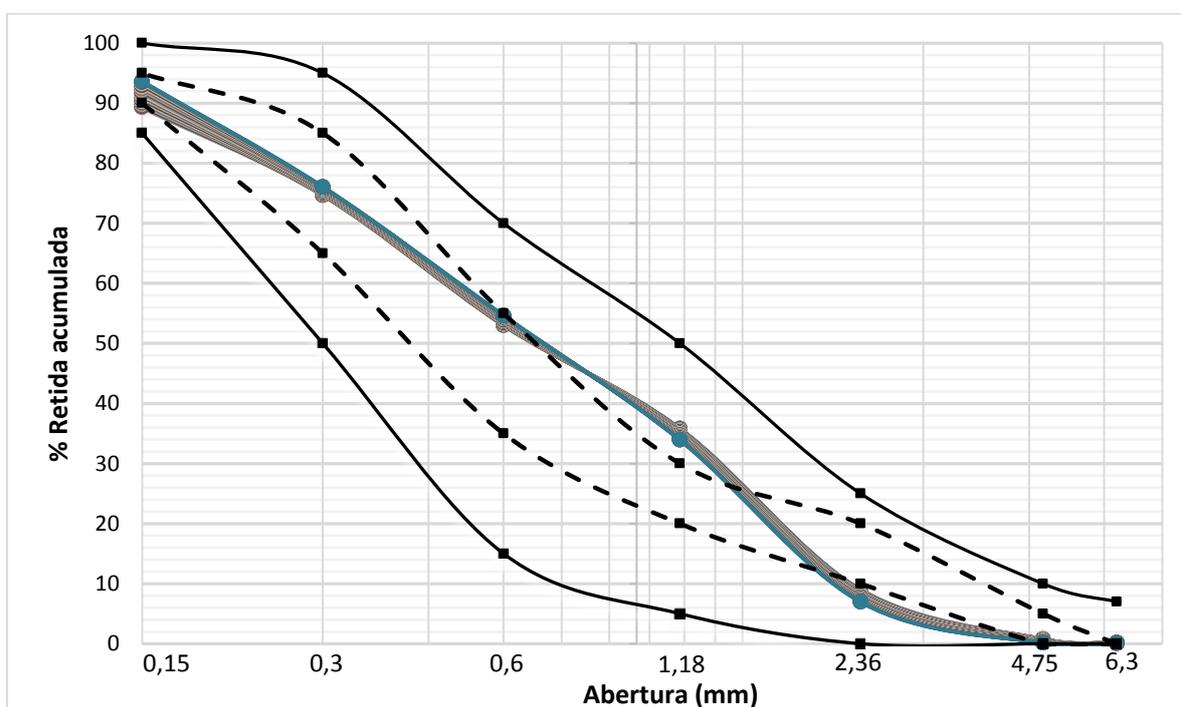
Analisando-se a Figura 4.11, nota-se a sua semelhança com o gráfico da Figura 4.10, mas com diferença em relação a peneira 0,15mm, ponto que apresentava valor fora da zona ótima e que foi melhorado com a substituição de um teor mínimo de 7% em relação a massa.

Caso as curvas granulométricas do agregado miúdo natural e agregado miúdo reciclado tenham uma diferença mais significativa, com valores intermediários contidos dentro de intervalos da zona de interesse, pode-se concluir previamente que é possível obter composições mais adequadas em relação distribuição granulométrica. Para análise desta situação, será feito o estudo de caso 2.

4.4.1.2 Caso 1 – Agregado miúdo reciclado atual - Substituição em volume

A partir dos resultados dos ensaios e, considerando-se os procedimentos descritos no item 3.2.2 da metodologia, tem-se a tabela do Anexo B com a porcentagem retida acumulada em cada peneira para todas as composições estudadas. A partir destes resultados, é possível traçar as curvas granulométricas para todas as composições, conforme Figura 4.12.

Figura 4.12 Curva granulométrica para diferentes teores de substituição em volume de agregado miúdo natural por reciclado.



Ao analisar a tabela em anexo e a Figura 4.12, percebe-se que a distribuição granulométrica das novas composições variam entre a distribuição do agregado miúdo natural (0% de substituição) e reciclado (teor de 100%). Assim, como estas curvas limites são muito próximas, não se tem uma variação significativa da distribuição granulométrica das composições intermediárias. Levando-se em consideração a zona utilizável e a zona ótima, e fazendo-se uma análise pontual em cada peneira, tem-se a Tabela 4.16 com intervalos nos quais as composições se encontram dentro da zona considerada.

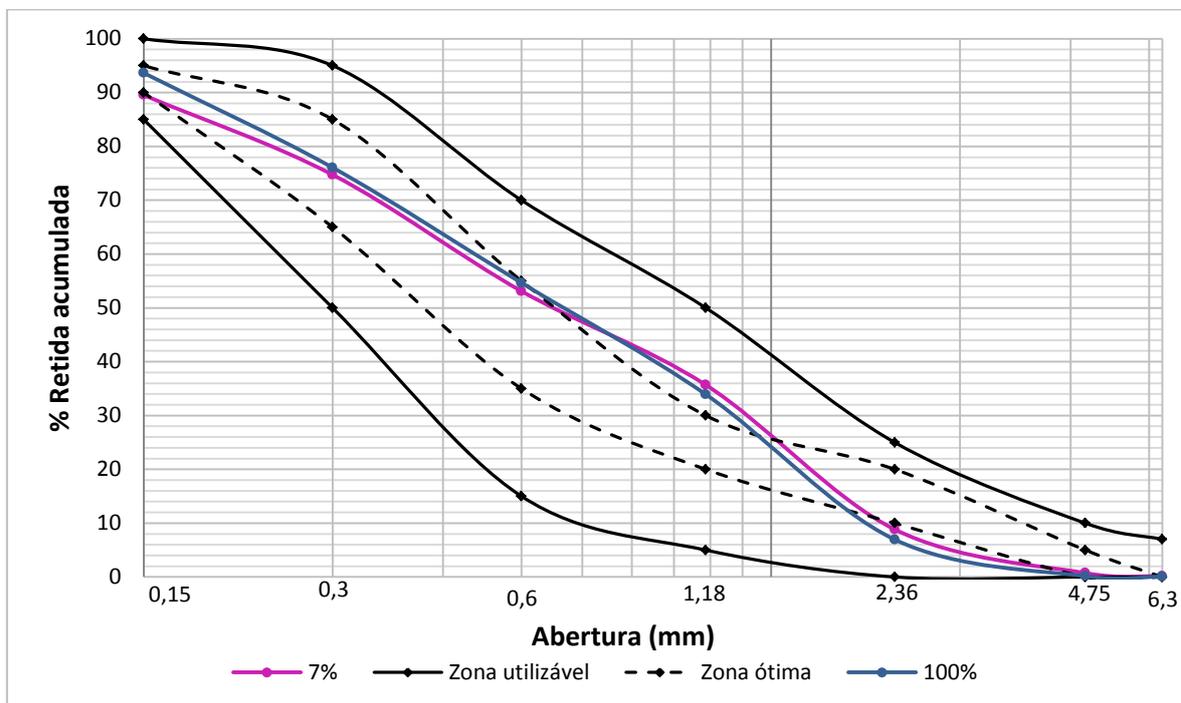
Tabela 4.14: Composições na zona ótima e utilizável – agregado miúdo reciclado.

Peneira	% Zona ótima	% Zona utilizável
6,3	0% a 100%	0% a 100%
4,75	0% a 100%	0% a 100%
2,36	*	0% a 100%
1,18	*	0% a 100%
0,6	0% a 100%	0% a 100%
0,3	0% a 100%	0% a 100%
0,15	7% a 100%	0% a 100%
Melhor intervalo de substituição na zona ótima		7% a 100%
Melhor intervalo de substituição na zona utilizável		0% a 100%

* Peneiras que não apresentam composições dentro da zona em questão.

Por meio da Tabela 4.14, nota-se que todas as composições encontram-se dentro da zona utilizável, ou seja, independente do teor de substituição, todas as composições podem ser usadas para produção de concreto. Com relação a zona ótima, duas peneiras não se adequam ao intervalo para nenhum teor de substituição (2,36 mm e 1,18 mm), enquanto as demais encontram-se dentro da zona ótima com teor de substituição limitado apenas para a peneira 0,15 mm. Sendo assim, para adequação à zona ótima, o teor de substituição para todas as peneiras é de 7% a 100%. A Figura 4.13 apresenta as curvas granulométricas destes teores limites do intervalo.

Figura 4.13: Curvas granulométricas - teor de substituição de 7% e 100% em relação ao volume.



Com a Figura 4.13, é possível notar que a adequação à zona ótima para este caso traz uma diferença muito sutil, com uma pequena variação para o ajustamento apenas na peneira 0,15 mm. Isto já era previamente esperado, pois a curva granulométrica dos agregados natural (0% de substituição) e reciclado (100% de substituição) são muito próximas, conforme verificado na Figura 4.10, resultando em pouca alteração decorrente da substituição.

4.4.1.3 Caso 1 – Agregado miúdo reciclado atual - Comparação entre os métodos

O caso 1 tem como principal característica a proximidade das curvas granulométricas entre o agregado miúdo natural e o agregado miúdo reciclado. Comparando-se as Figuras 4.9 e 4.12 com as curvas granulométricas resultantes de todas as composições, percebe-se que, no geral, os gráficos são os mesmos. No entanto, o que pode ser esperado é uma diferença mais pontual com relação aos valores percentuais e suas respectivas distribuições granulométricas. Sendo assim, será comparado os percentuais obtidos dentro da zona ótima e utilizável, em cada peneira, para cada método, como apresentado na Tabela 4.17.

Tabela 4.15 Comparação entre as composições na zona ótima e utilizável para substituição em relação a massa e ao volume.

	Peneira	6,3	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15
% Zona ótima	massa	0% a 100%	0% a 100%	*	*	0% a 100%	0% a 100%	7% a 100%
	volume	0% a 100%	0% a 100%	*	*	0% a 100%	0% a 100%	7% a 100%
% Zona utilizável	massa	0% a 100%	0% a 100%	0% a 100%	0% a 100%	0% a 100%	0% a 100%	0% a 100%
	volume	0% a 100%	0% a 100%	0% a 100%	0% a 100%	0% a 100%	0% a 100%	0% a 100%

* Peneiras que não apresentam composições dentro da zona em questão.

Ao analisar a Tabela 4.17, nota-se que, para as duas zonas e em todas as peneiras, os teores de substituição encontrados para cada método são os mesmos. Isto pode ser explicado pela grande proximidade das curvas, que resulta em pouca variação da distribuição granulométrica das novas composições e, por consequência, irrelevante diferença com relação ao método de substituição adotado.

No entanto, esta diferença pode ser melhor notada quando se analisa a razão que deu origem aos métodos estudados: massa e volume. Assim, a partir da caracterização dos materiais, é possível concluir que, devido à diferença de massa específica, 1000 g de agregado miúdo natural ocupam o mesmo volume que 1019,4 g de agregado miúdo reciclado. Com esta mesma análise para a massa unitária, é verificado que uma massa de 1000 g de agregado miúdo natural ocupam o mesmo volume que 921,1 g de agregado miúdo reciclado, ou seja, uma variação mais significativa devido a maior diferença de valores.

Com isso, é possível perceber a influência da massa específica nos métodos analisados: quanto maior for a diferença desta propriedade entre os materiais usados para obtenção de novas composições, maior será a diferença de massa total (ou volume total) quando se compara os dois métodos. Sendo assim, é importante destacar que esta propriedade nada influencia na forma geral da curva granulométrica das novas composições, mas pode alterar o valor do teor de substituição para uma dada distribuição granulométrica.

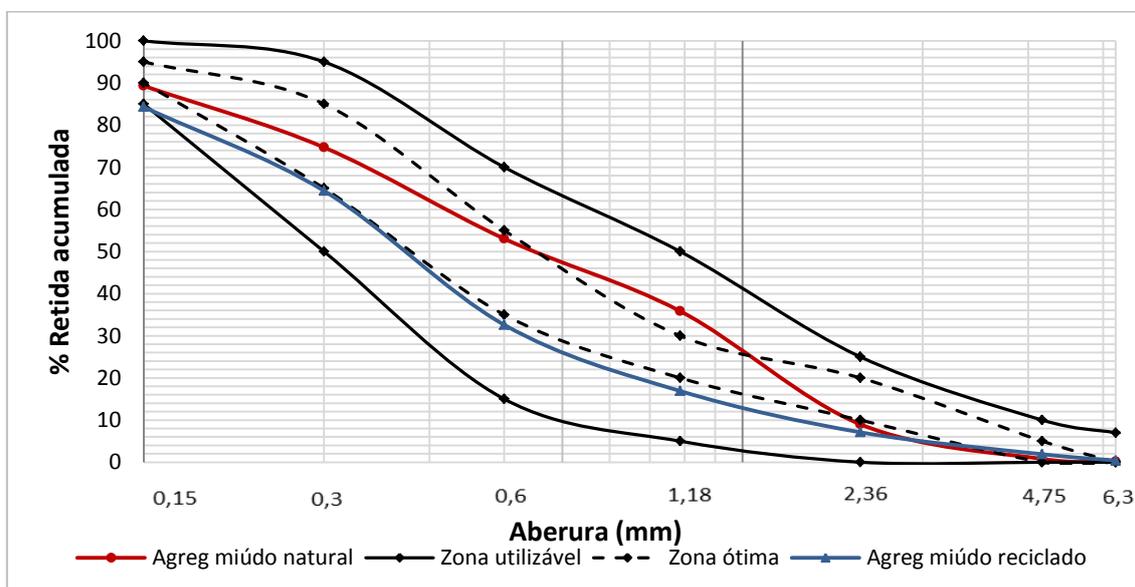
Levando-se isso em consideração, pode-se analisar, por exemplo, o teor limite de 7% para adequação à zona ótima na peneira 0,15mm. Este teor de substituição corresponde, para o método relação a massa, a uma composição de 70 g de agregado miúdo reciclado e 930 g de agregado miúdo natural. Já para o método de substituição em relação ao volume, tem-se uma composição de 71,36 g de agregado miúdo reciclado e 930 g de agregado miúdo natural.

Sendo assim, tendo em vista a proximidade da distribuição granulométrica dos materiais usados para obtenção de novas composições, os resultados apresentaram indiferença com relação ao método de substituição escolhido, se em massa ou volume.

4.4.1.4 Caso 2 – Agregado miúdo reciclado de Sousa e Soares (2013) - Substituição em massa

O caso 2 consiste na análise de composições granulométricas com agregado miúdo natural e agregado miúdo reciclado de Sousa e Soares (2013). A fim de se analisar as novas composições utilizando-se o agregado miúdo reciclado de Sousa e Soares (2013) com substituição em relação à massa, é importante observar, inicialmente, a curva granulométrica deste agregado reciclado juntamente com o agregado miúdo natural utilizado na composição. Sendo assim, estas curvas estão colocadas na Figura 4.14.

Figura 4.14: Curva granulométrica agregado miúdo natural (0% de substituição) e reciclado (teor de 100%) – estudo de Sousa e Soares (2013).



A partir da Figura 4.14, observa-se que há uma variação maior entre as curvas do material natural e reciclado, se comparado ao caso 1. No entanto, é importante destacar também que a curva do agregado miúdo reciclado está dentro da zona utilizável, o que garante que este agregado pode ser utilizado para produção de concreto, segundo critérios de granulometria. Já em relação à zona ótima, nota-se que somente as peneiras 6,3mm, 4,75 mm e 0,3 mm encontram-se nesta zona.

A partir desses materiais, fazendo-se o mesmo estudo de composição com a substituição de agregado natural por reciclado em relação a massa, conforme descrito no item 3.2.1, tem-se o gráfico das curvas granulométricas da Figura 4.15 e a tabela de composição granulométrica no Anexo A. Assim, repetindo-se o procedimento para análise das composições em cada peneira em função da zona ótima e da zona utilizável, tem-se a tabela do Anexo C.

Figura 4.15: Curva granulométrica para diferentes teores de substituição em massa de agregado miúdo natural por reciclado de Sousa e Soares (2013).

