

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

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO
CIVIL NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS PARA USO EM
PAVIMENTAÇÃO DE CICLOVIAS**

ANTÔNIO ZEFERINO DOS SANTOS
e
SAMUEL RUSSI E SOUSA

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

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

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO/2016

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

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO
CIVIL NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS PARA USO EM
PAVIMENTAÇÃO DE CICLOVIAS**

**ANTÔNIO ZEFERINO DOS SANTOS
e
SAMUEL RUSSI E SOUSA**

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:

**Prof.º Cláudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira, Dr. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**Prof.ª Eliane Kraus de Castro, Dr. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Eng.ª Jéssica Fernandes Tavares
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 07 de DEZEMBRO de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

SOUSA, SAMUEL RUSSI E

SANTOS, ANTÔNIO ZEFERINO DOS

Aproveitamento de Resíduos da Construção Civil na Produção de Concretos para Uso em Pavimentação de Ciclovias [Distrito Federal] 2016.

xii, 79 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. Materiais e Sistemas Construtivos

2. Resíduos da Construção Civil

3. Pavimentação de Ciclovia

4. Concreto de Demolição

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, A.Z. & SOUSA, S.R. (2016). Aproveitamento de Resíduos da Construção Civil para Uso em Pavimentação de Ciclovias. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 79 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: Antônio Zeferino dos Santos / Samuel Russi e Sousa

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Aproveitamento de Resíduos da Construção Civil na Produção de Concretos para Uso em Pavimentação de Ciclovias

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.

Antônio Zeferino dos Santos
SQSW 104 Bloco J Apartamento 301
70670-410 – Brasília/DF - Brasil

Samuel Russi e Sousa
SHIS Qi 26 Conjunto 14 Casa 10
71670-140 – Lago Sul/DF – Brasil

RESUMO

A indústria da construção civil representa, no Brasil, uma das maiores fontes de geração de lixo urbano, sendo responsável pelos chamados Resíduos da Construção Civil (RCC), que foram aumentando paralelamente com o crescimento das cidades e gerando problemas ambientais relacionados ao acúmulo e depósito incorreto desses materiais. Tendo esse fato em vista, o presente projeto buscou achar uma solução para melhorar a locação final dos RCC e devolvê-lo aos sistemas construtivos. Para tanto, fez-se necessário um estudo das legislações e normas brasileiras onde se concluiu que já existem leis que dão incentivo à reciclagem e especificam como esses resíduos devem ser alocados, além de normas de requisitos de reutilização dos RCC, mas que a efetividade de aplicação de ambas tem sido pouca.

É proposto no trabalho a utilização dos RCC como agregado miúdo para produção de concretos para uso em pavimentos rígidos de ciclovias no Distrito Federal (DF), sendo essa uma boa opção principalmente pela necessidade crescente de incentivo do uso de meios de transporte que ajudem no descongestionamento e na redução da poluição nas cidades.

Para determinar se a substituição do agregado miúdo convencional era possível foram realizados ensaios de caracterização do agregado miúdo reciclado obtido junto à empresa Fornecedora de Areia Bela Vista, de forma a comparar suas características com as exigidas pela norma de uso de agregados reciclados de RCC em pavimentação e concreto não estrutural, a NBR ABNT 15116:2004, e com os parâmetros de agregados convencionais. Além disso, foi produzido um concreto com uso desse material reciclado para verificar o seu comportamento em relação a um concreto convencional e também testar se tal concreto teria a capacidade de atender ao requisito de resistência à compressão uniaxial de 18 MPa de projeto do concreto utilizado na construção da ciclovia do Jardim Burle Marx, em Brasília.

Os resultados dos experimentos de caracterização puderam comprovar a adequabilidade do material reciclado da referida fonte em relação à composição granulométrica, à absorção e o tamanho dos agregados ideais, além de mostrar que estes tinham massa específica e massa unitária menores que a de agregados miúdos convencionais. Já os estudos com o concreto, mostraram que o uso de tais agregados miúdos reciclados neste não impossibilitou que a resistência mecânica necessária fosse atingida. Comprovou-se, no entanto, que o concreto com o material reciclado estudado tende a ter pior trabalhabilidade e maior relação água/cimento, sendo recomendável o uso de aditivos para a melhoria de tais características. Apesar disso, foi possível concluir com os dados obtidos que o concreto com agregado miúdo reciclado testado tem condições de ser usado em pavimentos rígidos de ciclovias.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	OBJETIVOS	2
1.1.1.	Objetivos Específicos	2
2.	RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	3
2.1.	LEIS E NORMAS DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	3
2.1.1.	Definições Específicas	3
2.1.2.	Classificações	4
2.1.3.	Legislações Reguladoras	5
2.1.4.	Legislação no Distrito Federal	6
2.1.5.	Normas Auxiliadoras às Leis	9
2.1.6.	Efetividade das Leis Vigentes	10
2.2.	A RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	11
2.2.1.	Resíduos da Construção Civil no Brasil e no Mundo	13
2.2.2.	Parâmetros de Reciclagem Utilizados no Brasil	17
2.2.2.1.	Requisitos do Agregado Reciclado Destinado a Camadas de Pavimentação	17
2.2.2.2.	Requisitos dos Agregados Reciclados em Concreto Não Estrutural	19
2.2.3.	Comparação entre as Exigências para Reciclagem dos Resíduos da Construção Civil no Brasil e no Mundo	20
2.2.4.	Propriedades dos Agregados Reciclados	22
3.	O CRESCIMENTO DAS CICLOVIAS E A POSSÍVEL DESTINAÇÃO DO RCC	24
3.1.	CONTEXTO DAS CICLOVIAS NO BRASIL	24
3.2.	O CRESCIMENTO DAS CICLOVIAS NO DISTRITO FEDERAL	25
3.3.	O CONCRETO E OS OUTROS PAVIMENTOS EM CICLOVIAS	27
3.3.1.	Tipos de Pavimentos de Concreto e Seus Elementos	28
3.3.2.	Definição do Traço e Métodos de Dimensionamento	32
3.3.3.	Métodos de Execução e Cuidados Especiais	36
3.4.	EXIGÊNCIAS DE PROJETO DE CICLOVIAS NO DISTRITO FEDERAL	38
4.	METODOLOGIA	39
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	40
4.1.1.	Amostragem	41

4.1.2.	Ensaio de Laboratório – Agregado Miúdo (Areia Reciclada)	42
4.1.2.1.	Composição Granulométrica	42
4.1.2.2.	Massa Específica	44
4.1.2.3.	Massa Unitária	46
4.1.2.4.	Absorção dos Agregados	47
4.2.	ENSAIO DE LABORATÓRIO – CONCRETO	49
4.2.1.	Traço Experimental e Moldagem do Concreto	49
4.2.1.1.	Características do Concreto	53
4.2.2.	Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto	54
4.2.3.	Resistência à Tração na Compressão Diametral	56
5.	RESULTADOS E ANÁLISES	58
5.1.	CARACTERÍSTICAS DA AREIA RECICLADA	58
5.1.1.	Composição Granulométrica	59
5.1.2.	Massa Específica	61
5.1.3.	Massa Unitária	62
5.1.4.	Absorção dos Agregados	63
5.2.	ESTUDOS DO CONCRETO	64
5.2.1.	Traços Experimentais de Concreto	65
5.2.2.	Características Mecânicas do Concreto	67
5.3.	REQUISITOS DA ABNT NBR 15116:2004 E OUTRAS NORMAS	69
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
6.1.	CONCLUSÃO	73
6.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Estimativa de geração de RCC em alguns países. Fonte: Adaptado de Córdoba (2010)	14
Tabela 2-2 – Composição média dos materiais de RCC de obras no Brasil. Fonte: Silva Filho (2005 <i>apud</i> Santos, 2009)	14
Tabela 2-3 – Requisito gerais para agregado reciclado destinado a camadas de pavimentação	18
Tabela 2-4 – Requisito gerais para agregado reciclado destinado a camadas de pavimentação	18
Tabela 2-5 – Requisito para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural	19
Tabela 3-1 – Materiais utilizados em pavimentos de ciclovia. Fonte: Manual para Design de Ciclovias de Londres	28
Tabela 4-1 – Módulo de finura e zonas de utilização	44
Tabela 4-2 – Planilha do traço experimental do concreto	50
Tabela 5-1 – Composição granulométrica do agregado miúdo (areia reciclada)	59
Tabela 5-2 – Massa específica do agregado miúdo (areia reciclada)	61
Tabela 5-3 – Massa unitária da areia reciclada – Estado Compactado – Método A	62
Tabela 5-4 – Massa unitária da areia reciclada – Estado Solto – Método C	62
Tabela 5-5 – Estudo dos traços pilotos de concreto	65
Tabela 5-6 – Massa específica do concreto	66
Tabela 5-7 – Consumo de cimento (C)	67
Tabela 5-8 – Resistência do concreto a compressão e a tração diametral – 7 dias	68
Tabela 5-9 – Resistência do concreto à compressão e à tração diametral – 28 dias	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Representação esquemática do conceito “Ciclo Fechado da Construção”. Fonte: Adaptado de Mulder <i>et al.</i> (2007)	12
Figura 2-2 – Tratamento distinto para os quatro tipos de Resíduos de Construção e Demolição. Fonte: Adaptado de Mulder <i>et al.</i> (2007)	13
Figura 2-3 – Total de RCC Coletados no Brasil (tx1000/ano). Fonte: ABRELPE (2014)	15
Figura 2-4 – Informação nacional sobre o tipo de processamento entre os 392 municípios brasileiros com serviço de manejo de RCC. Fonte: PNSB (IBGE, 2010)	16
Figura 2-5 – Informação sobre o tipo de processamento entre 22 municípios com serviço de manejo de RCC – região Centro-Oeste (2008). Fonte: PNSB (IBGE, 2010)	16
Figura 2-6 – Redução da argamassa no concreto reciclado - Imersão do concreto em solução ácida e depois em água limpa. Fonte: Adaptado de Xiao (2006)	23
Figura 3-1 – Pavimentos de concreto simples	29
Figura 3-2 – Pavimentos de concreto simples com barra de transferência	30
Figura 3-3 – Pavimentos de concreto com armadura distribuída descontínua	30
Figura 3-4 – Pavimento de concreto com armadura distribuída contínua	31
Figura 3-5 – Exemplo de pavimento de concreto protendido	31
Figura 3-6 – Caminhão estacionado sobre uma ciclovía	34
Figura 3-7 – Modelo de placa para discretização de uma ciclovía	35
Figura 3-8 – 0,5 tnf – Tensão na parte superior da placa	35
Figura 3-9 – 0,5 tnf – Tensão na parte inferior da placa	35
Figura 3-10 – 0,5 tnf – Deslocamento máximo da placa de ciclovía	35
Figura 4-1 – Fluxograma da metodologia do projeto	40
Figura 4-2 – Areia fina reciclada	41
Figura 4-3 – Areia média reciclada	41
Figura 4-4 – Britador	41
Figura 4-5 – Amostra de areia reciclada utilizada no ensaio de granulometria	43
Figura 4-6 – Série de peneira utilizadas no ensaio do agregado miúdo	43
Figura 4-7 – Secagem do agregado miúdo em estufa	45
Figura 4-8 – Água e agregado miúdo no frasco de Chapman	45
Figura 4-9 – Ensaio de determinação de massa unitária pelo Método A	47
Figura 4-10 – Pesagem do recipiente preenchido	47

Figura 4-11 – Amostra após saturação	48
Figura 4-12 – Amostra em condição não ideal para o cálculo de absorção	48
Figura 4-13 – Amostra em condição saturada de superfície seca	48
Figura 4-14 – Material para aumento do teor de argamassa seca	51
Figura 4-15 – Traço experimental de concreto com agregado natural	51
Figura 4-16 – Teste do slump do concreto	52
Figura 4-17 – Moldagem dos corpos de prova de concreto	52
Figura 4-18 – Corpos de Prova preparados para ensaio	54
Figura 4-19 – Prensa utilizada nos ensaios de resistência mecânica do concreto	54
Figura 4-20 – Corpo de prova posicionado na prensa	55
Figura 4-21 – Corpo de prova rompido à compressão uniaxial	55
Figura 4-22 – Corpo de prova no ensaio à tração na compressão diametral	56
Figura 5-1 – Curva granulométrica do agregado miúdo (areia reciclada)	60
Figura 5-2 – Comparativo da massa específica do agregado miúdo	62
Figura 5-3 – Comparativo de absorção dos agregados	64

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 4.1: Coeficiente de Uniformidade	44
Equação 4.2: Coeficiente de Curvatura	44
Equação 4.3: Massa específica pelo frasco de Chapman	45
Equação 4.4: Massa unitária	47
Equação 4.5: Absorção	48
Equação 4.6: Consumo de cimento por metro cúbico	53
Equação 4.7: Massa específica do concreto	53
Equação 4.8: Resistência à compressão uniaxial da amostra de concreto	55
Equação 4.9: Resistência à tração na compressão diametral do concreto	57

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
Ademi	Associação do Mercado Imobiliário do Distrito Federal
AGEFIS	Agência de Fiscalização do Distrito Federal
ARC	Agregado de Resíduo de Concreto
ARM	Agregado de Resíduo Misto
ASTM	<i>American Society for Testing of Materials</i>
Cc	Coefficiente de Curvatura
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
Cu	Coefficiente de Uniformidade
DF	Distrito Federal
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EUA	Estados Unidos da América
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
f_{cj}	Resistência à compressão do concreto prevista para a idade de “j” dias
GDF	Governo do Distrito Federal
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LEM	Laboratório de Ensaio de Materiais
MF	Módulo de Finura
NBR	Norma Brasileira
NOVACAP	Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
PEV	Pontos de Entrega de Pequenos Volumes
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
RCC	Resíduos da Construção Civil

RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
Sisnama	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SLU	Serviço de Limpeza Urbana
SNIS	Sistema Nacional de Informações em Saneamento
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
UnB	Universidade de Brasília
VTT	<i>Technical Research Centre of Finland</i>

1. INTRODUÇÃO

O Distrito Federal (DF) e as cidades do entorno passaram por grandes crescimentos populacionais desde o início de sua existência. Em meados de 2015, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) já indicava uma população total da região de 2,91 milhões de pessoas, uma quantidade que vai bem além das expectativas de muitos anos atrás. O número representou um crescimento de 2,19% que, apesar de ser inferior ao do ano anterior, ainda assim foi o maior do país, sendo mais que o dobro da média nacional, que é de 0,8%.

Como se sabe, um dos setores mais alavancados quando uma população cresce, é o setor da construção civil. Apesar do setor ter desacelerado em 2016 em consequência da conjuntura econômica do país, essa foi por grande parte da história da região uma das áreas que mais movimentou dinheiro no DF, apresentando alguns grandes momentos de prosperidade para essa indústria. Entre os anos de 2005 e 2010 ocorreu o último grande momento. De acordo com a Associação do Mercado Imobiliário do Distrito Federal (Ademi), foi registrado nesse período um crescimento de 80% do setor imobiliário, muito devido à demanda por uma expansão para as cidades satélites e do entorno, já que a zona central do DF começou a ficar saturada e a apresentar preços elevados.

Apesar de muitas das consequências negativas causadas por esse desenvolvimento da construção serem previsíveis, no Distrito Federal não foram tomadas medidas preventivas eficazes de combate a esses problemas gerados, mesmo que vários desses pudessem ter sido observados em situações ocorridas em outros lugares. O maior exemplo disso foi o crescimento exponencial dos chamados Resíduos da Construção Civil (RCC), provenientes das obras de construção civil. Esses resíduos foram sendo descartados e acumulados de forma inadequada ao longo dos anos, sendo um dos principais locais de deposição final o Aterro do Jockey Club.

O referido aterro, que também é conhecido como “Lixão da Estrutural”, está em funcionamento desde os anos 60 e é o maior de toda a América Latina, tendo acumulado milhões de toneladas de lixo em seus mais de 135 hectares. Ele constitui o chamado aterro controlado por não possuir fundo impermeabilizado ou coletores de chorume e por ficar longos períodos sem cobertura superficial, características que propiciam a contaminação do lençol freático e a propagação de doenças.

De acordo com o Relatório dos Serviços de Limpeza Urbana e Manejo dos Resíduos Sólidos do Distrito Federal de 2015, 8,9 mil toneladas de lixo são recebidas nesse aterro diariamente, sendo 6 mil toneladas composta pelo RCC.

Outra destinação frequente dos RCC são os depósitos irregulares, que segundo o Sistema de Limpeza Urbana (SLU) chegam a mais de mil nos dias de hoje. Os resíduos são levados para estes locais em volumes relativamente pequenos principalmente por carroceiros, que de acordo com SLU já eram cerca de 3000 no ano de 2008, mas que hoje são bem mais.

Nota-se assim, que o DF apresenta uma certa carência de atitudes em relação à melhor destinação dos RCC, visto que eles têm contribuição considerável para os problemas causados pelo lixo urbano. Medidas como a criação do Aterro Sanitário Oeste, são muito boas em vários sentidos, mas essa especificamente não mudará a situação dos RCC, já que não será enviado este tipo de resíduo para lá. Encontrar soluções que possibilitem a redução e reuso de alguma forma desses materiais constituem, dessa forma, um dos grandes desafios para as administrações públicas nos dias de hoje, que deve ser enfrentado antes que ocorra um agravamento da atual situação, já não tão favorável em razão da poluição já existente.

1.1. OBJETIVOS

Nesse trabalho pretende-se estudar a viabilidade técnica do aproveitamento de Resíduos da Construção Civil (RCC), em especial o agregado miúdo obtido a partir do concreto reciclado, para uso na produção de concreto para pavimentação de ciclovias. Pretende-se analisar a potencialidade da substituição total do agregado miúdo natural pelo reciclado nesse concreto.

1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar quais as exigências normativas para o uso de agregado miúdo reciclado na produção de concreto;
- Pesquisar quais são os requisitos já existentes para o concreto utilizado na pavimentação de ciclovias no Distrito Federal;
- Analisar a viabilidade técnica da produção do concreto reciclado produzido com agregados provenientes de demolição, para a construção dessas ciclovias, através de ensaios experimentais para determinação de propriedades físicas e mecânicas; e
- Comparar qualitativamente as características do concreto com agregado miúdo reciclado com as do concreto convencional.

2. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

O estudo dos resíduos urbanos e, conseqüentemente, dos Resíduos da Construção Civil (RCC) é possível somente com o entendimento de todos os aspectos que os envolvem, tais como legislações e normas reguladoras, técnicas de reaproveitamento existentes e propriedades desses materiais, entre outros. Somente a partir desse conhecimento pode-se compreender a situação do país e assim buscar soluções para o grave problema representado por esses resíduos.

2.1. LEIS E NORMAS DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

As leis e normas relativas aos Resíduos da Construção Civil (RCC) são de sùmula importância para dar uma destinação correta a estes. Nestas legislações e normatizações podem ser encontrados diretrizes a serem seguidas no manejo dos RCC e também alguns requisitos mínimos que os materiais devem apresentar. Elas também ajudam a entender as principais limitações e fatores impeditivos encontrados pelos recicladores.

2.1.1. DEFINIÇÕES ESPECÍFICAS

A ABNT NBR 10004:2004 define resíduos sólidos como “resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição”. Como se pode observar, os resíduos provenientes das atividades da indústria da construção civil não são diretamente citados nesta definição. Porém, interpretando, temos que os mesmos estão inclusos nas atividades industriais ou mesmo nas atividades de serviços.

No intuito de trabalhar com critérios mais específicos utiliza-se uma resolução elaborada para os Resíduos da Construção Civil (RCC): a Resolução 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. De acordo com esta resolução, os RCC podem ser definidos como:

“Os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha”

(Resoluções do CONAMA 1984-2012, página 805)

2.1.2. CLASSIFICAÇÕES

Assim como acontece com as definições relacionadas aos Resíduos da Construção Civil (RCC), a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e as Resoluções do CONAMA também dão classificações diferentes para os RCC. A CONAMA 307 os divide em quatro classes:

- **Classe A:** são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
 - a) De construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
 - b) De construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas, placas de revestimento, etc.), argamassa e concreto;
 - c) De processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.
- **Classe B:** são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;
- **Classe C:** são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam sua reciclagem ou recuperação;
- **Classe D:** são resíduos perigosos oriundos de processos de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Essa classificação já inclui as modificações que foram feitas pelas resoluções 348 (16 de agosto de 2004) e 431 (24 de maio de 2011), que modificaram a classificação da Resolução

307, inserindo o amianto como material perigoso (classe D) e mudando a classificação do gesso, de Classe C para a Classe B, respectivamente.

Já a ABNT NBR 10004:2004 classifica os resíduos sólidos diretamente de acordo com a atividade que o gerou e também de acordo com seus constituintes. Nesse sentido, essa norma classifica os resíduos sólidos em:

A) Resíduos classe I

- Perigosos.

B) Resíduos classe II

- Não perigosos;
- Resíduos classe II A – Não inertes;
- Resíduos classe II B – Inertes.

