



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DOS PARÂMETROS AMBIENTAIS, QUÍMICOS E MINERALÓGICOS DOS  
AGREGADOS RECICLADOS ORIUNDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

**por**

**VIVIANE RANGEL GOMES SILVA**

**João Pessoa – Paraíba**  
**Março/2015**

**ESTUDO DOS PARÂMETROS AMBIENTAIS, QUÍMICOS E MINERALÓGICOS DOS  
AGREGADOS RECICLADOS ORIUNDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Mestre.

**Viviane Rangel Gomes Silva**

**ORIENTADORA: Prof<sup>a</sup> Dra. Elisângela M<sup>a</sup> Rodrigues Rocha**  
**CO-ORIENTADOR: Prof<sup>o</sup> Dr. Ricardo Almeida de Melo**

**João Pessoa – Paraíba**  
**Março/2015**

S586e Silva, Viviane Rangel Gomes.

Estudo dos parâmetros ambientais, químicos e mineralógicos dos agregados reciclados oriundos da construção civil / Viviane Rangel Gomes Silva.- João Pessoa, 2015.

113f. : il.

Orientadora: Elisângela Maria Rodrigues Rocha

Coorientador: Ricardo Almeida de Melo

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT

1. Engenharia civil e meio ambiente. 2. Agregados reciclados (AR). 3. Agregados naturais (AN). 4. RCC. 5. Parâmetros ambientais. 6. Análises mineralógicas.

UFPB/BC

CDU: 624:504(043)

**"ESTUDOS DOS PARÂMETROS AMBIENTAIS, QUÍMICOS E MINERALÓGICOS DOS  
AGREGADOS RECICLADOS ORIUNDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL".**

**VIVIANE RANGEL GOMES SILVA**  
Dissertação aprovada em 31 de março de 2015.

**Período Letivo: 2014.2**

  
**Prof<sup>a</sup>. Dra. ELISÂNGELA M<sup>a</sup> RODRIGUES ROCHA - UFPB**  
(Orientadora)

  
**Prof. Dr. RICARDO ALMEIDA DE MELO - UFPB**  
(Co-Orientador)

  
**Prof<sup>a</sup>. Dra. CLAUDIA COUTINHO NÓBREGA - UFPB**  
(Membro Interno)

  
**Prof. Dr. MARÇAL ROSAS FLORENTINO LIMA FILHO - UFCG**  
(Membro Externo)

**João Pessoa/PB**  
**2015**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por estar sempre ao meu lado, guiando, fortalecendo e me amparando;

Ao meu esposo e amor, Hélio Pereira, pelo apoio em todas as dificuldades enfrentadas, incentivando-me na busca de meus objetivos, essa conquista é nossa!

Aos meus pais, Edmar e Salete, pelo amor, compreensão e incentivo a estudar, sempre acreditando no meu potencial. Vocês são meus exemplos, meu orgulho! Amo vocês!

Aos meus irmãos, Bruno e Lorena, por terem vivido e partilhado de tantos momentos que passei até chegar aqui, com vocês ao meu lado me sinto mais segura, mais feliz!

Aos cunhados Malba, Dalmo e Flávio, pela força e ajuda. Venho destacar um menino por alegrar nossas vidas (Lucas), “titia” ama muito;

Ao meu avô Valdemar *in memoriam*, por seu exemplo de ser humano, que sempre nos incentivou a buscar nossos sonhos. Seus ensinamentos, voinho, serão eternos para toda família;

Aos familiares, amigos e amigas que me acompanharam e sempre torceram por mim;

A professora Elisângela M<sup>a</sup> Rodrigues, pelo apoio e orientação na elaboração desta dissertação. Sua amizade, paciência e incentivo fizeram toda a diferença. Minha eterna gratidão!

Ao professor Ricardo Almeida por ter sido meu co-orientador, contribuindo como autor do projeto e transmitindo conhecimento sempre que precisei;

A professora Claudia Coutinho, pelo apoio e acompanhamento desde a graduação, e ter participado da banca do colóquio e fazer parte da banca para defesa desta dissertação;

Ao professor Marçal, por todo conhecimento transmitido, por ter aceitado fazer parte da banca do colóquio e por novamente atender ao nosso convite, sendo o examinador externo;

A todos os professores do mestrado pelos conhecimentos transmitidos nas disciplinas e aqueles que conheci durante a pesquisa e muito colaboraram: Sandro Marden (DEMAT), Raul Rosenhaim (DEQ), Fernando José (CCEN-DQ), Romualdo Menezes (UFCG), Ilda Antonieta (CCEN-DQ);

Aos técnicos de laboratório Romildo, Elson, Dorivaldo e Sérgio (UFPB) e Juliana (UFCG), e aos alunos, Alex, Wesley, Larissa, Marcella, Arthur, Camila, Gabriel e Nathália, pela valiosa ajuda nas análises realizadas;

Aos colegas do curso de mestrado, em especial à Sofia, pelos trabalhos que realizamos juntas e apoio recíproco durante essa fase;

Ao CNPq, pelo apoio financeiro;

E aos demais, que de alguma forma contribuíram para que este projeto de pesquisa se concretizasse;

Encerro com uma frase de incentivo repassada pelo meu esposo:

***“Que minha coragem seja maior que o meu medo, e que minha força seja tão grande quanto a minha fé”.***

*Marisa Pereira Silva.*

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar os parâmetros ambientais, químicos e mineralógicos de Agregados Reciclados (AR), classificados como Agregado Reciclado de Concreto (ARC), gerados na Usina de Beneficiamento de Resíduos Sólidos da Construção Civil (USIBEN) em João Pessoa/PB, como também alguns Agregados Naturais (AN). Foi realizada análise ambiental, através de ensaios de lixiviação e solubilização, bem como a caracterização da sua composição química e mineralógica, por fluorescência de raios X, difração de raios X, análise térmica diferencial e termogravimétrica e espectrometria de infravermelho. Na Etapa I, para o extrato solubilizado, os agregados brita 12 AR, brita 25 AR, agregado miúdo AR, brita 12 AN e pó de pedra AN apresentaram valores superiores ao limite definido no anexo G da ABNT NBR N° 10004/2004 para alguns parâmetros químicos como sulfato (250 mg/L), ferro (0,30 mg/L) e alumínio (0,20 mg/L). Também investigou-se a presença de metais pesados (As, Cd, Pb, Cr, Ni, Al, Cu, Fe, Ni, Se, Zn) e de acordo com a referida norma, a brita 12 AR ultrapassou o limite permitido para o metal cádmio. De acordo com esses resultados, os agregados supracitados mudam sua classificação de Classe II B - Inertes, para Classe II A - não Inertes. Na Etapa II foram definidos apenas 4 agregados para continuidade: areia AN e AR; brita 12 AN e AR. Investigou-se o comportamento do pH dos 4 agregados e todos tiveram decaimento, estabilizando-se em pH alcalino ( $\text{pH} > 7$ ). Para as análises químicas e mineralógicas (FRX, DRX, DTA/TG e IV) observou-se a presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) nas 4 amostras sendo em maior quantidade nos AN. Para as amostras AR foram comprovadas a presença de compostos presentes em argamassa e concreto, como carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) e produtos da hidratação do cimento, como a portlandita [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] e gesso [ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ]. Portanto os AR estudados são viáveis em relação a análise ambiental, química e mineralógica, para diversas utilizações, pois a maioria dos compostos encontrados neles também fazem parte dos AN, usados diariamente na construção civil.

**PALAVRAS-CHAVE:** Agregados reciclados; agregados naturais; RCC; parâmetros ambientais; análises mineralógicas.

## ABSTRACT

This study aimed to analyze environmental, chemical and mineralogical parameters of Recycled Aggregates (RA), classified as Recycled Concrete Aggregate (RCA), generated at the Plant for Improvement of Construction Solid Waste (USIBEN), in João Pessoa / PB, as well as some Natural Aggregates (NA). Environmental analyses were performed, through solubilization and leaching tests, as well as the characterization of its chemical and mineralogical composition by X-ray fluorescence, X-ray diffraction, differential thermal and thermogravimetric analyses, and infrared spectrometry. In Step I, for the solubilized extract, the aggregates Gravel 12 RA, Gravel 25 RA, Fine Aggregate RA, Gravel 12 NA and Stone Dust NA had values above the limits set out in Annex G of the standard ABNT NBR N° 10004/2004 for some chemical parameters, such as sulfate (250 mg / L), iron (0.30 mg / L) and aluminum (0.20 mg / L). This study also investigated the presence of heavy metals (As, Cd, Cr, Ni, Al, Cu, Fe, Ni, Se, Zn), and, in accordance with the aforementioned standard, Gravel 12 RA exceeded the allowable limit for Cadmium. According to these results, the aggregates mentioned above changed their classification from Class II B – Inert – to Class II A – Non-Inert. In Step II, only four aggregates were selected to continue the study: Sand NA and RA; Gravel 12 NA and RA. The pH behavior of the aggregates chosen was investigated, and all of them suffered decay, stabilizing at alkaline pH (pH > 7). The chemical and mineralogical analyses (XRF, XRD, DTA / TG and IV) revealed the presence of quartz (SiO<sub>2</sub>) in the four samples, being the greater quantity in the NA ones. It was confirmed that the RA samples had compounds also found in mortar and concrete, such as calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), iron oxide (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnesium oxide (MgO) and cement hydration products, such as portlandite [Ca(OH)<sub>2</sub>] and plaster [CaSO<sub>4</sub>2H<sub>2</sub>O]. It was concluded that the RA studied are viable for several uses, in relation to environmental, chemical and mineralogical analyses, since most compounds found in them are also part of NA used daily in civil construction.

**KEYWORDS:** Recycled aggregates; natural aggregates; CCW; environmental parameters; mineralogical analyses.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - RCC coletados nas regiões brasileiras – ton/dia.....	20
Figura 2 - Fluxograma de reciclagem sustentável para os RCC.....	22
Figura 3 - Esquema de pavimento com agregados reciclados.....	34
Figura 4 - Etapas de preparação dos AR na USIBEN .....	39
Figura 5 - Disposição irregularmente de entulho no bairro José Américo - JP.....	40
Figura 6 - Disposição irregularmente de entulho no bairro dos Bancários – JP.....	40
Figura 7 - Difratoograma de agregado miúdo .....	51
Figura 8 - Difratoograma do cimento Portland .....	52
Figura 9 - Espectros obtidos na TG do cimento (CP II F32).....	54
Figura 10 - Fluxograma das etapas do desenvolvimento experimental.....	57
Figura 11 - Soluções para o teste de lixiviação .....	59
Figura 12 - Mesa agitadora do teste de lixiviação .....	59
Figura 13 - Sistema de filtração para as amostras .....	59
Figura 14 - Amostras preparadas para o teste de solubilização.....	59
Figura 15 - Amostras enviadas para o ITEP para análise dos metais pesados .....	60
Figura 16 - Pesagem para o teste de solubilização .....	62
Figura 17 - Amostras nos frascos com tampa .....	62
Figura 18 - pHmetro e a medição .....	62
Figura 19 - Amostras da solubilização sem tampa .....	62
Figura 20 - Peneiramento das amostras .....	64
Figura 21 - Eppendorfs para armazenamento de amostras.....	64
Figura 22 - Prensagem das pastilhas.....	65
Figura 23 - Espectrômetro de raios X.....	65
Figura 24 - Equipamento aberto .....	66
Figura 25 - Análises do DRX .....	66
Figura 26 - Analisador térmico.....	66
Figura 27 - Preparação das amostras .....	67
Figura 28 - Equipamento para o ensaio .....	67
Figura 29 - Análise de cloreto no extrato lixiviado .....	70
Figura 30 - Análise de sulfato no extrato lixiviado .....	71



Figura 31 - Análise de ferro no extrato de lixiviado.....	71
Figura 32 - Análise de alumínio no extrato de lixiviado .....	72
Figura 33 - Comportamento do pH da brita 19 AN, na solubilização ST-ATM e CT-ATM.....	79
Figura 34 - Comportamento do pH da brita 12 AR, na solubilização ST-ATM e CT-ATM.....	80
Figura 35 - Comportamento do pH da areia AN, na solubilização ST-ATM e CT-ATM .....	80
Figura 36 - Comportamento do pH da brita 25 AR, na solubilização ST-ATM e CT-ATM.....	80
Figura 37 - Comportamento do pH do pó de pedra AN, na solubilização ST-ATM e CT-ATM .	81
Figura 38 - Comportamento do pH do agregado miúdo AR, na solubilização ST-ATM e CT-ATM .....	81
Figura 39 - Comportamento do pH da brita 12 AN, na solubilização ST-ATM e CT-ATM.....	81
Figura 40 - Comportamento do pH das areias (AN e AR) na solubilização ST-ATM e CT-ATM .....	82
Figura 41 - Comportamento do pH das britas 12 (AN e AR) na solubilização ST-ATM e CT-ATM .....	83
Figura 42 - Difratoograma da areia AN.....	86
Figura 43 - Difratoograma da areia AR.....	87
Figura 44 - Difratoograma da brita 12 AN.....	88
Figura 45 - Difratoograma da brita 12 AR .....	89
Figura 46 - Curva TG/DTG da areia AN.....	91
Figura 47 - Curva TG/DTG da brita 12 AN .....	92
Figura 48 - Curva TG/DTG da areia AR .....	92
Figura 49 - Curva TG/DTG da brita 12 AR .....	94
Figura 50 - Espectro de IV da areia AN .....	96
Figura 51 - Espectro de IV da brita 12 AN.....	96
Figura 52 - Espectro de IV da areia AR .....	97
Figura 53 - Espectro de IV da brita 12 AR.....	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Volume de material beneficiado (AR) produzido pela USIBEN (2007 a 2014).....	39
Tabela 2 - Análises químicas com o extrato lixiviado (pH, alcalinidade e dureza) .....	68
Tabela 3 - Condutividade no extrato lixiviado dos agregados estudados.....	70
Tabela 4 - Análises químicas com o extrato solubilizado .....	73
Tabela 5 - Condutividade dos extratos solubilizados dos agregados naturais e reciclados.....	74
Tabela 6 - Análises de cloretos, nitrato, sulfato, ferro e alumínio dos extratos solubilizados .....	75
Tabela 7 - Comparação dos valores e limites máximos para os extratos solubilizados dos agregados .....	75
Tabela 8 - Resultados das análises dos metais pesados - Etapa I (2013) .....	77
Tabela 9 - Resultados das análises dos metais pesados - Etapa II (2014) .....	78
Tabela 10 - Comparação da composição química da areia natural (AN) e reciclada (AR) .....	84
Tabela 11 - Comparação da composição química da brita 12 AN e brita 12 AR .....	85
Tabela 12 - Legenda da Figura 42 (areia AN).....	86
Tabela 13 - Legenda da Figura 43 (areia AR) .....	87
Tabela 14 - Legenda da Figura 44 (brita 12 AN) .....	88
Tabela 15 - Legenda da Figura 45 (brita 12 AR) .....	89
Tabela 16 - Dados termogravimétricos da areia AR .....	93
Tabela 17 - Dados termogravimétricos da brita 12 AR.....	94