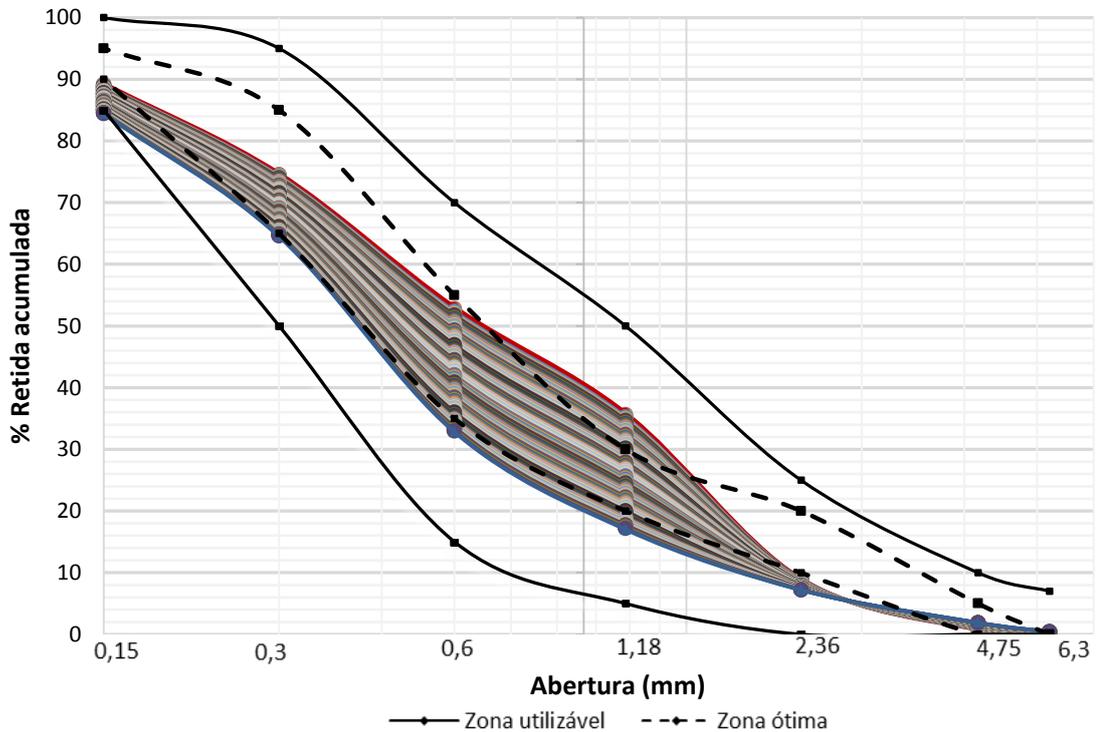


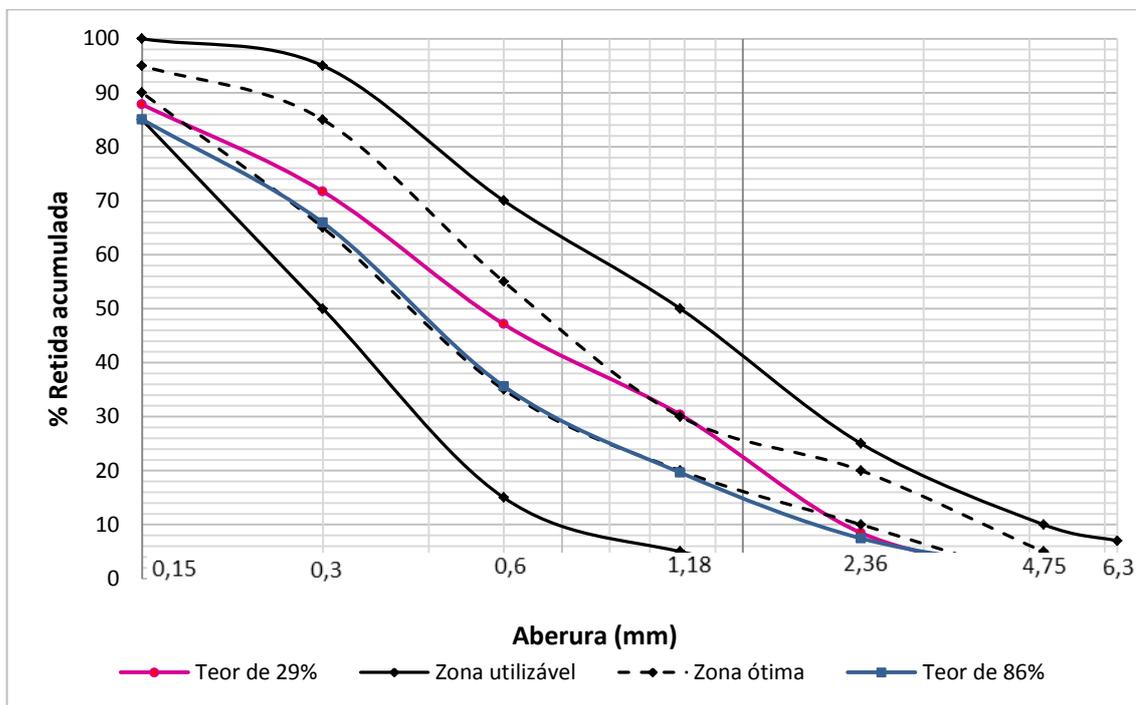
Tabela 4.16 Composições na zona ótima e utilizável com agregado reciclado de Sousa e Soares (2013).

Peneira	% Zona ótima	% Zona utilizável
6,3	0% a 100%	0% a 100%
4,75	0% a 100%	0% a 100%
2,36	*	0% a 100%
1,18	29% a 86%	0% a 100%
0,6	0% a 91%	0% a 100%
0,3	0% a 100%	0% a 100%
0,15	*	0% a 100%
Melhor intervalo de substituição na zona ótima		29% a 86%
Melhor intervalo de substituição na zona utilizável		0% a 100%

* Peneiras que não apresentam composições dentro da zona em questão.

A partir da Figura 4.15 e da Tabela 4.16 é possível notar que, de fato, todas as composições encontram-se dentro da zona utilizável e podem, portanto, ser usadas na fabricação de concreto. Com relação a zona ótima, nota-se que para as peneiras 2,36 mm e 0,15 mm nenhuma composição atende a este intervalo, o que era previamente esperado, já que a distribuição granulométrica tanto do agregado miúdo natural quanto reciclado são menores que o limite inferior da zona ótima. Para as peneiras 6,3 mm, 4,75 mm e 0,3 mm todas as composições encontram-se dentro da zona ótima. Por outro lado, para as peneiras 1,18 mm e 0,6 mm, este intervalo de composições dentro da zona ótima é mais limitado. De forma que, as composições que melhor se adequam a curva ótima, levando em conta todas as peneiras, são aquelas com teor de 29% a 86% de substituição. Assim, a Figura 4.16 apresenta as curvas limites das composições mais adequadas para visualização do melhor enquadramento na zona ótima.

Figura 4.16: Curva granulométrica teor de substituição de 29% e 86% - agregado reciclado de Sousa e Soares (2013).



Com a Figura 4.16, tem-se os teores de substituição limites para obtenção, na medida do possível, de composições dentro da zona desejável, ou seja, zona ótima. Apesar do ajuste, para algumas peneiras não foi possível a adequação, já que tanto a curva granulométrica do agregado natural quanto reciclado estavam fora da zona ótima e sem uma área comum entre as curvas dentro desta zona (no caso, para as peneiras 0,15 mm e 2,36 mm, ambas abaixo do limite inferior da zona). Por outro lado, para as peneiras em que foi possível fazer este ajuste com a substituição, fica claro na Figura 4.16 que as curvas com teor de 29% e 86% encontram-se no limite da zona desejada e, conseqüentemente, as composições com teor de substituição intermediário estarão dentro da zona de interesse.

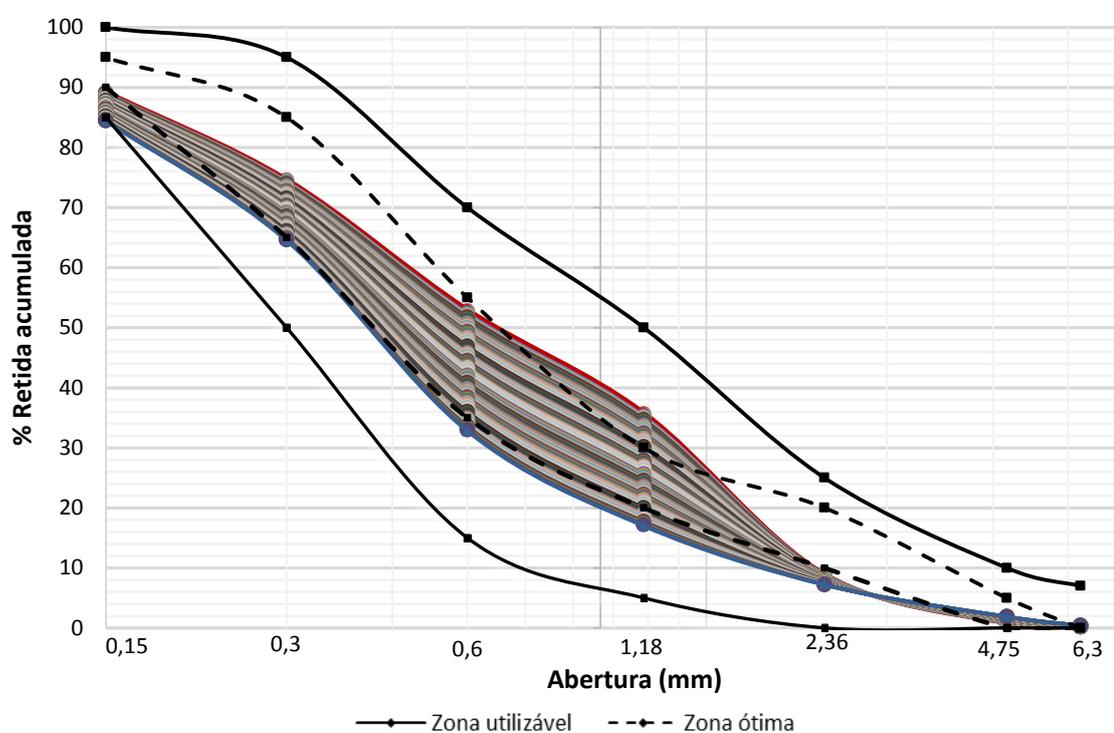
4.4.1.5 Caso 2– Agregado miúdo reciclado de Sousa e Soares (2013) - Substituição em volume

A análise das novas composições formadas a partir da substituição em relação ao volume de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado estudado por Sousa e Soares (2013),

sendo ambos materiais caracterizado neste trabalho, será desenvolvida de acordo com item 3.2.2 deste trabalho.

Dessa forma, inicialmente, determina-se a distribuição granulométrica para todas as composições estudadas, obtendo-se a tabela do Anexo D. Então, com estes resultados, é possível traçar as curvas granulométricas de todas as composições, como mostrado na Figura 4.17.

Figura 4.17: Curva granulométrica para diferentes teores de substituição, em volume, de agregado miúdo natural por reciclado – caso 2.



Ao analisar a Figura 4.17 e compará-la com a Figura 4.14, percebe-se que a curva granulométrica das novas composições variam entre as curvas do agregado miúdo natural (0% de substituição) e agregado miúdo reciclado (teor de 100%). Além disso, por meio da distribuição granulométrica das composições no Anexo B, pode-se verificar o enquadramento das composições dentro da zona ótima e zona utilizável para cada peneira, conforme Tabela 4.19.

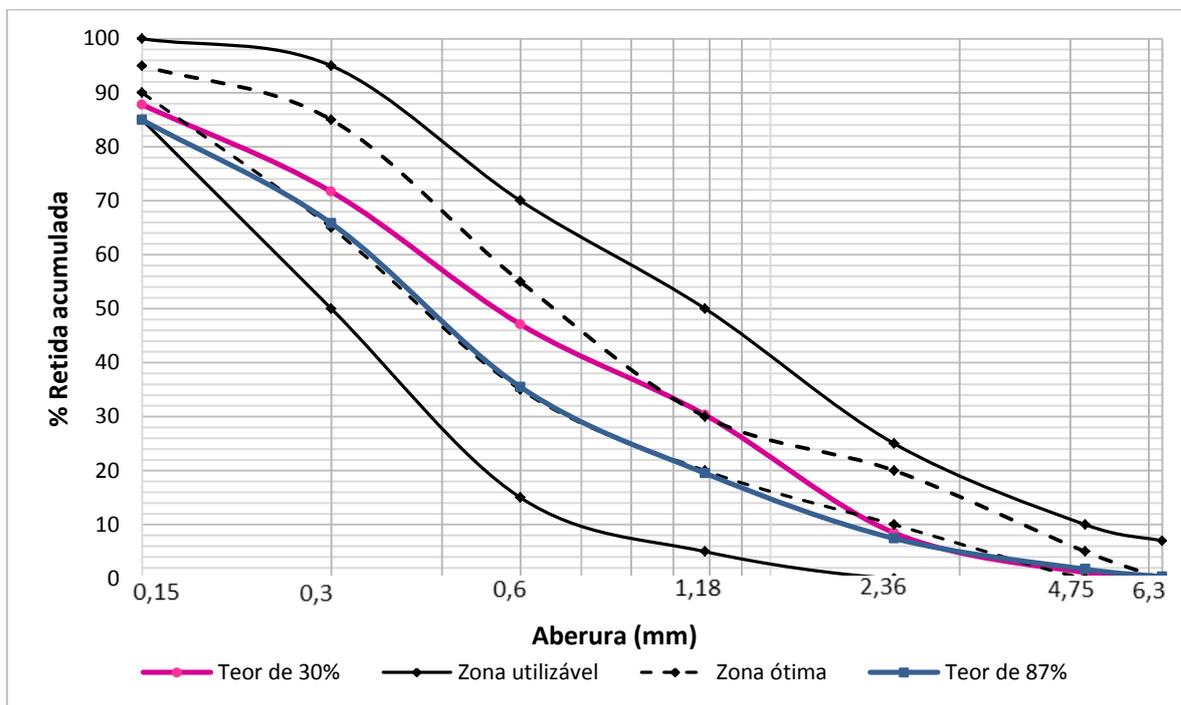
Tabela 4.17: Composições na zona ótima e utilizável – agregado miúdo reciclado (caso 2).

Peneira	% Zona ótima	% Zona utilizável
6,3	0% a 100%	0% a 100%
4,75	0% a 100%	0% a 100%
2,36	*	0% a 100%
1,18	30% a 87%	0% a 100%
0,6	0% a 91%	0% a 100%
0,3	0% a 99%	0% a 100%
0,15	*	0% a 100%
Melhor intervalo de substituição na zona ótima		30% a 87%
Melhor intervalo de substituição na zona utilizável		0% a 100%

* Peneiras que não apresentam composições dentro da zona em questão.

Verifica-se, a partir da Tabela 4.17, que, de forma geral, todas as composições estão dentro da zona utilizável, ou seja, todas podem ser usadas para produção de concreto. Quanto à zona ótima, nota-se que as peneiras 2,36 mm e 0,15 mm não apresentam nenhuma composição. Já as outras peneiras, apresentam intervalos de composições dentro dessa zona, sendo que a peneira 1,18 mm apresenta o resultado mais limitado: apenas as composições de 30% a 87% estão dentro da zona ótima. Com isso, satisfazendo-se todas as peneiras com composição dentro da zona ótima, o melhor intervalo de substituição em relação ao volume é de 30% a 87%. As curvas granulométricas dos limites deste intervalo de melhor adequação à zona ótima estão colocados na Figura 4.18.

Figura 4.18: Curvas granulométricas - teor de substituição de 7% e 100% em relação ao volume (caso 2).



Analisando-se a Figura 4.18, nota-se o ajuste das curvas limites com relação a zona ótima, ficando notável o enquadramento das curvas nas peneiras 0,3 mm, 0,6 mm e 1,18 mm, quando comparado a todas as possíveis composições estudadas (Figura 4.17) e às composições iniciais (Figura 4.14) com 0% de substituição (agregado miúdo natural) e 100% de substituição (agregado miúdo reciclado).