Uma grande parte dos RCC podem ser enquadrados na definição proposta pela classe II B: “quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007:2004, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006:2004, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor”.

Uma observação importante é que, caso exista a presença de tintas, solventes, óleos e outros derivados nos resíduos, a classificação dos mesmos deverá ser alterada para classe I ou classe II A.

Para o desenvolvimento desse trabalho optou-se pela definição mais específica utilizada pelo CONAMA na Resolução 307.

2.1.3. LEGISLAÇÕES REGULADORAS

A ideia de estabelecer regras mais rígidas no país inteiro em relação a maneira como diferentes tipos de resíduos devem ser tratados não é nova. A providência mais recente nesse sentido foi tomada em 2 de agosto de 2010 com a criação da Lei nº 12.305, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Entre outras metas, a referente lei visa criar uma cultura de gerenciamento e gestão dos resíduos sólidos priorizando a não geração, redução, reutilização, reciclagem, o tratamento destes e a disposição final ambientalmente adequada dos

rejeitos, além de instituir a responsabilidade compartilhada entre os envolvidos na fabricação, comércio, importação, consumo, distribuição, coleta e manejo, por todo o ciclo de vida dos resíduos.

2.1.4. LEGISLAÇÃO NO DISTRITO FEDERAL

Apesar da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) ser bem generalista em seus princípios, ela foi muito importante, principalmente por incumbir os Estados, o Distrito Federal (DF), os Municípios e os particulares de tomarem iniciativas, por meio da criação de planos, entre outros, relativos à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. Para o presente estudo, que trata mais especificamente dos Resíduos da Construção Civil (RCC) no DF, o mais relevante reflexo surgido de tal política foi a aprovação da Lei nº 4.704, de 20 de dezembro de 2011, a qual dispõe sobre a gestão integrada de Resíduos da Construção Civil e de resíduos volumosos e dá outras providências. Sendo sua compreensão fundamental para entender as principais limitações e aberturas legais para quem tem o interesse em realocar e/ou reutilizar os RCC.

A Lei nº 4.704 veio com o objetivo de tentar estabelecer uma consciência em relação à destinação dos RCC, entre outros, tendo como principais diretrizes: a redução, a reutilização, a reciclagem e a correta destinação de resíduos; a melhoria da manutenção da limpeza urbana, a responsabilidade do gerador pelo resíduo por ele gerado, a responsabilidade do transportador de resíduos e a melhoria da infraestrutura necessária para a melhoria desse sistema como um todo; dentre as mais importantes. Em outras palavras, procurava-se com esta lei botar em prática o que era almejado e proposto pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos, enquadrando seus objetivos à realidade específica do DF.

Pode-se citar que entre as principais determinações desta lei está a criação do Programa Distrital de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos (referente à volumes de resíduos menores que um metro cúbico) e o Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos (para volumes maiores), sendo o segundo, de forma geral, o mais relevante no caso da construção civil. Este esclarece:

“Os geradores de grandes volumes de Resíduos da Construção Civil cujos empreendimentos requeiram a expedição de alvará de aprovação e de construção de edificações, de reforma ou reconstrução, de demolição, de muros de arrimos, de movimento de terra e outros previstos na legislação distrital devem elaborar e implementar Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, pelos órgãos ou entidades do Sistema Nacional do Meio Ambiente – Sisnama, pelo Sistema Nacional de Vigilância Sanitária – SNVS e pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Inmetro, estabelecendo os procedimentos específicos de cada obra para redução da geração de resíduos e para manejo e destinação ambientalmente adequados de todos os resíduos gerados”

(Art.10 da seção III, Capítulo III, Lei nº 4.704)

Dessa forma, os geradores de resíduos devem especificar em seus respectivos planos: procedimentos a serem adotados para a não geração de entulhos; procedimentos a serem adotados em obras de demolição (com desmontagem seletiva) e os agentes cadastrados e licenciados a serem contratados para os serviços de transporte, triagem e destinação de resíduos; entre outros. Além disso, no plano também deve haver uma visão geral do que será gerado em determinada obra, sendo explicitado, por exemplo, os principais materiais destinados para descarte, as principais metas e soluções que serão dedicadas a redução desses materiais e o responsável por monitorar tais ações e procedimentos. Vale lembrar que o Poder Executivo é o responsável por regulamentar os procedimentos de apresentação, análise e fiscalização dos Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil para as obras públicas e privadas.

Tendo-se em vista os principais objetivos e diretrizes da Lei Nº 4.704 e do Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, é possível analisar seus outros aspectos. Quanto a captação, processamento e a destinação dos resíduos pode-se observar que a lei faz diversas determinações de controle desses processos. Destaca-se no capítulo V desta que os resíduos devem ser levados à locais específicos denominados Pontos de Entrega de Pequenos Volumes (PEV) e áreas para recepção (de grandes volumes), em locais preferencialmente degradados pela extração mineral. Existe a previsão que nos próximos anos sejam construídos 58 PEV. É determinado ainda que os RCC, após sua captação, devem ser triados, aplicando-se a eles, sempre que possível, processos de reutilização, desmontagem e reciclagem que evitem sua destinação final em aterro sanitário. Apesar disso, também é necessária uma prévia triagem à sua coleta pelos próprios geradores nos canteiros de obras ou nas áreas receptoras, segundo a

classificação definida pela legislação federal. Esta classificação é definida pela já mencionada Resolução 307 do CONAMA.

Quanto às responsabilidades e atribuições, o Capítulo VIII da lei exalta o fato de que os geradores de resíduos são os responsáveis por tudo que produzem e também por sua segregação, acondicionamento, coleta, transporte, tratamento, transbordo, manejo e destinação final. Como na maioria das vezes o gerador terceiriza o serviço transporte dos resíduos da construção, sendo esse realizado pelo serviço público ou pela iniciativa privada (quando estiver devidamente cadastrado e autorizado pelo Poder Executivo), o transportador é quem tem a responsabilidade pelo resíduo após coletá-lo. Além disso, é terminantemente proibido ao transportador: transportar material com volume maior que o permitido, sujar vias de transporte enquanto carregando resíduos, realizar operação de transporte sem o Controle de Transporte de Resíduos (documento descritivo da operação de transporte de resíduos), estacionar caçambas em locais públicos quando estas não estiverem sendo utilizadas para o depósito de resíduos. Os transportadores também ficam obrigados a operarem com veículos adequados, de dimensões permitidas e com a devida proteção da carga e com a documentação regularizada.

Finalmente, em relação aos receptores dos RCC, a Lei nº 4.704 informa que estes têm que ter licenciamento ambiental emitido pelo órgão ou entidade competente e que os operadores das áreas para recepção de grandes volumes estão obrigados a realizar a triagem dos resíduos e dar a destinação final a eles que esteja definida pela Legislação Federal específica, priorizando-se sua reutilização ou reciclagem.

É importante notar que os fabricantes de materiais da construção tampouco estão livres de responsabilidade, como é explicitado pela referida lei:

“Os estabelecimentos industriais e comerciais dedicados a produção e distribuição de materiais de construção de qualquer natureza devem informar sobre o manejo e a destinação adequada dos resíduos, bem como sobre os endereços dos locais destinados à recepção de Resíduos da Construção Civil, na forma preconizada no Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos”

(Art.26 da seção IV, Capítulo XIII, Lei nº 4.704)

Outra parte que merece destaque na Lei Nº 4.704 é o capítulo IX, referente aos instrumentos econômicos. Nele é dito que o Governo do Distrito Federal (GDF) pode conceder incentivos fiscais ou crédito às instituições que se dispuserem a realizar atividades, investimentos e gerenciamento relativos a reciclagem e reaproveitamento, além de conceder à

iniciativa privada os serviços de manejo de grandes volumes de RCC, mediante a cobrança de preço público pelo serviço prestado.

Por fim, é relatado pela lei que infrações administrativas cometidas contra a gestão integrada de RCC são passíveis de multas de até R\$ 1 milhão (Um milhão de reais) e serão processadas administrativamente de acordo com os dispositivos processuais e materiais da Lei Federal nº 9.605, de 1998; do Decreto federal nº 6.514, de 2008; e do Decreto federal nº 7.404, de 2010, inclusive em relação à aplicação das penas previstas.

2.1.5. NORMAS AUXILIADORAS ÀS LEIS

É importante notar que, antes mesmo da existência das leis anteriormente mencionadas, já existiam diversas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) relativas à manipulação dos resíduos sólidos, sendo que as principais foram elaboradas em 2004. Ao contrário do que acontece com as normas classificatórias dos resíduos sólidos da construção, essas normas constituem ferramentas de uso prático, ao determinarem como deve ser o correto manejo dos resíduos, em áreas específicas. A seguir são listadas as principais normas:

- ABNT NBR 15112:2004: responsável por normatizar os procedimentos de recebimento e triagem dos resíduos para uma posterior valorização e reaproveitamento. Essa norma é fundamental à logística dos resíduos pois estabelece critérios de destinação para os resíduos e também critérios para que os mesmos sejam processados (transformados) e, assim, reaproveitados;
- ABNT NBR 15113:2004: propõe soluções para projeto, implantação e operação de área para disposição dos resíduos que se enquadram na classe A da Resolução 307 do CONAMA. Essa norma prevê que é fundamental considerar a finalidade futura da área em que os resíduos serão depositados, ou seja, é necessário pensar se os mesmos ficarão depositados em uma área que não será utilizada para outra finalidade no futuro ou, se necessário, quais as possíveis formas de reaproveitar essa mesma área no futuro; e
- NBR ABNT 15114:2004: traz as diretrizes para projeto, implantação e operação de área de reciclagem. Essa norma determina parâmetros para a reciclagem dos resíduos enquadrados na classe A da Resolução 307 do CONAMA. Ela prevê que os mesmo podem ser transformados em agregados e que estes, por sua vez, podem ser reutilizados no setor da construção civil.

Há também a ABNT NBR 15116:2004 que trata dos requisitos mínimos que RCC devem ter para poderem ser utilizados como agregados em concretos não reciclados e em camadas de pavimentação. Esta será explicada de forma mais aprofundada no tópico 2.2.2.1 deste trabalho.

2.1.6. EFETIVIDADE DAS LEIS VIGENTES

A Lei nº 12.305, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), e a Lei Distrital nº 4.704 foram muito importantes, pois representaram a intenção e a preocupação do governo federal e distrital em melhorar a gestão dos resíduos. Apesar das boas intenções, tais leis não conseguiram alcançar grande efetividade no Distrito Federal (DF), o que pode ser explicado por diversos motivos.

Muitas vezes o fator mais impeditivo ao correto gerenciamento dos resíduos é a falta de fiscalização. Um exemplo disso é a não implementação efetiva dos Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, que deveriam ser elaborados pelas empresas com o intuito de planejarem e preverem com antecedência os procedimentos executados com os resíduos, mas raramente são observados nas obras. Além do plano, é possível notar que o transporte dos resíduos também carece de uma melhor fiscalização. O despejo de material em local indevido seria reduzido drasticamente caso o transporte fosse realizado exclusivamente por transportadores cadastrados e que utilizassem o Controle de Transporte de Resíduos, pois neste deveriam ser declarados o gerador, a origem, a quantidade, a descrição e o destino dos resíduos. Na prática, o que se observa é que muitas vezes o lixo é despejado em locais inadequados e, por isso, sua origem não é declarada. Em 2015, a Agência de Fiscalização do Distrito Federal (AGEFIS) estimou que existiam mais de mil pontos de despejo irregular (clandestinos) de Resíduos da Construção Civil (RCC) no DF.

As falhas do sistema também são provenientes da falta de estrutura adequada e da falta de conhecimentos e técnicas de reaproveitamento de materiais. A lei estabelece que os RCC devem sofrer triagem, de modo a separá-los em classes, antes mesmo de sua coleta, porém o fato de o lixo ser, muitas vezes, misturado novamente no ponto de deposição por falta de uma boa destinação de reuso ou reciclagem desencoraja essa separação prévia. Nesse ponto é observado outro grave problema. Como mencionado anteriormente, os fabricantes de materiais utilizados em construções são obrigados a fornecerem informações sobre o correto manejo e a

destinação adequada dos resíduos, bem como sobre os endereços dos locais destinados à recepção deles, porém os resíduos formados quase sempre vão ser compostos por diversos materiais misturados. Os produtores dos materiais são capazes de fornecer informações necessárias para o manejo dos elementos que eles próprios produzem, mas não tem, de certa forma, condições de dar a correta destinação quando estes estão juntos com outros materiais. Esse fato constitui uma brecha na lei, que deve ser solucionada a partir da invenção de novas tecnologias de reciclagem e reutilização dos resíduos ou de mudança na lei para previsão de procedimentos a serem adotados nesse tipo de situação.

2.2. A RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Tendo em vista que um dos principais fatores impeditivos existentes para a aplicação das leis de gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil (RCC) é a falta de técnicas de reaproveitamento, há algum tempo começou-se o estudo de maneiras de reciclar estes. É claro que tal ideia de reciclagem não é nova já tendo aparecido na literatura de outros países. Na Rússia, por exemplo, Glushge (1946) já investigava maneiras de usar o concreto de demolição desde a década de 40 em seu trabalho *“The work of the Scientific Research Institute. Gidrotskhnicheskoge Stroitelstvo”*.

A reciclagem é uma saída interessante para o problema, pois não só acarreta a redução dos resíduos, dos impactos socioeconômicos, dos impactos ambientais e da necessidade de extração de matérias primas, como também tem potencial para gerar ganhos financeiros para os seus praticantes. Somente através do estudo e desenvolvimento de técnicas viabilizadoras de reciclagem e reutilização será possível estabelecer o chamado “Ciclo Fechado da Construção”, processo no qual grande parte dos materiais utilizados na construção depois de demolidos serão tratados para serem reutilizados novamente no ciclo da construção.

A Figura 2-1 definida por Mulder *et al.* (2007) – adaptada – mapeia o ciclo fechado da construção civil.

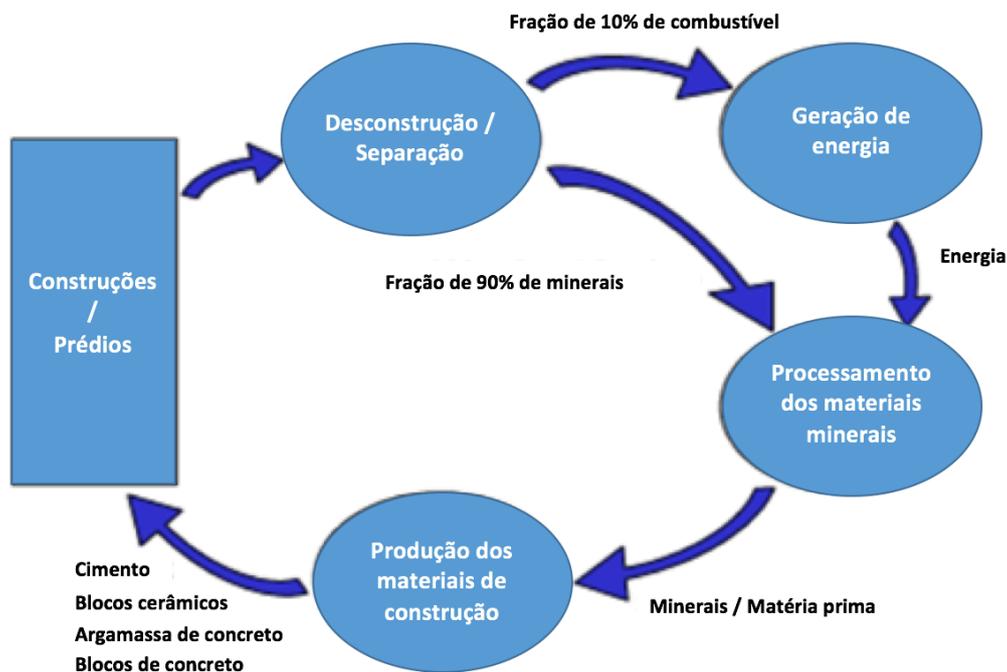


Figura 2-1 – Representação esquemática do conceito “Ciclo Fechado da Construção”.

Fonte: Adaptado de Mulder *et al.* (2007)

Para exemplificar o ciclo, pode-se pensar no caso de um edifício cuja vida útil chegou ao fim. Usualmente, os resíduos se tornariam entulho, porém no processo proposto por Mulder *et al.* (2007), estes deveriam ser devidamente desmontado e separados. A parcela correspondente aos resíduos combustíveis seria utilizada na geração de energia para transformar a fração mineral novamente em matéria prima (agregado, por exemplo). Essa matéria prima geraria novos produtos para construção, fechando e reiniciando assim o ciclo.

Os principais estudos de reciclagem na área se iniciaram com pesquisas que tem como foco os resíduos da construção de Classe A, baseada na classificação da Resolução 307 do CONAMA. As justificativas para essa escolha são bem simples: materiais da Classe A representam uma grande parcela do que é gerado em obras, sendo produzidos com quase todos os tipos de métodos construtivos. Além disso, estes possuem propriedades que os tornam utilizáveis como agregados.

Mulder *et al.* (2007) propôs na Figura 2-2 que os resíduos Classe A podem ser reciclados por meio de uma ou mais das seguintes técnicas: tratamento térmico, processos de britagem e reprocessamento. Após o processo de reciclagem os mesmos podem ser usados para produção de cimento, produção de tijolos e produção de concreto, a depender do resíduo reciclado. Esse processo já apresenta uma visão um pouco mais detalhada do mencionado “Ciclo Fechado da Construção”.

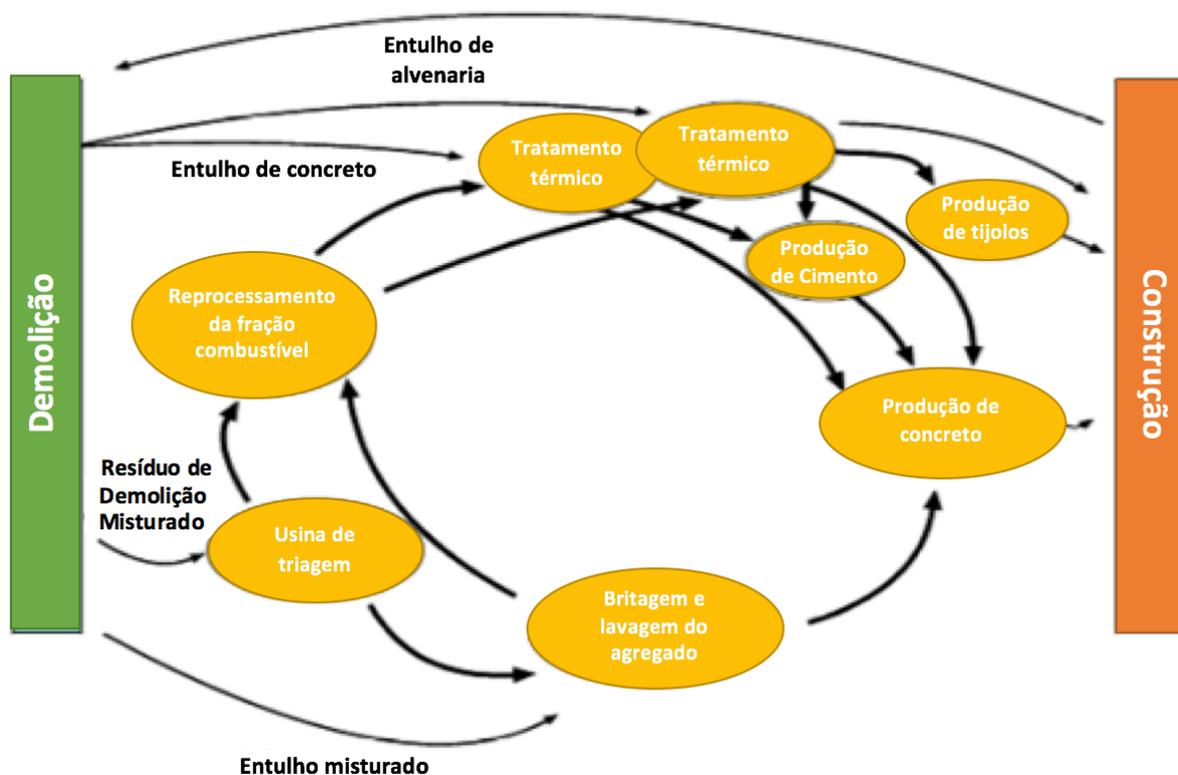


Figura 2-2 – Tratamento distinto para os quatro tipos de Resíduos de Construção e Demolição. Fonte: Adaptado de Mulder *et al.* (2007)

2.2.1. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL E NO MUNDO

De acordo com o relatório Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (2014), da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), o Brasil produz cerca de 44 milhões de toneladas/ano de Resíduos da Construção Civil (RCC), o que o coloca em uma posição moderada quando comparado a outros países.

A Tabela 2-1 retirada desse relatório mostra que países como Alemanha e Estados Unidos são os maiores produtores de RCC, porém deve-se lembrar que os mesmos também são grandes recicladores dos mesmos. O Brasil, por sua vez, não produz nem metade dos RCC desses países, mas ainda deixa muito a desejar no reuso e na reciclagem desse tipo de material.