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais utilizações dos agregados .....	26
Quadro 2 - Composição dos agregados reciclados (DIN 4226-100, 2002).....	28
Quadro 3 - Requisitos dos agregados reciclados (DIN 4226-100, 2002).....	28
Quadro 4 - Normas dos RCC e AR .....	31
Quadro 5 - Uso recomendado para os resíduos reciclados .....	33
Quadro 6 - Classificação das águas em relação à dureza .....	44
Quadro 7 - Risco de salinidade da água .....	45
Quadro 8 - Limites permitidos dos parâmetros químicos de acordo com sua legislação.....	47
Quadro 9 - Propriedades físicas e técnicas relacionadas em diferentes análises térmicas .....	53
Quadro 10 - Tipos de vibração e modos vibracionais de uma molécula.....	55
Quadro 11 - Classificação e denominação dos AR analisados nesse estudo.....	58
Quadro 12 - Distribuição das amostras para análise dos metais pesados.....	61
Quadro 13 - Limite de metais pesados segundo a Legislação .....	61
Quadro 14 - Monitoramento do pH das amostras: tempo e horários.....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAS	Ácido Acetil Salicílico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para a Reciclagem de Resíduos da Construção
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
Al	Alumínio
AN	Agregados Naturais
AR	Agregados Reciclados
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
ARM	Agregado Reciclado Misto
As	Arsênio
Ca	Cálcio
Cd	Cádmio
Co	Cobalto
CEC	<i>Commission of the European Communities</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr	Cromo
CT-ATM	Com Troca Atmosférica
Cu	Cobre
DIN	Norma Alemã - <i>Aggregates for mortar and concrete – recycled aggregates</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração de raios X
DTA	Análise Térmica Diferencial
EMLUR	Autarquia Especial Municipal de Limpeza Urbana
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
Fe	Ferro
FRX	Fluorescência de raios X
Hg	Mercúrio
ITEP	Instituto Tecnológico de Estudos e Pesquisas
IV	Infravermelho
LABSAN	Laboratório de Saneamento

LACOM	Laboratório de Combustíveis
KBr	Brometo de potássio
MME	Ministério de Minas e Energia
Mn	Manganês
MS	Ministério da Saúde
Na	Sódio
n/a	Nada encontrado
NR	Não realizado
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
Ni	Níquel
Pb	Chumbo
pH	Potencial Hidrogeniônico
PMJP	Prefeitura Municipal de João Pessoa
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCC	Resíduos da Construção Civil
RILEM	<i>Réunion Internationale des Laboratoires D'Essai set Matériux</i>
Se	Selênio
SEINFRA	Secretaria de Infraestrutura
Sn	Estanho
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfato
ST-ATM	Sem Troca Atmosférica
SWANA	<i>Solid Waste Association of North America</i>
TG	Análise Termogravimétrica
Ti	Titânio
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
USIBEN	Usina de Beneficiamento de Resíduos Sólidos da Construção Civil
V	Vanádio
VMP	Valor Máximo Permitido
Zn	Zinco

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>15</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1. Objetivos .....	16
1.1.1. Objetivo geral.....	16
1.1.2. Objetivo específico .....	17
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>18</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>18</b>
2.1. Resíduos da Construção Civil (RCC).....	18
2.1.1. Definição e classificação.....	18
2.1.2. Gerenciamento e reciclagem dos RCC .....	19
2.1.3. Impactos ambientais gerados pelos RCC.....	23
2.2. Agregados Naturais (AN).....	25
2.3. Agregados Reciclados (AR).....	26
2.3.1. Definição e classificação dos AR .....	26
2.3.2. Características e Legislação dos AR.....	29
2.3.3. Aplicações dos AR.....	32
2.3.4. Contaminantes presentes em AR .....	35
2.3.5. Usinas de reciclagem .....	37
2.4. Caracterização ambiental.....	40
2.4.1. Lixiviação e solubilização.....	42
2.4.2. Parâmetros químicos.....	43
2.5. Caracterização química e mineralógica.....	49
2.5.1. Fluorescência de raios X (FRX) .....	49
2.5.2. Difração de raios X (DRX) .....	50
2.5.3. Análises térmicas (DTA e TG) .....	52
2.5.4. Espectrometria de Infravermelho (IV).....	55
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>57</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>57</b>
3.1. Planejamento experimental .....	57
3.2. Identificação dos agregados .....	58
3.3. Análises ambientais .....	59

3.3.1. Testes de lixiviação e solubilização .....	59
3.3.2. Metais pesados .....	60
3.3.3. Estudo da influência do pH.....	62
3.4. Preparação das amostras para análises químicas e mineralógicas.....	63
3.5. Análises químicas e mineralógicas.....	64
3.5.1. Fluorescência de raios X (FRX) .....	64
3.5.2. Difração de raios X (DRX) .....	65
3.5.3. Análises térmicas (DTA e TG) .....	66
3.5.4. Espectrometria de Infravermelho.....	67
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>68</b>
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>68</b>
4.1. Parâmetros físico-químicos no extrato lixiviado.....	68
4.2. Parâmetros físico-químicos no extrato solubilizado.....	72
4.3. Análises dos metais pesados nos extratos lixiviado e solubilizado.....	76
4.4. Estudo da influência do pH na solubilização com e sem troca atmosférica.....	78
4.5. Análise química (FRX) .....	84
4.6. Análise mineralógica (DRX).....	86
4.7. Análise térmica (DTA e TG).....	90
4.8. Análise química (IV) .....	95
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>98</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>98</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>99</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>100</b>

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUÇÃO

No desenvolvimento econômico e social do Brasil, a construção civil encontra-se hoje em posição de destaque, porém também se encontra como grande gerador de impactos ambientais, modificando paisagens e aumentando a geração de resíduos.

A Construção Civil se depara com o grande desafio de conciliar sua atividade produtiva e lucrativa com o desenvolvimento sustentável consciente. Neste sentido, a Lei Nº 12.305/2010 também conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) regula o manejo ambientalmente correto dos resíduos sólidos, implementando metas de redução, reutilização e reciclagem no intuito de reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos para destinação final.

Com o aumento das construções e, conseqüente, crescimento na geração dos Resíduos da Construção Civil (RCC), a qualidade de vida das populações é afetada diretamente, uma vez que vai sistematicamente impactando o meio ambiente, desde a extração dos recursos naturais até o descarte inadequado dos resíduos em áreas de mananciais e de preservação ambiental.

Os RCC por serem heterogêneos podem ser constituídos por elementos perigosos como metais pesados, por isso deve-se levar em conta o tipo de resíduo, a tecnologia empregada e a utilização proposta para o material reciclado. Antes de qualquer reutilização é importante avaliar os riscos da sua aplicabilidade para que não comprometa o meio ambiente e a saúde pública, sejam nos aspectos físicos, químicos e ambientais.

Os estudos de aproveitamento de RCC usualmente são focados quanto aos aspectos qualitativos – textura, forma, granulometria, cor, resistência mecânica e aglutinação. Porém, faz-se necessário investigar as características ambientais, fornecendo justificativas para avaliar o comportamento ao longo do tempo, sem causar danos ao meio ambiente e nem comprometer a vida humana.

Ressalta-se que as análises químicas e mineralógicas permitem elucidar os processos de lixiviação, solubilização e a possível liberação de compostos químicos presentes nos agregados reciclados, que possuem potencial de contaminação de solo subjacente e de águas superficiais e/ou subterrâneas. Como exemplo, o risco de contaminação por metais pesados em centrais de



reciclagem de resíduos da construção civil na Flórida (Townsend *et al.*, 2004), e a influência do pH (Potencial Hidrogeniônico) na liberação de compostos contaminantes ao longo do tempo (ENGELSEN *et al.*, 2012).

Na cidade de João Pessoa/PB, foi promulgada em 10/10/2007 a Lei Nº 11.176 (João Pessoa, 2007), que dá diretrizes para o gerenciamento dos RCC e institui o Plano Integrado de Gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil, onde os geradores são responsáveis pelos resíduos gerados por suas atividades, bem como o destino final que deve ser o encaminhamento para a Usina de Beneficiamento de Resíduos Sólidos da Construção Civil (USIBEN) ou pontos de coleta definidos pela prefeitura.

A USIBEN transforma os entulhos em agregados reciclados, que podem ser usados em pavimentação de vias urbanas e construção de casas populares. A média ponderada da taxa de resíduos da construção bruto na cidade de João Pessoa é de 93,89 kg/m<sup>2</sup> de área construída considerando o total desses resíduos, no período de 2010 a 2012 (COSTA, 2012).

Este estudo refere-se às análises químicas e mineralógicas, bem como os possíveis impactos ambientais, dos agregados reciclados provenientes da USIBEN, comparando-os com as normas específicas e verificando seu uso sem trazer prejuízos ao meio ambiente e a saúde pública.

A presente dissertação está composta de cinco capítulos: o primeiro trata da introdução e dos objetivos geral e específico; o segundo apresenta a revisão da literatura; o terceiro compreende as diversas etapas do trabalho e a metodologia utilizada; o quarto capítulo corrobora com os resultados e suas análises e discussões; e o quinto apresenta as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros. Após este último capítulo, destacam-se as referências utilizadas nesta pesquisa.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Objetivo geral

Analisar os parâmetros ambientais, químicos e mineralógicos de agregados reciclados gerados na USIBEN (agregado miúdo, brita 25, brita 12 e areia) provenientes da construção civil de João Pessoa, avaliando os aspectos ambientais.

### 1.1.2. Objetivo específico

- Avaliar os riscos de contaminação ambiental dos agregados estudados, através de testes de lixiviação e solubilização e parâmetros químicos, como pH, sulfato, cloreto, nitrato e metais pesados presente nos agregados naturais (AN) e reciclados (AR);
- Classificar os Agregados reciclados (AR) estudados de acordo com a NBR N° 10004/2004;
- Investigar os materiais constituintes dos agregados reciclados (areia e brita 12) através dos ensaios de caracterização química e mineralógica: fluorescência de raios X, difração de raios X, infravermelho e análises térmicas (TG e DTA);
- Analisar de forma comparativa a composição química e mineralógica dos agregados reciclados em relação aos agregados naturais quanto aos aspectos ambientais para usos futuros.

## **CAPÍTULO II**

### **2. REVISÃO DE LITERATURA**

#### **2.1. Resíduos da Construção Civil (RCC)**

##### **2.1.1. Definição e classificação**

Segundo a PNRS, os RCC são aqueles gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis, 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 (PNRS, 2010).

“No âmbito da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, cabe ao titular dos serviços públicos de limpeza urbana (...) adotar procedimentos para reaproveitar os resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis (...), estabelecer sistema de coleta seletiva, (...) dar disposição final ambientalmente adequada aos rejeitos (...)”. (Cap. III, Seção II, art. 33 – PNRS, 2010).

A Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) Nº 10004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), diferencia os resíduos sólidos por Classe (I e II), de acordo com seus riscos potenciais para a saúde e para o meio ambiente. A Classe I se refere a dos resíduos perigosos, que proporcionam potencial tóxico aos seres humanos ou outros organismos vivos. A Classe II, representa os resíduos não perigosos, por sua vez é dividida em Classe II A (não-inertes) e a Classe II B (inertes). Os RCC estão enquadrados na Classe II B, que são aqueles resíduos submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, que não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme o anexo G da norma supracitada (ABNT, 2004).

A classificação dos RCC é determinada no artigo 3º da Resolução N° 307/2002 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) e nova redação na 348/2004, dividindo em quatro Classes:

- Classe A: resíduos reutilizáveis ou reciclados;
- Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações;
- Classe C: resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação;
- Classe D: resíduos perigosos oriundos do processo de construção, como exemplo, pode-se citar: amianto, tintas, solventes, óleos e outros.

Os RCC podem ser classificados de outra forma, como exemplo nos Estados Unidos é de acordo com sua origem, ou seja, segundo a atividade que o gerou. Assim, segundo o *The Solid Waste Association of North America* (SWANA, 1993), os RCC são classificados em:

- Material de obras viárias;
- Material de escavação;
- Material de demolição de edificações;
- Material de construção e renovação de edifícios;
- Material de limpeza de terrenos.