4.4.1.6 Caso 2 – Agregado miúdo reciclado de Sousa e Soares (2013) - Comparação entre os métodos

No caso 2, a distribuição granulométrica do agregado miúdo reciclado tem uma variação maior com relação ao agregado miúdo natural, comparando-se com o caso 1. No entanto, de forma análoga a este caso, as curvas granulométricas para todas as novas composições são, em geral, as mesmas quando comparados o método de substituição em relação à massa e o método de substituição em relação ao volume, conforme verifica-se na Figura 4.15 e 4.17.

Aprofundando-se esta análise para as composições que se encontram dentro da zona ótima e da zona utilizável, em cada peneira, tem-se a Tabela 4.20 que apresenta um comparativo entre os métodos em questão.

Tabela 4.18 Comparação entre as composições na zona ótima e utilizável para substituição em relação a massa e ao volume – agregado reciclado do caso 2.

	Peneira	6,3	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15
% Zona ótima	massa	0% a 100%	0% a 100%	*	29% a 86%	0% a 91%	0% a 100%	*
	volume	0% a 100%	0% a 100%	*	30% a 87%	0% a 91%	0% a 99%	*
% Zona utilizável	massa	0% a 100%						
	volume	0% a 100%						

* Peneiras que não apresentam composições dentro da zona em questão.

A partir da Tabela 4.20, é possível perceber que, no geral, os resultados são muito semelhantes, tendo-se apenas uma pequena diferença nos métodos para as peneiras 1,18 mm e 0,3 mm na zona ótima. Trata-se de uma diferença percentual de 1%, que significa dizer que uma composição com teor de 29% de substituição em relação à massa é a mesma que uma outra composição com teor de 30% em relação ao volume. Isto pode ser comprovado verificando-se as tabelas de composição granulométrica no Anexo A. Esta pequena alteração do teor de substituição para os dois métodos é justificada pela diferença de massa específica combinada com uma diferença mais significativa com relação as distribuições granulométricas dos materiais.

Com relação a diferença de massa específica, cabe a comparação: 1000 g do agregado miúdo natural tem o mesmo volume que 960,04 g do agregado miúdo reciclado. Com base nisso, uma composição com teor de substituição de 29% em massa tem 290g de agregado miúdo reciclado e 710 g de agregado miúdo natural, enquanto que uma composição com o mesmo teor de substituição de 29% em volume tem 278,42g de agregado miúdo reciclado e 710 g de agregado miúdo natural. Já para um teor de substituição de 30% em volume, tem-se 288,02 g de agregado miúdo reciclado e 700 g de agregado miúdo natural.

Ainda, fazendo-se uma breve comparação com a massa unitária, percebe-se que 1000 g de agregado miúdo reciclado ocupam o mesmo volume que 914,5 g de agregado miúdo reciclado – uma diferença mais significativa, comparando-se com a massa específica.

Sendo assim, levando-se em consideração a análise comparativa entre os métodos estudados para o caso 2, conclui-se que as curvas granulométricas são, de forma geral, dependentes das curvas granulométricas iniciais (teor de 0% e 100%), tendo-se ainda influencia da diferença de massa específica nos valores numéricos para os teores de substituição.

4.4.2 Agregado graúdo

O mesmo estudo de novas composições com substituição de uma material por outro, em relação a massa e volume, pode ser desenvolvido com agregado graúdo reciclado e natural. Levando-se isto em consideração, será analisado, neste trabalho, 2 diferentes casos, segundo a metodologia descrita no item 3.2. Sendo que, para todas as situações, serão examinados e comparados os métodos de substituição em relação à massa e ao volume para granulometria das novas composições.

No primeiro caso, serão estudadas as novas composições resultantes da substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado - “brita b”. Já no segundo caso, serão avaliadas as composições resultantes da substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado - “brita a”.

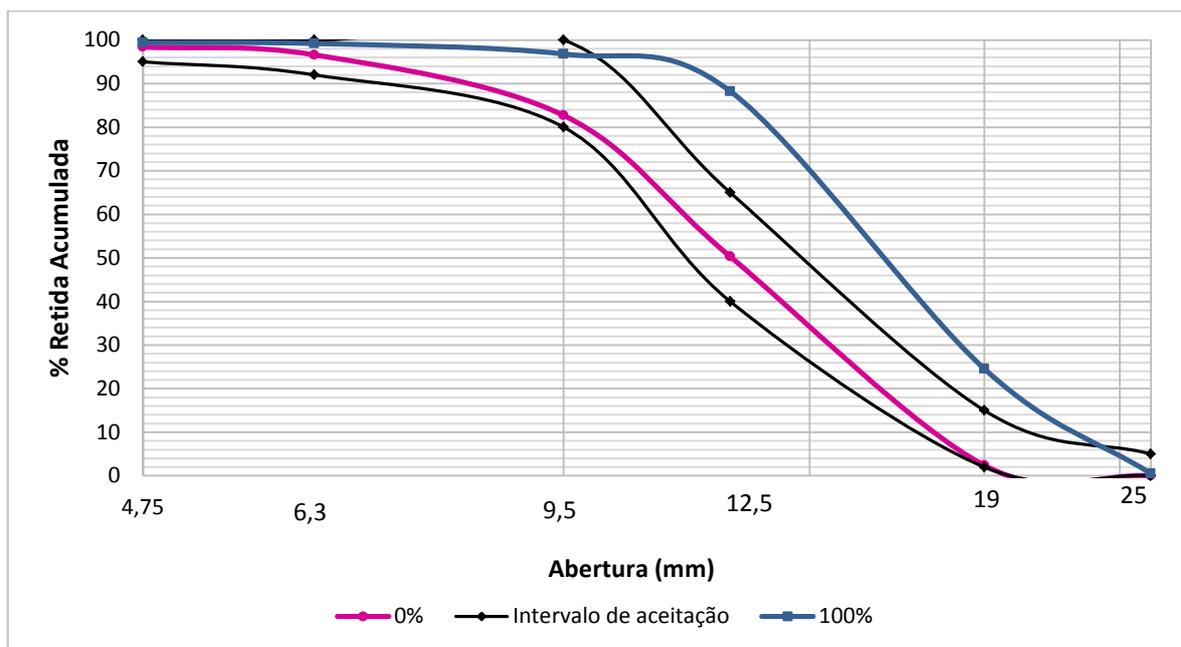
Neste contexto, cabe destacar um intervalo de grande importância para análise da distribuição granulométrica das novas composições: o intervalo de aceitação. Trata-se de limites de composição granulométrica, definidos pela norma brasileira, de acordo com a maior e a menor dimensão dos grãos, que o agregado graúdo deve atender para uso na produção de concreto.

4.4.3.1 Caso 3 – Agregado graúdo reciclado “brita b” - Substituição em massa

Este caso consiste na análise das composições formadas a partir de brita natural e “brita b” reciclada com substituição em massa. Inicialmente, é importante observar as curvas

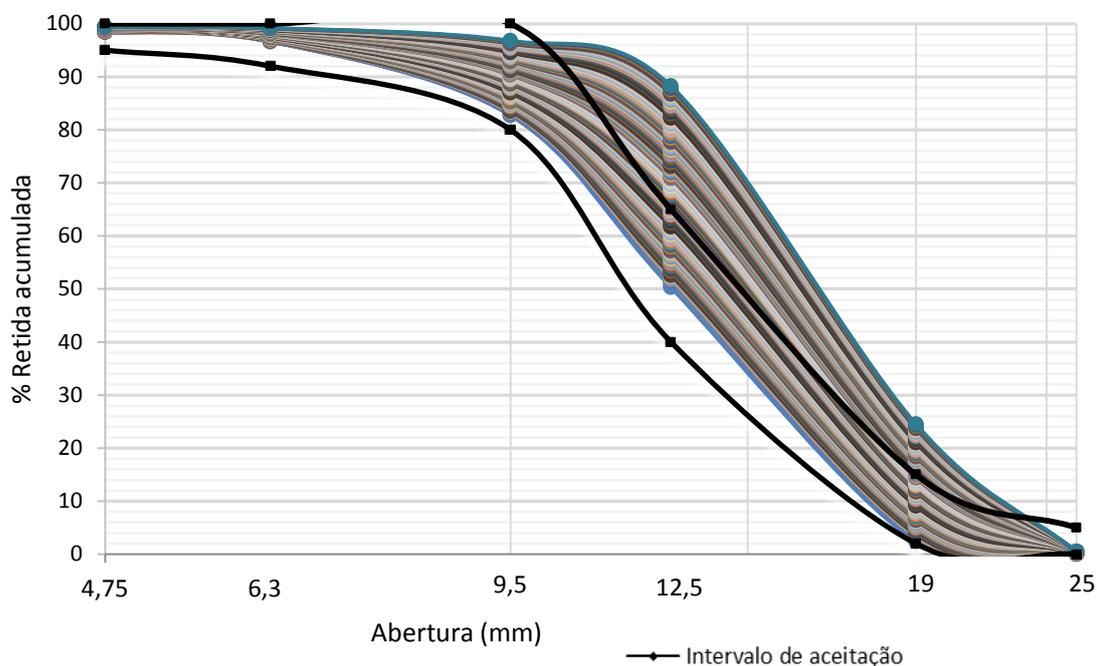
granulométricas dos agregados usados, uma vez que elas caracterizam os materiais que darão origem às novas composições. Desse modo, tem-se as curvas do agregado graúdo natural e agregado graúdo reciclado apresentados na Figura 4.19.

Figura 4.19: Curva granulométrica agregado graúdo natural (0% de substituição) e agregado graúdo reciclado (teor de 100%) “brita b”.



A partir da Figura 4.19, é possível notar que o agregado graúdo natural (0% de substituição) encontra-se completamente dentro da zona de aceitação, enquanto que o agregado graúdo reciclado (teor de 100%) está parcialmente dentro desta zona, com distribuição granulométrica para as peneiras 12,5 mm e 19 mm maiores que o limite superior. Com relação às novas composições decorrentes da substituição do agregado natural por reciclado, tem-se a tabela do Anexo E com a distribuição granulométrica para cada teor. A partir desta tabela com as distribuições granulométricas, pode-se traçar o gráfico das curvas granulométricas, para cada teor de substituição, conforme apresentado na Figura 4.20.

Figura 4.20: Curva granulométrica para diferentes teores de substituição em massa de agregado graúdo natural por reciclado – caso 3.



Analisando-se os resultados obtidos, nota-se que as novas composições tem distribuição granulométrica variando entre distribuição granulométrica do agregado graúdo natural (0% de substituição) e do reciclado (100% de substituição). Além disso, visando-se a aplicação das novas composições para produção de concreto, pode-se determinar quais teores de substituição estão dentro do intervalo de aceitação, conforme colocado na Tabela 4.19.

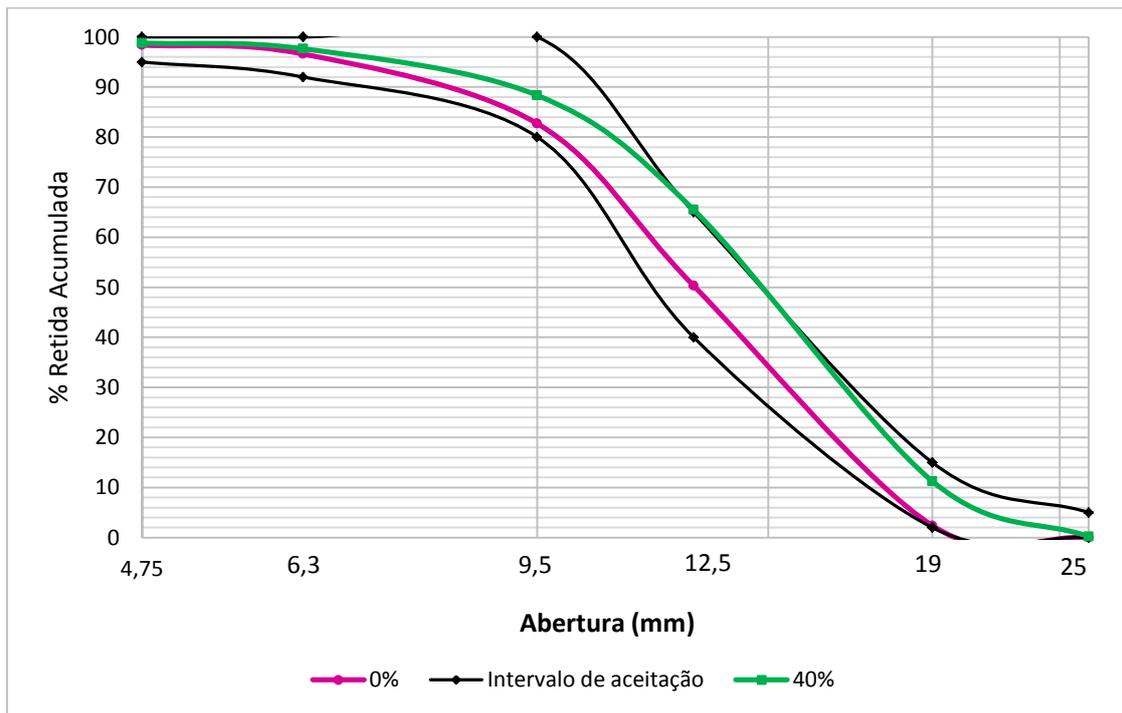
Tabela 4.19 Composições no intervalo de aceitação – agregado graúdo reciclado (caso 3).

Peneira	Intervalo de aceitação
25	0% a 100%
19	0% a 59%
12,5	0% a 40%
9,5	0% a 100%
6,3	0% a 100%
4,75	0% a 100%
Teor de substituição para aceitação	0% a 40%

Nota-se que a Tabela 4.19 faz uma verificação, para cada peneira, dos teores de substituição que atendem ao intervalo de aceitação. Assim, percebe-se que as limitações estão nas peneiras de 12,5 mm e 19 mm, o que já era esperado, pois são as peneiras que o agregado graúdo

reciclado está fora da zona de aceitação. Com isso, para que todas as peneiras estejam satisfeitas quanto ao intervalo de aceitação, os teores de substituição adequados são de 0% a 40% em relação à massa. A constatação da adequabilidade deste intervalo dentro da zona de interesse é dada por meio da Figura 4.21.

Figura 4.21: Curvas granulométricas - teor de substituição de 0% e 40% em relação à massa (caso 3).



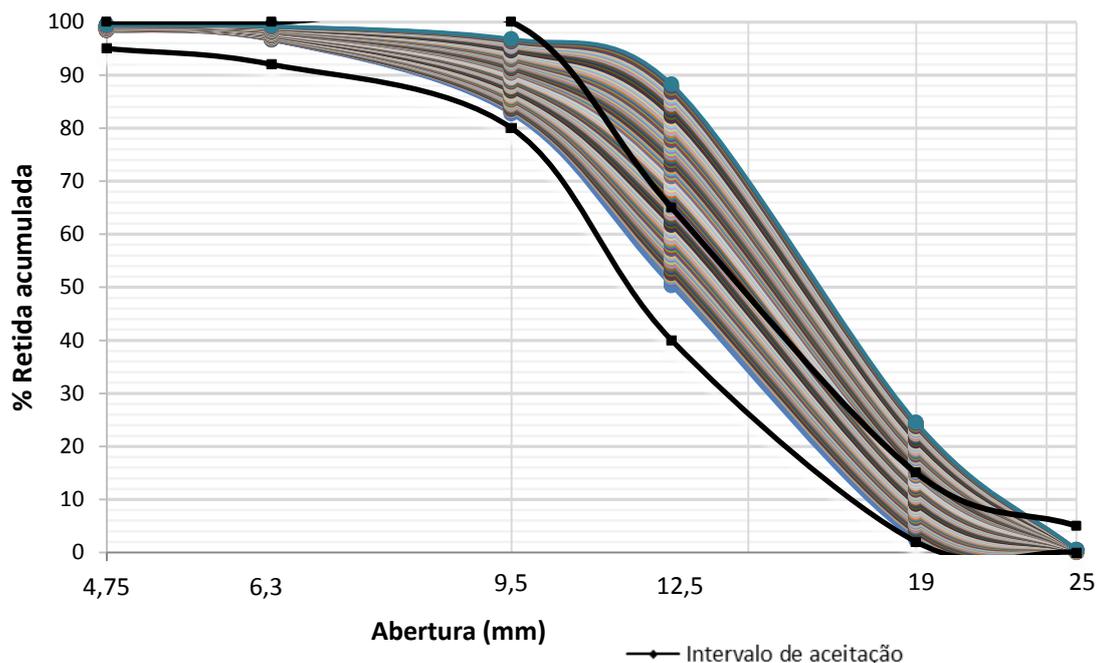
Com a Figura 4.21, é possível observar que as curvas granulométricas apresentadas e, conseqüentemente, todas as curvas entre elas, estarão dentro do intervalo de aceitação, garantindo-se que todas as composições em questão possam ser usadas para fabricação de concreto, no quesito granulometria.