Tabela 2-1 – Estimativa de geração de RCC em alguns países. Fonte: Adaptado de Córdoba (2010)

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

De acordo com a Tabela 2-2 apresentada por Silva Filho (2009), 29% da composição dos RCC gerados no Brasil é de concreto e blocos, ou seja, podem ser reciclados. Isso representa um potencial muito grande que não é bem explorado por empresas e, tampouco, incentivado como deveria pelo governo.

Tabela 2-2 – Composição média dos materiais de RCC de obras no Brasil. Fonte: Silva Filho (2005 *apud* Santos, 2009)

Componentes	Porcentagem
Argamassa	63
Concreto e blocos	29
Outros	7
Orgânicos	1
Total	100

No Brasil, de forma geral, a reciclagem do concreto e blocos tem sido voltada para produção de agregados que podem ser usados na construção de camadas de pavimentação e também para produção de concreto não estrutural reciclado. O uso para concreto com fins estruturais ainda depende de estudos mais aprofundados de viabilização e normatização dessa tecnologia no Brasil, devido à grande falta de uniformidade dos materiais e, consequentemente, das propriedades dos resíduos.

Ao se analisar o cenário brasileiro de acordo com as suas cinco regiões percebe-se uma grande discrepância na coleta dos RCC. A Figura 2-3 elaborada pelo relatório da ABRELPE

indica que boa parte dos resíduos são coletados no Sudeste e no Nordeste. Essa mesma figura indica que houve um aumento de 4,1% na coleta entre os anos de 2013 e 2014, o que pode tanto significar uma melhora na coleta dos RCC quanto um aumento na produção dos mesmos.

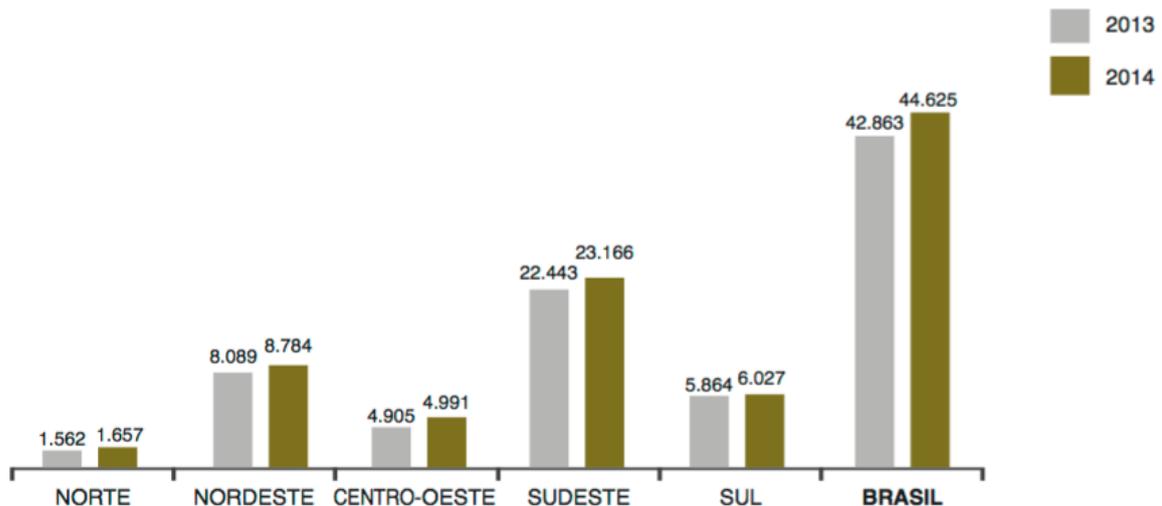


Figura 2-3 – Total de RCC Coletados no Brasil (tx1000/ano). Fonte: ABRELPE (2014)

Somente coletar os RCC não é suficiente para melhorar a forma de como se lida com esses resíduos. Como foi mostrado, é necessário alimentar o “Ciclo Fechado da Construção” e para que isso aconteça uma etapa essencial é a triagem dos resíduos. De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) realizada pelo IBGE em 2010, “em relação ao manejo dos RCC, dos 5.564 municípios brasileiros, 4.031 municípios (72,44%) apresentam serviços de manejo dos RCC. Contudo, apenas 392 municípios (9,7%) possuem alguma forma de processamento dos RCC”. Tais formas são discriminadas na Figura 2-4.

Como mostrado por Mulder *et al.* (2007) outras etapas recorrentes e importantes no processo de reciclagem são a trituração e a posterior classificação granulométrica dos agregados gerados. A Figura 2-4 mostra que não existem mais do que 20 municípios preparados para realizar estes procedimentos.

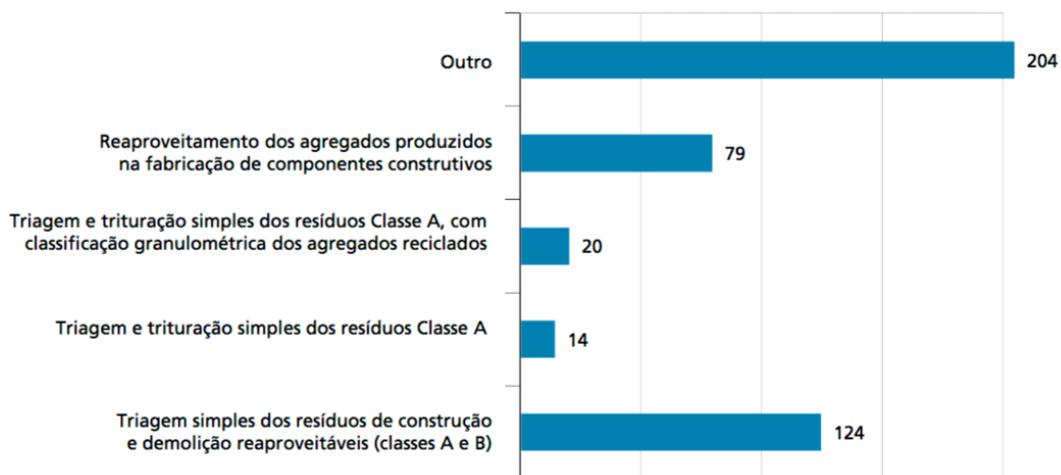


Figura 2-4 – Informação nacional sobre o tipo de processamento entre os 392 municípios brasileiros com serviço de manejo de RCC. Fonte: PNSB (IBGE, 2010)

Na Figura 2-5 é trazida uma informação análoga a da Figura 2-4, porém com dados dos municípios da região centro-oeste, sendo estes números os mais relevantes, pois o trabalho aqui apresentado foca na região do DF.

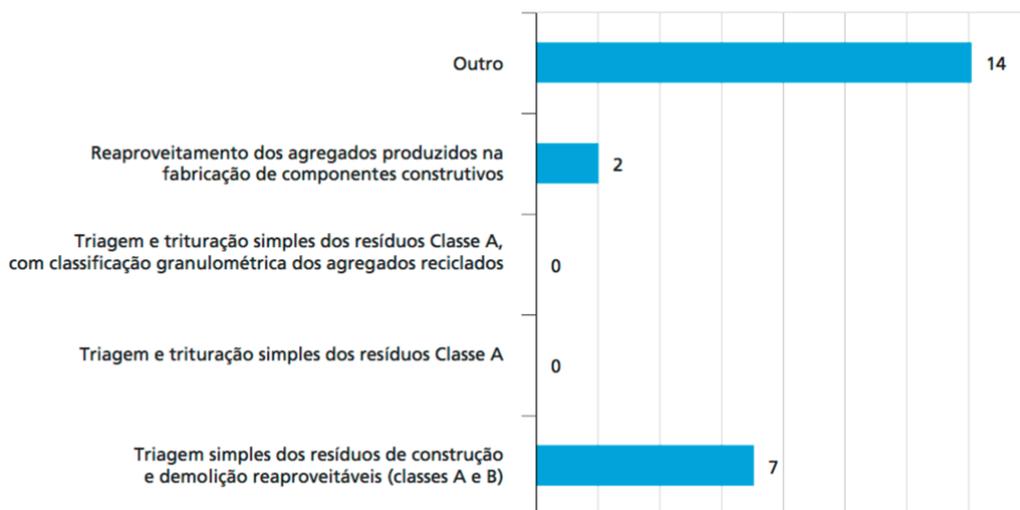


Figura 2-5 – Informação sobre o tipo de processamento entre 22 municípios com serviço de manejo de RCC – região Centro-Oeste (2008). Fonte: PNSB (IBGE, 2010)

2.2.2. PARÂMETROS DE RECICLAGEM UTILIZADOS NO BRASIL

A ABNT NBR 15116:2004 é a norma responsável por determinar os requisitos mínimos que os Resíduos Sólidos da Construção Civil devem ter para serem utilizados como agregados, tanto para camadas de pavimentação quanto para uso em concreto não estrutural reciclado, apresentando critérios específicos para cada um desses casos. Para se entender os critérios se faz necessário o conhecimento dos seguintes conceitos:

- Agregado de resíduo de concreto (ARC): é o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda, de 90% ou mais em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas. Sua composição deve ser determinada conforme o anexo A da ABNT NBR 15116:2004 e atender aos requisitos das aplicações específicas;
- Agregado de resíduo misto (ARM): é o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo de classe A composto na sua fração graúda por menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas. Sua composição deve ser determinada da mesma forma que a do ARC.

2.2.2.1. REQUISITOS DO AGREGADO RECICLADO DESTINADO A CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO

Tendo sido compreendida a diferença entre o ARC e o ARM, pode-se analisar os critérios exigidos pela ABNT NBR 15116:2004 para o uso de agregado reciclado em pavimentação e em concreto não estrutural. A Tabela 2-3 traz um resumo das exigências gerais para o primeiro caso e quais são as outras normas de ensaios que devem ser levadas em conta para que haja adequação do material:

Tabela 2-3 – Requisito gerais para agregado reciclado destinado a camadas de pavimentação

Propriedades		Agregado reciclado classe A		Normas de ensaios	
		Graúdo	Miúdo	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Composição granulométrica		Não uniforme e bem graduado com coeficiente de uniformidade $C_u > 10$		ABNT NBR 7181	
Dimensão máxima característica		≤ 63 mm		ABNT NBR NM 248	
Índice de forma		≤ 3	-	ABNT NBR 7809	-
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm		Entre 10% e 40%		ABNT NBR 7181	
Contaminantes - teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Materiais não minerais de mesmas características*	2		ABNT NBR 15116	
	Materiais não minerais de características distintas*	3		ABNT NBR 15116	
	Sulfatos	2		ABNT NBR 9917	
* Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.					

Além desses requisitos, há também alguns critérios que são dependentes do tipo de camada de aplicação, conforme apresentado na Tabela 2-4:

Tabela 2-4 – Requisito gerais para agregado reciclado destinado a camadas de pavimentação

Aplicação	ISC (CBR) %	Expansibilidade %	Energia de compactação
Material para execução de reforço de subleito	≥ 12	$\leq 1,0$	Normal
Material para execução de revestimento primário e sub-base	≥ 20	$\leq 1,0$	Intermediária
Material para execução de base de pavimento*	≥ 60	$\leq 0,5$	Intermediária ou modificada
*Permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo padrão de 8,2 tf (80 kN) no período de projeto			

2.2.2.2. REQUISITOS DOS AGREGADOS RECICLADOS EM CONCRETO NÃO ESTRUTURAL

As exigências normativas para o uso de agregados reciclado em concreto sem função estrutural são resumidas na Tabela 2-5.

Vale lembrar que os agregados a serem utilizados estão limitados a Classe A da classificação da Resolução 307 do CONAMA. Além disso, também é importante ressaltar que a composição granulométrica do agregado final a ser utilizado no concreto sem função estrutural deve estar de acordo com a ABNT NBR 7211:2009 e que tal composição pode ser corrigida pela adição de agregados convencionais.

Tabela 2-5 – Requisito para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural

Propriedades		Agregado reciclado classe A				Normas de ensaios	
		ARC		ARM			
		Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Teor de fragmentos à base de cimento e rochas (%)		≥ 90	-	< 90	-	ABNT NBR 15116	-
Absorção de água (%)		≤ 7	≤ 12	≤ 12	≤ 17	ABNT NBR NM 53	ABNT NBR NM 30
Contaminantes - teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos	1				ABNT NBR 9917	
	Sulfatos	1				ABNT NBR 9917	
	Materiais não minerais*	2				ABNT NBR 15116	ABNT NBR 15116
	Torrões de argila	2				ABNT NBR 7218	
	Teor total máximo de contaminantes	3				-	
Teor de material passante na malha 75 µm (%)		≤ 10	≤ 15	≤ 10	≤ 20	ABNT NBR NM 46	
* Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.							

2.2.3. COMPARAÇÃO ENTRE AS EXIGÊNCIAS PARA RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL E NO MUNDO

Como observado anteriormente, a norma vigente no Brasil relacionada à reciclagem dos Resíduos da Construção Civil (RCC) ainda não é adequada. Para o uso em pavimentação esta apresenta alguns critérios que são voltados apenas para os pavimentos flexíveis, mas que não são tão relevantes para os projetos de pavimento rígido. Já para o uso dos RCC em concreto não estrutural, as características exigidas são generalistas.

Uma provável razão para o pouco desenvolvimento da norma é a pouca utilização dos RCC no país. A expectativa é que, conforme essa cultura seja mais disseminada, um avanço na normatização também ocorra. Por essas razões, ao estudar a reciclagem dos materiais de construção, vale também consultar os trabalhos e recomendações adotados em outros países.

É possível destacar que características importantes dos materiais reciclados não são contempladas pela ABNT NBR 15116:2004. Apesar de o concreto reciclado não se tratar de um elemento de sustentação crucial para uma estrutura, seria relevante, por exemplo, que a norma brasileira previsse resistências características mínimas para esse concreto. Esse parâmetro deveria ser descrito para cada tipo de uso final, de maneira que fosse suficiente para atender as condições de desempenho, ou ao menos ter a finalidade de orientar o projetista a cumprir um mínimo valor.

A norma europeia, por exemplo, estabelece que a mínima resistência do concreto reciclado não estrutural deve ser de 15 MPa, podendo ser utilizado até 100% de agregado reciclado. Ela vai além e define padrões para concretos estruturais com uso de agregados reciclados (ainda não permitido no Brasil). Para esse caso o f_{ck} é de no mínimo 30 MPa e a composição dos agregados não pode ter mais que 35% de ARC. A existência de uma norma como essa demonstra uma preocupação dos europeus com a padronização dos seus materiais construtivos de todos os tipos. Mesmo que a tendência nesse continente seja a de construções com menos geração de resíduos, eles entendem como necessário a normatização do uso de resíduos reciclados.

Outro parâmetro não levado em conta pela normativa brasileira é o peso específico. O relatório do VTT (*Technical Research Centre of Finland*), estabelece que para podermos utilizar o ARC o mesmo deve possuir densidade entre 2000 kg/m^3 e 2200 kg/m^3 . Essa caracterização pode ser importante, pois ajuda a definir a sobrecarga sobre elementos subjacentes ao concreto reciclado e que podem sofrer deformação ou ruptura dependendo do

peso atuante. O peso específico pode também ser correlacionado com outras propriedades, como a porosidade do material, por exemplo.

Há também as propriedades do concreto reciclado que são especificadas pela ABNT NBR 15116:2004, mas que divergem do que é recomendado por estudos de outros países. É o caso dos teores máximos de contaminantes em relação à massa do agregado reciclado. Enquanto no Brasil o teor total máximo é de 3%, não podendo o teor de cloretos, sulfatos, materiais não minerais e torrões de argila ultrapassarem os já expostos limites da norma, o estudo em Hong Kong de Poon & Chan (2007) diz que o ARC não deve possuir teor total de contaminantes maiores que 1% para ser adequado a produção de concreto reciclado. Isso mostra uma menor severidade na caracterização do agregado reciclado no Brasil durante o processo de separação dos RCC. Vale ressaltar que tal processo é importantíssimo, pois um excesso no teor de cloretos e sulfatos pode prejudicar a qualidade, resistência e durabilidade do concreto.

Também em relação ao teor de absorção de água, as recomendações são, quase sempre, mais rígidas no exterior. O relatório VTT determina que a absorção deve estar limitada entre 7% e 10%, enquanto a norma brasileira determina que para o ARM o agregado graúdo deve apresentar teor de absorção de água menor ou igual a 12% e o miúdo menor ou igual a 17%, e para o agregado graúdo do ARC esse teor não pode ser maior que 7% e para o agregado miúdo não deve ultrapassar os 12%.

Finalmente, em relação a dimensão máxima dos agregados, temos que estudos como o relatório VTT recomendam que haja um grande esforço para limitar ao máximo o tamanho do agregado miúdo reciclado a 4 mm, pois materiais menores contêm mais pasta de cimento e por isso absorvem mais água, tornando mais difícil encontrar a relação água/cimento ideal para a produção de um concreto resistente. A norma ABNT NBR 15116:2004, por sua vez, recomenda que para o uso em pavimentação o tamanho máximo do agregado seja 63 mm, tanto para o agregado miúdo, quanto para o graúdo.

Após feitas essas comparações entre as recomendações, percebe-se que é exigido, de forma geral, um maior rigor das propriedades do concreto reciclado nos outros países. Isso nada mais é que um reflexo do maior estudo dessas nações na área, impulsionado muitas vezes pela legislação e pelo incentivo do uso de concreto reciclado com função estrutural em muitas delas.

2.2.4. PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS

Para o aprimoramento do uso do concreto com agregados reciclados deve-se levar em conta suas propriedades distintas do concreto convencional para que se entenda a melhor forma de realizar sua dosagem e para saber o que esperar do seu desempenho. A publicação Finlandesa Betonikeskus (2005) expôs algumas das particularidades do Agregado de Resíduo de Concreto (ARC) e do produto final (concreto reciclado) produzido com ele. Entre essas características podemos destacar:

- A maior absorção de água do ARC se comparado com os agregados naturais (5 a 10 vezes mais);
- A pior trabalhabilidade de concretos com altos teores de ARC;
- O pior controle da umidade do concreto reciclado, o que pode afetar a resistência da zona de transição concreto/agregado prejudicando a resistência mecânica final;
- A tendência de diminuição da porosidade ao longo do tempo do concreto produzido com ARC;
- O aumento da resistência do concreto reciclado quando há uma adição de sílica ao ARC;
- A diminuição do módulo de elasticidade e o aumento da fluência e da retração do concreto, conforme o maior uso de ARC, principalmente contido de maior porcentagem de finos;
- A ocorrência de menos carbonatação do concreto reciclado se comparado com o tradicional; e
- O menor peso específico do agregado reciclado se comparado com o natural.

Essas conclusões não podem ser generalizadas para todos os casos, pois as características do concreto podem variar com os diferentes padrões de agregado reciclado, bem como com o processo de britagem e a consequente granulometria do material gerada, mas são, na grande maioria das vezes, válidas e confiáveis. Sendo assim, o desafio na produção de concreto reciclado está em descobrir maneiras de melhorar suas características deficitárias.

Xiao (2006), por exemplo, propôs técnicas para reduzir os prejuízos em relação à piora de propriedades como a elasticidade, a fluência e a retração, recorrentes do alto teor de argamassa na composição dos concretos reciclados. Ele sugeriu reduzir a quantidade de argamassa aderida nos agregados por procedimentos como: tratamento térmico, tratamento por

micro-ondas e imersão do concreto em solução ácida e depois em água limpa. Essa última possibilidade é ilustrada a seguir na Figura 2-6.

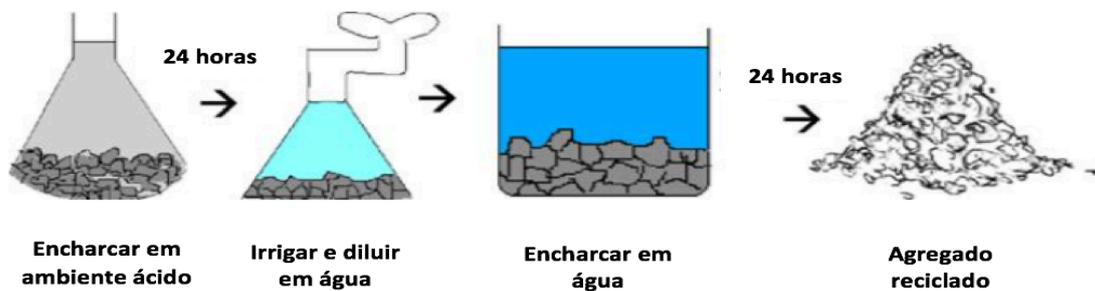


Figura 2-6 – Redução da argamassa no concreto reciclado - Imersão do concreto em solução ácida e depois em água limpa. Fonte: Adaptado de Xiao (2006)

É claro que não basta apenas que o concreto reciclado apresente boas características para que seja desencadeado o seu uso massivo no Brasil. O uso dele deve passar por uma barreira que talvez seja a maior de todas: a econômica. Se o concreto de agregado reciclado não for viabilizado economicamente, tendo custo alto de produção e adequação, ele dificilmente será implantado efetivamente, já que o preço aliado com o desempenho são, de forma geral, quem comandam efetivamente o mercado do país, ficando o interesse sustentável na maioria das vezes em segundo plano. Além disso, também constituem fatores impeditivos:

- A necessidade da criação de normas para regulamentar: os métodos de demolição e de esmagamento, os tratamentos pós-demolição, a forma de britagem e o tipo de britador, os tipos de uso, a parcela de agregado reciclado permitido para cada uso e os parâmetros de resistência do material final que utilizar o agregado reciclado;
- A falta de classificação dos diversos tipos de concreto de demolição;
- A falta de parâmetros para controle de qualidade;
- A falta de normatização do uso do agregado associado a outras substâncias.