#### 2.1.2. Gerenciamento e reciclagem dos RCC

A maior parcela dos resíduos gerados pela construção civil nos municípios provém de descarte das reformas e demolições, geralmente realizadas pelos próprios usuários dos imóveis. Portanto, a responsabilidade do consumo sustentável e adequação para a disposição final desses resíduos cabem não somente ao poder público, como também a sociedade civil.

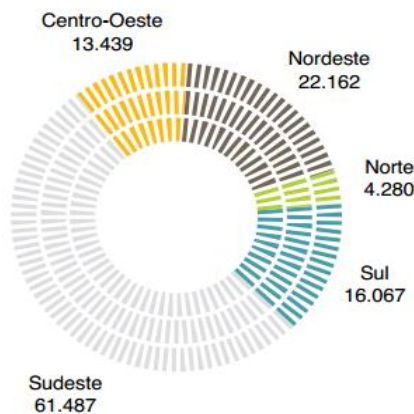
A Resolução N° 307/2002 do CONAMA, criou instrumentos para a superação dos problemas que vêm se verificando, citando a reciclagem, como ferramenta principal, pois alia-se aos quesitos sustentabilidade e lucratividade. Colocando na pauta do desenvolvimento a responsabilidade compartilhada, onde apenas com a união dos três eixos (público, privado e sociedade) os direitos e deveres se concretizarão no resultado eficaz. A orientação principal desta resolução é disciplinar o segmento de forma a estimular a não-geração de resíduos, classificando

os geradores de resíduos em “grandes geradores” (construtoras) e “pequenos geradores” (particulares).

A Prefeitura Municipal de João Pessoa (PMJP) revelou que em 2007 houve uma produção diária de 70 toneladas de RCC, o que representa aproximadamente 37 kg/pessoa.ano. Já no ano de 2013 a prefeitura supracitada contabilizou uma quantidade por pessoa de produção anual de 160 mil toneladas de entulho. Entretanto, a geração de resíduos da construção deve ser bem superior, pois na estimativa não são considerados os depósitos clandestinos em vias urbanas, cursos d’água ou terrenos baldios (PMJP/EMLUR, 2015).

Mediante dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), o Brasil coletou mais de 117 mil toneladas/dia de RCC em 2013, o que implica no aumento de 4,6% em relação a 2012 (Figura 1). Esta situação, também observada em anos anteriores, exige atenção especial quanto ao destino final dado aos RCC, visto que a quantidade total desses resíduos é ainda maior, uma vez que os municípios, via de regra, coletam apenas os resíduos lançados nos logradouros públicos.

Figura 1 - RCC coletados nas regiões brasileiras – ton/dia



Fonte: Pesquisa ABRELPE (2013)

As quantidades apresentadas são expressivas, o que ratifica a situação já evidenciada em anos anteriores, demandando atenção especial dos municípios na gestão desses resíduos, visto que as quantidades reais são ainda maiores já que a responsabilidade para com os RCC é dos respectivos geradores, que nem sempre informam às autoridades os volumes de resíduos sob sua gestão.

Todas as ações que tenham como objetivo permitir a reutilização de materiais e/ou produtos, de modo a estender seu ciclo de vida e diminuir os problemas com a forma de disposição dos resíduos ou de emissão de poluentes, são consideradas atividades de reciclagem.

A reciclagem pode auxiliar na produção de materiais de menor custo, colaborando na redução do custo das habitações, um dos mais caros e inacessíveis bens que produzimos e da infraestrutura, como rodovias, estradas de ferro, barragens, etc.

Desta forma, a reciclagem na construção civil pode gerar inúmeros benefícios:

- Redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados (JOHN, 2000);
- Redução de áreas necessárias para aterro, pela minimização de volume de resíduos pela reciclagem. Destaca-se aqui a necessidade da própria reciclagem dos resíduos de construção e demolição, que representam mais de 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos (PINTO, 1999);
- Redução do consumo de energia durante o processo de produção. Destaca-se a indústria do cimento, que usa resíduos de bom poder calorífico para a obtenção de sua matéria-prima (co-incineração) ou utilizando a escória de alto-forno, resíduo com composição semelhante ao cimento (JOHN, 2000);
- Redução da poluição; por exemplo, para a indústria de cimento, que reduz a emissão de gás carbônico utilizando escória de alto forno em substituição ao cimento *Portland* (JOHN, 1999).

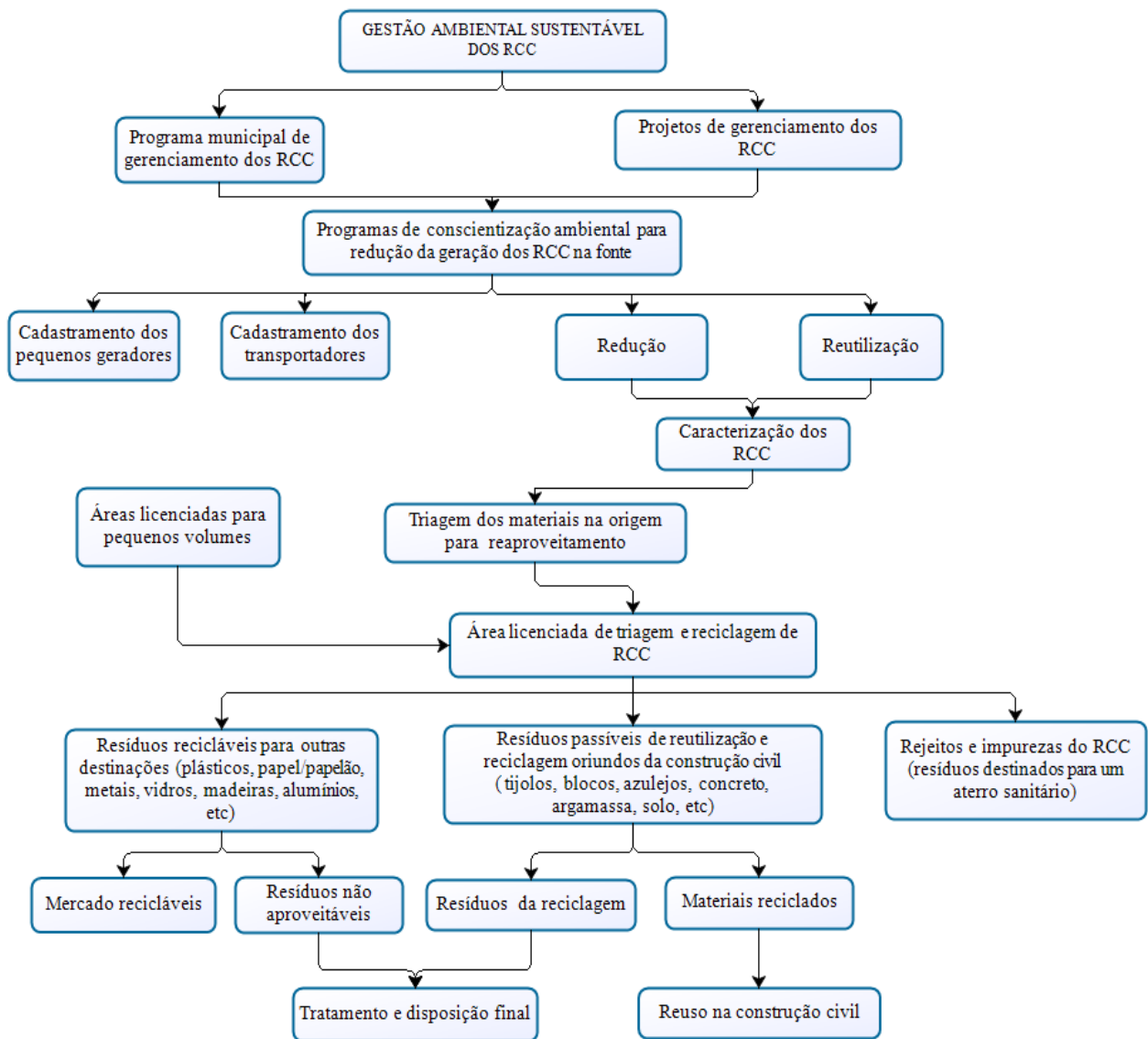
A reciclagem de RCC como material de construção civil, iniciada na Europa após a segunda guerra mundial, encontra-se no Brasil muito atrasada, apesar da escassez de agregados e áreas de aterros nas grandes regiões metropolitanas, especialmente se comparada com países europeus, onde fração reciclada pode atingir cerca de 90%, como é o caso da Holanda (ZWAN, 1997; DORSTHORST e HENDRIKS, 2000), que discute a certificação do produto (HENDRIKS, 1994).

Segundo a Associação Brasileira para a Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2013), ser sustentável significa que, no processo como um todo, não se utiliza, em nenhuma hipótese, recursos naturais, como pedreiras, cascalhos ou terra. A reciclagem além de contribuir com a limpeza da cidade, resguarda os rios, represas e terrenos baldios dos

descartes irregulares de RCC. Além de benefícios ambientais, a atividade da reciclagem de resíduos, traz o retorno social, pois a atividade tem o potencial de expandir a geração trabalho e renda. A ABRECON relata que o conceito de obra sustentável passou a ter maior intensidade no Brasil e atribui extrema importância ao entulho gerado na obra como atividade econômica rentável.

A Figura 2 mostra as ações que afetam diretamente as atividades de reciclagem, exigindo-se investimentos, porém gerando-se benefícios como a redução de custos.

Figura 2 - Fluxograma de reciclagem sustentável para os RCC



Fonte: Adaptado de Neto e Schalch (2010)

Além de ser rentável, uma característica fundamental para a reciclagem de RCC no país é o entrosamento entre questões ambientais e a abordagem preservacionista que a atividade agrega. Ser sustentável garante ao setor da construção civil um crescimento acima do esperado e ainda facilita as negociações com órgãos públicos, iniciativa privada e com potenciais parceiros. Para uma empresa ser classificada ou identificada como sustentável agrega valor a sua marca, são os lucros intangíveis (GUEDES, 2014).

### 2.1.3. Impactos ambientais gerados pelos RCC

A Resolução Nº 01/1986 do CONAMA, considera impacto ambiental qualquer alteração nas propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afetem:

- I – a saúde, a segurança e o bem estar da população;
- II – as atividades sociais e econômicas;
- III – a biota;
- IV – as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V – a qualidade dos recursos ambientais.

Na ABNT NBR ISO 14001/2004, os impactos ambientais também são considerados as alterações benéficas ou maléficas ao ambiente, resultando de ações das atividades, dos produtos ou serviços de uma determinada organização.

A produção de materiais consome elevada quantidade de energia, devendo-se levar em consideração alguns aspectos como volume de produção, distância do polo gerador ao polo consumidor e o meio de transporte. O gerenciamento de resíduos sólidos permite a minimização dos impactos causados, à montante, na exploração de matérias-primas como areia e cascalho e à jusante, evitando a poluição de solos e de lençóis freáticos, bem como danos à saúde e gastos públicos desnecessários (JOHN, 2000; BLUMENSCHIN, 2004).

A indústria da construção civil é a atividade humana mais impactante sobre o meio ambiente que habitamos. Todas as etapas de um empreendimento - construção, uso, manutenção e demolição - são relevantes no que diz respeito ao consumo de recursos e geração de resíduos.



Além dos impactos ambientais, a indústria da construção civil é capaz de impactar economicamente e socialmente, podendo funcionar como instrumento para melhoria da qualidade de vida da sociedade como um todo (ARAÚJO, 2009).

Algumas obras podem causar impactos que influenciam o ecossistema podendo alterá-lo drasticamente ou até provocar sua extinção, por meio de inundação de grandes áreas, corte de vegetações, impermeabilização do solo e a sua fase de construção que acaba gerando ruídos, resíduos, etc. Os impactos, além de ambientais, também influenciam o meio social, econômico e visual. Como pode valorizar uma área, pode também desvalorizar, mediante poluição visual, sonora, sombreamento de área que necessita de insolação, empecilho para a ventilação, entre outros. Apesar desta constatação, é possível perceber que existem soluções e técnicas adequadas para minimizar os impactos que uma obra de engenharia causa. Exemplos como a simples organização de um canteiro de obras, o não desperdício de materiais, e a qualificação da mão de obra já refletem estes procedimentos. Tecnologias inovadoras desenvolvidas também podem auxiliar na atenuação destes impactos, tais como a utilização de materiais originados do reaproveitamento de resíduos da construção (SPADOTTO *et al.*, 2011).

Isso afeta a qualidade ambiental urbana e os custos de serviços de limpeza para os órgãos públicos, pois a maior parte acaba em aterros sanitários e em locais inadequados.

Embora a reciclagem dos RCC seja uma solução favorável para mitigar os impactos ambientais, devido a deposições irregulares, sabe-se que é um processo lento e gradativo. Porém, urge acelerar as providências, devido ao crescente aumento da população e a consequente geração de novos resíduos que tantos impactos causam ao meio ambiente. Destaca-se, então, a importância da educação no sentido de esclarecer e ensinar à população como lidar com os RCC, quanto à geração, deposição, transporte e destinação final, fazendo de forma estruturada e eficiente no âmbito das ações do poder público, para que haja mudança de hábito e cultura nos municípios com relação a esses tipos de resíduos e suas implicações à qualidade ambiental e de vida (BARRETO, 2013).