4.4.2.2 Caso 3 – Agregado graúdo reciclado “brita b” – Substituição em volume

De forma geral, a curva granulométrica das composições usadas como base neste caso (agregado graúdo natural e agregado graúdo reciclado “brita b”) estão apresentadas na Figura 4.19. Com isso, conforme descrito no item 3.2.2 deste trabalho, é possível determinar a distribuição granulométrica de todas as novas composições estudadas, como colocado na

tabela do Anexo F. Com os resultados desta tabela, é possível traçar a curva de distribuição granulométrica para todas as novas composições estudadas, conforme mostrado na Figura 4.22.

Figura 4.22: Curva granulométrica para diferentes teores de substituição em volume de agregado graúdo natural por reciclado – caso 3.



Por meio da tabela em anexo e da Figura 4.22, nota-se que as distribuições granulométricas das novas composições se encontram entre as distribuições dos materiais antes da substituição, ou seja, entre as curvas com teor de 0% e 100%. De forma que, as curvas de alguns teores encontram-se dentro do intervalo de aceitação e outros não. Sendo assim, uma análise mais precisa e pontual pode ser feita para cada peneira, conforme colocado na Tabela 4.24.

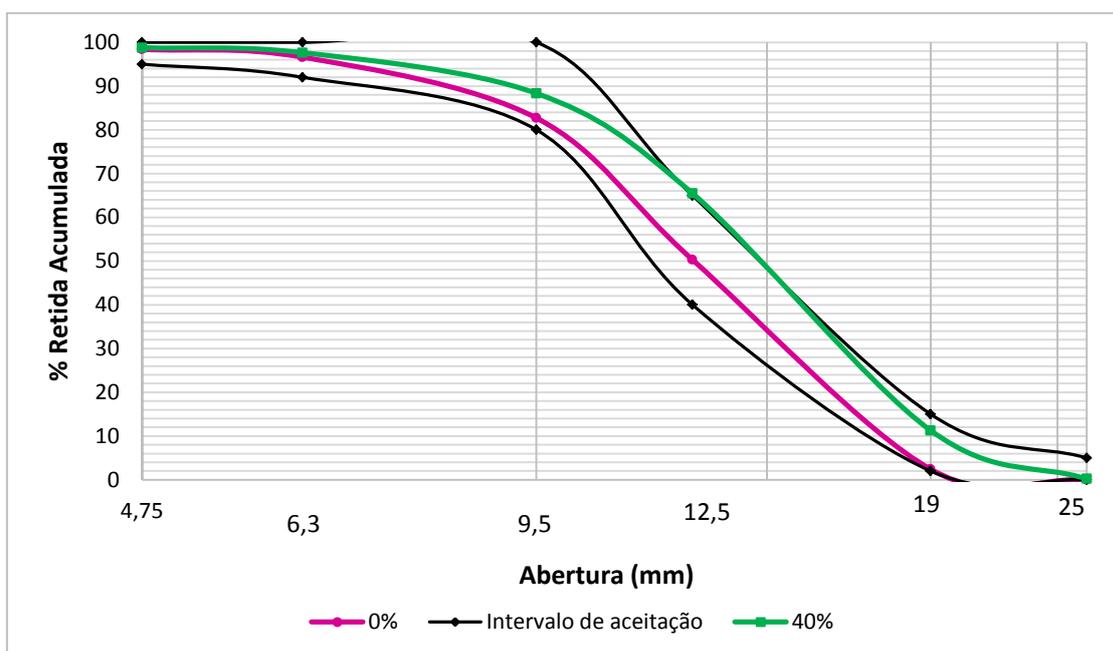
Tabela 4.20: Composições no intervalo de aceitação – substituição em volume de agregado graúdo reciclado natural por agregado graúdo reciclado “brita b”.

Peneira	Intervalo de aceitação
25	0% a 100%
19	0% a 59%
12,5	0% a 40%
9,5	0% a 100%
6,3	0% a 100%

4,75	0% a 100%
Teor de substituição para aceitação	0% a 40%

A partir da Tabela 4.20, observa-se que, para todas as peneiras, existe um intervalo de teores de substituição que satisfazem a zona de aceitação. Estes teores não variam muito: nas peneiras de 25 mm, 9,5 mm, 6,3 mm e 4,75 mm, por exemplo, todas as novas composições estudadas estão adequadas ao intervalo de aceitação. Já para as peneiras de 19 mm e 12,5 mm, isto é mais limitado, o que faz com que as novas composições aceitas para uso em concreto sejam aquelas com teor de substituição de 0% a 40%, pois encontram-se completamente dentro do intervalo de aceitação proposto pela norma. A curva destes teores estão colocados na Figura 4.23.

Figura 4.23: Curvas granulométricas - teor de substituição de 0% e 40% em relação ao volume de agregado gráudo natural por agregado gráudo reciclado “brita b”.



A partir da Figura 4.23, verifica-se a curva granulométrica de agregado gráudo natural (0% de substituição) e a curva do material composto por 40% de agregado gráudo reciclado e 60% de agregado gráudo natural, em relação ao volume. Com isso, é facilmente notado que estas curvas estão dentro da zona de interesse e que quaisquer novas composições com teores de substituição entre estes valores (e, conseqüentemente, com curvas intermediárias a estas) também estarão.

4.4.2.3 Caso 3 – Agregado graúdo reciclado “brita b” – Comparação entre os métodos

A partir do estudo da distribuição granulométrica de composições originadas da substituição parcial do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado “brita b”, é importante comparar os métodos de substituição adotados.

De forma geral, as curvas granulométricas para todas as novas composições são as mesmas quando comparado o método de substituição em relação à massa e o método de substituição em relação ao volume, conforme verifica-se nas Figuras 4.20 e 4.22. No entanto, fazendo-se uma verificação mais pontual nas Tabelas 4.21 e 4.23, percebe-se, por exemplo, que para um teor de substituição de 5%, o percentual retido acumulado na peneira de 19 mm é de 4%, quando a substituição é em relação a massa, e de 3% quando a substituição é em relação ao volume. Neste contexto, é importante notar os teores de substituição, em cada peneira, para os dois métodos de substituição, levando em conta o intervalo de aceitação, conforme apresentado na Tabela 4.25.

Tabela 4.21: Comparação entre as composições no intervalo de aceitação para substituição em relação a massa e ao volume – caso 3.

Peneira	Massa	Volume
25	0% a 100%	0% a 100%
19	0% a 59%	0% a 59%
12,5	0% a 40%	0% a 40%
9,5	0% a 100%	0% a 100%
6,3	0% a 100%	0% a 100%
4,75	0% a 100%	0% a 100%
Teor de substituição para aceitação	0% a 40%	0% a 40%

Por meio da Tabela 4.25, é possível notar que os resultados foram os mesmos para substituição em massa e em volume, ou seja, um material composto de até 40% (em relação à massa ou ao volume) do agregado graúdo reciclado (“brita b”) e o restante de agregado graúdo natural (60% em em relação à massa ou ao volume) pode ser usado para fabricação de concreto.

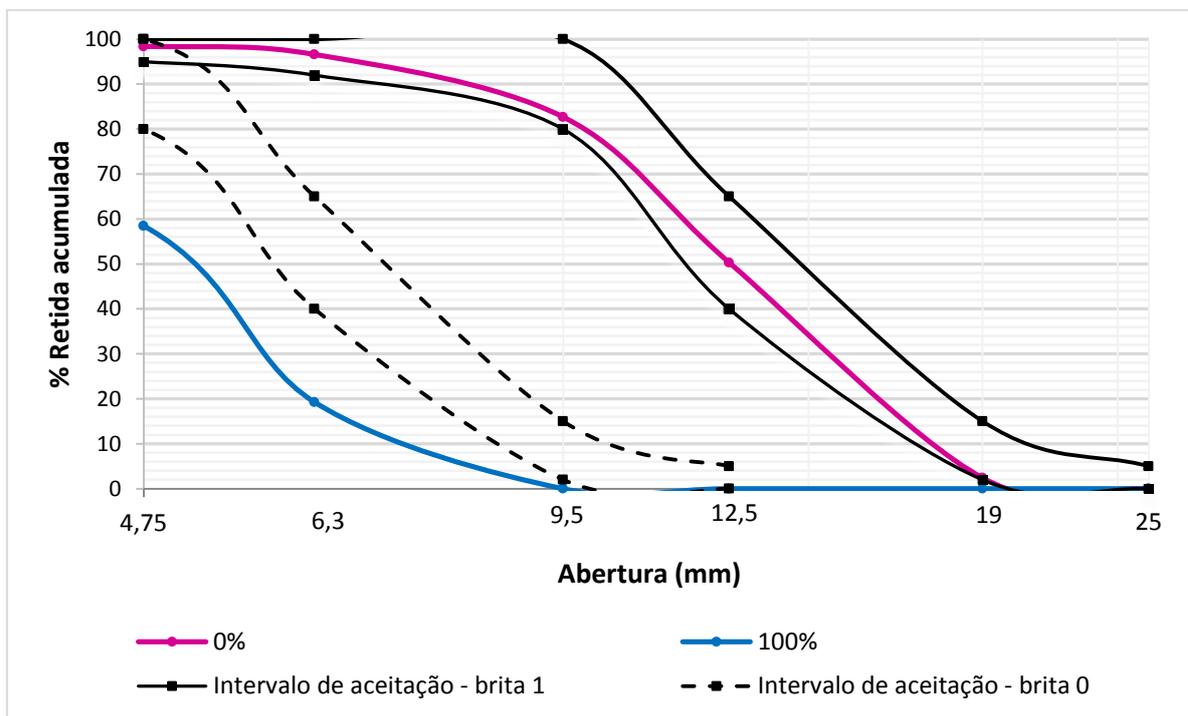
Levando-se em consideração ao exposto para este caso, percebe-se que, embora possa existir uma diferença de distribuição granulométrica quando comparado um mesmo teor para os dois

métodos, ela não foi significativa na determinação dos teores aceitáveis para uso em concreto, pois obteve-se o mesmo resultado.

4.4.2.4 Caso 4 – Agregado graúdo reciclado “brita a” – Substituição em massa

Para este caso, serão utilizados o agregado graúdo natural e agregado graúdo reciclado (“brita a”) para elaboração das novas composições, com substituição, em massa, de parte daquele material com relação a este. Cabe destacar aqui que os materiais em questão apresentam intervalos de aceitação diferentes, por conta da relação entre as dimensões maiores e menores dos grãos. Isto pode ser notado na Figura 4.24, que apresenta a curva granulométrica do agregado graúdo natural e agregado graúdo reciclado (“brita a”) juntamente com os possíveis intervalos de aceitação.

Figura 4.24: Curva granulométrica agregado graúdo natural (0% de substituição) e agregado graúdo reciclado “brita a” (teor de 100%) – caso 4.

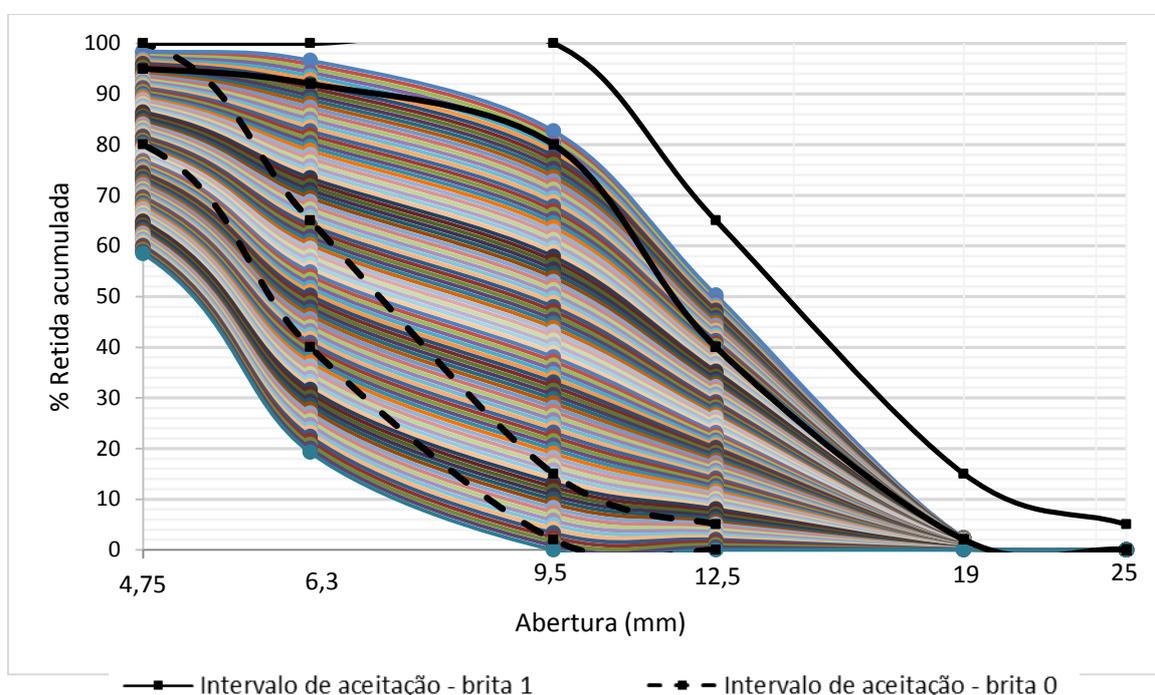


Por meio da Figura 4.24, nota-se os dois intervalos de aceitação possíveis para os agregados graúdos estudados. De modo que, o agregado graúdo natural (0% de substituição) encontra-se totalmente dentro deste intervalo, enquanto que o agregado graúdo reciclado (teor de 100%), “brita a”, está totalmente fora do intervalo de aceitação, com curva de distribuição

granulométrica menor que o limite inferior do respectivo intervalo. Assim, de acordo com esta caracterização e segundo procedimento descrito no item 3.2.1, tem-se a distribuição granulométrica das novas composições colocadas na tabela do Anexo G.

A partir da distribuição granulométrica colocada na tabela em anexo, pode-se determinar as curvas granulométricas de todas as composições, comparando-se com possíveis intervalos de aceitação, conforme mostrado na Figura 4.25.

Figura 4.25: Curva granulométrica para diferentes teores de substituição em massa de agregado graúdo natural por reciclado “brita a” – caso 4.



Analisando-se os resultados obtidos, nota-se a grande variação das curvas granulométricas das novas composições, que se encontram entre os teores de 0% de substituição (agregado graúdo natural) e 100% de substituição (agregado graúdo reciclado), ou seja, entre as curvas dos materiais que deram origem às novas composições. Tendo em vista a grande variabilidade dos resultados e levando em consideração o uso das novas composições para produção de concreto, cabe verificar quais composições se enquadram dentro do intervalo de aceitação proposto pela Norma. Isto está colocado na Tabela 4.27, com dois intervalos possíveis, já que as distribuições granulométricas iniciais foram analisadas para dois intervalos de aceitação diferentes (por conta da relação entre a menor e a maior dimensão dos grãos).

Tabela 4.22: Intervalo de aceitação como brita 1 e brita 0 – composições com relação à massa – caso 4.