3. O CRESCIMENTO DAS CICLOVIAS E A POSSÍVEL DESTINAÇÃO DO RCC

O presente trabalho tem como foco o uso dos RCC provenientes de concreto de demolição como agregado miúdo para a produção de concreto reciclado. As situações em que se há a oportunidade de usar tal concreto são extremamente variadas. Exemplos disso são: o uso para a fabricação de blocos de vedação, meio-fio, contrapiso, calçada, sarjetas, canaletas e placas de muro, entre outros. Apesar de tantas áreas para aplicação de concreto reciclado, seu uso tem sido pouco explorado. Nesse capítulo será tratado sobre uma dessas áreas com um enorme potencial de uso: os pavimentos de concreto rígido para uso como ciclovias.

3.1. CONTEXTO DAS CICLOVIAS NO BRASIL

O Brasil tem passado nos últimos anos por uma tendência de aumento considerável no número de ciclistas. Tal crescimento tem diversas razões conhecidas, dentre as quais se destacam:

- A saturação do sistema automotivo de transporte;
- O aumento dos preços dos combustíveis;
- O relativo baixo custo de aquisição e manutenção das bicicletas;
- O simples funcionamento destas;
- A oportunidade de inclusão social que o transporte por bicicletas proporciona;
- A busca por uma melhor condição de saúde da população; e
- A preocupação com os impactos ambientais causados pelos modais de transportes poluentes.

É de se supor que com o crescimento do número de ciclistas deveria haver um crescimento proporcional do sistema de infraestrutura cicloviária, que são os diversos elementos de suporte ao transporte ciclístico (bicicletários, paraciclos, ciclovias, ciclofaixas, vias compartilhadas e pontos de apoio). Tal estrutura deveria ser capaz de suportar com segurança e funcionalidade todos os usuários novos, porém não é isso que acontece no Brasil.

A maior prova desta desproporcionalidade é a quantidade de ciclovias presentes em várias capitais do país se comparada a outras grandes capitais do mundo. É o caso de Belo

Horizonte que, segundo dados da União dos Ciclistas do Brasil, apresentava em abril de 2015 apenas 70,4 km de ciclovias. Valor muito pequeno em relação a cidades em que o meio de transporte ciclístico é bem estabelecido, como em Viena na Áustria, que apresenta mais de 800 km. Outro bom exemplo é São Paulo. A cidade apresenta cerca de 400 km dessas vias, extensão que em números absolutos não é pequena, mas se analisarmos a relação habitante/km de ciclovia, é possível perceber insuficiência para atender a população. A cidade de São Paulo tem 30 mil habitantes por km de ciclovia, enquanto Viena tem 2,5 mil habitantes por km de ciclovia.

Vale ressaltar que o cenário atual não é ideal, mas já esteve pior. Em 3 de janeiro de 2012 foi instituída a Lei nº 12.587 que estabeleceu a Política Nacional de Mobilidade Urbana. Essa lei veio com a intenção de planejar o crescimento das cidades de forma ordenada, exigindo que os municípios de mais de 20 mil habitantes elaborassem e apresentassem um plano de mobilidade urbana. Entre seus principais objetivos, princípios e diretrizes estavam o desenvolvimento ambientalmente sustentável das cidades, a prioridade dos modos de transporte não motorizados sobre os motorizados e a integração entre os modos e serviços de transporte urbano. Ficou claro que o desenvolvimento do país de acordo com esses preceitos passava pelo paralelo desenvolvimento do sistema cicloviário das cidades.

A Política Nacional de Mobilidade Urbana não foi a única razão para que as cidades começassem a investir em meios de transportes mais limpos, mas certamente representou um incentivo grande. A cidade de São Paulo, por exemplo, tinha até 2011 cerca de 60 km de ciclovias e depois chegou a cerca de 400 km em 2016, o que mostra um investimento no modal de transporte ciclístico bem acima do que o habitual.

3.2. O CRESCIMENTO DAS CICLOVIAS NO DISTRITO FEDERAL

A perspectiva em relação ao desenvolvimento do transporte com o uso de bicicletas no Distrito Federal (DF) tem crescido. A região, que em 2012 apresentava cerca de 200 km de ciclovias construídas, ao final de 2015 já se aproximou dos 500 km, de acordo com o Governo do Distrito Federal (GDF). O valor não chega ao planejado de mais de 600 km que o governo tinha como meta até o final deste ano, mas ainda assim pode ser considerado expressivo, já que representa a maior malha do país. Por essa razão Brasília já é considerada nacionalmente como a capital das ciclovias por muitos, tendo malha extensa em regiões como a Asa Norte, a Asa Sul, o Sudoeste, o Lago Sul e o Lago Norte.

A expansão das ciclovias no DF também é impulsionada por algumas de suas características que viabilizam o processo construtivo das ciclovias e sua posterior utilização, dentre as quais destacam-se:

- O relevo pouco acidentado de quase todo o território;
- Os baixos índices pluviométricos; e
- A infraestrutura capaz de absorver a construção de ciclovias sem problemas de desapropriação.

Apesar do expressivo aumento das ciclovias em Brasília, é notável que ainda falta muito para a consolidação do meio de transporte ciclístico na cidade. Uma parcela das ciclovias ainda é pouquíssima utilizada, o que é reflexo principalmente da carência de políticas públicas que visem divulgar à população as vantagens do uso de bicicletas para o transporte. A falta de sinalização e conservação de algumas das pistas existentes também representam um problema, que desencorajam o seu uso. Um dos maiores problemas, porém, é a falta de cultura de respeito ao ciclista por parte dos motoristas de automóveis, responsável por vários acidentes, principalmente nos pontos de intercessão entre as ciclovias e as pistas de automóveis, e também a falta de segurança em locais mais isolados e com menos circulação de pessoas.

É possível observar que, mesmo após a conclusão dos 600 km de ciclovias construídas, o DF não estará todo interligado por estas. A forma como foi feita a locação dos diferentes bairros no planejamento de Brasília, de forma a setorizar as regiões das cidades e deixá-las relativamente distantes, exige uma rede maior que a normal, principalmente se compararmos à malha necessária para interligar cidades menos “espalhadas” e mais “compactas”. Tal fato faz muitas pessoas até mesmo pensarem erroneamente que a construção de ciclovias é um erro porque o transporte entre alguns pontos da cidade não é viavelmente feito de forma rápida com o uso de bicicletas. Falta a esses críticos notarem que o meio de transporte ciclístico não tem necessariamente que ser o único em um trajeto. Ele pode, e deve, em vários casos ser combinado com o transporte público coletivo, tornando-se uma possibilidade viável e eficiente.

A combinação entre a necessidade de dar um melhor fim a grande quantidade de Resíduos da Construção Civil (RCC) e a possibilidade de melhoria na eficiência do transporte urbano no DF por meio do investimento no modal ciclístico torna o uso de concreto reciclado com o uso de agregados provenientes dos RCC na construção de ciclovias uma ideia que pode ser interessante, tanto do ponto de vista econômico, quanto ambiental, caso seja viabilizada por estudos adequados.

3.3. O CONCRETO E OS OUTROS PAVIMENTOS EM CICLOVIAS

Com tantos bons motivos para se construírem ciclovias, como os anteriormente mencionados, as mais diversas cidades começaram a apresentar iniciativas de planejamento destas. Uma das maiores dúvidas levantadas na fase de projeto desse tipo é relativa ao tipo de material que deve ser empregado na pavimentação das referidas ciclovias, sendo que as opções principais são o concreto de cimento Portland e o asfalto.

Projetistas que defendem a escolha do concreto alegam que este apresenta as seguintes vantagens:

- A possibilidade de usar como matéria prima dos componentes do concreto elementos residuais de outras indústrias, como é o caso da escória de alto forno do cimento e dos Resíduos da Construção Civil (RCC) como agregado do concreto;
- Baixa absorção de calor causando um menor desconforto proveniente desse fator ao usuário;
- A não deformação plástica, evitando assim a formação de “trilhas de rodas”, por exemplo;
- A melhor condição de iluminação para o ciclista gerada pela cor clara do concreto;
- A execução feita com equipamentos de porte pequeno e médio, o que na maioria das vezes permite que as áreas verdes ao redor não sejam danificadas ou destruídas durante o processo construtivo;
- Estruturas de pavimentação com poucas camadas; e
- A transmissão distribuída e não pontual de cargas da base para a fundação.

O Distrito Federal (DF) tem representado um bom exemplo de como a resistência ao uso do concreto na pavimentação de ciclovias tem diminuído. Uma considerável parte dessas vias que foram construídas desde 2012 são de concreto. É importante notar que a escolha do pavimento ideal para ciclovias, como qualquer sistema construtivo, depende de fatores característicos como uso previsto, tipo do solo, clima, relevo e disponibilidade de material. Na Inglaterra, por exemplo, o Manual de Design de Ciclovias de Londres sugere o uso do asfalto, argumentando que os ciclistas da cidade consideram a qualidade de tráfego melhor e mais confortável nesse tipo de pavimento.

Os principais tipos de materiais utilizados em pavimentos de ciclovia na Inglaterra são apresentados na Tabela 3-1 cuja fonte é o Manual para Design de Ciclovias de Londres.

Tabela 3-1 – Materiais utilizados em pavimentos de ciclovia. Fonte: Manual para Design de Ciclovias de Londres

Material	Características
Asfalto	É o material mais utilizado pois possui uma elevada resistência a derrapagem, um baixo custo por m ² e uma vida útil superior a 20 anos.
Blocos intertravados	Vida útil superior a 20 anos, boa resistência a derrapagem, porém um elevado custo por m ² devido a trabalhosa execução do mesmo. O tipo de material do bloco pode alterar essas características aqui apresentadas.
Concreto	Baixa vida útil se comparado aos outros tipos de pavimento (10 anos), elevado custo por m ² e boa resistência a derrapagem. Possui o menor custo de manutenção entre os materiais e é muito bom para ciclovias desde que a juntas sejam bem feitas. A sinalização não é tão visível quanto no asfalto.

3.3.1. TIPOS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO E SEUS ELEMENTOS

Os pavimentos, independentemente do seu tipo, podem ser divididos em camadas com diferentes funções. Para o caso específico do pavimento de concreto, de forma geral, as camadas existentes são:

- Subleito: terreno de fundação onde será apoiado todo o pavimento, devendo ser considerado e estudado até a profundidade onde as cargas de tráfego ainda são influentes;
- Sub-base: camada responsável por melhorar a capacidade de carga da fundação, dar suporte uniforme, evitar bombeamento de água através de juntas ou fissuras da base, minimizar efeitos danosos causados por variações volumétricas, funcionar como camada drenante e facilitar a execução e o controle geométrico da espessura das camadas sobrejacentes; e
- Base e revestimento: é a camada responsável por resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e transmiti-los às camadas inferiores.

Dependendo do material a ser utilizado no pavimento a espessura dessas camadas é alterada e isso influi diretamente no preço e na qualidade da ciclovia. Para o particular caso do

pavimento rígido de concreto a existência de uma sub-base pode muitas vezes ser facultativa, principalmente em solos onde o nível do lençol freático é muito fundo. Nesse caso praticamente não haverá variação volumétrica do solo. Já no caso dos pavimentos asfálticos, além das camadas acima mencionadas, pode-se ter também uma camada de reforço do subleito, quando viável. Para esse tipo de pavimento também é importante ressaltar que a camada de revestimento é separada da base.

Como o projeto tem foco no pavimento de concreto rígido, vale entender os seus principais tipos. De acordo com o manual de pavimentos rígidos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), estes são:

- Pavimentos de concreto simples - Figura 3-1: que não dispõem de espécie alguma de aço, sob nenhuma forma, e tem entrosagem de agregados como única forma de transferência de carga e por isso mesmo, exigem placas curtas;

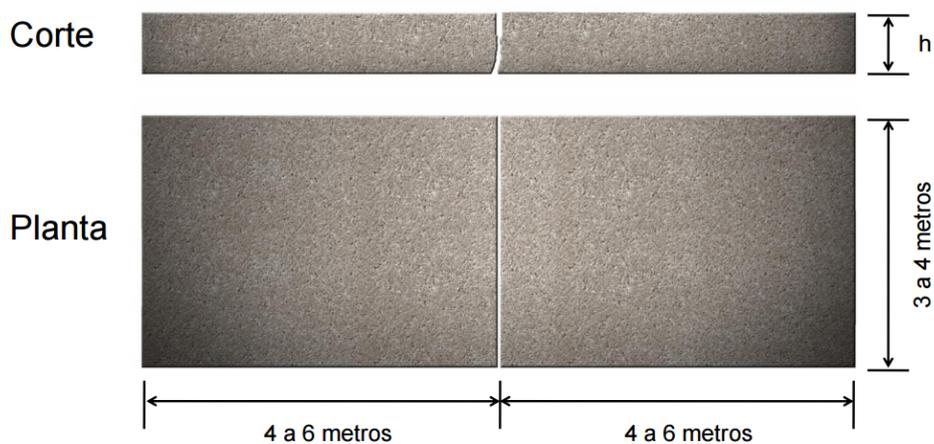


Figura 3-1 – Pavimentos de concreto simples

- Pavimentos de concreto simples com barra de transferência - Figura 3-2: dotados de sistema artificial de transferência de carga, formado por barras curtas de aço liso, postada na meia-seção das juntas transversais, permitindo um maior comprimento das placas, se comparado com o pavimento de concreto simples;

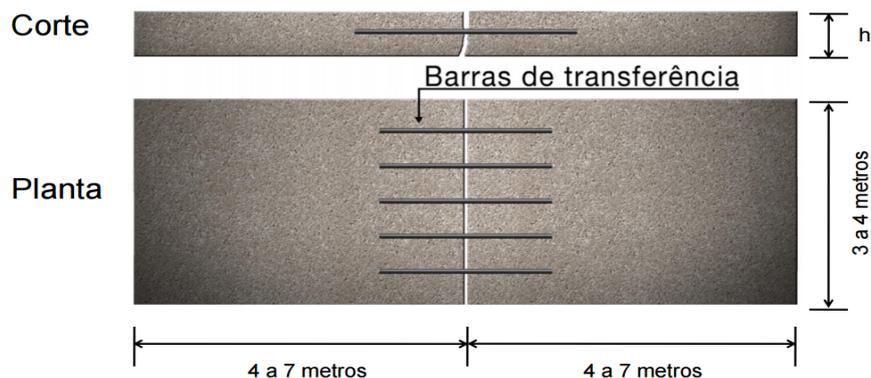


Figura 3-2 – Pavimentos de concreto simples com barra de transferência

- Pavimentos de concreto com armadura distribuída descontínua - Figura 3-3: que contam com barras de aço sob forma de armadura distribuída, que se detém antes de cada junta transversal, nas quais é obrigatória a adoção de barras de transferência, armadura esta que não possui função estrutural, ou seja, não contribui para aumentar a resistência da placa à flexão, agindo com a exclusiva função de manter as fissuras fortemente ligadas, que por acaso se formem entre duas juntas transversais;

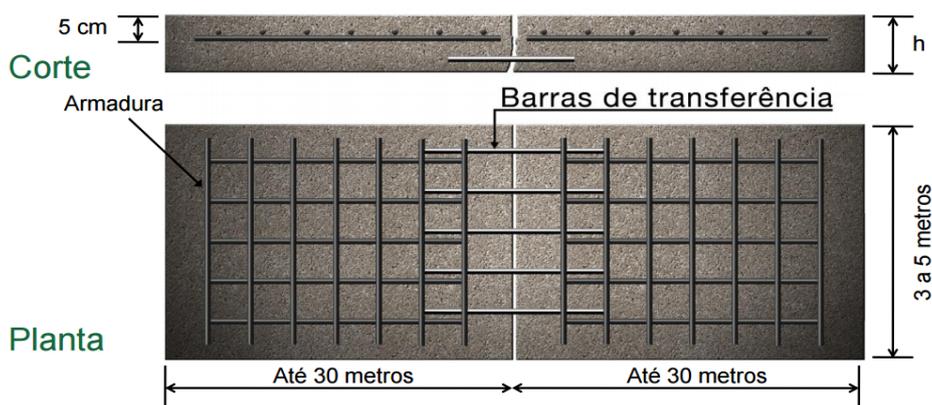


Figura 3-3 – Pavimentos de concreto com armadura distribuída descontínua

- Pavimento de concreto com armadura distribuída contínua - Figura 3-4: nos quais não há juntas transversais de retração e a armadura, bastante pesada, faz com que se tenha boa transmissão de cargas nas fissuras.

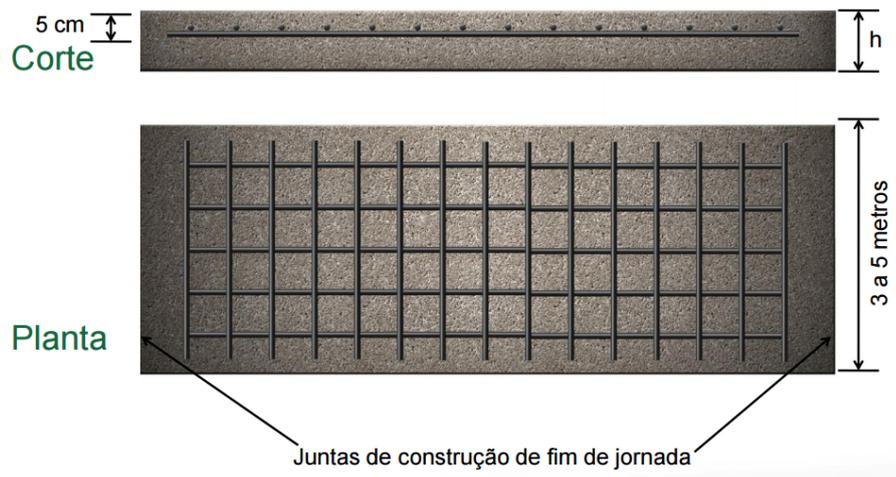


Figura 3-4 – Pavimento de concreto com armadura distribuída contínua

O Manual do DNIT não especifica, mas também existem os pavimentos de concreto protendido, que apresentam armadura protendida e são utilizados principalmente em locais que recebem carregamentos especiais, tais como aeroportos que é o caso do pavimento mostrado na Figura 3-5.



Figura 3-5 – Exemplo de pavimento de concreto protendido. Fonte: Revista Techne, Edição 176.

Nesse trabalho serão abordados os critérios de projeto e as técnicas construtivas de pavimentos de concreto simples para ciclovias, sem barras de transferência. Esse tipo foi o escolhido, pois as ciclovias não apresentam cargas constantes que requeiram armações elaboradas. Em fase posterior do estudo se tentará julgar se existe a possibilidade do uso de concreto com agregado reciclado proveniente de RCC para construção de ciclovias dessa configuração.

3.3.2. DEFINIÇÃO DO TRAÇO E MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

Assim como ocorre com o concreto reciclado, a ABNT não apresenta normatização adequada para o projeto de pavimentos de concreto mesmo já havendo construções desse tipo há um considerável período de tempo no Brasil. As únicas normas da ABNT relativas ao tema em vigor são:

- ABNT NBR 16416:2015: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos;
- ABNT NBR 15146-2:2011: Controle tecnológico de concreto – Qualificação de pessoal, Parte 2: Pavimentos de concreto;
- ABNT NBR 15953:2011: Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução; e
- ABNT NBR 9781:2013: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio.

Há também outras normas da ABNT relativas a caracterização de materiais para uso em sub-base e reforço de subleito, porém entre todas estas apresentadas, nenhuma faz especificações sobre métodos de projeto e dimensionamento de base de pavimentos rígidos de concreto ou seus métodos executivos. Dessa forma, não há material que trate do uso de concreto para pavimentação de ciclovias e, conseqüentemente, também não há orientações para o uso de concreto reciclado com essa finalidade.