A necessidade de minimização dos impactos ambientais gerados pelas edificações e a difusão dos conceitos de desenvolvimento sustentável levam o setor a buscar construções com melhor desempenho ambiental. A dificuldade em encontrar, atualmente, agregados naturais de boa qualidade nos centros urbanos, aliada às distâncias crescentes entre as fontes e os locais das

construções, tem elevado cada vez mais o custo dos agregados naturais (brita e areia) para uso na construção civil.

## 2.2. Agregados Naturais (AN)

O termo agregados para a construção civil é usado no Brasil para identificar o segmento do setor mineral que produz matéria-prima mineral para emprego na construção civil. Dentro dessa denominação estão as substâncias minerais, como areia, cascalho e rocha britada que entram em misturas para produzir concreto, misturas asfálticas e argamassa ou são utilizados *in natura* em base de pavimentos (Ministério de Minas e Energia - MME, 2009).

Em alguns países como Estados Unidos e Canadá, o termo agregados inclui também rocha como o calcário que vai para a indústria cimenteira, caieira e siderúrgica, assim como areia e cascalho que vão para usos industriais. Segundo o *United States Geological Survey* (USGS), os agregados são os recursos minerais mais acessíveis à humanidade. São as matérias-primas mais importantes usadas na indústria da construção civil.

A NBR N° 7211/2009 fixa as características exigidas para agregados que podem ser de origem natural ou resultante de processo de cominuição (britagem) de rochas estáveis. Dessa forma, define agregado miúdo cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira de 0,075 mm. Define agregado graúdo cujos grãos passam por uma peneira de malha com abertura nominal de 75 mm e ficam retidos na peneira de 4,75 mm (ABNT, 2009).

Os usos das areias e britas estão relacionados ao seu tamanho e granulometria. Podendo ser misturadas ao cimento (quando da preparação do concreto), ou sem nenhuma mistura aglomerante, sejam em drenos, em filtros, em ferrovias (na forma de lastro), na fabricação de gabiões, de muros de contenção, em base e sub-base de pisos e estradas, e outras aplicações (Quadro1).

Quadro 1 - Principais utilizações dos agregados

AGREGADOS	PRINCIPAIS UTILIZAÇÕES
Areia artificial e areia natural	Assentamento de bloquetes, tubulações em geral, tanques, embolso, podendo entrar na composição de concreto e asfalto.
Pedrisco	Confecção de pavimentação asfáltica, lajotas, bloquetes, intertravado, lajes, jateamento de túneis e acabamentos em geral.
Brita 1	Intensivamente na fabricação de concreto, com inúmeras aplicações, como na construção de pontes, edificações e grandes lajes.
Brita 2	Fabricação de concreto que exija maior resistência, principalmente em formas pesadas.
Brita 3	Também denominada pedra de lastro utilizada nas ferrovias.
Brita 4	Produto destinado a obras de drenagem, como drenos sépticos e fossas.
Rachão, pedra de mão ou pedra marroada	Fabricação de gabiões, muros de contenção e bases.
Brita graduada	Em base e sub-base, pisos, pátios, galpões e estradas.

Fonte: Adaptado de Kulaif (2001)

O concreto, em média, contém 42% de brita, 40% de areia, 10% de cimento, 7% de água e 1% de aditivos químicos por metro cúbico. O concreto, em volume, é o segundo material mais consumido pela humanidade, sendo somente superado pela água (MME, 2009).

### 2.3. Agregados Reciclados (AR)

#### 2.3.1. Definição e classificação dos AR

Segundo a NBR N° 15115/2004 (ABNT, 2004), agregados reciclados são materiais granulares, obtidos por britagem ou beneficiamento mecânico, de resíduos da construção civil, classificados como resíduo de construção Classe “A”, que incluem-se tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, agregados pétreos, argamassas, telhas, camadas asfálticas de pavimentos e outros, adequados à execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base, bem como camada de revestimento primário, que apresenta características técnicas, para aproveitamento em obras de pavimentação, aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, de aterros sanitários ou outras obras de engenharia. A referida norma classifica os agregados reciclados em dois tipos:

(a) Agregado Reciclado de Concreto (ARC), como “o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à Classe A, composto na sua fração gráuda de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento *Portland* e rochas”;

(b) Agregado Reciclado Misto (ARM), como o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo de Classe A, composto na sua fração graúda de menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento *Portland* e rochas.

Essa classificação, na prática, é simples: basta na usina controlar-se visualmente os RCC que chegam e armazenar separadamente aqueles predominantemente originados de concreto daqueles com presença de materiais cerâmicos.

A denominação das amostras dos AR, dar-se através das frações dos seus grãos, ou seja, semelhança na sua granulometria. De acordo com a classificação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006) os agregados são classificados em graúdo, miúdo e material de enchimento ou fíler:

- Agregado graúdo: é o material retido na peneira N° 10 (2 mm): brita, cascalhos, seixos, etc.;
- Agregado miúdo: é o material que passa na peneira N° 10 (2 mm) e fica retido na peneira N° 200 (0,075 mm): pó de pedra, areia, etc.;
- Material de enchimento ou fíler: é o material que passa pelo menos 65% na peneira ° 200 (0,075 mm): cal extinta, cimento *Portland*, pó de chaminé e etc.

Os agregados reciclados de construção civil apresentam algumas especificações e classificação de acordo com a sua composição. Na *Réunion International des Laboratoires D'Essai set Matériux* (RILEM, 1994) foi proposta a classificação de agregados graúdos reciclados em 3 categorias:

- Tipo I: agregados originados de resíduos de alvenaria;
- Tipo II: agregados originados de resíduos de concreto;
- Tipo III: agregados constituídos de uma mescla de agregados reciclados e naturais.

Na Alemanha, vigoram duas normas, sendo a primeira referente aos requisitos dos AR, enquanto que a segunda propõe regras à aplicação destes agregados em concreto.

A primeira é a DIN 4226/2002 - *Aggregates for mortar and concrete – recycled aggregates*. Esta norma apresenta requisitos para os agregados reciclados para uso em argamassas e concreto, especificando também o sistema de controle de produção e de avaliação de conformidade. Classificando-os de acordo com sua composição e origem, em quatro tipos:

- Tipo 1: resíduos de concreto;
- Tipo 2: resíduos de construção e demolição;
- Tipo 3: resíduos de alvenaria;
- Tipo 4: mistura de material.

A composição dos AR deve obedecer aos requisitos apresentados no Quadro 2, segundo a norma supracitada:

Quadro 2 - Composição dos agregados reciclados (DIN 4226-100, 2002)

CONSTITUINTES	PERCENTAGEM LIMITE EM RELAÇÃO À MASSA DO AGREGADO POR TIPO DE AGREGADO (%)			
	1	2	3	4
Betão	$\geq 90$	$\geq 70$	$\leq 20$	$\geq 80$
Clínquer e tijolos maciços	$\leq 10$	$\leq 30$	$\geq 80$	
Alvenaria de pedra			$\leq 5$	
Outros materiais	$\leq 2$	$\leq 3$	$\leq 5$	$\leq 20$
Material betuminoso	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$	
Contaminantes	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$	

Fonte: Adaptado de Gonçalves e Brito (2008)

No contexto desta norma, entendem-se como outros materiais os tijolos porosos, concreto leve, concreto celular, concreto poroso, estuque ou argamassas. No Quadro 3 são mostrados os demais requisitos para os AR.

Quadro 3 - Requisitos dos agregados reciclados (DIN 4226-100, 2002)

PROPRIEDADES	TIPOS DE AGREGADOS			
	1	2	3	4
Massa volúmica mínima (kg/m <sup>3</sup> )	2000		1800	1500
Desvio máximo permitido para a massa volúmica média das partículas declarada pelo fabricante (kg/m <sup>3</sup> )	$\pm 150$			n/a
Absorção de água máxima após 10 minutos (%)	10	15	20	n/a
Máxima percentagem em massa de cloretos solúveis em ácidos	0,04 %			0,15 %
Máxima percentagem em massa de sulfatos solúveis em ácidos	0,8 %			-

Fonte: Adaptado de Gonçalves e Brito (2008)

A escala de massas volúmicas e absorções de água são coerentes com a composição dos vários tipos de agregados definidos pela norma, partindo do princípio de que, quanto menor a quantidade de concreto na mistura dos agregados, menor será a massa volúmica dos mesmos, da mesma forma que a absorção de água aumenta (GONÇALVES E BRITO, 2008).

### 2.3.2. Características e Legislação dos AR

Os resíduos de construção reciclados apresentam componentes com algumas propriedades relevantes para o desempenho de materiais de construção. Segundo Pinto (1999), entre esses componentes, destacam-se as partículas de cimento não-inertizadas, que ainda irão reagir, partículas de cal, que estarão disponíveis para novas reações, partículas já cristalizadas, que funcionarão como iniciador da cristalização (acelerando a formação da nova rede cristalina) e partículas finas de material cerâmico, com significado potencial pozolânico, que irão reagir com a cal hidratada.

Segundo Nunes *et al.* (1996); Angulo *et al.* (2003) e Motta *et al.* (2004), as vantagens da utilização desse material são:

- Baixo custo, já que grande parte dos custos é relativa ao transporte e que, como são produzidos nas cidades, pode existir uma grande vantagem competitiva em relação aos agregados naturais;
- Redução da demanda dos agregados primários e consequente preservação das paisagens urbanas e das jazidas;
- Diminuição das áreas de aterro;
- Diminuição da atração de transmissores de doenças, do entupimento de bueiros e do assoreamento dos cursos d'água e reservatório, implicando em aumento das enchentes e inundações nas estações chuvosas;
- Preservação ambiental, o que não é quantificado monetariamente.

Entretanto, em razão da complexidade das atividades da construção civil, os RCC podem apresentar diversos outros tipos de resíduos como sobras de madeiras da construção, plásticos, demolição de edificações industriais, asfaltos provenientes de atividades de pavimentação, resinas sintéticas como óleos de maquinários utilizados na construção, pinturas e asbestos de

telhas de cimento amianto etc. Nos Estados Unidos, a quantidade de resíduos perigosos em relação à quantidade de resíduo de construção e demolição em massa é de 0,4% (EPA, 1995).

A presença destes compostos tem causado uma série de problemas em aterros de inertes, taludes e obras de infraestrutura como:

a) a compactação em aterros pode causar a dispersão de fibras de cimento amianto expondo funcionários e a população local a riscos de saúde (CEC, 2002);

b) nos Estados Unidos, alguns incêndios foram detectados em aterros inertes de resíduos de construção e demolição pela presença de substâncias orgânicas (à base de carbono) (EPA, 1995);

c) aterros de resíduos inertes podem ser utilizados para abrigar ilegalmente resíduos perigosos (EPA, 1995); e

d) a reciclagem intensa e cíclica pode aumentar a concentração de contaminantes, principalmente (HENDRIKS, 2000).

Os RCC, processados em forma de agregados, são classificados conforme a sua composição. Esta tem como constituintes primordiais agregados de concreto e alvenaria, que combinados em diversas proporções dão origem a todas as classes de agregados preconizadas pelas normas (GONÇALVES E BRITO, 2008).

Enfatiza-se como marco divisor da gestão dos resíduos da construção civil, a Resolução Nº 307/2002 do CONAMA. Essa resolução define, classifica e estabelece quem são os agentes envolvidos na gestão dos resíduos e sugere ainda as possíveis destinações para os RCC. A referida Resolução também se fundamenta no princípio da viabilidade técnica e econômica da fabricação de materiais produzidos a partir da reciclagem de parte dos RCC. Tudo isso, aliado ao princípio da gestão integrada dos resíduos para proporcionar a população benefícios de ordem social, econômica e ambiental (GUEDES, 2014).

Outro fato marcante foi à aprovação da Lei Nº 12.305/2010, que instituiu a PNRS, considerada um avanço significativo na política ambiental brasileira e que alterou a Lei Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998.

As principais Normas técnicas da ABNT relativas aos RCC e AR, estão apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Normas dos RCC e AR

<b>CÓDIGO</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>OBJETIVO</b>
ABNT NBR N° 15112/2004	Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.	Esta Norma fixa os requisitos exigíveis para projeto, implantação e operação de áreas de transbordo e triagem de resíduos da construção civil e resíduos volumosos.
ABNT NBR N° 15113/2004	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.	Esta Norma fixa os requisitos mínimos exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos sólidos da construção civil Classe A e de resíduos inertes.
ABNT NBR N° 15114/2004	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Área de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.	Esta Norma fixa os requisitos mínimos exigíveis para projeto, implantação e operação de áreas de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil Classe A.
ABNT NBR N° 15115/2004	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.	Esta Norma estabelece os critérios para execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos, bem como camada de revestimento primário, com agregados reciclados de resíduo sólido da construção civil, denominado agregados reciclados, em obras de pavimentação.
ABNT NBR N° 15116/2004	Agregados reciclados de resíduos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.	Esta Norma estabelece os requisitos para o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil.
ABNT NBR N° 10004/2004	Resíduos sólidos- classificação.	Classificar os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, de forma que sejam gerenciados de forma adequada.
ABNT NBR N° 10005/2004	Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos Sólidos.	Fixar os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados pela ABNT NBR N° 10004/2004 como Classe I – perigosos - e Classe II – não perigosos.
ABNT NBR N° 10006/2004	Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.	Fixar os requisitos exigíveis para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados na ABNT NBR N° 10004/2004 como Classe II A - não inertes – e Classe II B – inertes.
ABNT NBR N° 10007/2004	Amostragem de resíduos sólidos.	Fixar os requisitos exigíveis para amostragem de resíduos sólidos.