Peneira	Intervalo de aceitação	
	Brita 1	Brita 0
25	0% a 100%	*
19	0% a 37%	*
12,5	0% a 21%	90% a 100%
9,5	0% a 3%	82% a 98%
6,3	0% a 6%	41% a 73%
4,75	0% a 9%	0% a 47%
2,4	*	0% a 58%
Teor de substituição para aceitação	0% a 3%	Não se aplica

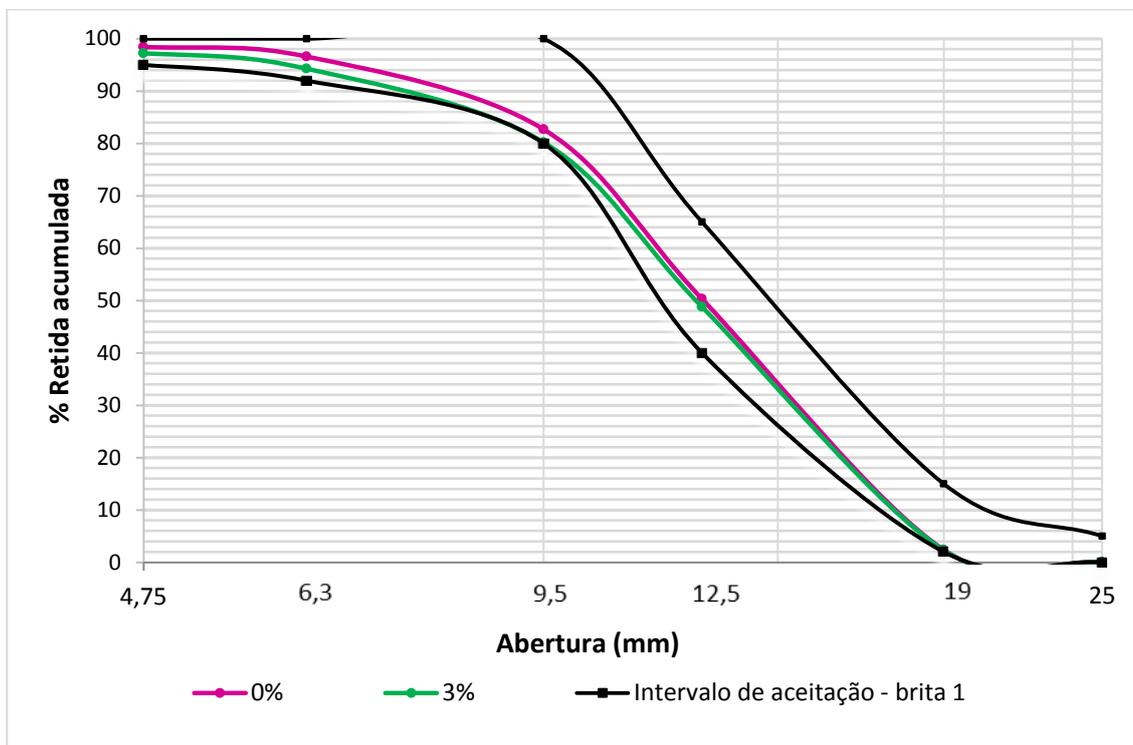
* Peneiras com abertura que não se encontra nos limites em questão.

Cabe destacar aqui que a ABNT NBR 7211:2005 não utiliza como denominação dos intervalos os termos “brita 0” e “brita 1” trata-se de termos comerciais usuais. A Norma utiliza uma razão entre a menor e a maior dimensão dos grãos, de forma que a brita 0 corresponde a zona granulométrica de 4,75/12,5 e a brita 1 de 9,5/25.

A partir da Tabela 4.22, analisando-se o intervalo de aceitação para brita 1 (dimensão dos grãos variando da peneira de 4,75mm a 25 mm), percebe-se uma grande variação dos teores de substituição quando comparado o enquadramento em cada peneira. Sendo assim, os teores que satisfazem a todas as peneiras são os de 0% a 3% de substituição em massa, ou seja, para uso em concreto, somente estes teores de substituição estão de acordo com a norma, em relação a granulometria. Estes teores limites estão colocado na Figura 4.26.

Por outro lado, considerando as composições que poderiam se enquadrar no intervalo de aceitação como brita 0 (dimensão dos grãos variando da peneira de 12,5mm a 2,4 mm), observa-se que não é possível obter nenhuma composição que se ajuste completamente. Com isso, o uso das novas composições como brita 0 neste contexto não está de acordo com a Norma, uma vez que nem o próprio material nem composições feitas com o agregado natural se encontram dentro da zona de aceitação.

Figura 4.26: Curvas granulométricas - teor de substituição de 0% e 3%, em relação à massa – caso 4.



A partir da Figura 4.26, é possível notar as curvas granulométricas dos teores limites de substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado (“brita a”), em relação à massa, para obtenção de curvas granulométricas dentro da zona aceitável. Além disso, percebe-se ainda a proximidade da distribuição granulométrica para os teores analisados.

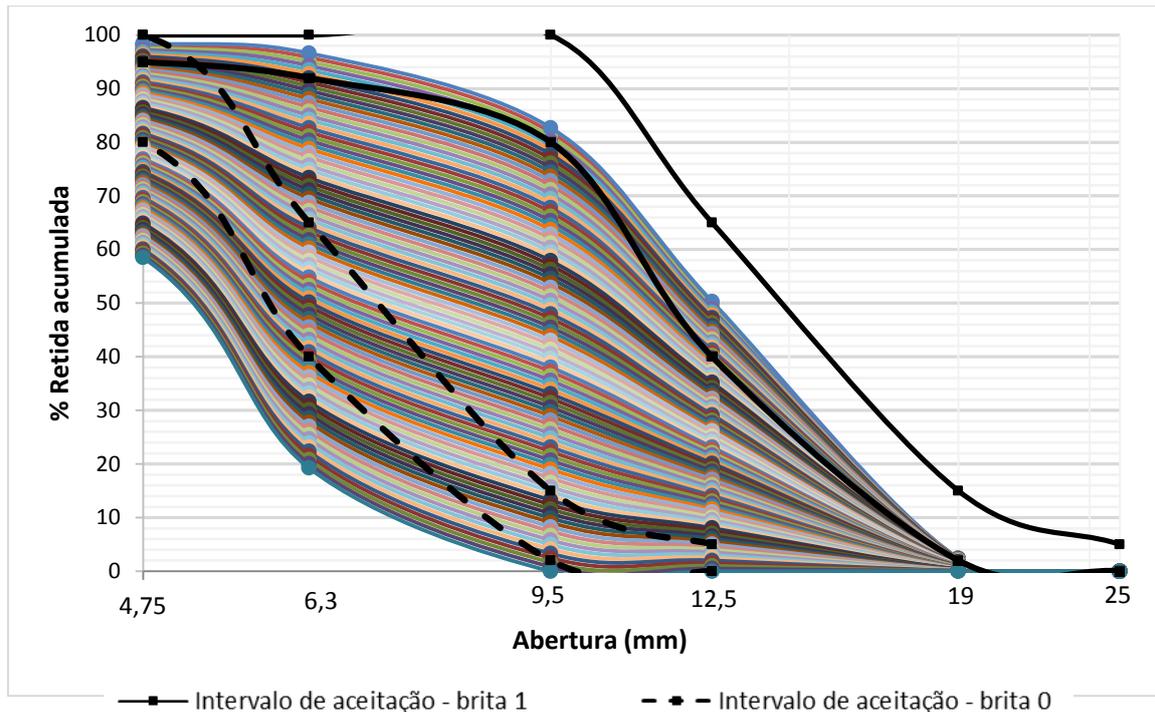
4.4.2.5 Caso 4 – Agregado graúdo reciclado “brita a” – Substituição em volume

Para este caso, são estudadas novas composições com substituição, em relação ao volume, de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado (“brita a”). O gráfico com a curva granulométrica destas composições pode ser verificado por meio da Figura 4.24, em que nota-se, de maneira geral, o distanciamento considerável entre as curvas, sendo que o agregado graúdo natural está enquadrado no intervalo de aceitação para brita 1, enquanto que o agregado graúdo reciclado tem distribuição inferior ao aceito para brita 0.

A partir destes materiais e segundo os procedimentos descritos na metodologia deste trabalho (item 3.2.2), pode-se determinar a distribuição granulométrica das novas composições,

conforme colocado na tabela do Anexo H, de acordo com os teores de substituição em relação ao volume. Com os resultados é possível traçar a curva de distribuição granulométrica para todos os teores de substituição juntamente com os possíveis intervalos de aceitação, como apresentado na Figura 4.27.

Figura 4.27 Curva granulométrica para diferentes teores de substituição em volume – caso 4.



Analisando-se a tabela em anexo e a Figura 4.27, nota-se que a distribuição granulométrica das novas composições resultantes da substituição parcial apresenta valores intermediários com relação aos materiais usados como referência para criação dessas composições (teor de 0% e 100%). Sendo assim, tendo em vista o grande distanciamento destas curvas, tem-se uma grande variação de resultados para as novas composições: na peneira 9,5 mm, por exemplo, a porcentagem de material retido acumulado varia de 0% a 83%. Isto tem grande impacto na análise de aceitação dos materiais quanto a granulometria, tendo-se, portanto, uma necessidade de avaliação em cada peneira, conforme colocado na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 Intervalo de aceitação como brita 1 e brita 0 – caso 4

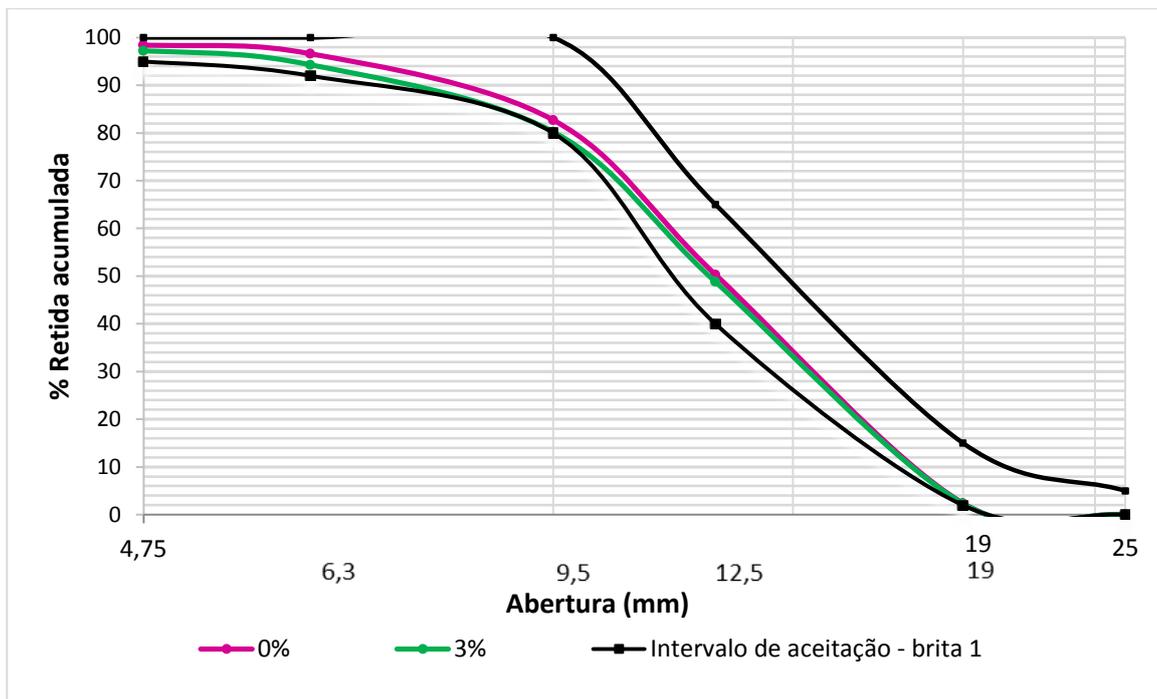
Peneira	Intervalo de aceitação	
	Brita 1	Brita 0
25	0% a 100%	*
19	0% a 37%	*
12,5	0% a 21%	90% a 100%
9,5	0% a 3%	82% a 98%
6,3	0% a 6%	41% a 74%
4,75	0% a 9%	0% a 47%
2,4	*	0% a 58%
Teor de substituição para aceitação	0% a 3%	Não se aplica

* Peneira com abertura fora do intervalo em questão.

Por meio da Tabela 4.23, percebe-se que, para o intervalo de aceitação como brita 1 (dimensão dos grãos variando de 25 mm a 4,75 mm), os teores de substituição que se adequam variam: para a peneira de 25 mm, por exemplo, todos os teores satisfazem este intervalo, enquanto que, para peneira de 6,3 mm, por exemplo, isso ocorre somente nas composições com teor de 0% a 3% de substituição em relação ao volume. A curva destas composições limites está colocada na Figura 4.28.

Além disso, nota-se também que, para o intervalo de aceitação como brita 0 (dimensão dos grãos variando de 12,5 mm a 2,4 mm), a variação dos teores de substituição entre as peneiras é ainda maior: para a peneira de 12, mm, por exemplo, todas as composições com no mínimo 90% de agregado graúdo reciclado estão dentro deste intervalo. Por outro lado, na peneira de 4,75 mm, por exemplo, somente composições com até 47% do volume sendo agregado graúdo reciclado estão dentro do intervalo de aceitação. Sendo assim, nota-se incompatibilidade dos resultados para cada peneira, sendo, portanto, impossível de se obter um teor único de substituição que satisfaça todo intervalo. Dessa forma, não é recomendada a utilização de composições deste agregado graúdo natural com o agregado graúdo reciclado (brita 0) como brita 0.

Figura 4.28: Curvas granulométricas - teor de substituição de 0% e 3%, em volume - caso 4.



A Figura 4.28 apresenta a curva granulométrica do agregado gráúdo natural (0% de substituição) e a curva do material composto por 3% de agregado gráúdo reciclado e 97% de agregado gráúdo natural, em volume. Trata-se de curvas limites para aceitabilidade de utilização na produção de concreto, já que, como facilmente notado na Figura 4.28, estas curvas estão dentro da zona de interesse e que quaisquer novas composições com teores de substituição entre estes valores (e, conseqüentemente, com curvas intermediárias a estas) também estarão.

4.4.2.6 Caso 4 – Agregado gráúdo reciclado “brita a” – Comparação entre os métodos

A partir dos resultados apresentados, pode-se comparar os métodos utilizados, a fim de se determinar semelhanças, diferenças e, se possível, qual deles é melhor. De forma geral, as curvas granulométricas para todas as novas composições são as mesmas quando comparado o método de substituição em relação à massa e o método de substituição em relação ao volume, conforme verifica-se nas Figuras 4.25 e 4.27.

Neste contexto, é importante notar os teores de substituição, em cada peneira, para os dois métodos de substituição, levando em conta o intervalo de aceitação. De forma que, para esta

substituição, notou-se a possibilidade de adequação a dois intervalos aceitáveis, como pode ser notado nas Tabelas 4.24 e 4.25.

Tabela 4.24 Intervalo de aceitação como brita 0 – comparação para caso 4.

Peneira	Intervalo de aceitação – brita 0	
	Massa	Volume
25	*	*
19	*	*
12,5	90% a 100%	90% a 100%
9,5	82% a 98%	82% a 98%
6,3	41% a 73%	41% a 73%
4,75	0% a 47%	0% a 47%
2,4	0% a 58%	0% a 58%
Teor de substituição para aceitação	Não se aplica	Não se aplica

* Peneiras com abertura que não se encontra nos limites em questão.

A partir da Tabela 4.24, nota-se que os teores de substituição que se adequam ao intervalo de aceitação são os mesmos, quando comparado os métodos de substituição adotados.

Tabela 4.25 Intervalo de aceitação como brita 1 – comparação das composições para o intervalo de aceitação como brita 1 – caso 4.

Peneira	Intervalo de aceitação – brita 1	
	Massa	Volume
25	0% a 100%	0% a 100%
19	0% a 37%	0% a 37%
12,5	0% a 21%	0% a 21%
9,5	0% a 3%	0% a 3%
6,3	0% a 6%	0% a 6%
4,75	0% a 9%	0% a 9%
2,4	*	*
Teor de substituição para aceitação	0% a 3%	0% a 3%

* Peneira com abertura fora do intervalo em questão.