Os projetos de pavimentos rígidos no Brasil costumam ter como documentos diretores as normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) que já são consolidadas e vem sendo utilizadas há bastante tempo. O Manual de Pavimentos Rígidos desta entidade trata de fatores que vão desde o estudo preliminar tecnológico dos materiais que serão utilizados, até a execução e a conservação dos pavimentos rígidos. Ele sugere que a definição do traço do concreto deva seguir as recomendações da DNIT-054/2004-PRO: Pavimento Rígido – Estudos de traços de concreto e ensaios de caracterização de materiais – Procedimentos. Essa norma traz, entre outras informações, quais os principais ensaios de caracterização dos diversos elementos constituintes do concreto de cimento Portland (agregados miúdo e graúdo, cimento, água e aditivos). Para o caso dos agregados miúdos, por exemplo, os ensaios sugeridos são:

- Análise granulométrica e módulo de finura – NBR 7217;
- Teor de argila em torrões e materiais friáveis – NBR 7218;
- Teor de materiais pulverulentos – NBR 7219;
- Impurezas inorgânicas húmicas – NBR NM 49;
- Massa unitária solta seca – NBR 7251;
- Massa específica por meio do frasco de Chapman – NBR 9776;
- Absorção de água – NBR NM 30;
- Determinação do teor de partículas leves – NBR 9937; e
- Determinação do teor de cloretos e sulfatos solúveis – NBR 9917.

Na DNIT-054/2004-PRO também é dado o roteiro para a determinação do traço e requisitos mínimos recomendáveis que o produto final (concreto de cimento Portland) deve apresentar. Alguns desses requisitos são:

- Consumo mínimo de cimento – 320 kg/m³;
- Relação água/cimento entre 0,40 e 0,56;
- Dimensão máxima do agregado graúdo: 1/5 a 1/4 da espessura da placa, e nunca superior a 50 mm;
- Teor de ar incorporado máximo de 0,5 %; e
- Exsudação máxima de 1,5 %.

O Manual de Pavimentos Rígidos sugere que o dimensionamento dos pavimentos rígidos de concreto simples seja feito com o uso do Método da *Portland Cement Association* (PCA) de 1984 ou 1966, porém, fica claro que o uso de tais métodos para ciclovias acarretaria em um superdimensionamento, que geraria gastos excessivos e desnecessários para uma construção de porte e uso não tão exigente, visto que a PCA considera cargas de altas magnitudes, provindas de veículos como caminhões, por exemplo, e recomenda que o concreto a ser utilizado tenha resistência à tração na flexão aos 28 dias de no mínimo 4,5 MPa. Tendo isso em vista, o presente projeto utilizará as recomendações do DNIT apenas para fins comparativos.

Outras fontes de consulta que podem ser utilizadas em projetos de ciclovias são os manuais feitos por instituições nacionais confiáveis ou mesmo instituições internacionais, já que vários países já possuem metodologias consolidadas. Um dos manuais internacionais mais conhecidos é o Manual de Projeto de Ciclovias de Londres. Ele indica que, de forma geral, as

espessuras ideais das camadas de pavimentação são: 50 mm para a base e 125-225 mm para o sub-base. Esse documento propõe que, para determinar a profundidade ideal de cada camada, é necessário levar em conta o material que será utilizado em cada uma e também as condições do solo local, por exemplo o tipo de solo e se o mesmo possui muitas raízes de árvores. Além disso, ele também ressalta que deve ser levado em conta as superfícies adjacentes a ciclovia pois elas podem influenciar nas patologias que afetam a mesma.

Já a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) de Brasília recomenda que os parâmetros de projeto de construção das ciclovias devem ser encontrados para a pior situação a que uma ciclovia pode ser submetida, mesmo que essa situação não esteja de acordo com o uso previsto para mesma. A ABCP considera que essas ações serão a de carros e caminhões que, eventualmente, possam estacionar sobre a ciclovia de forma indevida, como por exemplo, para realizar a manutenção de alguma instalação próxima a esta, conforme é mostrado na Figura 3-6.



Figura 3-6 – Caminhão estacionado sobre uma ciclovia. Fonte: ABCP

A ABCP propõe como método de dimensionamento uma modelagem computacional onde é simulado o carregamento de uma placa de concreto, que representa a base do pavimento, por cargas distribuídas em eixos, sendo assim representada a carga de um veículo que poderia estar estacionado sobre ela. A partir daí determinam-se as tensões mais severas na placa e também os deslocamentos máximos prováveis sobre ela. O método é ilustrado nas figuras que se seguem para o caso particular de carregamento de 0,5 toneladas por eixo, o equivalente a um veículo de pequeno porte:

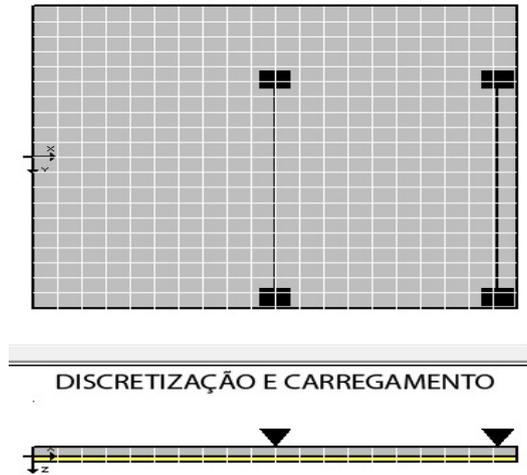


Figura 3-7 – Modelo de placa para discretização de uma ciclovia

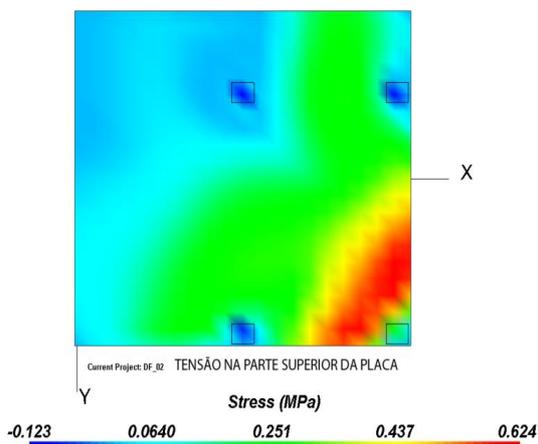


Figura 3-8 – 0,5 tnf – Tensão na parte superior da placa

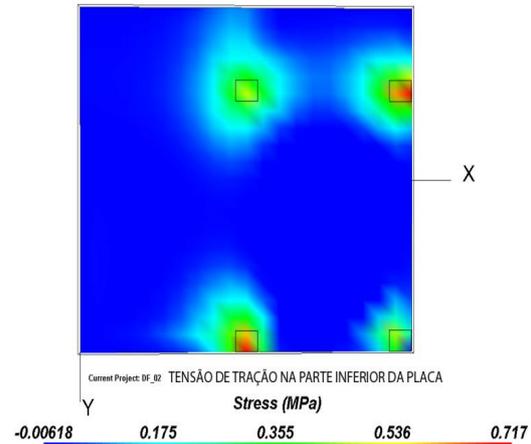


Figura 3-9 – 0,5 tnf – Tensão na parte inferior da placa

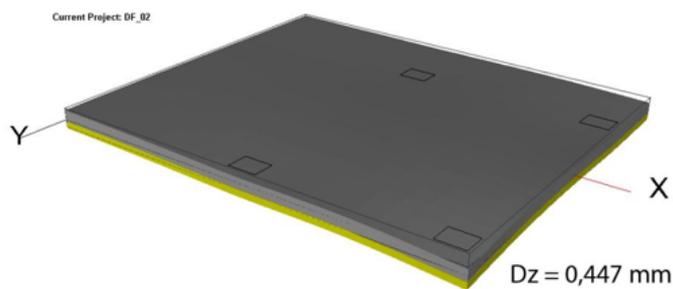


Figura 3-10 – 0,5 tnf – Deslocamento máximo da placa de ciclovia

Após realizado o processo com diversos carregamentos, foi concluído pela ABCP no estudo que uma placa de concreto de cimento Portland de 8 cm de espessura e resistência

característica a compressão de 25 MPa consegue suportar os esforços de bicicletas e pedestres circulantes e, até mesmo, aqueles provenientes de algum veículo leve que venha a estacionar na ciclovia. É importante ressaltar que esse método também gera um certo superdimensionamento, já que utiliza pesos exercidos por cargas consideravelmente maiores que de ciclistas e pedestres. Além disso, ele apresenta a deficiência de não considerar as camadas de pavimentação abaixo da placa de concreto.

3.3.3. MÉTODOS DE EXECUÇÃO E CUIDADOS ESPECIAIS

A metodologia executiva para construção de ciclovias de concreto de cimento Portland não costuma ser muito complexa. A ABCP sugere as seguintes etapas no processo:

- Etapa 1: Preparação do Subleito
 - I. Abertura da caixa, com profundidade mínima de 20 cm e inclinação igual ao do pavimento acabado;
 - II. Regularização e compactação do subleito.
- Etapa 2: Sub-Base Granular
 - I. Distribuição da camada granular uniformemente sobre o solo compactado. O material deve estar limpo e bem graduado;
 - II. Após a distribuição dos grãos, a camada deve ser compactada, com placa ou rolo vibratório.
- Etapa 3: Colocação das Formas
 - I. Fixação da fôrma de forma que o topo coincida com a superfície de rolamento prevista em projeto. Deve-se garantir espessura uniforme ao longo de todo o pavimento.
- Etapa 4: Colocação do lençol plástico
 - I. Colocação do lençol plástico para criar camada impermeabilizante e redutora de atrito. Não deve conter dobras.
- Etapa 5: Concretagem
 - I. Lançamento e distribuição: Espalhamento manual;
 - II. Adensamento com o auxílio de vibradores de imersão, régua vibratória ou vibro strike.

- III. Nivelamento feito por desempenadeiras (*floats*) de magnésio ou alumínio com, no mínimo, 1,5 m de comprimento;
- IV. Para dar maior aderência ao concreto, evitando o escorregamento dos usuários, deve ser feita uma textura com vassoura de fios de piaçava ou náilon.
- Etapa 6: Cura Química
 - I. A aplicação do produto de cura pode ser manual, realizada com pulverizadores costais. Após a aplicação do produto, a área do pavimento deve ser protegida para que a superfície do concreto fresco não seja danificada pela circulação precoce de pessoas e bicicletas.
- Etapa 7: Juntas de Retração
 - I. O Projeto Executivo de Engenharia deve prever juntas transversais de retração e de construção. Estas devem ser serradas com serra de disco diamantado, assim que o concreto aceitar o corte sem se danificar. A profundidade do corte deve ser especificada/
 - II. Após o corte das juntas, procede-se à limpeza com ferramentas com ponta cinzelada, que penetre na ranhura das juntas, e jateamento de ar comprimido;
 - III. As juntas devem ser preenchidas com material selante apropriado e finalmente liberado o tráfego para os ciclistas.

Vale ressaltar que a construção de sub-base é muitas vezes facultativa, bem como a utilização de camada plástica acima dessa. Outro ponto é que o uso da cura química não é consenso entre os profissionais do ramo, pois alguns acreditam que ela não possui a mesma efetividade que o processo de cura convencional, sendo este o mais indicado para ser usado.

O Manual de Projetos Técnico: Ciclovias da ABCP prevê que devem ser tomados alguns cuidados na execução de pavimentos de concreto para ciclovia. De acordo com ele, alguns dos pontos que se deve prestar atenção são:

- a) Concretagem em panos, placas módulos de 2,5m x 2,5m
- b) Esborcinamento¹ de juntas e desgaste superficial

¹ Esborcinamento de juntas: “O esborcinamento das juntas se caracteriza pela quebra das bordas da placa de concreto (quebra em cunha) nas juntas, com o comprimento máximo de 60cm, não atingindo toda a espessura da placa.”. NORMA DNIT 061/2004 –TER

- Concretos de pavimento, sujeitos atuação direta de cargas, devem atender a resistências a desgaste por abrasão, principalmente quando do arraste destas, como é o caso do andar de pedestres e rodagem de bicicletas;

c) Utilização de armadura

- Armadura para ciclovia, quando necessária;
- Tela soldada, posicionada na linha neutra e distribuída em cada placa;
- Positiva ou neutra para auxiliar no controle de fissuras.

3.4. EXIGÊNCIAS DE PROJETO DE CICLOVIAS NO DISTRITO FEDERAL

Como explicitado anteriormente, o projeto de um pavimento rígido de concreto envolve o estudo de diversos componentes desse, como as características granulométricas e de absorção de seus agregados, entre outras. Apesar de serem muitos os fatores que influenciam o desempenho final de um concreto para pavimentação de ciclovias, são poucas as exigências feitas em licitações públicas às empresas que as desejam construir. Um exemplo disso é o caso da ciclovia que foi construída no Jardim Burle Marx, entre a Torre de TV e a Rodoviária do Plano Piloto em Brasília, onde as únicas características exigidas constantes no caderno de especificações são a resistência à compressão mínima de 18 MPa do concreto a ser utilizado e a espessura mínima de 8 cm das placas da via. Uma justificativa para os poucos requisitos são as baixas solicitações às quais tais ciclovias são submetidas.

4. METODOLOGIA

Visando atingir os objetivos gerais e específicos propostos nesse trabalho, é apresentado um programa experimental cujo foco principal é a caracterização do agregado miúdo proveniente da reciclagem do Resíduos da Construção Civil (RCC) e a posterior utilização deste para a fabricação de concreto para, enfim, determinar sua viabilidade no uso em pavimentação de ciclovias. A opção do uso de apenas agregado miúdo reciclado foi feita considerando resultados obtidos em trabalhos como o de Tavares (2016), que mostraram que este tipo de agregado costuma apresentar características de granulometria e absorção adequadas ao uso em concreto, enquanto para agregados graúdos reciclados isso não acontece, pois estes apresentam maior absorção e maior chance de possuir dupla zona de transição.

O trabalho foi dividido em etapas. A primeira delas foi constituída pela obtenção do agregado miúdo reciclado. Em seguida procedeu-se a atividades experimentais realizadas no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade de Brasília (UnB). Esses ensaios visavam determinar as principais características do agregado de RCC. Foram obtidas: a composição granulométrica com os procedimentos, descritos na ABNT NBR NM 248:2003; a massa específica, de acordo com a norma ABNT NBR 9776:1987; a massa unitária, de acordo com a norma ABNT NBR NM 45:2006 e, por fim, a absorção do agregado seguindo a norma ABNT NBR NM 30:2001.

Após a caracterização do material, foi realizado um traço experimental do concreto utilizando-se primeiramente a areia natural e, posteriormente, a areia reciclada. Para esta etapa seguiu-se a metodologia de Helene e Terzian (1992) contida no “Manual de dosagem e controle de concreto” da editora Pini. Tomou-se também como referência a ABNT NBR NM 67:1998 para a realização do teste de consistência pelo abatimento do tronco de cone e a ABNT NBR 5738:2015 para a moldagem e cura dos corpos de prova.

Por fim, foi executada a última etapa experimental do projeto, na qual foram determinadas as resistências mecânicas dos concretos à compressão uniaxial, seguindo-se os procedimentos adotados na ABNT NBR 5739:2007, e a resistência à tração na compressão diametral, baseando-se na ABNT NBR 7222:2011.

O fluxograma apresentado na Figura 4-1 ilustra, resumidamente, todos esses procedimentos propostos para a metodologia do trabalho.

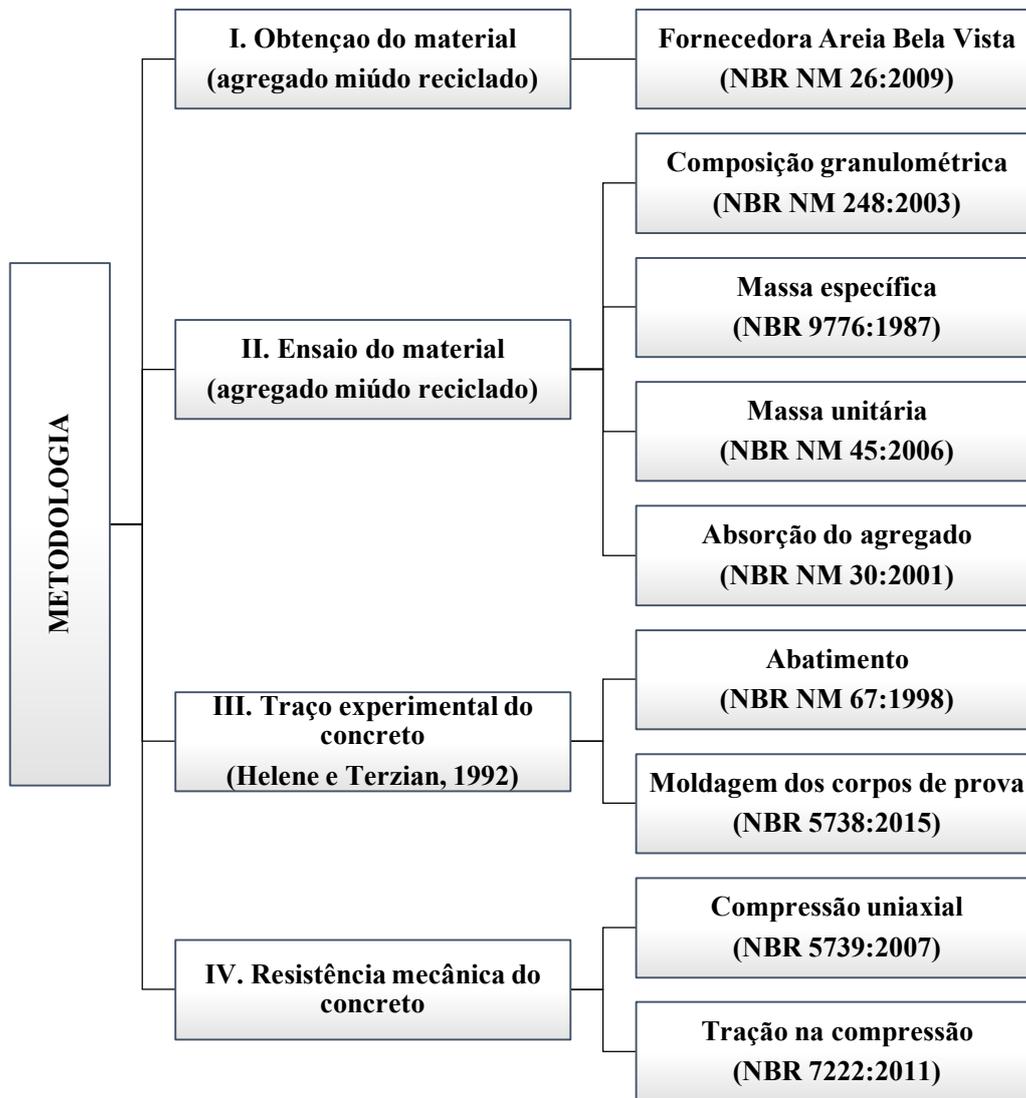


Figura 4-1 – Fluxograma da metodologia do projeto

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização do agregado miúdo convencional foi fornecida pelo Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) visto que, por esse agregado ser o utilizado como padrão nos experimentos do LEM, o mesmo já havia sido caracterizado para outros ensaios. As características do agregado miúdo reciclado, por sua vez, foram obtidas seguindo as etapas de amostragem e de ensaios laboratoriais.

4.1.1. AMOSTRAGEM

O agregado reciclado miúdo utilizado no experimento foi cedido pela empresa Fornecedora de Areia Bela Vista. Esta é a única empresa licenciada no Distrito Federal (DF) para o comércio de tal tipo de material. No local é utilizado um britador de mandíbula para a obtenção de agregados de diferentes granulometrias a partir de Resíduos da Construção Civil (RCC) de Classe A. Os agregados miúdos reciclados produzidos nessa empresa são de dois tipos, comercialmente chamados de: areia fina reciclada, com grãos finos e uniformes; e areia média reciclada, com grãos mais grossos e graduados. Já que para o uso em concreto o material com granulometria contínua é mais adequado, optou-se pela utilização da areia média reciclada.

As Figura 4-2 e Figura 4-3 mostram os dois tipos de areia reciclada produzidas pela Fornecedora de Areia Bela Vista e a Figura 4-4 mostra o equipamento de reciclagem utilizado no local.



Figura 4-2 – Areia fina reciclada



Figura 4-3 – Areia média reciclada



Figura 4-4 – Britador

É importante notar que o material foi coletado seguindo a norma brasileira ABNT NBR NM 26:2009, tendo sido feito um esforço para que as amostras fossem representativas ao serem retiradas de diferentes partes da pilha.

4.1.2. ENSAIOS DE LABORATÓRIO – AGREGADO MIÚDO (AREIA RECICLADA)

Para o presente estudo foram escolhidos para a caracterização do agregado miúdo os ensaios de composição granulométrica, massa específica, massa unitária e absorção, por estes serem os ensaios mais comumente utilizados para caracterizar agregados a serem utilizados em concretos. Apesar de nenhuma das características fornecidas por esses ensaios ser requisitada de forma direta nos atuais projetos de pavimentação de ciclovias de concreto do Distrito Federal (DF), elas têm grande influência na elaboração do traço experimental de concreto, e por consequência, na resistência à compressão uniaxial do concreto, que é a principal exigência para essa aplicação. Dessa forma, a determinação precisa dos parâmetros característicos dos agregados é de extrema importância, principalmente por se tratar do uso de material reciclado, o qual ainda não é muito utilizado na produção de concreto.