Ressalta-se que, para uma melhor gestão faz-se necessário à criação, bem como a aplicação de normas. Vale ressaltar que, a ABNT padronizou o uso dos agregados reciclados em pavimentação viária e concreto não estrutural através da norma NBR 15116/2004 (ABNT, 2004).

Entretanto, Aguiar (2004) destaca que uma das dificuldades em se estabelecer diretrizes e normalizar o uso de AR é sua grande variabilidade e o estabelecimento de limites para diversos contaminantes é ainda uma questão a ser resolvida.

Verifica-se, contudo, que começa a surgir uma consciência ambiental e, apesar da intensa geração de RCC, alguns países, preocupados com a questão da sustentabilidade, têm vindo a atingir percentagens de reciclagem elevadas, na sua maioria por aplicação de agregados reciclados em bases e sub-bases de pavimentos rodoviários. Nas condições ambientais, de uma forma geral, todas as normas tentam que as aplicações sejam sujeitas a condições não agressivas, tomando especial cuidado no que toca aos ataques químicos (PINTO, 1999).






### 2.3.3. Aplicações dos AR

O uso dos materiais reciclados ainda é restrito, comparado com o grande potencial de utilização. Isto se deve, principalmente, pela ineficiência das usinas que ainda não possuem tecnologia avançada para separação e segregação dos agregados reciclados como já ocorrem em outros países, assim como outros fatores como a falta de normas, crença que os materiais têm potencial de contaminação e falta de divulgação para o uso desses reciclados (CAPELLO, 2006).

Segundo Bidone (2001), as principais aplicações para os AR são: em material para base e sub-base de ruas, avenidas e estradas; agregados para construção; concreto e construção em geral; blocos de concreto e material para argamassa; e aterro.

Os reciclados de entulhos de demolição, dependendo do processamento a que são submetidos, podem gerar agregados para a construção de qualidade comparável aos agregados naturais, com características que variam de produto para produto e possuem um uso recomendado (Quadro 5). Eles podem apresentar menores custos de energia e de transporte pela possibilidade de serem produzidos nos locais de consumo (CAPELLO, 2006; LA SERNA E REZENDE, 2008).

Quadro 5 - Uso recomendado para os resíduos reciclados

IMAGEM	PRODUTO	CARACTERÍSTICAS	USO RECOMENDADO
	<b>AREIA REICLADA</b>	Material com dimensão máxima característica inferior a 4,8 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Argamassas de assentamento de alvenaria de vedação, contrapisos, solo-cimento, blocos e tijolos de vedação.
	<b>PEDRISCO REICLADO</b>	Material com dimensão máxima característica de 6,3 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Fabricação de artefatos de concreto, como blocos de vedação, pisos intertravado, manilhas de esgoto, entre outros.
	<b>BRITA REICLADA</b>	Material com dimensão máxima característica inferior a 39 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Fabricação de concretos não estruturais e obras de drenagens.
	<b>BICA CORRIDA</b>	Material proveniente da reciclagem de resíduos da construção civil, livre de impurezas, com dimensão máxima característica de 63 mm (ou a critério do cliente).	Obras de base e sub-base de pavimentos, reforço e subleito de pavimentos, além de regularização de vias não pavimentadas, aterros e acertos topográficos de terrenos.
	<b>RACHÃO</b>	Material com dimensão máxima característica inferior a 150 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Obras de pavimentação, drenagens e terraplenagem.

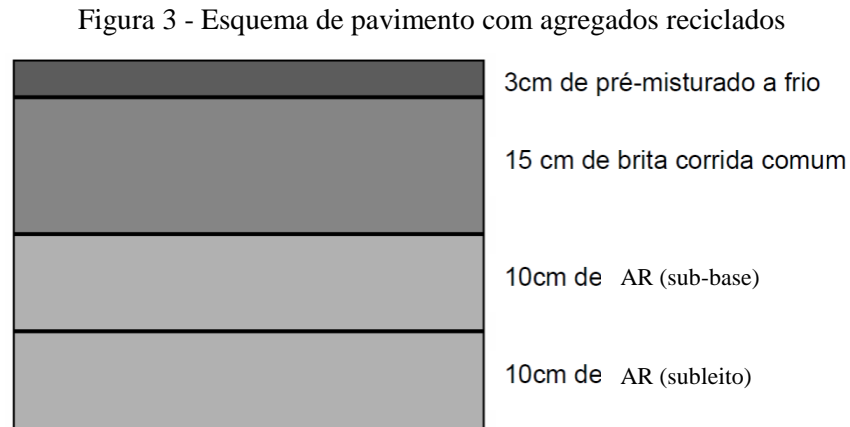
Fonte: Adaptado de Capello (2006)

O uso de RCC em camadas de pavimentos tem crescido pelo mundo, uma vez que o uso desses materiais tem-se mostrado resultados satisfatórios, devido sua disponibilidade, assim como a existência de tecnologia para reciclagem (HORTEGAL *et al.*, 2009).

Segundo Bodi *et al.* (1995), em São Paulo, iniciou-se estudos para o aproveitamento dos RCC gerados na cidade em obras de pavimentação. Verificou-se que a mistura dos RCC com solo apresentou valores de CBR melhores que com o agregado britado natural misturado ao solo. Os autores atribuíram essa diferença ao fato de que os agregados reciclados apresentavam, ainda, uma carga aglomerante, tais como cimentos e cais ativos, e à ausência de finos do agregado natural britado.

Segundo Bennert *et al.* (2000), a mistura utilizada de 25% de agregados de concreto reciclados com 75% de agregados naturais teve comportamento semelhante, quanto à deformação

permanente, comparando com um agregado de base. A Figura 3 mostra o esquema estrutural de um pavimento aplicando os agregados reciclados (resíduos de construção civil) nas camadas de reforço do subleito e sub-base (BODI *et al.*, 1995).



CBR do subleito 12%

Fonte: Adaptado de Bodi *et al.* (1995)

Após várias pesquisas realizadas (Motta *et al.*, 2004; Rustom *et al.*, 2007; Melbouci e Fazia, 2009; Grubba e Parreira, 2009), aprovaram o uso dos RCC como substituto de parte do material granular em pavimentos submetidos a baixo volume de tráfego. Os valores obtidos nos testes de capacidade técnica (ensaio de caracterização física e resistência mecânica) demonstram que os agregados reciclados são passíveis de uso em construção de pavimentos. Onde o uso do mesmo deve ser incentivado, tanto por apresentar custo inferior aos materiais comumente empregados, como para reduzir problemas ambientais causados pelo grande volume gerado e pela redução de impactos ambientais e aumento da vida útil dos aterros sanitários.

Na pesquisa realizada por Gómez (2011) foi utilizado resíduo da demolição do estádio de futebol Mané Garrincha, com 99,44% de materiais classe A pela resolução CONAMA 307/2002. Obteve-se ganho de 20 e 34% quando da imersão na energia intermediária e modificada, respectivamente, para ensaios de CBR. O módulo de resiliência mostrou que os agregados obtiveram comportamento similar ao de agregados pétreos.

Em estudo de Melo e Nóbrega (2009) com um material oriundo da USIBEN, contendo cerâmica, argamassa, concreto, brita e outros minerais, também constatou-se em função de suas características mecânicas, que os AR pode ser usado na pavimentação. Outros trabalhos como

Queiroz e Melo (2010 e 2012) utilizaram os AR da USIBEN e também comprovaram um forte potencial de uso na execução de revestimento primário e sub-base de pavimentos urbanos.

No Brasil, várias pesquisas importantes foram desenvolvidas visando à utilização de RCC em concreto (ZORDAN, 1997; BAZZUCO, 1999; LIMA, 1999; LEITE, 2001; LEVY, 2001). Outros estudos realizados avaliaram o comportamento dos AR em argamassas (BAVARESCO, 2001; MIRANDA, 2000; LIMA, 1999). Ainda no escopo nacional, pesquisas procuraram diagnosticar a quantidade de RCC gerada no município com a finalidade de identificar a parcela mineral que pode ser empregada no processamento em unidades de beneficiamento de resíduos (PINTO, 1999; XAVIER, 2001; SARDA, 2003). Embora os estudos realizados demonstrem viabilidade do uso do agregado reciclado dos RCC na produção de concretos e argamassas, tem-se verificado a necessidade de controle da qualidade desse agregado produzido nas usinas de beneficiamento, principalmente no ponto de vista dos impactos ao meio ambiente.

#### 2.3.4. Contaminantes presentes em AR

Diversos resíduos perigosos podem estar presentes nos entulhos provenientes da construção e demolição, por exemplo, latas de tinta ainda com material dentro; resíduos de óleos, graxas e fluidos, baterias, lâmpadas fluorescentes, madeiras tratadas, etc. É importante atentar para que os resíduos perigosos passem por cuidadoso processo de triagem e sejam corretamente acondicionados, evitando contaminações de resíduos inertes e para que recebam os cuidados necessários. O maior cuidado é impedir com que estes adentrem a rede de esgotos e atinjam o terreno natural, evitando assim a poluição do solo e da água (ARAÚJO, 2009).

Um parâmetro que geralmente é desprezado na avaliação de produtos reciclados é o risco à saúde dos usuários do novo material, e dos próprios trabalhadores da indústria recicladora, devido à lixiviação de frações solúveis ou até mesmo pela evaporação de frações voláteis. Os resíduos muitas vezes são constituídos por elementos perigosos como metais pesados (Cd, Pb) e compostos orgânicos voláteis. Estes materiais mesmo quando inertes nos materiais - após a reciclagem - podem apresentar riscos, pois nem sempre os processos de reciclagem garantem a imobilização destes componentes (SCHAEFER, 2007).

Segundo Jadovski (2005) pode-se considerar contaminantes no reciclado praticamente todos os materiais minerais não inertes ou materiais que prejudicam a qualidade de concretos e

argamassas, tais como: cloretos, sulfatos, matéria orgânica, produtos industrializados leves (papel, plástico, tecido, borracha etc.), vidro, betume, vegetação, terra, gesso, madeira, refratários, metais, álcalis e areias industriais quimicamente contaminadas.

As características de periculosidade dos resíduos podem ser conceituadas como:

- Inflamabilidade - podem entrar em combustão com bastante facilidade ou até mesmo espontaneamente;
- Corrosividade - atacam materiais e organismos vivos devido as suas características ácidas ou básicas intensas;
- Reatividade - reagem com a presença de outras substâncias, liberando calor e energia;
- Toxicidade - atuam sobre os organismos vivos, ocasionando danos as suas estruturas biomoleculares;
- Patogenicidade - possui características biológicas infecciosas, contendo microrganismos ou toxinas.

De acordo com Pinto (1999), os minerais, compostos por silicatos, aluminatos e carbonatos, em sua maioria advindos de rochas naturais, cimento e cerâmica provenientes dos RCC, não representam grandes riscos ambientais em razão das características químicas e minerais semelhantes aos agregados naturais e solos. É por esta razão que muitas vezes os RCC se classificam como inertes.

Angulo e Jonh (2006) e Silva e Arnosti Jr. (2007) enfatizam que o poder contaminante dos resíduos provenientes de demolição é maior do que dos resíduos da construção, uma vez que os primeiros são baseados em sistemas construtivos com diversos tipos de materiais, podendo ter materiais perigosos, como o amianto, pintura à base de chumbo e cromo, tintas, vernizes e outros materiais para acabamento que geralmente possuem metais pesados em sua composição e, consequentemente aumentam o risco de contaminação de mananciais e do solo.

A solução para alguns contaminantes presentes nos RCC (plásticos e madeiras) pode ser o emprego de tanques de depuração por flotação e separadores magnéticos (QUEBAUD E BUYLE-BODIN, 1999); mas em alguns casos, a retirada das fases contaminantes pode ser algo bem mais complexo, como compostos orgânicos voláteis e hidrocarbonetos (MULDER *et al.*, 2000).

Conforme Townsend *et al.* (2004), os produtos provenientes de processamento de RCC podem ser contaminados por metais pesados de três modos:

- (1) Pelo solo onde as pilhas de resíduos ficam dispostas;
- (2) Por pequenos pedaços de materiais perigosos nos resíduos da construção;
- (3) Pela lixiviação de materiais perigosos misturados aos resíduos.

Os resíduos de construção civil são classificados por exceção na NBR N° 10004/2004 como inertes. Embora em sua grande maioria se submetidos às análises, os RCC típicos provavelmente seriam classificados como não inertes, especialmente devido ao seu pH e dureza da água absorvida, em alguns casos eles podem conter contaminações importantes. Estas contaminações podem tanto ser oriundas da fase de uso da construção a partir dos quais foram gerados quanto do seu manuseio posterior. Estes contaminantes podem afetar tanto a qualidade técnica do produto contendo o reciclado quanto significar riscos ambientais (ABNT, 2004).

No estudo de Silva *et al.* (2009), constatou-se que a gestão de resíduo nos canteiros é fundamental para a obtenção de amostras com menor teor de contaminação química e, conseqüentemente, aptas para serem recicladas. Verificou-se que os sulfatos foram os contaminantes mais presentes nas amostras e que nenhuma amostra apresentou contaminação por cloretos, apesar de algumas terem sido colhidas próximas ao ambiente marinho. Segundo os autores provavelmente, devido à falta de um sistema de gestão eficiente, e o elevado teor de  $\text{SO}_4$  foi associado à presença de gesso, mas que não deveria ser descartada a possibilidade de contaminação presente na própria matéria prima (blocos, agregados, etc) utilizada nas obras.