De forma que ao analisar as tabelas 4.24 e 4.25, nota-se que não se tem diferença nos valores do teor de substituição para cada peneira comparando-se os métodos de substituição em massa e em volume.

5 DISCUSSÃO GERAL

Esta pesquisa foi motivada, principalmente, devido ao relevante problema que se tem atualmente com relação a grande quantidade de resíduos sólidos da construção civil produzidos e despejados em aterros e regiões ilegais. Trata-se de um volume de resíduos expressivo e cada vez maior, que traz problemas não só ambientais, como também afeta diretamente a sociedade, agindo como um meio proliferador de doenças, por exemplo.

Levando-se isso em consideração, a pesquisa foi desenvolvida de modo a permitir uma análise do uso dos resíduos sólidos reciclados na produção do concreto, por meio de uma substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado, focando-se na distribuição granulométrica dos materiais para dois métodos de substituição: em massa e em volume.

Para tanto, foram realizados ensaios de caracterização dos agregados reciclados produzidos no Distrito Federal, analisando-se a viabilidade de uso destes materiais para produção de concreto e comparando-se os resultados obtidos com outros coletados em anos anteriores, na mesma região.

De forma geral, para a massa específica, os resultados obtidos foram próximos, tanto em relação ao agregado natural, quanto aos resultados coletados em anos anteriores. Já para a absorção de água, observou-se, para o agregado miúdo, pouca variação da amostra atual em relação ao agregado miúdo natural, mas grande variação quando comparado ao resultado anterior. Apesar desta diferença considerável, os resultados estão de acordo com o estipulado pela ABNT NBR 15116:2004. Para os agregados graúdos, a variação da absorção foi muito significativa, com o material reciclado chegando a ser 16 vezes superior ao agregado graúdo natural. Além disso, para a massa unitária, os valores obtidos para os agregados reciclados (graúdo e miúdo) foram inferiores ao encontrado para os agregados naturais, com variação máxima de 12% para o agregado graúdo.

Tendo em vista a granulometria, para o agregado miúdo reciclado, os resultados foram satisfatórios, ou seja, o material está de acordo com os limites de utilização permitidos pela ABNT NBR 7211:2005. Por outro lado, o mesmo não foi concluído para o agregado graúdo reciclado: todas as amostras não apresentaram distribuição dentro dos limites de aceitação.

Assim, feito a caracterização, partiu-se para o estudo da composição conforme proposto. De forma geral, as curvas granulométricas resultantes da substituição em relação à massa foram as mesmas quando comparado à substituição em relação ao volume. Estas curvas variaram entre a curva granulométrica do agregado natural (0% de substituição) e do agregado reciclado (100% de substituição). Com isso, notou-se que, quanto maior a diferença entre estas curvas limites, maior a variação das distribuições granulométricas para as novas composições com substituição parcial.

Sendo assim, para os agregados que apresentavam valores intermediários de distribuição granulométrica dentro de intervalos de interesse (zona ótima para o agregado miúdo e intervalo de aceitação para agregado graúdo), foi possível determinar quais teores de substituição se adequavam ao intervalo em questão.

Fazendo-se uma comparação de forma mais pontual e precisa nas peneiras para os métodos estudados, notou-se pequenas diferenças de distribuição granulométrica para um mesmo teor de substituição, trazendo, conseqüentemente, variação nos teores de substituição limites para adequação à zonas de interesse. De forma que, foi possível verificar que esta variação depende da diferença de distribuição granulométrica dos materiais usados para as novas composições (teor de 0% e 100%) e da diferença de massa específica: quanto mais próximos estes valores, menor a variação dos resultados e conseqüentemente menor a diferença entre o método adotado.

Levando-se em consideração ao apresentado neste estudo, conclui-se que os métodos de substituição adotados trazem resultados semelhantes, ou seja, não há um método melhor que o outro. Além disso, é possível concluir também que, quanto à granulometria, não existe um percentual mínimo ou fixo ideal de substituição, pois ele varia dependendo das características granulométricas dos materiais utilizados na composição e da massa específica. Sendo assim, a metodologia desenvolvida neste trabalho facilita análises futuras, caso se queira determinar o teor ideal de substituição para agregados graúdo e miúdo, levando-se em conta a granulometria.

5.1 Conclusão

Com este trabalho foi possível desenvolver, de forma satisfatória, um estudo a respeito da distribuição granulométrica de agregados compostos por uma parcela de material natural e outra de material reciclado, oriundos de substituição com relação à massa e ao volume. Para tanto, foi feita uma coleta de amostras de agregado reciclado produzido no Distrito Federal e este material foi caracterizado por meio de ensaios de massa específica, massa unitária, absorção e distribuição granulométrica. Estes ensaios forneceram resultados adequados e suficientes para a caracterização quanto ao uso deste material para produção de concreto. Cabe destacar que, neste contexto, apenas os resultados obtidos para distribuição granulométrica de amostras do agregado graúdo reciclado não se encontravam de acordo com os limites de aceitação propostos pela Norma. Além disso, embora seja esperada uma grande variação deste material reciclado devido a origem diversa, foi possível comparar resultados obtidos em coletas anteriores de materiais da mesma região, mostrando pouca variação e valores dentro do esperado.

Feito isso, partiu-se para a segunda etapa do estudo, em que, a partir da metodologia sugerida neste trabalho, foi possível determinar as composições estudadas e os teores de substituição adotados com as respectivas distribuições granulométricas para composições resultantes da substituição em massa e em volume. Por fim, foi feita uma análise e comparação dos métodos de substituição adotados, em que foi concluído que os métodos fornecem bons resultados, semelhantes entre si, com possíveis diferenças em relação a correspondência dos valores do teor de substituição e respectiva distribuição granulométrica. Notou-se que esta diferença é consequência da variação da distribuição granulométrica dos materiais usados para criação das composições e diferença de massa específica.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para futuras pesquisas, recomenda-se um estudo mais aprofundado da influência da massa específica nos métodos de substituição analisados, a fim de se verificar até que ponto esta propriedade afeta na diferença dos teores de substituição e a partir de qual diferença ela começa a se tornar significativa. Dentro deste contexto, caberia estudar também os materiais que podem ser reciclados como agregados para uso em concreto com significativa diferença

de massa específica em relação aos agregados naturais utilizados, capazes de provocar esta distorção maior dos teores de substituição em relação aos métodos estudados. Além disso, recomenda-se também uma avaliação da composição granulométrica dos materiais finos (passantes na peneira 0,075 mm).

6. CRONOGRAMA

MÊS ATIVIDADE	Ago /15	Set/ 15	Out/ 15	Nov /15	Dez /15	Jan/ 16	Fev/ 16	Mar /16	Abr/ 16	Mai /16	Jun/ 16	Jul/ 16
1. Revisão Bibliográfica												
2. Objetivos												
3. Metodologia												
4. Coleta de material												
5. Ensaio de caracterização												
6. Estudo da composição												
7. Análise dos resultados												
8. Defesa												

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Sólidos. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil**, 2014 (Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>. Acesso em: 07 de dezembro de 2015).

ACHE, Grupo de Trabajo 2/5 **“Hormigón reciclado”, “Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural,”** *Monografía M-11 ACHE*, 2006.

ANGULO, S. C. **Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência de Suas Características no Comportamento Mecânico de Concretos**. São Paulo, 2005. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural**. Junho de 2004.

BELTRÃO, L.M.P. (2014). **Resíduos Sólidos da Construção Civil: planos para sua redução, reutilização e reciclagem no Distrito Federal**. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF- 002/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 131p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução 307, de 05 de julho de 2002**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, nº 136, 17 de julho de 2002. Seção 1, p. 95-96.

BRASIL. **Decreto nº 7.404/2011, de 23 de dezembro de 2010**. (Disponível em: www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm. Acesso em: 07 de dezembro de 2015).

BUTTLER, A. M. **Concreto Com Agregado Graúdo Reciclado**: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. São Carlos, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de Propriedades Mecânicas e de Durabilidade de Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados, Considerando-se a Variabilidade da Composição do RCD**. São Carlos, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007.

CABRAL, A. E. B. **Mechanical Properties Modeling of Recycled Aggregate Concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 4, p. 421-430, 2010.

CARRIJO, P. M. **Análise da Influência da Massa Específica de Agregados Graúdos Provenientes de Resíduos da Construção e Demolição no Desempenho Mecânico do Concreto**. São Paulo, 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. **Mechanical Behaviour of Concrete Made With Fine Recycled Aggregates**. *Cement and Concrete Composites*, v. 29, n. 5, p. 397-401, 2007.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ A.; BARRA, M. **Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete**. *Cement and Concrete Research*, Volume 37, Issue 5, p. 735–742, 2007.

GAYARRE, F. **Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecânicas**. Gijón: Universidad de Oviedo, 2008.

GONÇALVES, A.; ESTEVES, A.; VIEIRA, M. Influence of recycle concrete aggregates on concrete durability. **International Rilem conference on the use of recycled materials in buildings and structures**, v. 2, p. 554-562, 2004.

GUZMÁN, J.; MARRERO, M.; DELGADO, M.; ARELLANO, A. D. “**A Spanish model for qualification and management of construction waste**” *Waste Management*. 29, pp. 2542-2548, 2009.

HANSEN, T. **Recycling of demolished concrete and masonry**. London: E & FN SPON, Rilem report 6, 1992.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. In: **Seminário Reciclagem de Resíduos Domiciliares**. São Paulo. 2013.

JUAN, M. **Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural**. *Tesis Doctoral*, 2005.

KARPINSK, L. A. *et al.* **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2009.

LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados de Resíduos da Construção e Demolição**. Porto Alegre, 2001. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M. **Reciclagem do Entulho da Construção Civil, Para Utilização Como Agregados Para Argamassas e Concretos**. São Paulo, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, São Paulo, São Carlos, 1997.

LEVY, S. M. **Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos, Produzidos Com Resíduos de Concreto e Argamassa**. São Paulo, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LIMA, P.; LEITE, M.; SANTIAGO, E. **“Recycled lightweight concrete made from footwear industry waste and CDW,”** *Waste Management Volume 30, Issue 6*, p. 1107–1113, 2010.

LIMA, R. S.; LIMA, R. R. R. **Guia para Elaboração de Projeto de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil.** Série de Publicações Temáticas do CREA-PR. S.D.

MEYER, C. **The greening of the concrete industry.** *Cement and Concrete Composites Volume 31, Issue 8*, p. 601–605, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 3 ed. Ibracon: São Paulo, 2008.

MIRANDA, R. J. N. **Estado da Arte e Análise à Gestão e Utilização na Região Autónoma da Madeira.** Madeira, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade da Madeira, Madeira, 2014.

PINTO, T. P.; GONZÁLES, J. L. R. **Manejo e Gestão de Resíduos da Construção Civil.** Como implantar um Sistema de Manejo e Gestão dos Resíduos da Construção Civil nos Municípios. Brasília: Caixa Econômica Federal; Ministério das Cidades, Ministério do Meio Ambiente, 2005. v. 1, 198p.

RAO, M. C.; BHATTACHARYYA S. K.; BARAI, S. V. **Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete.** *Materials and Structures, Volume 44, Issue 1*, pp. 205–220, 2011.

RODRIGUES, C. R. DE SÁ; FUCALE, S. **Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil.** *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 99-111, jan./mar. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

SANTOS, A. L. **Diagnóstico ambiental da gestão e destinação dos resíduos de construção e demolição (RCC): análise das construtoras associadas ao Sinduscon/RN e empresas**

coletoras atuantes no município de Parnamirim - RN. 2009. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

SEMARH. Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil e Resíduos Volumosos no Distrito Federal (PIGRCC). Brasília, DF, dezembro de 2013, 35p.

SLU. Relatório de Atividades – Exercício 2013. Brasília, DF, 2013, 15p.

SOUZA, L. M.; ASSIS, C. D.; SOUTO, S. B. G. **Agregado reciclado: um novo material da construção civil**, v. 18, n. 1, p. 273-278, 2014.

TAM, V. W. Y. **Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries.** Journal of Cleaner Production, v. 17, n. 7, p. 688-702, 2009.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. 2007.

YAPRAK, H. *et al.* Effects of the Fine Recycled Concrete Aggregates on the Concrete Properties. **International Journal of the Physical Sciences**, v. 6, p. 2455-2461, may 2011.

ZORDAN, S. E. **A Utilização do Entulho Como Agregado, na Confecção de Concreto.** Campinas, 1997. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

ANEXO A

Composições granulométricas para diferentes teores de substituição em massa – caso 1.

Pen. Teor	6,3	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
0%	0	1	9	36	53	75	89	97
1%	0	1	9	36	53	75	89	97
2%	0	1	9	36	53	75	89	97
3%	0	1	9	36	53	75	89	97
4%	0	1	9	36	53	75	89	97
5%	0	1	9	36	53	75	89	97
6%	0	1	9	36	53	75	89	97
7%	0	1	9	36	53	75	90	97
8%	0	1	9	36	53	75	90	97
9%	0	1	9	36	53	75	90	97
10%	0	1	9	36	53	75	90	97
11%	0	1	9	36	53	75	90	97
12%	0	1	9	36	53	75	90	97
13%	0	1	9	36	53	75	90	97
14%	0	1	9	36	53	75	90	97
15%	0	1	9	36	53	75	90	97
16%	0	1	9	36	53	75	90	97
17%	0	1	9	35	53	75	90	97
18%	0	1	9	35	53	75	90	97
19%	0	1	9	35	53	75	90	97
20%	0	1	9	35	53	75	90	97
21%	0	1	9	35	53	75	90	97
22%	0	1	9	35	53	75	90	97
23%	0	1	9	35	53	75	90	97
24%	0	1	8	35	53	75	90	97
25%	0	1	8	35	53	75	90	97
26%	0	1	8	35	53	75	90	97
27%	0	1	8	35	53	75	90	97
28%	0	1	8	35	53	75	90	97
29%	0	1	8	35	53	75	91	97
30%	0	1	8	35	53	75	91	97
31%	0	1	8	35	53	75	91	97
32%	0	1	8	35	54	75	91	97
33%	0	1	8	35	54	75	91	97
34%	0	1	8	35	54	75	91	97
35%	0	1	8	35	54	75	91	97
36%	0	1	8	35	54	75	91	97
37%	0	1	8	35	54	75	91	97
38%	0	1	8	35	54	75	91	97
39%	0	1	8	35	54	75	91	97
40%	0	1	8	35	54	75	91	97
41%	0	1	8	35	54	75	91	97
42%	0	1	8	35	54	75	91	97

43%	0	1	8	35	54	75	91	97
44%	0	1	8	35	54	75	91	97
45%	0	1	8	35	54	75	91	97
46%	0	0	8	35	54	75	91	97
47%	0	0	8	35	54	75	91	97
48%	0	0	8	35	54	75	91	97
49%	0	0	8	35	54	75	91	98
50%	0	0	8	35	54	75	91	98
51%	0	0	8	35	54	75	91	98
52%	0	0	8	35	54	75	92	98
53%	0	0	8	35	54	75	92	98
54%	0	0	8	35	54	75	92	98
55%	0	0	8	35	54	75	92	98
56%	0	0	8	35	54	75	92	98
57%	0	0	8	35	54	75	92	98
58%	0	0	8	35	54	75	92	98
59%	0	0	8	35	54	75	92	98
60%	0	0	8	35	54	75	92	98
61%	0	0	8	35	54	76	92	98
62%	0	0	8	35	54	76	92	98
63%	0	0	8	35	54	76	92	98
64%	0	0	8	35	54	76	92	98
65%	0	0	8	35	54	76	92	98
66%	0	0	8	35	54	76	92	98
67%	0	0	8	35	54	76	92	98
68%	0	0	8	35	54	76	92	98
69%	0	0	8	35	54	76	92	98
70%	0	0	8	34	54	76	92	98
71%	0	0	8	34	54	76	92	98
72%	0	0	8	34	54	76	92	98
73%	0	0	8	34	54	76	92	98
74%	0	0	7	34	54	76	92	98
75%	0	0	7	34	54	76	93	98
76%	0	0	7	34	54	76	93	98
77%	0	0	7	34	54	76	93	98
78%	0	0	7	34	54	76	93	98
79%	0	0	7	34	54	76	93	98
80%	0	0	7	34	54	76	93	98
81%	0	0	7	34	54	76	93	98
82%	0	0	7	34	54	76	93	98
83%	0	0	7	34	54	76	93	98
84%	0	0	7	34	54	76	93	98
85%	0	0	7	34	54	76	93	98
86%	0	0	7	34	54	76	93	98
87%	0	0	7	34	54	76	93	98
88%	0	0	7	34	54	76	93	98
89%	0	0	7	34	54	76	93	98
90%	0	0	7	34	54	76	93	98

91%	0	0	7	34	54	76	93	98
92%	0	0	7	34	55	76	93	98
93%	0	0	7	34	55	76	93	98
94%	0	0	7	34	55	76	93	98
95%	0	0	7	34	55	76	93	98
96%	0	0	7	34	55	76	93	98
97%	0	0	7	34	55	76	94	98
98%	0	0	7	34	55	76	94	98
99%	0	0	7	34	55	76	94	98
100%	0	0	7	34	55	76	94	98

ANEXO B

Composições granulométricas para diferentes teores de substituição em volume – caso 1.