4.1.2.1. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

O ensaio de composição granulométrica (granulometria) foi realizado seguindo a norma ABNT NBR NM 248:2003. De acordo com a mesma, 1000g da amostra de areia reciclada coletada na Fornecedora de Areia Bela Vista, Figura 4-5, deve ser separada e seca em estufa a 105°C. Essa secagem deve durar o tempo necessário a garantir que o material chegue a constância de massa.

A Figura 4-6 apresenta a série de peneira utilizadas no ensaio, sendo necessário pesar separadamente (sem material) cada uma delas. Foram utilizadas a peneira intermediária de 6,3mm de abertura, as peneiras da série normal de 4,75mm a 0,15mm e a peneira de 0,075mm para determinar a quantidade de material pulverulento. Peneiras de maiores aberturas não foram necessárias por se tratar de um ensaio para agregado miúdo.



Figura 4-5 – Amostra de areia reciclada utilizada no ensaio de granulometria



Figura 4-6 – Série de peneira utilizadas no ensaio do agregado miúdo

A amostra seca deve ser despejada sobre as peneiras empilhadas na ordem de maior abertura para menor abertura e o conjunto deve ser submetido ao agitador mecânico durante 10 minutos. Feito isso, pesa-se cada uma das peneiras com material para determinar a quantidade de agregado retido. Sabendo a quantidade de massa retida em cada peneira é possível determinar o percentual retido em cada uma das peneiras, determinar o percentual retido acumulado e traçar a curva granulométrica. É importante ressaltar que, conforme determina a norma, a composição granulométrica final deve ser resultado da média do ensaio de duas amostras do agregado. Depois de traçada a curva granulométrica, esta deve ser comparada com os intervalos de zonas utilizáveis e zonas ótimas estabelecidos pela ABNT NBR NM 7211:2009 para o uso de agregados miúdos em concreto.

De acordo com a ABNT NBR NM 248:2003, para que o ensaio de composição granulométrica seja realizado por completo é necessário determinar também a dimensão máxima característica e o módulo de finura do material. Essa norma define a dimensão máxima como “correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa” e o módulo de finura (MF) como a “soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100”.

Para análise do módulo de finura de uma composição granulométrica, a ABNT NBR NM 7211:2009 estabelece, conforme indicado na Tabela 4-1, a seguinte relação entre MF e zonas de utilização:

Tabela 4-1 – Módulo de finura e zonas de utilização

Zona	Intervalo Módulo de Finura	
Zona utilizável inferior	1,55	2,20
Zona ótima	2,20	2,90
Zona utilizável superior	2,90	3,50

Outros parâmetros que podem ser utilizados para analisar a granulometria de um agregado são o Coeficiente de Uniformidade (C_u) e o Coeficiente de Curvatura (C_c). Quanto maior o valor de C_u e menor o valor de C_c mais bem graduada e menos uniforme é a amostra. C_u pode ser Equação 4.1 e C_c pela Equação 4.2:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{Equação 4.1})$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (\text{Equação 4.2})$$

Onde,

D_{10} = diâmetro que corresponde à porcentagem que passa igual a 10%;

D_{30} = diâmetro que corresponde à porcentagem que passa igual a 30%; e

D_{60} = diâmetro que corresponde à porcentagem que passa igual a 60%.

Para fins de comparação, a composição granulométrica da areia normal foi fornecida pelo Laboratório de Ensaios de Materiais (LEM) da UnB, visto que os técnicos do mesmo já haviam realizado esse experimento para esse material.

4.1.2.2. MASSA ESPECÍFICA

De acordo com a ABNT NBR 9776:1987, massa específica é a relação entre a massa do agregado seco em estufa e o volume igual do sólido, incluídos os poros impermeáveis. O ensaio desse parâmetro para o agregado miúdo (areia reciclada) foi realizado de acordo com o prescrito nessa norma e, portanto, utilizou o frasco de Chapman e não a balança hidrostática, como é previsto na norma mais recente que é a ABNT NBR 52:2009. Como o uso dessa norma mais nova ainda não se tornou recorrente nos laboratórios de materiais, é aceito o uso da norma antiga por ser a mais utilizada atualmente, sendo utilizada também por entidades como o DNIT.

Para iniciar o experimento foi feita a secagem do material em estufa a 105° C, conforme Figura 4-7, até a constância de massa, assim como no ensaio de granulometria. Em seguida, adicionaram-se cuidadosamente 500 gramas do agregado seco a um frasco de Chapman que havia sido anteriormente preenchido até a marca de 200 cm³ com água. A Figura 4-8 ilustra o conjunto formado pela água e o material.



Figura 4-7 – Secagem do agregado miúdo em estufa



Figura 4-8 – Água e agregado miúdo no frasco de Chapman

Para que o volume obtido pela mistura fosse realmente o desejado, promoveu-se delicadamente a agitação do frasco, de maneira que as bolhas de ar fossem eliminadas do conjunto. A leitura, em cm³, do nível atingido pela água, ou seja, do volume ocupado pela água e o agregado miúdo, foi realizada quando as faces internas do frasco estavam secas e sem grãos aderidos. Feita a medição, a massa específica do agregado foi calculada pela Equação 4.3 a seguir:

$$\gamma = \frac{500}{L-200} \quad (\text{Equação 4.3})$$

Onde:

γ = massa específica do agregado miúdo; deve ser expressa em g/cm³;

L = leitura do frasco (volume em cm³ ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo).

Conforme especificado pela norma ABNT NBR 9776:1987, o experimento foi executado duas vezes e o resultado final foi o obtido a partir da média das duas determinações.

4.1.2.3. MASSA UNITÁRIA

De acordo com a norma ABNT NBR NM 45:2006 a definição de massa unitária é a relação entre a massa do agregado lançado no recipiente e o volume desse recipiente. A sua determinação foi feita com base nessa mesma norma. Como a dimensão máxima do agregado em estudo é menor que 37,5 mm foi suficiente a utilização de recipientes cilíndricos de até 15 dm³ de volume. Também foi utilizada para o experimento uma haste reta de aço com 600 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro, como recomendado.

A referida norma prevê a possibilidade de utilização de 3 métodos para a determinação da massa unitária, sendo:

- Método A: é o utilizado para medir a massa unitária de agregados compactados com dimensão máxima de 37,5 mm ou menor;
- Método B: é o utilizado para medir a massa unitária de agregados compactados com dimensão máxima maior que 37,5 mm e menor que 75 mm;
- Método C: é o utilizado para medir a massa unitária dos agregados no estado solto.

Dessa forma, foram feitos ensaios com os métodos A e C. Para ambos os casos foi necessário inicialmente secar as amostras de material em estufa com temperatura de cerca de 105°C até a constância de massa. Além disso, também foi feita a prévia pesagem do recipiente cilíndrico a ser utilizado.

Para a determinação da massa unitária pelo Método A foi feito o preenchimento do cilindro com três camadas do agregado miúdo. Após o preenchimento de cada uma dessas camadas foi feita a compactação do material com 25 golpes da haste de aço e o nivelamento da camada. Por fim foi pesado o conjunto recipiente-agregado. Vale ressaltar que os golpes necessários as compactações foram proferidos de forma a atingir somente a camada a ser adensada, não podendo a haste tocar o fundo do recipiente no caso da primeira camada. O procedimento é ilustrado na Figura 4-9 e na Figura 4-10.



Figura 4-9 – Ensaio de determinação de massa unitária pelo Método A



Figura 4-10 – Pesagem do recipiente preenchido

Já o Método C constou de procedimento mais simples. Nesse caso o recipiente utilizado foi preenchido com o agregado até que este transbordasse. Em seguida foi feito o nivelamento da superfície e, por fim, a pesagem do cilindro cheio. As massas unitárias dos agregados nos estados compactados (Método A) e solto (Método C) foram calculadas pela média dos resultados individuais obtidos em três determinações, dividindo-se a massa do agregado pelo volume do recipiente utilizado, expressa em quilogramas por metro cúbico, conforme Equação 4.4 a seguir:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (\text{Equação 4.4})$$

Onde:

ρ_{ap} é a massa unitária do agregado, em quilogramas por metro cúbico;

m_{ar} é a massa do recipiente mais o agregado, em quilogramas;

m_r é a massa do recipiente vazio, em quilogramas;

V é o volume do recipiente, em metros cúbicos.

4.1.2.4. ABSORÇÃO DOS AGREGADOS

O ensaio de absorção de agregados miúdos foi feito de acordo com a ABNT NBR NM 30:2001. O experimento foi iniciado com a separação e secagem em estufa até a constância de massa do agregado miúdo reciclado. Em seguida, separou-se 1000 gramas dessa amostra e a encobriu com água para que sofresse saturação durante 24 horas. A etapa seguinte foi a retirada do excesso de água do material e posterior secagem do mesmo até que este atingisse a condição

de saturado de superfície seca. Com o agregado neste estado foi possível calcular a absorção deste por meio da Equação 4.5 descrita a seguir:

$$A(\%) = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (\text{Equação 4.5})$$

Onde:

A é a absorção do material, em porcentagem;

m_s é a massa ao ar do agregado na condição saturada e de superfície seca, em gramas;

m é a massa da amostra seca em estufa do material, em gramas.

A condição de material saturado e de superfície é definida como sendo aquela onde os grãos do agregado miúdo não ficam aderidos entre si de forma marcante. Para verificar se tal condição foi atingida a amostra foi inserida diversas vezes durante o processo de secagem em um molde de tronco de cone com diâmetro superior de 40 ± 3 mm, diâmetro inferior de 90 ± 3 mm e 75 ± 3 mm de altura; aplicando-se 25 golpes no material com uma haste de compactação e, em seguida, retirando-se o molde. Quando, após executado este procedimento e tendo o molde sido retirado, o material se conservou com a forma do molde, foi considerado que este ainda tinha umidade superficial e foi necessário prosseguir com a secagem. O material foi considerado na condição ideal no momento em que, após feito este teste, o agregado “desmoronou”. O referido ensaio está ilustrado nas Figura 4-11 a Figura 4-13 a seguir:



Figura 4-11 – Amostra após saturação



Figura 4-12 – Amostra em condição não ideal para o cálculo de absorção



Figura 4-13 – Amostra em condição saturada de superfície seca

4.2. ENSAIO DE LABORATÓRIO – CONCRETO

Após a etapa de caracterização do agregado miúdo reciclado obtido na Fornecedora de Areia Bela Vista, partiu-se para a etapa do traço experimental e caracterização do concreto. Foram previstos dois ensaios de resistência mecânica: o ensaio de resistência à compressão uniaxial e o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Para fins de comparação de resultados, os ensaios, bem como o traço, foram feitos tanto para um concreto com agregado miúdo natural quanto para um concreto com agregado miúdo reciclado. O cimento utilizado para todos os concretos foi o CP II-F 40, ou seja, Cimento Portland Composto com Filer.

4.2.1. TRAÇO EXPERIMENTAL E MOLDAGEM DO CONCRETO

Visando comparar a resistência do concreto produzido utilizando apenas o agregado miúdo (areia) não reciclado em relação ao concreto produzido com agregado miúdo reciclado, optou-se por produzir um concreto com areia do rio Corumbá e outro com agregado miúdo reciclado obtido na Fornecedora de Areia Bela Vista. Utilizou-se como metodologia base a descrita por Helene e Terzian (1992) contida no “Manual de dosagem e controle de concreto” da editora Pini. Para tanto, foram produzidos traços experimentais para ambos os concretos utilizando-se como referência a Tabela 4-2. Nessa tabela os traços propostos consideram a relação agregados secos/cimento (em massa) igual a 5.

A intensão desta fase experimental era determinar qual o teor de argamassa e a relação água/cimento necessários para o traço experimental do concreto com a consistência (abatimento) desejada. A determinação do teor de argamassa ideal é de extrema importância visto que um teor muito baixo pode acarretar em um concreto muito poroso e gerar falhas de concretagem, enquanto um concreto com alto teor de argamassa tende a ser mais caro e estar sujeito a mais fissuras provenientes da retração. Já a preocupação com a relação água/cimento se justifica pelo fato de que um excesso de água no concreto tende a diminuir sua resistência, e uma baixa relação costuma gerar concretos de trabalhabilidade ruim, entre outros problemas.

Tabela 4-2 – Planilha do traço experimental do concreto

Teor de argamassa seca (α)	c	a	p	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Var. Cimento (kg)	Água (kg)	Slump (cm)	a/c
48%	1	1,88	3,12	8,333	15,667	26	0,000	-	10 ± 2	-
51%	1	2,06	2,94	8,844	18,218	26	0,511	-	10 ± 2	-
54%	1	2,24	2,76	9,420	21,101	26	0,576	-	10 ± 2	-

Onde:

“c” é a quantidade de cimento;

“a” é a relação areia/cimento (tanto areia natural quanto reciclada);

“p” é a relação brita/cimento;

α é o teor de argamassa seca, ou seja, $\frac{\text{cimento} + \text{areia}}{\text{cimento} + \text{areia} + \text{água}}$; e

a/c é a relação água/cimento.

No presente estudo foi estipulado que a adequabilidade da consistência do concreto seria atingida quando o traço experimental de concreto tivesse abatimento, determinado pelo “*slump test*”, de 10 ± 2 cm. Esse é o valor normalmente utilizado para os concretos de ciclovias em pavimento rígido no Distrito Federal (DF) e se justifica por ser uma consistência adequada ao adensamento com uso de régua vibratória e por possibilitar uma concretagem com bombeamento, caso seja necessário.

Sendo assim, conforme recomendado no método escolhido, iniciou-se o traço experimental fixando-se a relação agregados/cimento e a quantidade de agregado graúdo para que a cada tentativa de variação no teor de argamassa (α) fosse necessário calcular apenas o proporcional de cimento e de areia a serem adicionados à betoneira. A escolha por iniciar o traço experimental com α em 48% foi tomada porque com um teor de argamassa seca menor do que esse o concreto tem uma chance elevada de não adquirir uma consistência mínima no teste de consistência pelo abatimento de tronco de cone, já que haverá um relativo excesso de agregado graúdo na mistura que tende a impedir uma condição de coesão do material adequada.

Inicialmente foi produzido o concreto com agregado miúdo natural, como mostra a Figura 4-15. Para a introdução dos materiais à betoneira respeitou-se a ordem: agregado graúdo, agregado miúdo, cimento e água. Após misturar por cerca de 5 minutos os materiais e uma pausa intermediária para a limpeza das pás da betoneira, retirou-se uma amostra do concreto para o teste de consistência pelo abatimento do tronco de cone, conforme ilustra a Figura 4-16.

Quando o resultado obtido não foi satisfatório procedeu-se com o aumento do α de 3% em 3%, vide Figura 4-14, sempre verificando se a consistência pelo já mencionado teste de abatimento estava dentro da trabalhabilidade necessária. A partir do momento que foi encontrado um α satisfatório, foram fixados todos os parâmetros dessa mistura e partiu-se para o traço experimental do concreto com agregado miúdo reciclado.



Figura 4-14 – Material para aumento do teor de argamassa seca



Figura 4-15 – Traço experimental de concreto com agregado natural

A mistura de concreto com a areia reciclada foi rodada com as mesmas quantidades de material utilizado no concreto com areia natural. Optou-se por utilizar a mesma quantidade de materiais em ambas as misturas, com o mesmo α e a mesma relação água/cimento para que a comparação do resultado de resistência dos dois concretos fosse coerente. Após a determinação dos traços pilotos experimentais adequados para cada tipo de concreto foram moldados os Corpos de Provas (CP's) conforme ilustra a Figura 4-17.



Figura 4-16 – Teste de abatimento do concreto



Figura 4-17 – Moldagem dos corpos de prova de concreto

Vale ressaltar que o teste de consistência pelo abatimento do tronco de cone foi feito de acordo com a ABNT NBR NM 67:1998, utilizando-se molde metálico de espessura maior que 1,5 mm, diâmetro de base inferior de 200 mm, diâmetro de base superior de 100 mm, e altura de 300 mm. Foi também utilizada haste de compactação com 600 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro, além de placa base quadrada de 3 mm de espessura. Este teste de abatimento pode ser descrito de forma resumida nas seguintes etapas:

- Umedecimento do molde e colocação deste sobre a base também umedecida;
- Preenchimento do molde com concreto até um terço de sua altura;
- Compactação da camada com 25 golpes distribuídos da haste de socamento;
- Preenchimento e compactação de mais duas camadas, sem que a haste encoste na camada inferior durante os golpes;
- Rasamento e limpeza do concreto no topo do molde;
- Limpeza da placa base;
- Retirada vertical e progressiva (de 5 a 10 segundos) do molde;
- Medição do abatimento pela diferença entre a altura do molde e a altura do eixo da amostra, com aproximação de 5 mm.

Já a moldagem dos CP's, posterior ao traço experimental de cada um dos concretos, foi realizada de acordo com a ABNT NBR 5738:2015. Conforme permitido por esta os CP's, que deveriam ter 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, foram moldados a partir de duas camadas iguais de concreto compactadas manualmente com 12 golpes de haste de compactação. Em seguida foi feito o rasamento do topo e os CP's foram levados para uma câmara úmida, onde

foram armazenados em superfície horizontal e livre de deformações para que se iniciasse o processo de cura para posterior realização dos ensaios de resistência mecânica.

No presente estudo não foram realizadas dosagens dos concretos com os traços rico (1:3,5) e pobre (1:6,5) para a determinação do gráfico de dosagem exposto no “Manual de dosagem e controle de concreto”. Como o foco do trabalho é verificar se as características de resistência do concreto com agregado miúdo reciclado para uso na pavimentação de ciclovias são adequadas, optou-se por realizar apenas um traço experimental que atendesse a esse critério.

4.2.1.1. CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO

Depois de encontrado o traço experimental dos dois tipos concretos e determinadas as quantidades de cada material utilizado, foi possível determinar, além do teor de argamassa e da relação água/cimento para cada um deles, o consumo de cimento por metro cúbico (C) e a massa específica do concreto que são dados, respectivamente, pelas Equação 4.6 e Equação 4.7.

$$C = \frac{\gamma_{concreto}}{1+a+p+"a/c"} \quad (\text{Equação 4.6})$$

$$\gamma_{concreto} = \frac{P_{cp}}{V_{cp}} \quad (\text{Equação 4.7})$$

Onde:

“c” é a quantidade de cimento;

“a” é a relação agregado miúdo/cimento (tanto areia natural quanto reciclada);

“p” é a relação agregado graúdo/cimento;

“a/c” é a relação água/cimento;

C é o consumo de cimento, em quilograma por metro cúbico;

$\gamma_{concreto}$ é a massa específica do concreto, em quilograma por metro cúbico;

P_{cp} é o peso do corpo de prova, em quilogramas; e

V_{cp} é o volume do corpo de prova, em metros cúbicos.

4.2.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL DO CONCRETO

O ensaio de resistência a compressão uniaxial do concreto foi realizado aos 7 e aos 28 dias após a produção do traço experimental, moldagem dos Corpos de Prova (CP's) e início da cura dos CP's. A escolha para a primeira data de ensaio foi feita considerando-se que na aplicação do concreto com agregado miúdo reciclado para ciclovia, muitas vezes há urgência para a liberação do tráfego dos trechos onde já há a resistência prevista pelo projeto. Para o caso particular deste presente estudo, a resistência à compressão do concreto será dada como satisfatória quando esta atingir 18 MPa, que foi o exigido no edital da obra de construção da ciclovia do Jardim Burle Marx, no Distrito Federal (DF).

Para dar início a esse ensaio foram desformados dois corpos de prova do concreto produzido com o agregado miúdo reciclado e dois corpos de prova produzidos com o agregado miúdo natural. Em seguida foi efetuado com ajuda de aparelho mecânico a retificação das bases das amostras, ou seja, foram removidas as irregularidades destas de forma a deixá-las livres de ondulações e outras irregularidades para que a aplicação de tensões do ensaio fosse a mais uniforme possível. Na Figura 4-18 tem-se os CP's preparados e prontos para ensaio. Também constou da parte prévia do ensaio a medição com o paquímetro das dimensões dos CP's, retirando-se duas medidas de cada altura e de cada base para que, com a média, fossem calculadas as dimensões de referência. A relação entre essas duas dimensões não deve ser menor que 1,94 para que não sejam necessários fatores de correção nos cálculos da resistência e nunca deve ser maior que 2,02.



Figura 4-18 – Corpos de Prova preparados para ensaio



Figura 4-19 – Prensa utilizada nos ensaios de resistência mecânica do concreto

Após o controle geométrico do corpo de prova procedeu-se ao rompimento deste na prensa do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) apresentada na Figura 4-19. Para tanto, foi feito o posicionamento da amostra com sua base em cima do prato inferior da prensa mecânica, de maneira que este ficasse centralizado nos círculos de referência lá desenhados, como mostra a Figura 4-20. Iniciou-se então o carregamento com velocidade constante de cerca de 0,45 MPa/s, só sendo cessado quando uma queda na força exercida pela máquina foi identificada, o que indicou que o corpo de prova atingiu a ruptura. Na Figura 4-21 observa-se um CP já rompido.