#### 2.3.5. Usinas de reciclagem

Usina de reciclagem de RCC é a infraestrutura para a transformação dos RCC em agregados reciclados, comumente utilizado novamente na própria construção civil.

A ABRECON mostra sinais positivos do aumento da capacidade produtiva do setor. Dados de 2013 relataram que o Brasil possuía 190 usinas para a reciclagem de resíduos da construção, onde 76% são de caráter particular e 24% de iniciativas públicas. O aquecimento do mercado da construção civil é representado pela inversão do número de usinas públicas e privadas. Em 2002, os números indicavam que a maioria das usinas existentes eram públicas, e com esse estudo, verifica-se que nos dias atuais, quase 80% das usinas são particulares e grande

parte do entulho de construção civil é processada em usinas fixas. Esse modelo de negócio representa 83% de todas as instalações voltadas para a reciclagem de materiais de construção e demolição no país.

A escassez de locais para se aterrar os resíduos e as distâncias cada vez maiores das pedreiras dos centros consumidores impulsionaram essa nova atividade econômica, que ainda traz um grande benefício socioambiental (Construir - NE, 2014).

Foi construída pela PMJP sob a responsabilidade da Autarquia Especial Municipal de Limpeza Urbana (EMLUR) e em parceria com o Ministério da Ciência e Tecnologia e a Secretaria Executiva da Ciência e Tecnologia (SECIETC) a USIBEN, inaugurada em 2007, localizada no bairro de José Américo e é a primeira usina pública do Nordeste, apta a processar e reinserir no ciclo produtivo da construção civil 160 toneladas por dia de resíduos da Classe A, sendo considerada uma usina de médio porte, para os padrões brasileiros.

Por outro lado, no ano de 2012, surgiu na cidade do Conde, uma empresa privada especializada em reciclagem de materiais de construção. A empresa produz a partir dos RCC, produtos como: brita, meio fio e estaca de cimento e tem capacidade de processar cerca de 2.000 toneladas de resíduos por dia e que atende empreendimentos da região Metropolitana de João Pessoa.

Sabe-se que existem outras empresas que transportam e beneficiam os resíduos da construção. O surgimento de novas empresas comprova que existe demanda, aumento da conscientização e da fiscalização, como também, evidencia-se que parte das construtoras e transportadoras de RCC estão destinando corretamente seus resíduos. Entretanto, o volume de RCC depositados em locais de forma clandestina ainda continua grande, quer seja produzidos por construtoras quer seja por autoconstrução (MARQUES, 2007).

Um fator negativo é a irregularidade de funcionamento da USIBEN, segundo Sobral (2012) provocada por fatores ligados às dificuldades de manutenção preventiva e corretiva, próprias da morosidade das ações administrativas do Poder Público, tem levado a quebras relativamente constantes no ritmo do processo produtivo, causando acúmulo de matéria prima (entulho) no pátio interno, dificultando o acesso de caminhões transportadores e reduzindo, consideravelmente, a eficiência da Usina.

Segundo informações da PMJP, através da EMLUR, os RCC beneficiados na USIBEN estão sendo destinados ao uso geral da Secretaria de Infraestrutura (SEINFRA), órgão da mesma

prefeitura, como sub-base de vias públicas (Figura 4). Na Tabela 1 estão mostrados os volumes de AR produzidos pela USIBEN, desde o seu funcionamento até o final do ano de 2014 (PMJP/EMLUR, 2015).

Figura 4 - Etapas de preparação dos AR na USIBEN

a) Retirada das impurezas



b) Área de trituração dos RCC



c) AR pronto



Fonte: Acervo pessoal (2015)

Tabela 1 - Volume de material beneficiado (AR) produzido pela USIBEN (2007 a 2014)

MÊS/ANO	2007 (m³)	2008 (m³)	2009 (m³)	2010 (m³)	2011 (m³)	2012 (m³)	2013 (m³)	2014 (m³)
JANEIRO	-	1.008,00	1.294,00	1.332,00	685,00	-	1.408,00	2.172,00
FEVEREIRO	-	756,00	912,00	1.104,00	1.527,00	768,00	504,00	2.214,00
MARÇO	-	618,00	690,00	618,00	1.058,00	462,00	725,00	1.650,00
ABRIL	-	-	1.026,00	822,00	924,00	1.340,00	312,00	1.398,00
MAIO	-	-	1.365,00	438,00	165,00	404,00	-	612,00
JUNHO	-	-	1.788,00	238,00	1.384,00	294,00	552,00	636,00
JULHO	-	908,00	1.938,00	798,00	600,00	530,00	132,00	798,00
AGOSTO	-	-	2.262,00	624,00	672,00	1.200,00	1.002,00	932,00
SETEMBRO	-	-	840,00	228,00	1.454,00	2.196,00	1.098,00	1.112,00
OUTUBRO	78,00	-	570,00	438,00	384,00	1.262,00	654,00	
NOVEMBRO	270,00	-	1.120,00	286,00	886,00	986,00	5.387,00	579,00
DEZEMBRO	402,00	1.098,00	972,00	1.608,00	1.240,00	782,00	-	726,00
<b>TOTAL</b>	<b>750,00</b>	<b>4.388,00</b>	<b>14.777,00</b>	<b>8.534,00</b>	<b>10.979,00</b>	<b>10.224,00</b>	<b>11.774,00</b>	<b>12.829,00</b>

Fonte: PMJP/EMLUR (2015)

De acordo com a Resolução N° 307/2002 do CONAMA e a Lei Municipal N° 11.176/2007, os geradores são responsáveis pelos RCC e devem destinar às áreas de beneficiamento. Em visita *in loco*, Figuras 5 e 6, constatou-se a disposição irregular de RCC em terrenos baldios, ferindo dessa forma as exigências contidas nas Leis federais, estaduais e municipais, podendo ocasionar enchentes, proliferação de doenças, obstrução de vias, além da poluição visual, degradando o meio ambiente e comprometendo o saneamento ambiental urbano.



Figura 5 - Disposição irregularmente de entulho no bairro José Américo - JP.



Fonte: Acervo pessoal (2015)

Figura 6 - Disposição irregularmente de entulho no bairro dos Bancários – JP.



Fonte: Acervo pessoal (2015)

É preciso melhorar a gestão e a política de resíduos da construção civil no âmbito da cidade de João Pessoa, fazendo com que haja regularidade no fornecimento de matéria prima para Usina. Por outro lado, para que o produto final seja mais bem utilizado, e ganhe mais valor no mercado, faz-se necessário despertar o interesse dos seguimentos ligados à área de construção civil quanto às vantagens do uso de material reciclado, reduzindo o custo final da obra e ajudando a preservar o meio ambiente.

#### 2.4. Caracterização ambiental

É fundamental um estudo das características físico-químicas e das propriedades dos resíduos, por meio de ensaios e métodos apropriados. Tais informações darão subsídio para a seleção das possíveis aplicações dos mesmos. Além disso, a compreensão do processo que leva à geração do resíduo fornece informações imprescindíveis à concepção de uma estratégia de reciclagem com viabilidade no mercado.

Percebe-se que os RCC são compostos predominantemente por materiais minerais inertes como cerâmica, areia, pedra e aglomerantes, com presença de outros materiais que podem ser considerados impurezas (plástico, papel, madeira etc.). Vários pesquisadores como Cheriaf e Rocha (1997); Pinto (1999); Townsend *et al.*(2004); Hasparick (2005), Alcântara (2007); e

Guedes (2014) ressaltam à falta de uniformidade na composição do resíduo, deixando clara a necessidade da caracterização do resíduo para uso como agregados em outros materiais.

O interesse pelos resíduos da construção civil está vinculado a dois motivos principais: primeiro, ao fato de a constituição química da grande maioria dos resíduos ser predominantemente de silicatos, aluminatos e óxidos alcalinos, os mesmos compostos que constituem a composição química básica dos materiais de construção; segundo, ao importante volume de resíduos disponibilizado anualmente nos processos, que podem ser usados como insumos básicos empregados na elaboração de materiais e componentes de construção civil.

A avaliação do potencial de aproveitamento de resíduos foi estudada por Cheriaf e Rocha (1997) que estabeleceram a necessidade de identificação dos parâmetros estruturais, geométricos e ambientais dos resíduos, definindo-os como:

a) Parâmetros estruturais: identificação e conhecimento da estrutura e composição dos resíduos através da realização de ensaios: análise química, difração de raios X, análise térmica diferencial, condutibilidade térmica, perda de massa ao fogo;

b) Parâmetros geométricos: identificação da morfologia e textura do resíduo, através das seguintes análises: microscopia eletrônica de varredura; granulometria; superfície específica; solubilidade e viscosidade;

c) Parâmetros ambientais: identificação dos constituintes que podem ser potencialmente lixiviados e/ou solubilizados dos resíduos, pH;

d) Outros parâmetros: identificação das propriedades relacionadas à unidade de geração do resíduo, e das formas de beneficiamento que podem ser associadas: reologia, presença de óleos, graxas, conteúdo orgânico, pureza, consistência, capacidade de retenção de umidade, capacidade de moagem.

O conhecimento das propriedades requer ainda a identificação dos contaminantes presentes nos resíduos, principalmente quando há necessidade de um beneficiamento como calcinação ou exposição a elevadas temperaturas de queimas, que podem gerar uma poluição secundária, uma vez que a massa de resíduo, quando incorporada, por exemplo, a matrizes que sofrerão transformação térmica, pode liberar poluentes durante o processo de queima.

É de vital importância o conhecimento do processo de geração dos resíduos e o sistema de extração, manuseio e acondicionamento. Entretanto, pontos delicados da questão precisam ser

mais atacados: estabelecimento de normas e de procedimentos que auxiliem na validação dos materiais desenvolvidos com resíduos e mapeamento da disponibilidade dos resíduos. Além disso, a forma de avaliação do potencial de liberação de poluentes ainda não é consensual, tendo sido empregados os procedimentos estabelecidos para lixiviação e solubilização de resíduos (CURTIUS E FIEDLER, 2002).

#### 2.4.1. Lixiviação e solubilização

A realização dos ensaios de lixiviação tem como objetivo determinar como uma substância se comporta durante uma percolação, simulando em laboratório os fenômenos de arraste, diluição e de dessorção que podem ocorrer pela passagem de água através de um resíduo disposto no meio ambiente servindo, portanto, para avaliar o potencial deste resíduo em liberar certas espécies químicas (CAUDURO E ROBERTO, 2002).

Os Testes de lixiviação são empregados para prever o impacto ambiental causado pela disposição de uma matriz contendo resíduo. A escolha entre os tipos de testes de lixiviação é feita conjuntamente entre o órgão ambiental responsável e o gerador. Os testes de lixiviação de resíduos mais difundidos são (CAUDURO E ROBERTO, 2002):

- *Environmental Protection Agency's Extraction Procedure* (EP) - EUA;
- *Toxicity Test* ou *Toxic Characterisitics Leaching Procedure* (TCLP) - EUA;
- *Essay de lixiviation* - AFNOR X-31-210/92 - França;
- NBR N° 10005/2004 (lixiviação de resíduos sólidos) - Brasil.

Vários fatores afetam a liberação de poluentes através da lixiviação. Um fator dominante é o estado do material, o qual define o fenômeno que governa a lixiviação. Materiais granulares lixiviam contaminantes pela percolação de água, já no caso de materiais monolíticos a lixiviação é controlada pela difusão (HARTLÉN, 1996). Outros fatores que também influenciam a contaminação são os parâmetros físicos como tamanho da partícula, tempo de contato, relação líquido/sólido (L/S), porosidade, sortividade, temperatura e parâmetros biológicos tais como pH, potencial de oxidação-redução, complexação, conteúdo de carbono orgânico, alcalinidade, entre outros (VAN DER SLOOT, 1998; TOWNSEND *et al.*, 2003).

Os testes de lixiviação são realizados para enquadramento dos resíduos em Classe I, já os testes de solubilização avaliam a capacidade de solubilidade dos resíduos, identificando o seu potencial de dissolução e contaminação quando em contato com a água, sendo realizado para enquadrar os resíduos em Classe II. Os ensaios de lixiviação e solubilização são descritos pela NBR N° 10005/2004 e NBR N° 10006/2004, respectivamente.

A NBR N° 10005/2004 define lixiviação como o processo para a determinação da capacidade de liberação de substâncias orgânicas e inorgânicas através da dissolução em meio extrator.

Os resíduos de Classe II são considerados como não perigosos, porém quando se tem dúvidas quanto a sua classificação em inertes e não inertes emprega-se a metodologia de solubilização. Os testes de solubilização são empregados com o objetivo de se determinar a solubilidade dos resíduos, identificando o seu potencial de dissolução e contaminação quando em contato com a água.

A grande preocupação relacionada à solubilidade dos resíduos reside no fato de que, mesmo anos depois do seu descarte, eles continuam se degradando e contaminando as fontes externas. Estudos realizados por Garcia *et al.*, 1990; Aguiar *et al.*, 2002 e Mellis, 2006 mostram que Cobre, Níquel e Chumbo estão entre os metais que mais se destacam pelo potencial de toxicidade. Independentemente de suas origens, quando presente em quantidades elevadas esses metais podem entrar na cadeia alimentar por meio de acúmulo no tecido vegetal e provocar o desenvolvimento de doenças crônicas e agudas nos animais e serem humanos. Além disso, podem acumular-se no solo, reduzir sua produtividade devido ao seu efeito fitotóxico, alterar a atividade microbiana e contaminar os corpos hídricos (PIRES E ANDRADE, 2006).