Pen. Teor	6,3	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
0%	0	1	9	36	53	75	89	97
1%	0	1	9	36	53	75	89	97
2%	0	1	9	36	53	75	89	97
3%	0	1	9	36	53	75	89	97
4%	0	1	9	36	53	75	89	97
5%	0	1	9	36	53	75	89	97
6%	0	1	9	36	53	75	89	97
7%	0	1	9	36	53	75	90	97
8%	0	1	9	36	53	75	90	97
9%	0	1	9	36	53	75	90	97
10%	0	1	9	36	53	75	90	97
11%	0	1	9	36	53	75	90	97
12%	0	1	9	36	53	75	90	97
13%	0	1	9	36	53	75	90	97
14%	0	1	9	36	53	75	90	97
15%	0	1	9	36	53	75	90	97
16%	0	1	9	36	53	75	90	97
17%	0	1	9	35	53	75	90	97
18%	0	1	9	35	53	75	90	97
19%	0	1	9	35	53	75	90	97
20%	0	1	9	35	53	75	90	97
21%	0	1	9	35	53	75	90	97
22%	0	1	9	35	53	75	90	97
23%	0	1	9	35	53	75	90	97
24%	0	1	8	35	53	75	90	97
25%	0	1	8	35	53	75	90	97
26%	0	1	8	35	53	75	90	97
27%	0	1	8	35	53	75	90	97
28%	0	1	8	35	53	75	90	97
29%	0	1	8	35	53	75	91	97
30%	0	1	8	35	53	75	91	97
31%	0	1	8	35	54	75	91	97
32%	0	1	8	35	54	75	91	97
33%	0	1	8	35	54	75	91	97
34%	0	1	8	35	54	75	91	97
35%	0	1	8	35	54	75	91	97
36%	0	1	8	35	54	75	91	97
37%	0	1	8	35	54	75	91	97
38%	0	1	8	35	54	75	91	97
39%	0	1	8	35	54	75	91	97
40%	0	1	8	35	54	75	91	97

41%	0	1	8	35	54	75	91	97
42%	0	1	8	35	54	75	91	97
43%	0	1	8	35	54	75	91	97
44%	0	1	8	35	54	75	91	97
45%	0	0	8	35	54	75	91	97
46%	0	0	8	35	54	75	91	97
47%	0	0	8	35	54	75	91	97
48%	0	0	8	35	54	75	91	97
49%	0	0	8	35	54	75	91	98
50%	0	0	8	35	54	75	91	98
51%	0	0	8	35	54	75	92	98
52%	0	0	8	35	54	75	92	98
53%	0	0	8	35	54	75	92	98
54%	0	0	8	35	54	75	92	98
55%	0	0	8	35	54	75	92	98
56%	0	0	8	35	54	75	92	98
57%	0	0	8	35	54	75	92	98
58%	0	0	8	35	54	75	92	98
59%	0	0	8	35	54	75	92	98
60%	0	0	8	35	54	75	92	98
61%	0	0	8	35	54	76	92	98
62%	0	0	8	35	54	76	92	98
63%	0	0	8	35	54	76	92	98
64%	0	0	8	35	54	76	92	98
65%	0	0	8	35	54	76	92	98
66%	0	0	8	35	54	76	92	98
67%	0	0	8	35	54	76	92	98
68%	0	0	8	35	54	76	92	98
69%	0	0	8	35	54	76	92	98
70%	0	0	8	34	54	76	92	98
71%	0	0	8	34	54	76	92	98
72%	0	0	8	34	54	76	92	98
73%	0	0	7	34	54	76	92	98
74%	0	0	7	34	54	76	93	98
75%	0	0	7	34	54	76	93	98
76%	0	0	7	34	54	76	93	98
77%	0	0	7	34	54	76	93	98
78%	0	0	7	34	54	76	93	98
79%	0	0	7	34	54	76	93	98
80%	0	0	7	34	54	76	93	98
81%	0	0	7	34	54	76	93	98
82%	0	0	7	34	54	76	93	98
83%	0	0	7	34	54	76	93	98
84%	0	0	7	34	54	76	93	98
85%	0	0	7	34	54	76	93	98
86%	0	0	7	34	54	76	93	98
87%	0	0	7	34	54	76	93	98
88%	0	0	7	34	54	76	93	98

89%	0	0	7	34	54	76	93	98
90%	0	0	7	34	54	76	93	98
91%	0	0	7	34	54	76	93	98
92%	0	0	7	34	55	76	93	98
93%	0	0	7	34	55	76	93	98
94%	0	0	7	34	55	76	93	98
95%	0	0	7	34	55	76	93	98
96%	0	0	7	34	55	76	93	98
97%	0	0	7	34	55	76	94	98
98%	0	0	7	34	55	76	94	98
99%	0	0	7	34	55	76	94	98
100%	0	0	7	34	55	76	94	98

ANEXO C

Composições granulométricas para diferentes teores de substituição em massa - caso 2.

Pen. Teor	6,3	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
0%	0	1	9	36	53	75	89	97
1%	0	1	9	36	53	75	89	97
2%	0	1	9	35	53	74	89	97
3%	0	1	9	35	52	74	89	97
4%	0	1	9	35	52	74	89	97
5%	0	1	9	35	52	74	89	96
6%	0	1	9	35	52	74	89	96
7%	0	1	9	35	52	74	89	96
8%	0	1	9	34	51	74	89	96
9%	0	1	9	34	51	74	89	96
10%	0	1	9	34	51	74	89	96
11%	0	1	9	34	51	74	89	96
12%	0	1	9	34	51	73	89	96
13%	0	1	9	33	50	73	89	96
14%	0	1	9	33	50	73	89	96
15%	0	1	9	33	50	73	89	96
16%	0	1	9	33	50	73	88	96
17%	0	1	9	33	50	73	88	96
18%	0	1	9	32	49	73	88	96
19%	0	1	9	32	49	73	88	96
20%	0	1	9	32	49	73	88	96
21%	0	1	9	32	49	73	88	96
22%	0	1	9	32	49	72	88	96
23%	0	1	9	31	48	72	88	96
24%	0	1	9	31	48	72	88	96
25%	0	1	9	31	48	72	88	96
26%	0	1	9	31	48	72	88	96
27%	0	1	9	31	48	72	88	96
28%	0	1	8	31	47	72	88	96
29%	0	1	8	30	47	72	88	96
30%	0	1	8	30	47	72	88	95
31%	0	1	8	30	47	71	88	95
32%	0	1	8	30	47	71	88	95
33%	0	1	8	30	46	71	88	95
34%	0	1	8	29	46	71	88	95
35%	0	1	8	29	46	71	88	95
36%	0	1	8	29	46	71	87	95
37%	0	1	8	29	46	71	87	95
38%	0	1	8	29	45	71	87	95
39%	0	1	8	28	45	71	87	95
40%	0	1	8	28	45	71	87	95

41%	0	1	8	28	45	70	87	95
42%	0	1	8	28	45	70	87	95
43%	0	1	8	28	44	70	87	95
44%	0	1	8	28	44	70	87	95
45%	0	1	8	27	44	70	87	95
46%	0	1	8	27	44	70	87	95
47%	0	1	8	27	43	70	87	95
48%	0	1	8	27	43	70	87	95
49%	0	1	8	27	43	70	87	95
50%	0	1	8	26	43	70	87	95
51%	0	1	8	26	43	69	87	95
52%	0	1	8	26	42	69	87	95
53%	0	1	8	26	42	69	87	95
54%	0	1	8	26	42	69	87	94
55%	0	1	8	25	42	69	87	94
56%	0	1	8	25	42	69	87	94
57%	0	1	8	25	41	69	86	94
58%	0	1	8	25	41	69	86	94
59%	0	1	8	25	41	69	86	94
60%	0	1	8	25	41	69	86	94
61%	0	1	8	24	41	68	86	94
62%	0	1	8	24	40	68	86	94
63%	0	1	8	24	40	68	86	94
64%	0	1	8	24	40	68	86	94
65%	0	2	8	24	40	68	86	94
66%	0	2	8	23	40	68	86	94
67%	0	2	8	23	39	68	86	94
68%	0	2	8	23	39	68	86	94
69%	0	2	8	23	39	68	86	94
70%	0	2	8	23	39	68	86	94
71%	0	2	8	22	39	67	86	94
72%	0	2	8	22	38	67	86	94
73%	0	2	8	22	38	67	86	94
74%	0	2	8	22	38	67	86	94
75%	0	2	8	22	38	67	86	94
76%	0	2	8	22	38	67	86	94
77%	0	2	8	21	37	67	86	94
78%	0	2	8	21	37	67	85	94
79%	0	2	8	21	37	67	85	93
80%	0	2	8	21	37	67	85	93
81%	0	2	8	21	37	66	85	93
82%	0	2	8	20	36	66	85	93
83%	0	2	8	20	36	66	85	93
84%	0	2	7	20	36	66	85	93
85%	0	2	7	20	36	66	85	93
86%	0	2	7	20	36	66	85	93
87%	0	2	7	19	35	66	85	93
88%	0	2	7	19	35	66	85	93

89%	0	2	7	19	35	66	85	93
90%	0	2	7	19	35	66	85	93
91%	0	2	7	19	35	65	85	93
92%	0	2	7	19	34	65	85	93
93%	0	2	7	18	34	65	85	93
94%	0	2	7	18	34	65	85	93
95%	0	2	7	18	34	65	85	93
96%	0	2	7	18	34	65	85	93
97%	0	2	7	18	33	65	85	93
98%	0	2	7	17	33	65	84	93
99%	0	2	7	17	33	65	84	93
100%	0	2	7	17	33	65	84	93

ANEXO D

Composições granulométricas para diferentes teores de substituição em volume – caso 2.

Teor \ Pen.	6,3	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
0%	0	1	9	36	53	75	89	97
1%	0	1	9	36	53	75	89	97
2%	0	1	9	35	53	74	89	97
3%	0	1	9	35	52	74	89	97
4%	0	1	9	35	52	74	89	97
5%	0	1	9	35	52	74	89	96
6%	0	1	9	35	52	74	89	96
7%	0	1	9	35	52	74	89	96
8%	0	1	9	34	51	74	89	96
9%	0	1	9	34	51	74	89	96
10%	0	1	9	34	51	74	89	96
11%	0	1	9	34	51	74	89	96
12%	0	1	9	34	51	73	89	96
13%	0	1	9	33	50	73	89	96
14%	0	1	9	33	50	73	89	96
15%	0	1	9	33	50	73	89	96
16%	0	1	9	33	50	73	88	96
17%	0	1	9	33	50	73	88	96
18%	0	1	9	33	49	73	88	96
19%	0	1	9	32	49	73	88	96
20%	0	1	9	32	49	73	88	96
21%	0	1	9	32	49	73	88	96
22%	0	1	9	32	49	72	88	96
23%	0	1	9	32	48	72	88	96
24%	0	1	9	31	48	72	88	96
25%	0	1	9	31	48	72	88	96
26%	0	1	9	31	48	72	88	96
27%	0	1	9	31	48	72	88	96
28%	0	1	8	31	47	72	88	96
29%	0	1	8	31	47	72	88	96
30%	0	1	8	30	47	72	88	95
31%	0	1	8	30	47	72	88	95
32%	0	1	8	30	47	71	88	95
33%	0	1	8	30	46	71	88	95
34%	0	1	8	30	46	71	88	95
35%	0	1	8	29	46	71	88	95
36%	0	1	8	29	46	71	88	95
37%	0	1	8	29	46	71	87	95
38%	0	1	8	29	45	71	87	95
39%	0	1	8	29	45	71	87	95
40%	0	1	8	28	45	71	87	95

41%	0	1	8	28	45	71	87	95
42%	0	1	8	28	45	70	87	95
43%	0	1	8	28	44	70	87	95
44%	0	1	8	28	44	70	87	95
45%	0	1	8	28	44	70	87	95
46%	0	1	8	27	44	70	87	95
47%	0	1	8	27	44	70	87	95
48%	0	1	8	27	43	70	87	95
49%	0	1	8	27	43	70	87	95
50%	0	1	8	27	43	70	87	95
51%	0	1	8	26	43	70	87	95
52%	0	1	8	26	43	69	87	95
53%	0	1	8	26	42	69	87	95
54%	0	1	8	26	42	69	87	94
55%	0	1	8	26	42	69	87	94
56%	0	1	8	25	42	69	87	94
57%	0	1	8	25	42	69	86	94
58%	0	1	8	25	41	69	86	94
59%	0	1	8	25	41	69	86	94
60%	0	1	8	25	41	69	86	94
61%	0	1	8	25	41	69	86	94
62%	0	1	8	24	41	68	86	94
63%	0	1	8	24	40	68	86	94
64%	0	1	8	24	40	68	86	94
65%	0	1	8	24	40	68	86	94
66%	0	2	8	24	40	68	86	94
67%	0	2	8	23	40	68	86	94
68%	0	2	8	23	39	68	86	94
69%	0	2	8	23	39	68	86	94
70%	0	2	8	23	39	68	86	94
71%	0	2	8	23	39	67	86	94
72%	0	2	8	22	39	67	86	94
73%	0	2	8	22	38	67	86	94
74%	0	2	8	22	38	67	86	94
75%	0	2	8	22	38	67	86	94
76%	0	2	8	22	38	67	86	94
77%	0	2	8	21	38	67	85	94
78%	0	2	8	21	37	67	85	93
79%	0	2	8	21	37	67	85	93
80%	0	2	8	21	37	67	85	93
81%	0	2	8	21	37	66	85	93
82%	0	2	8	20	37	66	85	93
83%	0	2	8	20	36	66	85	93
84%	0	2	7	20	36	66	85	93
85%	0	2	7	20	36	66	85	93
86%	0	2	7	20	36	66	85	93
87%	0	2	7	20	35	66	85	93
88%	0	2	7	19	35	66	85	93

89%	0	2	7	19	35	66	85	93
90%	0	2	7	19	35	65	85	93
91%	0	2	7	19	35	65	85	93
92%	0	2	7	19	34	65	85	93
93%	0	2	7	18	34	65	85	93
94%	0	2	7	18	34	65	85	93
95%	0	2	7	18	34	65	85	93
96%	0	2	7	18	34	65	85	93
97%	0	2	7	18	33	65	84	93
98%	0	2	7	17	33	65	84	93
99%	0	2	7	17	33	65	84	93
100%	0	2	7	17	33	64	84	93

ANEXO E

Composições granulométricas para diferentes teores de substituição em massa de agregado graúdo natural por reciclado “brita b” – caso 3.