Figura 4-20 – Corpo de prova posicionado na prensa



Figura 4-21 – Corpo de prova rompido à compressão uniaxial

De posse da força necessária à ruptura e das dimensões previamente medidas do CP foi possível o cálculo da resistência uniaxial do concreto ensaiado pela Equação 4.8:

$$f_{cj} = \frac{4.F}{\pi.D^2} \quad (\text{Equação 4.8})$$

Onde:

F é a força máxima aplicada pela prensa, em newtons;

D é o diâmetro do corpo de prova, em mm; e

f_{cj} é a resistência à compressão do corpo de prova a uma idade de “j” dias, em megapascals.

O ensaio de resistência à compressão uniaxial do concreto aos 28 dias foi realizado com os mesmos procedimentos citados para o ensaio aos 7 dias

4.2.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL

Apesar de não constar nos editais e cadernos de especificações de construções de ciclovias no Distrito Federal (DF) a exigência de uma resistência mínima à tração para os concretos a serem utilizados, decidiu-se por fazer a determinação da resistência à tração na compressão diametral para se ter mais uma caracterização do concreto com agregado miúdo reciclado.

Assim como no ensaio de resistência à compressão uniaxial, foram utilizados para esse ensaio Corpos de Prova (CP's) cilíndricos moldados da mesma maneira após o traço experimental e que também foram submetidos ao mesmo tipo de cura em câmara úmida. Além disso, também foram medidas as dimensões das amostras previamente por meio da média de duas determinações. Outro procedimento adotado foi o traçado na extremidade de cada corpo de prova uma linha diametral de forma que as duas linhas resultantes ficassem contidas no mesmo plano axial. Esse processo visou auxiliar no posicionamento das amostras na prensa e pode ser observado na Figura 4-22.

Por fim, foi feita a ruptura dos corpos de prova, posicionando-os “deitados” no prato inferior da prensa com o auxílio de tiras de madeira fixadas sobre as linhas desenhadas, como mostrado na Figura 4-22. A velocidade de carregamento da prensa foi, conforme a norma mencionada, de cerca de 0,05 MPa/s até a ruptura. Também para esse ensaio foram rompidas amostras feitas com concreto convencional e reciclado para fins de comparação.



Figura 4-22 – Corpo de prova no ensaio à tração na compressão diametral

A resistência à tração na compressão diametral pôde ser determinada pela Equação 4.9:

$$f_{ct,sp} = \frac{2.F}{\pi.D.L} \quad (\text{Equação 4.9})$$

Onde:

F é a força máxima aplicada pela prensa, em newtons;

L é o comprimento do corpo de prova, em milímetros;

D é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros; e

$f_{ct,sp}$ é a resistência à tração na compressão diametral, em megapascals.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

As análises dos resultados obtidos nos ensaios descritos foram feitas considerando-se diversos aspectos, dentre os quais se destacam:

- Critérios contidos nas próprias normas de ensaio, que julgam não só a qualidade do material, como também a correta execução dos procedimentos;
- Resultados obtidos em pesquisas anteriores;
- Impactos nas características do material recorrentes da utilização do agregado miúdo reciclado;
- Requisitos previstos por norma para a utilização de material reciclado; e
- Requisitos de projetos nos quais se pode projetar uma possível utilização de concreto com agregado miúdo reciclado.

Os dados de caracterização do agregado miúdo convencional apresentados nesse trabalho foram obtidos junto ao Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) e também em pesquisas bibliográficas de trabalhos de Sousa e Soares, 2013, Beltrão, 2014, e Tavares, 2016. Tais dados são utilizados como parâmetro de comparação para o agregado miúdo reciclado.

5.1. CARACTERÍSTICAS DA AREIA RECICLADA

A areia média utilizada no experimento pode ser classificada quanto a sua procedência como Agregado de Resíduo de Concreto (ARC), pois além de ser proveniente de resíduos da Classe A, ela também é composta de mais de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas, já que segundo os proprietários do local o material foi obtido a partir da britagem de concreto de demolição do Estádio Nacional de Brasília.

Apesar de a areia reciclada ter sido obtida na Fornecedora de Areia Bela Vista, assim como em outras pesquisas recentemente realizadas, os ensaios de caracterização do agregado miúdo reciclado mostraram que algumas propriedades variaram bastante quando comparamos esse a outros trabalhos, como será visto adiante.

5.1.1. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Conforme as orientações experimentais apresentadas no item 4.1.2.1 desse trabalho, o ensaio de composição granulométrica foi feito de acordo com a NBR NM 248:2001. A Tabela 5-1 traz os resultados do experimento para o agregado miúdo (areia reciclada).

Tabela 5-1 – Composição granulométrica do agregado miúdo (areia reciclada)

Peneira (mm)	Massa (g)				% Massa Retida			% Ret. Acum. Média
	Peneira	Amostra 1	Amostra 2	Média	Amostra 1	Amostra 2	Média	
6,3	473,19	20,25	23,25	21,75	2,1%	2,4%	2,2%	2%
4,75	516,25	55,38	55,15	55,27	5,6%	5,7%	5,7%	8%
2,36	596,77	165,83	157,33	161,58	16,8%	16,3%	16,6%	25%
1,18	581,62	235,98	228,08	232,03	23,9%	23,6%	23,8%	48%
0,6	405,22	69,38	70,68	70,03	7,0%	7,3%	7,2%	55%
0,3	387,20	91,70	91,49	91,60	9,3%	9,5%	9,4%	65%
0,15	387,97	207,16	213,63	210,40	21,0%	22,1%	21,6%	86%
0,075	381,63	106,72	109,84	108,28	10,8%	11,4%	11,1%	98%
Fundo	331,37	33,60	15,06	24,33	3,4%	1,6%	2,5%	100%
Módulo de finura (%)								2,87
Dimensão máxima característica (mm)								6,3

Ao se analisar as exigências da NBR NM 248:2001, temos que o ensaio foi bem executado visto que a porcentagem de massa retida individualmente em cada uma das peneiras de cada amostra não diferiu mais do que 4% em relação ao respectivo percentual na outra amostra.

Por meio dos dados da Tabela 5-1 foi possível construir a curva granulométrica em escala mono-log desse agregado e compará-la com as zonas de utilização estabelecidas pela ABNT NBR 7211:2009, conforme ilustra a Figura 5-1.

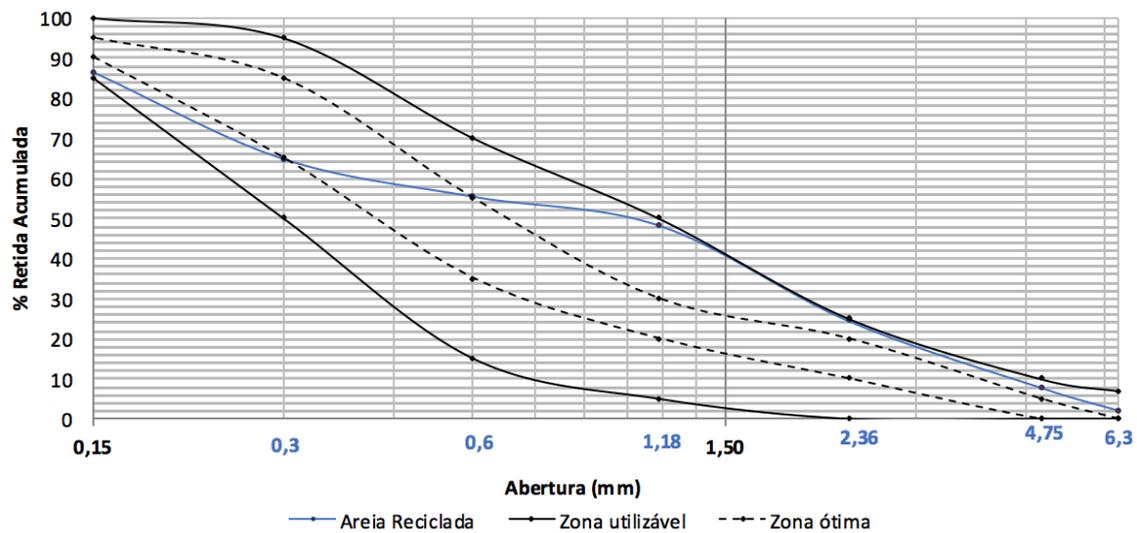


Figura 5-1 – Curva granulométrica do agregado miúdo (areia reciclada)

Analisando a curva da areia reciclada (série em azul) observamos que o agregado possui uma granulometria que se encontra sempre dentro do intervalo da zona utilizável, o que indica que esse agregado pode ser utilizado na produção de concreto. Uma observação é que apenas a amostra que ficou entre as peneiras 0,3mm e 0,6mm se encontra na zona ótima, situação em que a graduação do agregado é a melhor possível para uso em concreto.

Quando olhamos na Tabela 5-1 o percentual de matéria fina (passante na peneira 0,075mm) que existe na amostra de areia reciclada, observamos que quase 2,5% da massa da amostra está nessa faixa, o que não é uma quantidade elevada. Uma maior parcela de matéria fina resulta em uma maior quantidade de água para hidratar a mistura do concreto, o que pode aumentar a relação água/cimento e, conseqüentemente, reduzir a resistência do mesmo. Outra característica que pode ser afetada é a trabalhabilidade do concreto que está diretamente relacionada com a relação água/cimento da amostra.

Para a areia reciclada o módulo de finura encontrado foi de 2,87 o que, de acordo com a ABNT NBR 7211:2009, classifica o agregado como pertencente a zona ótima. Assim como a curva granulométrica, esse indicador permite prever como será o comportamento do concreto quanto ao consumo de água e de cimento, sendo que a relação água/cimento tende a estar otimizada quando o mesmo se encontra na zona ótima.

Outro indicador determinado nesse experimento foi a dimensão máxima característica de 6,3mm, correspondente a abertura da peneira onde havia um percentual retido acumulado igual ou imediatamente inferior a 5% em massa do agregado. Associando esse indicador ao consumo de água e de cimento temos que quanto maior ele for, menor será a área superficial

por unidade de massa, resultando em um menor consumo de água para hidratar a mistura e aumentar sua trabalhabilidade.

Quanto aos índices Coeficiente de Uniformidade (C_u) e Coeficiente de Curvatura (C_c), calculados conforme equações apresentadas no 4.1.2.1, foram obtidos os seguintes resultados:

$$C_u = \frac{1,55}{0,13} = 11,9 \qquad C_c = \frac{0,25}{1,55 \times 0,13} = 1,2$$

O resultado de C_u maior do que 10 indica que a agregado miúdo reciclado não tem granulometria uniforme e o resultado de C_c , que está entre 1 e 3, é característica de um material bem graduado.

5.1.2. MASSA ESPECÍFICA

Os resultados do ensaio de massa específica, executado de acordo com o roteiro descrito no tópico 4.1.2.2, são apresentados na Tabela 5-2.

Tabela 5-2 – Massa específica do agregado miúdo (areia reciclada)

Indicador	1ª Determinação	2ª Determinação	Média
Massa (g)	500	500	500
L (cm ³)	396	396	396
γ (g/cm ³)	2,551	2,551	2,551

Conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 9776:1987, as duas determinações desse ensaio não deveriam diferir entre si mais de 0,05 g/cm³. Como a diferença entre elas pode ser considerada nula, pode-se considerar que o experimento foi realizado de forma bem sucedida.

Quando comparamos a massa específica da areia reciclada com a massa específica da areia convencional, temos que a mesma foi menor. Isso já era esperado pois agregados reciclados costumam ter uma maior quantidade de vazios internos. Uma explicação para o resultado desse parâmetro nos trabalhos de Beltrão, 2014, e Tavares, 2016, terem sido bem diferentes é que a amostra do agregado reciclado pode ter sido de origem diferente.

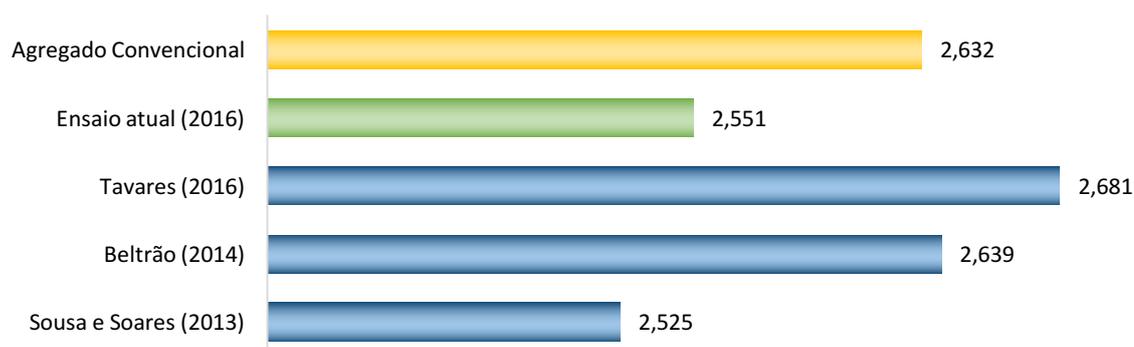


Figura 5-2 – Comparativo da massa específica do agregado miúdo (g/cm³)

5.1.3. MASSA UNITÁRIA

Conforme previsto na norma ABNT NBR NM 45:2006 e explicado no item 4.1.2.3 desse trabalho, o ensaio de massa unitária para o agregado miúdo reciclado foi realizado tanto para o estado compactado (Método A) quanto para o estado solto (Método C). A Tabela 5-3 e a Tabela 5-4 apresentam, respectivamente, os resultados encontrados.

Tabela 5-3 – Massa unitária da areia reciclada – Estado Compactado – Método A

Massa Agregado (kg)	Volume (dm ³)	Massa Unitária (kg/dm ³)
22,37	14,25	1,57
22,71	14,25	1,59
22,95	14,25	1,61
Média		1,59

Tabela 5-4 – Massa unitária da areia reciclada – Estado Solto – Método C

Massa Agregado (kg)	Volume (dm ³)	Massa Unitária (kg/dm ³)
22,41	15,00	1,49
22,64	15,00	1,51
22,80	15,00	1,52
Média		1,51

O resultado individual de cada ensaio não deve apresentar desvio maior que 1% em relação à média. Para o Método A esse desvio não deve ser maior do que 0,0159g (limite superior = 1,61 e limite inferior = 1,57) e para Método C não deve ser maior do que 0,0151g (limite superior = 1,53 e limite inferior = 1,49). Observando a Tabela 5-3 e a Tabela 5-4 tem-

se que o experimento foi bem sucedido e a norma atendida, pois todos os resultados individuais estão dentro de seus respectivos limites.

Assim como aconteceu com a massa específica, a massa unitária no estado solto também apresentou um resultado menor quando comparada ao agregado convencional nesse estado, cuja massa unitária é de 1,52 kg/dm³. Essa diferença, embora pareça pequena, pode ser significativa quando consideramos o volume de concreto a ser produzido com cada tipo de agregado.

5.1.4. ABSORÇÃO DOS AGREGADOS

O ensaio de determinação da absorção, realizado de acordo com a ABNT NBR NM 30 e descrito no item 4.1.2.4 deste trabalho, forneceu o seguinte resultado:

$$A(\%) = \frac{m_s - m}{m} \times 100 = \frac{1022,1 - 1000}{1000} \times 100 = 2,2 \%$$

O resultado de apenas 2,2% de absorção foi inesperado, visto que é mais comum valores mais altos para agregados reciclados que para agregados convencionais. O agregado convencional utilizado na posterior fase do traço experimental do concreto apresentou absorção de 1,7%, ou seja, a absorção do agregado reciclado foi apenas 29% maior. Uma possível razão para essa baixa diferença é que o agregado reciclado utilizado foi obtido majoritariamente da demolição de concreto do Estádio Nacional de Brasília, sendo composto em sua maior parte por Cimento Portland e rochas. Para os casos onde o agregado reciclado possui em sua composição parcelas consideráveis de outros materiais mais porosos, como os materiais cerâmicos, por exemplo, é provável que premissas, como a mencionada por Betonikeskus (2005), de que o agregado reciclado apresente de 5 a 10 vezes mais absorção, possam ser concretizadas, já que materiais mais porosos costumam absorver mais água. Na Figura 5-3 é mostrada uma comparação entre a absorção obtida neste projeto e a obtida em outros estudos recentes.

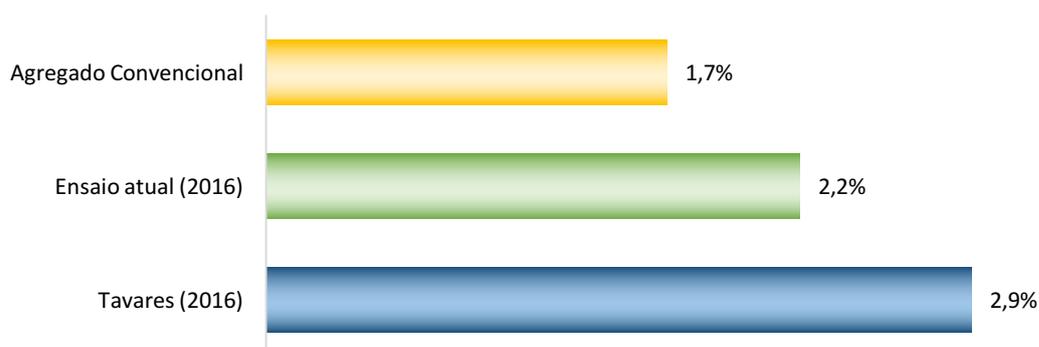


Figura 5-3 – Comparativo de absorção dos agregados

5.2. ESTUDOS DO CONCRETO

Os estudos do traço experimental, que foram realizados baseando-se no método de Helene e Terzian (1992), mostraram que o agregado miúdo reciclado em estudo, apesar de ter particularidades, pode ser utilizado na produção de concreto para uso em pavimentação de ciclovias seguindo os mesmos procedimentos que os utilizados para o concreto convencional. Para chegar a essa conclusão, foram obtidos parâmetros como o consumo de cimento, a relação água/materiais secos, a relação água/cimento e a massa específica do concreto. Além disso foram encontrados os parâmetros de resistência mecânica do concreto, como a resistência à compressão uniaxial e à tração na compressão diametral.

Como explicitado anteriormente, toda a análise do concreto reciclado foi realizada visando o uso do mesmo na pavimentação de ciclovias do Distrito Federal (DF). Feita essa consideração, os parâmetros de resistência e as características mais estudadas do concreto são aquelas estabelecidas pelos editais e projetos de ciclovia em pavimento rígido de concreto do DF. Sendo assim, a resistência à compressão uniaxial é o fator determinante para a viabilidade do concreto com agregado miúdo reciclado.

Para o presente estudo essa análise foi feita considerando a situação de controle tecnológico do concreto após recebimento em uma obra. Dessa forma, será considerado que o f_{cj} (resistência do traço experimental após “j” dias) obtido no ensaio do concreto realizado será comparado diretamente com o f_{ck} (resistência característica de projeto), sendo considerado para fins de resultado o maior valor obtido entre as duas amostras moldadas. Outra consideração é que a situação de controle será na fase de execução, logo não será considerado para fins de cálculo o desvio padrão referente à variabilidade de resultados do produtor do concreto. Os

resultados e análises referentes às dosagens e às características mecânicas do concreto estão apresentadas nos itens 5.2.1 e 5.2.2.

5.2.1. TRAÇOS EXPERIMENTAIS DE CONCRETO

A Tabela 5-5 apresenta os resultados dos dois traços pilotos de concretos que foram produzidos, um com agregado miúdo convencional e outro com agregado miúdo reciclado. Como pode ser percebido, ambos os traços experimentais dos concretos foram produzidos com o mesmo teor de argamassa e a mesma relação água/cimento, o que facilitou a comparação entre os dois materiais.

Para o concreto com areia convencional, o *slump* (abatimento) de 12 cm, dentro do almejado de 10 ± 2 cm, foi obtido com um teor de argamassa (α) de 54% e com o uso de 7,03 litros de água. Também com o mesmo teor de argamassa e o mesmo uso de água foi obtida uma consistência adequada para o concreto com agregado reciclado, porém, para esse caso o *slump* foi de 9,5 cm. Dessa forma, a relação água/cimento (*a/c*) foi, para ambos os casos, igual 0,75, que é um valor bem elevado e consideravelmente superior ao valor máximo de 0,60, recomendado pela ABNT NBR 6118:2014 para o uso em estruturas cuja classe de agressividade é II. Uma observação é que esse valor de 0,60 é para concretos estruturais. Apesar de não haver uma obrigatoriedade em relação a esse parâmetro para o uso não estrutural, que é o caso das ciclovias, não é prudente a utilização de concretos com relação água/cimento tão elevada, já que isto pode acarretar em baixos valores de resistência, entre outros problemas.