Alguns trabalhos têm enfoque no impacto que os resíduos podem provocar ao ambiente principalmente, através da lixiviação de metais que possam prejudicar a qualidade do solo e da água (HARTLÉN, 1996; TOWNSEND *et al.*, 2004; SANI *et al.*, 2005; MARION *et al.*, 2005).

#### 2.4.2. Parâmetros químicos

Os parâmetros químicos têm conceitos comuns, independentes do estado da amostra (líquida, sólida ou gasosa), onde os limites determinados nas normas e/ou legislação, indicam sua viabilidade de uso e/ou de disposição. Esses parâmetros podem ser utilizados nas análises de

toxicidade, solubilidade, potabilidade, os quais delimitam os limites permitidos para liberação de alguns compostos, que podem ocasionar a contaminação do solo ou de recursos hídricos, caso estes estejam em valores superiores aos seus limites.

O pH é um parâmetro que expressa a intensidade da condição ácida ou básica de um determinado meio. A maioria dos microrganismos se desenvolvem em um pH ótimo próximo da neutralidade, visto que este facilita a absorção de alimentos.

A faixa de valores de pH recomendada pela Portaria N° 2914/2011 para águas do sistema de distribuição é de 6,0 a 9,5 (padrão de potabilidade). Na Resolução CONAMA N° 357/2005, o pH deverá estar entre 6,0 e 9,0 para águas doces e 5,0 e 9,0 para lançamento direto nos corpos receptores. No tratamento físico-químico de efluentes industriais a precipitação química de metais pesados ocorre em pH alto, sendo um fator importante para determinar a liberação de contaminantes, segundo a solubilidade de contaminantes em diferentes materiais (PIVELI E KATO, 2006).

De acordo com Piveli e Kato (2006), a alcalinidade das águas não representa risco à saúde pública, provoca apenas alteração no paladar. Não se constitui um padrão de potabilidade e lançamento de esgotos ou classificação de águas naturais. A alcalinidade das águas geralmente associa-se à dureza, sendo responsável pela precipitação de carbonatos.

A dureza é um parâmetro que resulta da presença, principalmente, de sais alcalinos terrosos (cálcio e magnésio), ou de outros metais bivalentes, em menor intensidade; em teores elevados causa sabor desagradável e efeitos laxativos; reduz a formação da espuma do sabão, aumentando seu consumo; provoca incrustações nas tubulações e caldeiras. No Quadro 6 é mostrada a classificação das águas, em termos de dureza (MOTA, 2006).

Quadro 6 - Classificação das águas em relação à dureza

<b>DUREZA (CaCO<sub>3</sub>)</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO</b>
< 50 mg/L	Água mole
Entre 50 e 150 mg/L	Água com dureza moderada
Entre 150 e 300 mg/L	Água dura
> 300 mg/L	Água muito dura

Fonte: Adaptado de Mota (2006)

A principal fonte de dureza nas águas é a sua passagem, pelo solo, dissolução da rocha calcária pelo gás carbônico da água. Desta forma, é mais frequente dureza elevada em águas subterrâneas do que as superficiais (PIVELI E KATO, 2006).

Águas com elevados teores de sais tendem a afetar o crescimento das plantas e a causar a salinização do solo, tornando-o improdutivo. A salinidade da água é expressa pela condutividade elétrica, sendo a água um isolante térmico, quanto maior for sua condutividade, mais íons (solutos) estarão presentes, aumentando portanto, o risco de salinidade (MOTA, 2006).

O Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos estabeleceu os seguintes intervalos para a condutividade elétrica da água, em termos de risco de salinidade (Quadro 7):

Quadro 7 - Risco de salinidade da água

CONDUTIVIDADE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ , a 25°C)	RISCO DE SALINIDADE
Menor que 250	Baixo (C1)
Entre 250 e 750	Médio (C2)
Entre 750 e 2.250	Alto (C3)
Acima de 2.250	Muito Alto (C4)

Fonte: Adaptado de Mota (2006)

A condutividade elétrica baseia-se na condução de eletricidade causada pela movimentação independente dos íons em solução. A condutividade aponta para o nível de solubilidade de sais ou outros compostos em ambiente aquático. Dessa maneira, avaliando-se este parâmetro em água doce, pode-se co-relacionar o valor da condutividade com as concentrações dos principais íons determinantes da salinidade, como cálcio, magnésio, sódio, potássio, carbonatos, sulfatos e cloreto. Para água potável, os valores de condutividade variam da ordem de 20 a 70  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (FATMA, 2007).

O sulfato é o ânion  $\text{SO}_4^{-2}$ , um dos mais abundantes íons na natureza. Surge nas águas subterrâneas através da dissolução de solos e rochas, como o gesso ( $\text{CaSO}_4$ ) e o sulfato de magnésio ( $\text{MgSO}_4$ ) e pela oxidação de sulfeto (exemplo: pirita, sulfeto de ferro). Nas águas superficiais, ocorre através das descargas de esgotos domésticos (por exemplo, através da degradação de proteínas) e efluentes industriais (exemplos: efluentes de indústrias de celulose e papel, química, farmacêutica, etc.). Nas águas para abastecimento público, o sulfato deve ser controlado porque provoca efeitos laxativos, sendo o padrão de potabilidade fixado em 250 mg/L pela Portaria do Ministério da Saúde (MS) Nº 2914/2011, (PIVELI E KATO, 2006).

O cloreto é o ânion  $\text{Cl}^-$  que se apresenta nas águas subterrâneas através de solos e rochas. Nas águas superficiais são fontes importantes as descargas de esgotos sanitários, sendo que cada pessoa expele através da urina cerca de 6 g de cloreto por dia, o que faz com que os esgotos apresentem concentrações de cloreto que ultrapassam a 15 mg/L. Nas regiões costeiras, através da chamada intrusão da língua salina, são encontradas águas com níveis altos de cloreto. Nas águas tratadas, a adição de cloro puro ou em solução leva a uma elevação do nível de cloreto, resultante das reações de dissociação do cloro na água (PIVELI E KATO, 2006).

Para as águas de abastecimento público, a concentração de cloreto constitui-se em padrão de potabilidade, segundo a Portaria MS Nº 2914/2011. O cloreto provoca sabor “salgado” na água, sendo o cloreto de sódio o mais restritivo por provocar sabor em concentrações da ordem de 250 mg/L, valor este que é tomado como padrão de potabilidade. No caso do cloreto de cálcio, o sabor só é perceptível em concentrações de cloreto superior a 1000 mg/L. Embora hajam populações árabes adaptadas ao uso de águas contendo 2.000 mg/L de cloreto, são conhecidos também seus efeitos laxativos. Pode provocar corrosão em estruturas hidráulicas como, por exemplo, em emissários submarinos para a disposição oceânica de esgotos sanitários, que por isso têm sido construídos com polietileno de alta densidade (PIVELI E KATO, 2006).

O nitrogênio em recursos hídricos pode se apresentar nas formas de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), nitrito, amônia, nitrogênio molecular e nitrogênio orgânico, sendo que os níveis elevados de nitratos indicam poluição que pode estar ocorrendo há algum tempo, porque estes são os produtos finais da oxidação do nitrogênio. Podendo causar uma doença denominada meta-hemoglobinemia infantil, que é letal para crianças, por isso é padrão de potabilidade pela mesma Portaria citada anteriormente, sendo 10 mg/L o valor máximo permitido. O nitrogênio pode contaminar as águas naturais sem ter sido introduzido diretamente, decorrendo do processo de decomposição biológica da matéria orgânica nitrogenada (PIVELI E KATO, 2006).

O Quadro 8 mostra os limites de alguns parâmetros químicos que serão posteriormente analisados neste trabalho, de acordo com a legislação correspondente:

Quadro 8 - Limites permitidos dos parâmetros químicos de acordo com sua legislação

PARÂMETROS QUÍMICOS	LEGISLAÇÃO			
	Portaria Nº 2914/11 do MS	CETESB Nº 152/07	NBR Nº 10004/04	CONAMA Nº 357/05
pH	6,0 a 9,5 (1)	5,0 a 10,0 (4)	$\leq 2$ ou $\geq 12,5$ (7)	6,0 a 9,0 (9)
Dureza	500 mg/L (2)	-	-	
Sulfato	250 mg/L (2)	2.500 mg/L (5)	250 mg/L (8)	250 mg/L (9)
Cloreto	250 mg/L (2)	2.500 mg/L (5)	250 mg/L (8)	250 mg/L (9)
Nitrato	10 mg/L (3)	n/a (6)	10 mg/L (8)	10 mg/L (10)

- (1) Qualidade da água para consumo humano, recomendado para o sistema de distribuição;
- (2) VMP (Valor Máximo Permitido) para padrão de potabilidade;
- (3) VMP para padrão de potabilidade para substâncias químicas que representam risco à saúde;
- (4) Faixa para o resíduo de areia de fundição;
- (5) Concentração máxima de poluentes no lixiviado neutro;
- (6) n/a – Nada encontrado;
- (7) Resíduo caracterizado como corrosivo;
- (8) Limite máximo no extrato solubilizado;
- (9) Limite padrão de qualidade para água doce. Para água salina e salobra a faixa de pH é de 6,5 a 8,5;
- (10) Limite padrão de qualidade para água doce. Para águas salobras e salinas (classe 1) o padrão é 0,40 mg/L e para salobras e salinas (classe 2) é de 0,70 mg/L.

Os metais pesados são considerados elementos cuja densidade é igual ou superior a 5 g/cm<sup>3</sup>, ou cujo número atômico seja superior a 20, excluindo os alcalinos e alcalinos terrosos (ALCÂNTARA, 2007). Esses elementos ocorrem naturalmente no ambiente, exercendo funções fisiológicas em plantas, animais, microrganismos, sendo considerados, portanto, essenciais. Entretanto, quando suas concentrações são elevadas, causam danos ao ambiente.

Os metais pesados quando incorporados em materiais cimentícios podem afetar algumas propriedades. Minocha *et al.* (2003) comentam que os metais normalmente provocam efeitos deletérios na resistência e durabilidade de sistemas aglomerantes e estes efeitos são maximizados com o aumento de sua concentração.

Muitos metais são empregados ou liberados em atividades industriais, agrícolas e de mineração, sendo posteriormente lançados no ambiente como resíduo destas atividades. Consequentemente, os teores destes metais em solos sob atividade humana são mais elevados que os encontrados naturalmente em solos (BIONDI, 2010).

Particularmente no solo, os metais apresentam baixa mobilidade devido aos processos de adsorção/dessorção, precipitação/solubilização, complexação, oxi-redução, etc. Com isso, é possível encontrar um metal fazendo parte das diversas formas químicas. Portanto, a toxicidade de metais pesados no solo é, a princípio, muito baixa. Infelizmente, a atividade industrial, juntamente, com o aumento do despejo de resíduos sólidos urbanos, aumentou consideravelmente



a quantidade destes no solo, fato que pode possibilitar a alteração de suas propriedades bioquímicas e biológicas. No ambiente, esses elementos ainda, podem seguir diferentes vias de fixação, liberação ou transporte, acumulando-se no solo e com isso alterando a atividade microbiana, causando fitotoxicidade (CHAVES, 2008).

Em termos de poluição ambiental, os metais podem ser classificados de acordo com três critérios: não-tóxicos; tóxico e muito tóxico. Alguns dos principais elementos que fazem parte desses grupos são:

- Não tóxico – Sódio, magnésio, cálcio, fósforo, ferro e lítio;
- Tóxico – Alumínio, titânio, gálio, bário, ósmio, hafnio;
- Muito tóxico – Cobalto, níquel, zinco, cobre, arsênio, prata, cádmio, mercúrio e chumbo.

A Norma NBR N° 10004/2004 classifica os resíduos em perigosos ou não perigosos, limitando os componentes inorgânicos, inclusive os metais pesados, que possam lixiviar ou solubilizar dos resíduos. Como exemplo, a presença de teores do alumínio (Al) acima do estabelecido pela norma supracitada é um fator bastante preocupante, pois embora a solubilidade desse elemento diminua com o aumento do pH, elevadas concentrações desse elemento podem lixiviar, contaminando corpos hídricos e solos.

O alumínio surge na água com a presença de fluoretos, sulfatos e matéria orgânica, sendo influenciado pelo pH mais baixo. O aumento da concentração está relacionado com a turbidez da água. Os riscos ao ser humano se dão pela ingestão de alimentos e bebidas, estando associado a várias doenças.

Townsend *et al.* (2004) comentam que os RCC são em sua maior parte inertes, porém em estudo realizado na Flórida por esses pesquisadores com finos reciclados provenientes desses resíduos foram encontrados altos níveis de metais pesados. Esses metais podem afetar a qualidade do produto reciclado e provocar danos ambientais.

A remoção de componentes perigosos dos RCC antes de processar os materiais é vantajosa. Primeiramente, muito da separação de materiais é executada pelo trabalho manual na central de reciclagem ou nos centros de triagem, a remoção de componentes perigosos reduz riscos do trabalhador. Em segundo, a pureza do produto criado pela reciclagem é afetada pela presença de elementos químicos perigosos (*Department of Environmental Engineering Sciences*, 2004).

Cauduro e Roberto (2002) que analisou a presença dos metais Cr, Pb, Zn, Cd, e Ni, nos testes de lixiviação para a classificação de resíduos sólidos; Sampaio (2003) analisou metais em águas e em sedimentos: Co, Hg, Cu, Fe, Mn, Cd, Zi, Pb, Ni, e Cr; Schaefer (2007) avaliou a liberação de metais pesados como As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Ti e Zn dos AR provenientes do beneficiamento de RCC; e Jacob *et al.* (2009) teve como objetivo analisar a lixiviação de metais pesados (Cu, Fe, Zn, Cd, Sn, Cr, Mn, Se, Ni e As) em concretos produzidos com AR de RCC.