Teor \ Pen.	25	19	12,5	9,5	6,3	4,75
0%	0	2	50	83	97	98
1%	0	3	51	83	97	98
2%	0	3	51	83	97	98
3%	0	3	51	83	97	98
4%	0	3	52	83	97	98
5%	0	4	52	83	97	98
6%	0	4	53	84	97	98
7%	0	4	53	84	97	98
8%	0	4	53	84	97	98
9%	0	4	54	84	97	98
10%	0	5	54	84	97	99
11%	0	5	54	84	97	99
12%	0	5	55	84	97	99
13%	0	5	55	85	97	99
14%	0	6	56	85	97	99
15%	0	6	56	85	97	99
16%	0	6	56	85	97	99
17%	0	6	57	85	97	99
18%	0	6	57	85	97	99
19%	0	7	58	85	97	99
20%	0	7	58	86	97	99
21%	0	7	58	86	97	99
22%	0	7	59	86	97	99
23%	0	7	59	86	97	99
24%	0	8	59	86	97	99
25%	0	8	60	86	97	99
26%	0	8	60	86	97	99
27%	0	8	61	87	97	99
28%	0	9	61	87	97	99
29%	0	9	61	87	97	99
30%	0	9	62	87	97	99
31%	0	9	62	87	97	99
32%	0	9	62	87	97	99
33%	0	10	63	87	97	99
34%	0	10	63	87	97	99
35%	0	10	64	88	98	99
36%	0	10	64	88	98	99
37%	0	11	64	88	98	99
38%	0	11	65	88	98	99

39%	0	11	65	88	98	99
40%	0	11	65	88	98	99
41%	0	11	66	88	98	99
42%	0	12	66	89	98	99
43%	0	12	67	89	98	99
44%	0	12	67	89	98	99
45%	0	12	67	89	98	99
46%	0	13	68	89	98	99
47%	0	13	68	89	98	99
48%	0	13	69	89	98	99
49%	0	13	69	90	98	99
50%	0	13	69	90	98	99
51%	0	14	70	90	98	99
52%	0	14	70	90	98	99
53%	0	14	70	90	98	99
54%	0	14	71	90	98	99
55%	0	15	71	90	98	99
56%	0	15	72	91	98	99
57%	0	15	72	91	98	99
58%	0	15	72	91	98	99
59%	0	15	73	91	98	99
60%	0	16	73	91	98	99
61%	0	16	73	91	98	99
62%	0	16	74	91	98	99
63%	0	16	74	92	98	99
64%	0	17	75	92	98	99
65%	0	17	75	92	98	99
66%	0	17	75	92	98	99
67%	0	17	76	92	98	99
68%	0	17	76	92	98	99
69%	0	18	76	92	98	99
70%	0	18	77	93	98	99
71%	0	18	77	93	98	99
72%	0	18	78	93	98	99
73%	0	19	78	93	98	99
74%	0	19	78	93	99	99
75%	0	19	79	93	99	99
76%	0	19	79	93	99	99
77%	0	19	80	94	99	99
78%	0	20	80	94	99	99
79%	0	20	80	94	99	99
80%	0	20	81	94	99	99
81%	0	20	81	94	99	99
82%	0	21	81	94	99	99
83%	0	21	82	94	99	99
84%	0	21	82	95	99	99
85%	0	21	83	95	99	99
86%	0	21	83	95	99	99

87%	0	22	83	95	99	99
88%	0	22	84	95	99	99
89%	0	22	84	95	99	99
90%	0	22	84	95	99	99
91%	0	23	85	96	99	99
92%	0	23	85	96	99	99
93%	0	23	86	96	99	99
94%	0	23	86	96	99	99
95%	0	23	86	96	99	99
96%	0	24	87	96	99	99
97%	0	24	87	96	99	99
98%	0	24	87	97	99	99
99%	0	24	88	97	99	99
100%	1	25	88	97	99	99

ANEXO F

Composições granulométricas para diferentes teores de substituição em volume – caso 3.

Teor \ Pen.	25	19	12,5	9,5	6,3	4,75
0%	0	2	50	83	97	98
1%	0	3	51	83	97	98
2%	0	3	51	83	97	98
3%	0	3	51	83	97	98
4%	0	3	52	83	97	98
5%	0	3	52	83	97	98
6%	0	4	53	84	97	98
7%	0	4	53	84	97	98
8%	0	4	53	84	97	98
9%	0	4	54	84	97	98
10%	0	5	54	84	97	98
11%	0	5	54	84	97	99
12%	0	5	55	84	97	99
13%	0	5	55	85	97	99
14%	0	5	56	85	97	99
15%	0	6	56	85	97	99
16%	0	6	56	85	97	99
17%	0	6	57	85	97	99
18%	0	6	57	85	97	99
19%	0	7	57	85	97	99
20%	0	7	58	85	97	99
21%	0	7	58	86	97	99
22%	0	7	59	86	97	99
23%	0	7	59	86	97	99
24%	0	8	59	86	97	99
25%	0	8	60	86	97	99
26%	0	8	60	86	97	99
27%	0	8	60	86	97	99
28%	0	9	61	87	97	99
29%	0	9	61	87	97	99
30%	0	9	62	87	97	99
31%	0	9	62	87	97	99
32%	0	9	62	87	97	99
33%	0	10	63	87	97	99
34%	0	10	63	87	97	99
35%	0	10	63	88	97	99
36%	0	10	64	88	98	99
37%	0	10	64	88	98	99
38%	0	11	65	88	98	99
39%	0	11	65	88	98	99
40%	0	11	65	88	98	99

41%	0	11	66	88	98	99
42%	0	12	66	89	98	99
43%	0	12	66	89	98	99
44%	0	12	67	89	98	99
45%	0	12	67	89	98	99
46%	0	12	68	89	98	99
47%	0	13	68	89	98	99
48%	0	13	68	89	98	99
49%	0	13	69	90	98	99
50%	0	13	69	90	98	99
51%	0	14	69	90	98	99
52%	0	14	70	90	98	99
53%	0	14	70	90	98	99
54%	0	14	71	90	98	99
55%	0	14	71	90	98	99
56%	0	15	71	91	98	99
57%	0	15	72	91	98	99
58%	0	15	72	91	98	99
59%	0	15	73	91	98	99
60%	0	16	73	91	98	99
61%	0	16	73	91	98	99
62%	0	16	74	91	98	99
63%	0	16	74	92	98	99
64%	0	16	74	92	98	99
65%	0	17	75	92	98	99
66%	0	17	75	92	98	99
67%	0	17	76	92	98	99
68%	0	17	76	92	98	99
69%	0	18	76	92	98	99
70%	0	18	77	93	98	99
71%	0	18	77	93	98	99
72%	0	18	77	93	98	99
73%	0	18	78	93	98	99
74%	0	19	78	93	99	99
75%	0	19	79	93	99	99
76%	0	19	79	93	99	99
77%	0	19	79	94	99	99
78%	0	20	80	94	99	99
79%	0	20	80	94	99	99
80%	0	20	81	94	99	99
81%	0	20	81	94	99	99
82%	0	21	81	94	99	99
83%	0	21	82	94	99	99
84%	0	21	82	95	99	99
85%	0	21	82	95	99	99
86%	0	21	83	95	99	99
87%	0	22	83	95	99	99
88%	0	22	84	95	99	99

89%	0	22	84	95	99	99
90%	0	22	84	95	99	99
91%	0	23	85	96	99	99
92%	0	23	85	96	99	99
93%	0	23	86	96	99	99
94%	0	23	86	96	99	99
95%	0	23	86	96	99	99
96%	0	24	87	96	99	99
97%	0	24	87	96	99	99
98%	0	24	87	97	99	99
99%	0	24	88	97	99	99
100%	1	25	88	97	99	99

ANEXO G

Composições granulométricas para diferentes teores de substituição em massa – caso 4.

Teor \ Pen.	25	19	12,5	9,5	6,3	4,75	2,4
0%	0	2	50	83	97	98	98
1%	0	2	50	82	96	98	98
2%	0	2	49	81	95	98	98
3%	0	2	49	80	94	97	98
4%	0	2	48	79	94	97	98
5%	0	2	48	79	93	96	98
6%	0	2	47	78	92	96	98
7%	0	2	47	77	91	96	98
8%	0	2	46	76	90	95	98
9%	0	2	46	75	90	95	98
10%	0	2	45	74	89	94	98
11%	0	2	45	74	88	94	98
12%	0	2	44	73	87	94	98
13%	0	2	44	72	87	93	98
14%	0	2	43	71	86	93	97
15%	0	2	43	70	85	92	97
16%	0	2	42	69	84	92	97
17%	0	2	42	69	83	92	97
18%	0	2	41	68	83	91	97
19%	0	2	41	67	82	91	97
20%	0	2	40	66	81	90	97
21%	0	2	40	65	80	90	97
22%	0	2	39	65	80	90	97
23%	0	2	39	64	79	89	97
24%	0	2	38	63	78	89	97
25%	0	2	38	62	77	88	97
26%	0	2	37	61	76	88	97
27%	0	2	37	60	76	88	97
28%	0	2	36	60	75	87	97
29%	0	2	36	59	74	87	96
30%	0	2	35	58	73	86	96
31%	0	2	35	57	73	86	96
32%	0	2	34	56	72	86	96
33%	0	2	34	55	71	85	96
34%	0	2	33	55	70	85	96
35%	0	2	33	54	70	84	96
36%	0	2	32	53	69	84	96
37%	0	2	32	52	68	84	96
38%	0	1	31	51	67	83	96
39%	0	1	31	50	66	83	96
40%	0	1	30	50	66	82	96

41%	0	1	30	49	65	82	96
42%	0	1	29	48	64	82	96
43%	0	1	29	47	63	81	96
44%	0	1	28	46	63	81	95
45%	0	1	28	45	62	80	95
46%	0	1	27	45	61	80	95
47%	0	1	27	44	60	80	95
48%	0	1	26	43	59	79	95
49%	0	1	26	42	59	79	95
50%	0	1	25	41	58	78	95
51%	0	1	25	41	57	78	95
52%	0	1	24	40	56	78	95
53%	0	1	24	39	56	77	95
54%	0	1	23	38	55	77	95
55%	0	1	23	37	54	76	95
56%	0	1	22	36	53	76	95
57%	0	1	22	36	53	76	95
58%	0	1	21	35	52	75	95
59%	0	1	21	34	51	75	94
60%	0	1	20	33	50	74	94
61%	0	1	20	32	49	74	94
62%	0	1	19	31	49	74	94
63%	0	1	19	31	48	73	94
64%	0	1	18	30	47	73	94
65%	0	1	18	29	46	72	94
66%	0	1	17	28	46	72	94
67%	0	1	17	27	45	72	94
68%	0	1	16	26	44	71	94
69%	0	1	16	26	43	71	94
70%	0	1	15	25	42	70	94
71%	0	1	15	24	42	70	94
72%	0	1	14	23	41	70	94
73%	0	1	14	22	40	69	94
74%	0	1	13	22	39	69	93
75%	0	1	13	21	39	68	93
76%	0	1	12	20	38	68	93
77%	0	1	12	19	37	68	93
78%	0	1	11	18	36	67	93
79%	0	1	11	17	35	67	93
80%	0	0	10	17	35	66	93
81%	0	0	10	16	34	66	93
82%	0	0	9	15	33	66	93
83%	0	0	9	14	32	65	93
84%	0	0	8	13	32	65	93
85%	0	0	8	12	31	64	93
86%	0	0	7	12	30	64	93
87%	0	0	7	11	29	64	93
88%	0	0	6	10	29	63	93

89%	0	0	6	9	28	63	92
90%	0	0	5	8	27	62	92
91%	0	0	5	7	26	62	92
92%	0	0	4	7	25	62	92
93%	0	0	4	6	25	61	92
94%	0	0	3	5	24	61	92
95%	0	0	3	4	23	60	92
96%	0	0	2	3	22	60	92
97%	0	0	2	2	22	60	92
98%	0	0	1	2	21	59	92
99%	0	0	1	1	20	59	92
100%	0	0	0	0	19	58	92

ANEXO H

Composições granulométricas para diferentes teores de substituição em volume – caso 4.

Teor \ Pen.	25	19	12,5	9,5	6,3	4,75	2,4
0%	0	2	50	83	97	98	
1%	0	2	50	82	96	98	98
2%	0	2	49	81	95	98	98
3%	0	2	49	80	94	97	98
4%	0	2	48	79	94	97	98
5%	0	2	48	79	93	96	98
6%	0	2	47	78	92	96	98
7%	0	2	47	77	91	96	98
8%	0	2	46	76	90	95	98
9%	0	2	46	75	90	95	98
10%	0	2	45	75	89	94	98
11%	0	2	45	74	88	94	98
12%	0	2	44	73	87	94	98
13%	0	2	44	72	87	93	98
14%	0	2	43	71	86	93	97
15%	0	2	43	70	85	92	97
16%	0	2	42	70	84	92	97
17%	0	2	42	69	84	92	97
18%	0	2	41	68	83	91	97
19%	0	2	41	67	82	91	97
20%	0	2	40	66	81	91	97
21%	0	2	40	66	81	90	97
22%	0	2	39	65	80	90	97
23%	0	2	39	64	79	89	97
24%	0	2	38	63	78	89	97
25%	0	2	38	62	77	89	97
26%	0	2	37	61	77	88	97
27%	0	2	37	61	76	88	97
28%	0	2	36	60	75	87	97
29%	0	2	36	59	74	87	96
30%	0	2	35	58	74	87	96
31%	0	2	35	57	73	86	96
32%	0	2	34	57	72	86	96
33%	0	2	34	56	71	85	96
34%	0	2	33	55	71	85	96
35%	0	2	33	54	70	85	96
36%	0	2	32	53	69	84	96
37%	0	2	32	52	68	84	96
38%	0	1	31	52	67	83	96
39%	0	1	31	51	67	83	96
40%	0	1	30	50	66	83	96

41%	0	1	30	49	65	82	96
42%	0	1	29	48	64	82	96
43%	0	1	29	47	64	81	96
44%	0	1	28	47	63	81	95
45%	0	1	28	46	62	81	95
46%	0	1	27	45	61	80	95
47%	0	1	27	44	61	80	95
48%	0	1	26	43	60	79	95
49%	0	1	26	42	59	79	95
50%	0	1	25	42	58	79	95
51%	0	1	25	41	57	78	95
52%	0	1	24	40	57	78	95
53%	0	1	24	39	56	77	95
54%	0	1	23	38	55	77	95
55%	0	1	23	38	54	77	95
56%	0	1	22	37	54	76	95
57%	0	1	22	36	53	76	95
58%	0	1	21	35	52	75	95
59%	0	1	21	34	51	75	94
60%	0	1	20	33	50	75	94
61%	0	1	20	33	50	74	94
62%	0	1	19	32	49	74	94
63%	0	1	19	31	48	73	94
64%	0	1	18	30	47	73	94
65%	0	1	18	29	47	73	94
66%	0	1	17	28	46	72	94
67%	0	1	17	28	45	72	94
68%	0	1	16	27	44	71	94
69%	0	1	16	26	43	71	94
70%	0	1	15	25	43	71	94
71%	0	1	15	24	42	70	94
72%	0	1	14	23	41	70	94
73%	0	1	14	23	40	69	94
74%	0	1	13	22	40	69	93
75%	0	1	13	21	39	69	93
76%	0	1	12	20	38	68	93
77%	0	1	12	19	37	68	93
78%	0	1	11	18	36	67	93
79%	0	1	11	18	36	67	93
80%	0	0	10	17	35	67	93
81%	0	0	10	16	34	66	93
82%	0	0	9	15	33	66	93
83%	0	0	9	14	33	65	93
84%	0	0	8	13	32	65	93
85%	0	0	8	13	31	65	93
86%	0	0	7	12	30	64	93
87%	0	0	7	11	29	64	93
88%	0	0	6	10	29	63	93

89%	0	0	6	9	28	63	92
90%	0	0	5	8	27	63	92
91%	0	0	5	8	26	62	92
92%	0	0	4	7	26	62	92
93%	0	0	4	6	25	61	92
94%	0	0	3	5	24	61	92
95%	0	0	3	4	23	61	92
96%	0	0	2	3	22	60	92
97%	0	0	2	3	22	60	92
98%	0	0	1	2	21	59	92
99%	0	0	1	1	20	59	92
100%	0	0	0	0	19	58	92