Tabela 5-5 – Estudo dos traços pilotos de concreto

Traço Piloto	Teor de argamassa seca (α)	c	a	p	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Slump (cm)	a/c
Areia Convencional	54%	1	2,24	2,76	9,420	21,101	26	7,03	12,0	0,75
Areia Reciclada (demolição)	54%	1	2,24	2,76	9,420	21,101	26	7,03	9,5	0,75

Pela comparação dos resultados obtidos para os dois tipos de concreto também é possível inferir que a expectativa em relação a pior trabalhabilidade do concreto com material reciclado, anteriormente mencionada por Betonikeskus (2005), foi confirmada. Isso pode ser notado pelo *slump* maior obtido no concreto de agregado convencional em relação ao reciclado, para um mesmo consumo de água. Para solucionar os problemas mencionados uma alternativa seria um novo traço experimental do concreto reciclado utilizando-se menos água, já que para a adequabilidade deste o abatimento pode ser de até 8,0, o que quer dizer que o concreto dosado ainda possui uma margem em relação a esse fator. Outra alternativa interessante seria testar a utilização de aditivo plastificante. Esse poderia possibilitar não só na redução da relação água/cimento como em uma redução no consumo de cimento, ao permitir uma boa trabalhabilidade com menos água.

Com as dimensões dos corpos de prova e os seus pesos, foi possível calcular a massa específica dos dois concretos pela média dos resultados obtidos pela Equação 4.7 apresentada no tópico 4.2.1.1 para quatro amostras de cada tipo. Os resultados estão apresentados na Tabela 5-6.

Tabela 5-6 – Massa específica do concreto

Agregado miúdo	Corpo de prova	Peso (kg)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (dm ³)	γ (kg/m ³)	γ médio (kg/m ³)
Areia Natural	A1.a	3,784	10,059	19,884	1,579	2395,9	2387,5
	A1.b	3,806	10,015	20,037	1,578	2412,7	
	A1.1	3,795	10,009	20,071	1,578	2404,5	
	A1.2	3,784	10,119	20,147	1,619	2337,1	
Areia Reciclada	A2.a	3,727	9,987	19,893	1,558	2392,6	2368,8
	A2.b	3,735	10,018	19,859	1,564	2387,4	
	A2.1	3,757	10,061	20,196	1,605	2340,9	
	A2.2	3,786	10,019	20,412	1,608	2354,3	

Os resultados mostram que o concreto com agregado miúdo reciclado possui menor massa específica, apesar de a diferença não ter sido muito alta. Concretos com materiais reciclados tendem a ter massa específica bem menor devido à sua maior quantidade de vazios, então pode-se dizer que o resultado surpreendeu pela pequena diferença entre as amostras. Como ambos os concretos apresentam massas específicas entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³, pode-se dizer que ambos são classificados como normais, quanto a esse fator. Quando comparamos a massa específica ao valor ideal proposto pelo VTT (*Technical Research Centre of Finland*), temos que tanto a areia natural quanto a reciclada ficaram acima do valor máximo de uso indicado que é de 2200kg/m³.

Também com os resultados obtidos nos traços experimentais e com os parâmetros de massa específica dos materiais, foi possível calcular com a Equação 4.6, apresentada no tópico 4.2.1.1, os consumos de cimento para ambos os concretos. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 5-7.

Tabela 5-7 – Consumo de cimento (C)

Agregado miúdo utilizado no concreto	C (kg/m³)
Areia Natural	353,90
Areia Reciclada	351,12

O consumo de cimento, assim como a massa específica, não apresentou uma variabilidade grande entre concretos. Como a relação água/cimento foi fixada e o cimento e o agregado grão utilizados para os dois tipos de material foram os mesmos, o principal fator responsável pela variação dos consumos de cimento entre as amostras foi a massa específica dos agregados miúdos, porém, como se pôde observar, somente essa característica não foi suficiente para trazer uma grande mudança nesse parâmetro, que tem grande influência no custo final do concreto. Analisando apenas o consumo de cimento obtido, é possível interpretar que o concreto reciclado é mais econômico nesse sentido, porém o concreto convencional poderia ter tido sua relação água/cimento e consumo de cimento reduzidos, caso este tivesse sido produzido com o mesmo abatimento do concreto reciclado.

Outra conclusão que também pode ser tirada pelos resultados é que ambos os concretos estariam aptos, do ponto de vista do consumo de cimento, para uso em elementos estruturais sujeitos às classes de agressividade I, II e III, de acordo com a ABNT NBR 12655:2015, já que o consumo foi maior que 320 kg/m³ para os dois casos.

5.2.2. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO CONCRETO

A Tabela 5-8 e a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a seguir apresentam os resultados de resistência do concreto à compressão e à tração na compressão diametral aos 7 dias e 28 dias. Para cada um dos ensaios foram utilizados dois Corpos de Prova (CP's).

Tabela 5-8 – Resistência do concreto a compressão e a tração diametral – 7 dias

Agregado miúdo	Ensaio	Corpo de prova	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Carga (tf)	Tensão (MPa)
Areia Natural	Compr.	A1.a	10,059	19,884	13,030	16,41
		A1.b	10,015	20,037	12,620	16,03
	Tração	A1.1	10,009	20,071	6,870	2,18
		A1.2	10,119	20,147	6,700	2,09
Areia Reciclada	Compr.	A2.a	9,987	19,893	14,890	19,02
		A2.b	10,018	19,859	13,100	16,63
	Tração	A2.1	10,061	20,196	6,790	2,13
		A2.2	10,019	20,412	6,460	2,01

Tabela 5-9 – Resistência do concreto à compressão e à tração diametral – 28 dias

Agregado miúdo	Ensaio	Corpo de prova	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kgf)	Tensão (Mpa)
Areia Natural	Compr.	A1a	10,055	19,763	17,860	22,506
		A1b	10,049	19,824	15,460	19,503
	Tração	A1.1	10,046	19,875	5,590	1,783
		A1.2	10,083	19,915	8,040	2,550
Areia Reciclada	Compr.	A2a	9,973	19,795	18,310	23,454
		A2b	10,009	19,794	17,620	22,406
	Tração	A2.1	10,012	19,972	5,700	1,816
		A2.2	10,073	20,050	6,970	2,198

É possível observar que, ao contrário do que era esperado, o concreto com areia reciclada teve resistência à compressão maior que o concreto convencional. Isso pode ser explicado pelo fato de que os concretos foram produzidos para terem mesma relação água/cimento e mesmo teor de argamassa, o que gerou a necessidade de produzir um traço de concreto convencional consideravelmente mais fluido que o concreto reciclado, já que este último possui piores características de trabalhabilidade. Caso o traço experimental do concreto convencional fosse produzido com *slump* de 9,5 cm, este teria menos água e, por consequência, provavelmente teria maior resistência à compressão. Além disso, pode-se constatar que, enquanto o concreto convencional apresentou resistências à compressão parecidas para as duas amostras rompidas aos 7 dias, no concreto reciclado uma das amostras teve uma resistência 14% maior que a outra, apesar de todos os corpos de prova terem sido moldados de forma igual.

Essa irregularidade é uma possível consequência do uso de materiais não tão homogêneos, que é o caso do agregado miúdo reciclado.

Já em relação à resistência à tração na compressão das amostras, foi possível notar que o concreto convencional obteve desempenho superior, mas os resultados, de forma geral, foram bem similares para todas as amostras. Pelas mesmas razões apontadas para os resultados do teste anterior, é possível inferir que, para um mesmo abatimento, essa resistência à tração na compressão também tenderia a ser maior para o concreto convencional.

Apesar das várias características obtidas experimentalmente serem importantes para caracterizar o concreto, o principal objetivo deste estudo era o de determinar se a resistência obtida para o concreto reciclado atingia a resistência requisitada por um projeto modelo executado em Brasília, o Jardim Burle Marx, que era de 18 MPa. Nota-se que o concreto com material reciclado atingiu a resistência requisitada já aos 7 dias, o que já permitiria uma possível liberação do tráfego de uma ciclovia que o utilizasse nessa idade mais nova, enquanto o mesmo não ocorreria para o concreto convencional que foi produzido.

Os resultados de rompimento aos 28 dias mostram que ambos os concretos produzidos superaram os 20 MPa de resistência à compressão, podendo ser classificados na classe C20, ou seja, superiores à classe C15 do concreto de resistência igual 18 MPa, exigida no projeto de comparação, mesmo tendo uma elevada relação água/cimento. Além disso, ao comparar a resistência encontrada experimentalmente com a resistência mínima prevista pela norma europeia, que é de 15MPa para concreto reciclado não estrutural, o resultado encontrado também é adequado. Vale ressaltar que, pelas considerações de análise anteriormente explicitadas, o resultado a ser considerado no controle tecnológico é o maior das amostras.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão indicam que a substituição total do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado, nesse caso, aumentou a resistência à compressão do concreto. Dessa forma, o uso dessa amostra de areia reciclada se apresenta como uma opção satisfatória, em relação ao requisito de projeto, para o uso na produção de concreto para uso em pavimentação de ciclovia.

5.3. REQUISITOS DA ABNT NBR 15116:2004 E OUTRAS NORMAS

Os resultados fornecidos pelos procedimentos experimentais possibilitaram não só a análise qualitativa dos agregados em relação às normas para uso dos mesmos em concreto, como também dados para comparação com as exigências feitas pela norma específica de uso

dos agregados reciclados, a ABNT NBR 15116:2004. O uso dos agregados miúdos reciclados para o concreto de pavimentação se enquadra na análise tanto dos requisitos de uso em camadas de pavimentação, como nos requisitos para uso em concreto não estrutural constantes nessa norma.

Foi possível concluir que os agregados miúdos reciclados adquiridos junto a Fornecedora de Areia Bela Vista se adequaram a diversos critérios normativos. Com relação aos requisitos relativos ao uso em camadas de pavimentação é possível perceber que o material apresentou características granulométricas adequadas por ser bem graduado e ter coeficiente de uniformidade maior que 10. Além disso, também foi possível analisar a dimensão máxima característica, que deveria ser menor que 63 mm e foi de 6,3 mm; e também o teor de material passante na peneira de 0,42 mm, que deveria estar entre 10% e 40%, e foi de 38%; tendo ambos os critérios sido atendidos. Os critérios relativos ao Índice de Suporte Califórnia (ISC) e à expansibilidade não foram julgados, pois estes são critérios não tão relevantes para o estudo de bases de pavimento rígido, sendo mais necessários para o caso dos pavimentos flexíveis.

Relativamente à parte da norma que trata de requisitos para uso em concretos estruturais é possível afirmar que o agregado miúdo reciclado se mostrou adequado tanto em relação à absorção máxima permitida de 12% (foi de apenas 2,2%), quanto em relação ao teor máximo de materiais passantes na peneira de 0,075 mm, que poderia ser no máximo de 15% e foi de apenas 2,5%. Não foram feitos ensaios para a análise dos teores máximos de contaminantes em relação à massa do agregado reciclado, que contam nas duas partes da norma. Estes são aspectos importantes do agregado reciclado e podem posteriormente ser verificados em uma futura continuidade do estudo do material.

Apesar de não ser o objetivo deste estudo, os experimentos também forneceram dados suficientes para se fazer uma comparação com alguns dos parâmetros exigidos pela norma DNIT 054/2004 – PRO, que estabelece critérios para os concretos utilizados em pavimentos rígidos de concreto mais exigentes, que são os das rodovias. Nota-se que, dentro dos critérios abordados nesse documento, temos que consumo de cimento mínimo do concreto reciclado produzido atende ao mínimo de 320 kg/m³ da referida norma. Já a relação água/cimento, que foi considerada como alta para o uso em estruturas, também esteve bem acima para a norma do DNIT, que permite uma variação no intervalo entre 0,40 e 0,56. Outro quesito que mostrou estar bem aquém do necessário para o uso em pavimentação de rodovias foi a resistência. Não foram feitos ensaios de determinação da resistência à tração na flexão, que é a utilizada pelo DNIT nos dimensionamentos, mas as resistências à tração indireta obtidas (por compressão diametral) mostraram que o concreto com essas características de produção não terá a

resistência entre 4,5 e 5,0 MPa, que é a mais usual para rodovias de concreto. Isso pode ser concluído ao se observar que as amostras de concreto atingiram resistência à tração na compressão aos 28 dias de pouco mais que 2 MPa. Estudos como os da *American Society for Testing of Materials* (ASTM,2004) mencionados no volume 6 da revista IBRACON de Estruturas e Materiais (2013) comprovaram que a resistência medida neste tipo de ensaio tem valores maiores que a resistência à tração na flexão.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo foi motivado pelas pesquisas que apontam a alta produção de Resíduos da Construção Civil (RCC) no Distrito Federal (DF) e a sua incorreta destinação nos mais diversos lugares. Tendo isso em vista, se teve como objetivo determinar a possibilidade e viabilidade de dar um melhor destino e aproveitamento à parcela desses resíduos que se enquadram na Classe A da Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e são transformados em agregados miúdos pela empresa Fornecedora de Areia Bela Vista. Ao se examinar o contexto de desenvolvimento de meios de transporte no DF, chegou-se à conclusão de que uma possível aplicação para este material seria nos concretos utilizados na construção de ciclovias em pavimento rígido, por apresentarem um apelo ecológico interessante e, ao mesmo tempo, permitirem o uso de material reciclado. Foi dado procedimento, então, à realização de experimentos de caracterização do agregado miúdo reciclado e à produção de um traço experimental de concreto com 100% de substituição do agregado miúdo convencional pelo proveniente dos RCC, de forma a entender melhor o comportamento desse material e verificar se ele atendia tanto às normas específicas de uso de agregado reciclado, quanto ao critério de projeto da Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil (NOVACAP) para o concreto da ciclovia que foi construída no Jardim Burle Marx, que é a resistência à compressão uniaxial aos 28 dias de 18 MPa.

Os resultados de caracterização dessa areia mostraram que os referidos agregados miúdos reciclados se adequam aos critérios de composição granulométrica, dimensão máxima característica, teor de material passante na peneira de 0,42 mm, teor de absorção de água e teor de material passante na peneira de 0,075 mm da norma ABNT NBR 15116:2004, que foram os requisitos escolhidos para serem avaliados com os experimentos executados. O traço de concreto produzido posteriormente também satisfaz a condição de resistência mecânica pré-fixada já no rompimento aos 7 dias.

O estudo também possibilitou comparações entre o agregado miúdo reciclado e um agregado miúdo convencional (anteriormente caracterizado pelo Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB), bem como a comparação entre características do concreto reciclado produzido e um concreto sem utilização desses agregados miúdos de RCC, que também foi produzido no trabalho. Com as análises dos dados obtidos foram confirmadas as expectativas de que o material reciclado tem menor massa específica, menor massa unitária, maior quantidade de material fino e maior absorção, que o material convencional, porém, para este

último critério a diferença não foi tão grande como esperado. Já em relação às características do concreto, foi obtido uma maior resistência à compressão uniaxial e um menor consumo de cimento para o material reciclado, porém isso se deveu ao fato de terem sido fixados os teores de argamassa e a relação água/cimento para ambos, o que impediu que eles fossem produzidos com abatimentos iguais. Como o abatimento do concreto convencional ainda possuía margem para redução, uma possível produção desse concreto com menos água teria, provavelmente, revertido esses resultados comparativos. Foi confirmada durante esses procedimentos a hipótese de que o concreto reciclado apresenta pior trabalhabilidade.

O projeto não tinha como uma de suas metas a produção de um concreto reciclado que pudesse ser utilizado em elementos estruturais ou rodovias, porém, foi possível perceber por algumas das características do concreto com agregado miúdo reciclado determinadas que várias destas estão de acordo com o que é exigido pelas normas referentes a estes tipos de uso, tendo sido um dos poucos fatores de não adequabilidade analisados a alta relação água/cimento. Uma relação água/cimento dentro de um intervalo adequado de valores não foi estabelecida como requisito no projeto da ciclovia do Jardim Burle Marx, apesar disso, seria interessante o uso de aditivo plastificante para verificar se este poderia melhorar esse fator, tendo-se em vista os problemas que uma alta relação água/cimento pode acarretar. Além disso, o uso de tal aditivo também poderia possivelmente melhorar as características de trabalhabilidade do concreto.

6.1. CONCLUSÃO

O trabalho mostrou que o agregado miúdo obtido a partir da reciclagem de Resíduos da Construção Civil (RCC) da empresa Fornecedora de Areia Bela Vista apresenta características que se adequam a norma de utilização de reciclados desse tipo (NBR ABNT 15116:2004). Além disso, também se verificou que tal material pode ser utilizado em concretos destinados à pavimentação de ciclovias com substituição completa do agregado miúdo convencional, podendo o concreto reciclado ser produzido utilizando-se dos mesmos procedimentos que nos concretos convencionais. Concluiu-se também que o uso de um aditivo plastificante no concreto de agregado reciclado, mesmo não sendo obrigatório, poderia ser testado para verificar possíveis benefícios em características como a trabalhabilidade e a relação água/cimento.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos sugere-se que sejam feitos ensaios complementares de caracterização dos agregados miúdo reciclados de maneira a serem determinados os teores de contaminantes contidos nestes. Dessa forma, será possível realizar uma análise completa dos requisitos da norma ABNT NBR 15116:2004. Além disso, recomenda-se que seja realizado um estudo de dosagem completo do concreto reciclado utilizando-se um aditivo plastificante e determinando o diagrama de dosagem do material.

Por fim, poderia ser de relevância a realização de um estudo comparativo da viabilidade econômica do concreto com agregado miúdo convencional em relação ao concreto com agregado miúdo reciclado para determinar se o segundo possui custo competitivo em relação ao primeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. **Apresentação: Ciclovias de Concreto no Distrito Federal**. Engenheiro Fernando Crosara.

ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. **Programa Ciclovitário do Distrito Federal**. Sistema Ciclovitário Intermunicipal, Integrado com Outros Modais de Transporte e Ação Educativa.

ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. **Projeto Técnico: Ciclovias**.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Norma C920** – Standard Specification for Elastomeric Joint Sealants.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004:2004. **Resíduos sólidos** – Classificação.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15114:2004. **Resíduos sólidos da construção civil** – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15115:2004. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil** – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738:2015. **Concreto** – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739:2007. **Concreto** – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211:2009. **Agregados Para Concreto** – Especificação.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222:2011. **Concreto e argamassa** — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776:1987. **Agregados** – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9781:2013. **Peças de concreto para pavimentação** – Especificação e métodos de ensaio.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248:2003. **Agregados** – Determinação da composição granulométrica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 26:2009. **Agregados** – Amostragem.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 30:2001. **Agregado miúdo** – Determinação da absorção de água.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45:2006. **Agregados** – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67:1998. **Concreto** – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM ISSO 565:1997. **Peneiras de ensaio** – Tela de tecido metálico, chapa metálica perfurada e lâmina eletroformada – Tamanhos nominais de abertura.

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. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resoluções do CONAMA**. Edição especial 1984 – 2012. Ministério do Meio Ambiente.

CÓRDOBA, R. E. **Estudo do sistema de gerenciamento integrado de resíduos de construção e demolição do município de São Carlos**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

CORREIO BRAZILIENSE. Especial Estrutural, 2014. (Disponível em: <http://www.correiobraziliense.com.br/especiais/estrutural/>. Acesso em 27 de junho de 2016)

DISTRITO FEDERAL. Lei nº 4.704, de 20 de dezembro de 2011.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **Norma 061/2004** – TER. Pavimento Rígido – Defeitos – Terminologia.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. IPR Pub. 715/2005. **Manual de pavimentos rígidos**. 2 ed. – Rio de Janeiro, 2005.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Norma 054/2004** – PRO: Pavimento Rígido – Estudos de traços de concreto e ensaios de caracterização de materiais – Procedimentos.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: Pini, 1992. 349 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**, 2008. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (Acesso em 27 de junho de 2016).
<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=530010>

IBRACON. Instituto Brasileiro de Concreto. Revista IBRACON de Estruturas e materiais. Volume 6, nº6. São Paulo, dezembro de 2013.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil**. Brasília, 2012.

LONDON CYCLE NETWORK. **Design Manual**. Março, 1998.

LONDON CYCLING DESIGN STANDARDS. **Chapter 7 – Construction, including surfacing**. Publicado por Transport for London, 2014.

MULDER, E., TAKO P.R. DE JONG & FEENSTRA, L. 2007. **Closed Cycle Construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste**. Waste Management, Vol. 27, p. 1408–1415.

REVISTA TECHNE, Edição 176 – Novembro, 2011.

SLU. Serviço de Limpeza Urbana. **Relatório dos Serviços de Limpeza Urbana e Manejo dos Resíduos Sólidos do Distrito Federal**. Brasília, março de 2016.

SOUSA, A.A.C.; SOARES, G.G. (2013). **Utilização de agregados reciclados de RCC – Produção de concretos C10 e C15**. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 45 p.

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.

VTT. Technical Research Centre of Finland. **Reuse of recycled aggregates and other C&D wastes**. Hannele Kuosa. Novembro, 2012.