Logo, a chave do sucesso da reciclagem é manter o grau de contaminação do material ao mínimo possível. A pureza do produto recuperado assegura um valor de mercado mais elevado e a remoção de componentes perigosos dos resíduos da construção é um primeiro passo para isso.

## 2.5. Caracterização química e mineralógica

### 2.5.1. Fluorescência de raios X (FRX)

A espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) constitui uma metodologia fundamentada na mensuração da intensidade dos raios X característicos, emitidos pelos elementos que fazem parte do material, cujas intensidades estão co-relacionadas com a concentração do elemento na amostra (FERNANDES, 2010).

A análise química por FRX, realizada no estudo de Aguiar (2004), constatou que as quatro amostras de RCC resultaram em aproximadamente 65% de  $\text{SiO}_2$ , 12% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , seguindo dos outros óxidos. O alto valor para o óxido de alumínio foi associado aos minerais do tijolo cerâmico usado nesses RCC. Para Ferreira *et al.* (2014), os RCC foi composto em sua maioria (95,11%) por óxidos de silício, e em sua minoria por óxidos de alumínio (0,57%), ferro (0,31%) e potássio (0,17%) o que o caracteriza como um bom agregado miúdo para produção de argamassas. O alto teor de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) encontrado deve está associado, principalmente, aos agregados naturais do concreto e da argamassa de paredes presentes nos RCC.

Limbachiya *et al.* (2007) em estudo com agregados graúdos reciclados (RCA) determinaram através da FRX os seus constituintes majoritários, sendo  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$ , alguns elementos traços como Pb, Zn, Ni, Co, Cr e V também foram detectados. Os autores também investigaram os agregados graúdos naturais, em que verificaram que houve

predominância de  $\text{SiO}_2$  em sua composição, e o agregado miúdo foi mais rico em  $\text{CaO}$ . Eles destacaram que o reciclado teve em sua constituição predominância de óxidos de Al e Ca. O cobalto foi o elemento traço que apresentou maior teor nos agregados graúdos reciclados, seguido do chumbo e vanádio.

Outro trabalho com a FRX, foi determinada a composição química dos agregados provenientes da reciclagem de RCC, em várias dimensões de grãos. Em todas as frações investigadas ocorreu predominância da  $\text{SiO}_2$ , sendo o maior pico na areia média. Em contrapartida, o pico do  $\text{CaO}$  na areia média foi inferior. Os conteúdos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  mostraram-se aproximadamente constantes, diferindo de forma pouco significativa nas distintas frações analisadas. Quando comparados com areia natural, esses agregados reciclados são mais ricos em  $\text{CaO}$  e pobres em  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{K}_2\text{O}$  (BIANCHINI *et al.*, 2005).

#### 2.5.2. Difração de raios X (DRX)

O método de difração de raios X (DRX) consiste no bombardeamento de feixes de raios X em uma amostra. Uma parte desses feixes passa através da amostra e a outra parte é difratada. Os picos exibidos no difratograma são as distâncias interplanares, correlacionadas à posição, intensidade e forma da estrutura cristalina, determinando, dessa maneira, a composição mineralógica dos materiais pesquisados (FERNANDES, 2010).

O teste de DRX permite a determinação mineralógica dos resíduos. Em novos materiais esta técnica permite, sobretudo determinar a fase cristalina dos materiais e também analisar, para certos casos, os hidratos mal cristalizados. Na caracterização através de DRX, dos compostos de AR, Aguiar (2004) e Ferreira *et al.* (2014) detectou principalmente quartzo, constituinte da argamassa; além do feldspato e calcita (Aguiar, 2004) e leucita e hematita (Ferreira *et al.*, 2014).

Corrêa (2005) estudou a composição mineralógica das misturas iniciais secas dos resíduos de concreto seco, através do método de DRX verificando-se a presença dos seguintes grupos de minerais:

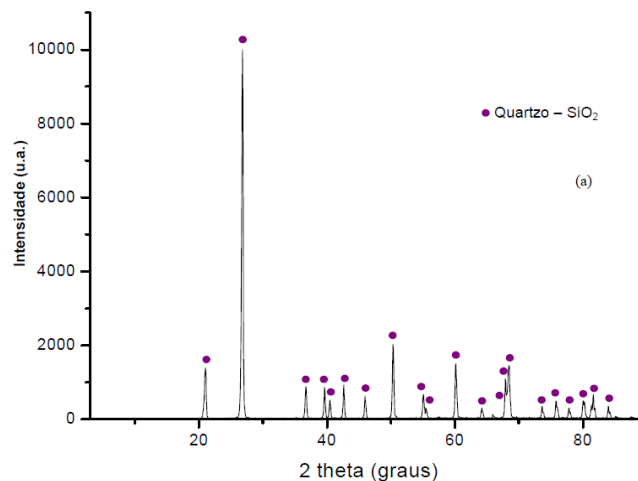
- Componentes usuais de agregados de resíduos de concreto - quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), microclina ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), ortoclásio ( $\text{KSi}_3\text{AlO}_8$ ), carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e silicato de cálcio ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ );  $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ;

- Produtos de hidratação - afwillita  $\text{Ca}_3(\text{SiO}_3\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$ , C-S-H - silicato de cálcio  $\text{Ca}_4\text{Si}_5\text{O}_{13.5}(\text{OH})_2$  e hidrato de silicato de cálcio  $(\text{Ca}_{1.5} \text{SiO}_{3.5} \cdot x\text{H}_2\text{O})$ , ettringita -  $\text{Ca}_6(\text{Al}(\text{OH})_6)_2(\text{SO}_4)_3(\text{H}_2\text{O})_{25.7}$ ;
- Minerais ligantes, como hidróxido de cálcio - portlandita  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; brownmillerita (Bw) -  $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe}^{+3})_2\text{O}_5$ , gesso (Gy) -  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ .

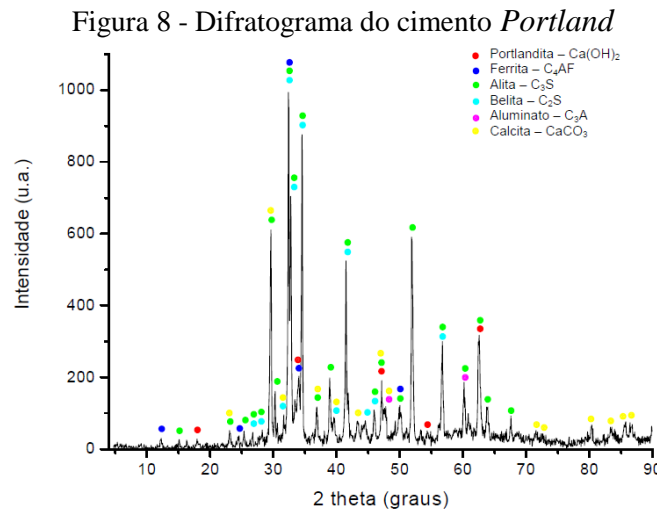
Em outro trabalho, Reis (2004), em amostras de areias identificou os minerais: quartzo, feldspato, mica, piroxênio, caulinita e calcita e na brita Nº 0 foram identificados: quartzo, feldspato, calcita e portlandita. Limbachiya *et al.* (2007) observaram uma predominância dos picos de  $\text{SiO}_2$ , seguido por feldspato e por picos menores de  $\text{CaCO}_3$ . Os autores comentam que a presença de feldspato pode estar relacionada à parcela tijolo/cerâmica, que é uma fase aluminossilicato, ou ainda, à presença de areias contendo feldspato e usado no concreto. A presença de  $\text{CaCO}_3$  pode diretamente ser relacionada à pasta original do cimento aderido na superfície de partículas de RCC ou devido ao processo de carbonatação dentro do concreto original.

Mansur (2007) mostrou no difratograma do agregado miúdo (Figura 7), um padrão essencialmente cristalino com os picos característicos do quartzo bem definidos. E na (Figura 8), o mesmo autor, mostrou para o cimento a identificação das fases cristalinas, sendo encontrados os principais componentes do cimento: a alita ( $\text{C}_3\text{S}$ ), belita ( $\text{C}_2\text{S}$ ), ferrita ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) e aluminato ( $\text{C}_3\text{A}$ ), bem como a adição calcária ( $\text{CaCO}_3$ ) e a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

Figura 7 - Difratograma de agregado miúdo



Fonte: Mansur (2007)



Fonte: Mansur (2007)

### 2.5.3. Análises térmicas (DTA e TG)

Na técnica de Análise Térmica Diferencial (DTA) é medida a diferença de temperatura entre a amostra e uma referência inerte, quando submetidas ao aquecimento ou resfriamento. A partir desta técnica é possível analisar as mudanças que ocorrem na amostra com a temperatura, se de origem endotérmica ou exotérmica, proporcionando informações importantes como a temperatura de fusão e cristalização, reações de decomposição, mudança de fase, oxidação, entre outros (RAMACHANDRAN E BEAUDOIN, 2001; MOTHÉ E AZEVEDO, 2002).

As análises térmicas se constituem de um conjunto de técnicas, cada uma com uma habilidade de acompanhar uma propriedade física específica (DENARI E CAVALHEIRO, 2012). O Quadro 9 mostra as técnicas mais utilizadas e as respectivas propriedades físicas associadas a cada uma delas.

De acordo com Aguiar (2004), os possíveis compostos encontrados em quatro amostras de RCC estudadas, representam: entre 114°C e 120°C – C-S-H e aos sulfoaluminatos; entre 275°C e 282°C, minerais dos tijolo cerâmico; entre 491°C e 511°C, decomposição de hidróxidos do cimento e da cal hidratados, provavelmente portlandita; e entre 760°C e 767°C seria da decomposição dos carbonatos. No processo de calcinação do agregado miúdo reciclado teve-se a descarbonatação da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) nas amostras calcinadas a 800°C; a transformação do quartzo da fase  $\alpha$  para  $\beta$  a 573°C; a perda de hidróxidos da caulinita a 600°C; e a transformação da caulinita presente no agregado reciclado bruto em metacaulina.

Quadro 9 - Propriedades físicas e técnicas relacionadas em diferentes análises térmicas

<b>TÉCNICA</b>	<b>ABREVIATURA</b>	<b>PROPRIEDADE</b>	<b>USOS</b>
Análise Termogravimétrica (*) Termogravimetria Derivada (*)	TGA DTG	Massa	Decomposição Desidratação Oxidação
Análise Térmica Diferencial (*)	DTA	Temperatura	Mudança de fase Reações
Calorimetria Exploratória Diferencial (*)	DSC	Entalpia	Capacidade de calor Mudança de fase Reações Calorimetria
Análise Termomecânica	TMA	Deformação	Mudanças mecânicas Expansão
Análise Dinâmico-Mecânica	DMA	Propriedades Mecânicas	Mudança de fase Cura de polímero
Análise de gás envolvido	EGA	Gases	Decomposição Catálise e reação de superfície
Termoptometria	-	Ótica	Mudança de fase Reações de superfície Mudanças de coloração

(\*) Essas são as técnicas mais conhecidas

Fonte: Adaptado de Denari e Cavalheiro (2012)

Segundo estudo de Denari e Cavalheiro (2012), a dolomita é uma mistura natural de carbonatos de cálcio e carbonato de magnésio, que representa um excelente exemplo de mistura que pode ser resolvida com facilidade pelas curvas TG, devido às diferenças nas temperaturas de decomposição destes carbonatos:

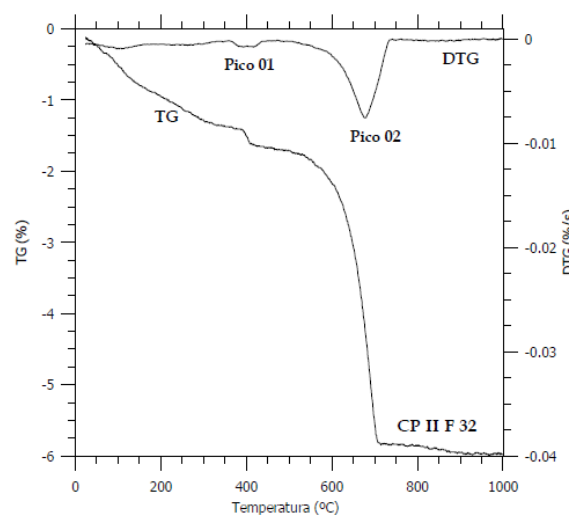


Assim, uma curva TG da dolomita normalmente apresenta dois picos, uma referente à saída de  $\text{CO}_2$  proveniente do carbonato de magnésio e outra do carbonato de cálcio, respectivamente. A medida das quantidades de massa perdida em cada etapa da sua decomposição permite determinar a quantidade de  $\text{CO}_2$  referente à decomposição de cada carbonato (cálcio e magnésio). As curvas TG obtidas no estudo de Denari e Cavalheiro (2012) para o carbonato de magnésio aconteceu no intervalo de  $255,7^\circ\text{C} - 513,8^\circ\text{C}$  e para o carbonato de cálcio foi de  $570,7^\circ\text{C} - 738,8^\circ\text{C}$ .

O carbonato de cálcio provém do cimento tipo II utilizado, já que é adicionado como fíler calcário a mistura clínquer mais gipsita durante o processo de moagem da composição final do cimento (ABNT, 1991).

Gonçalves *et al.* (2006) em seu trabalho observou um pico (Pico 02), o qual referiu-se à perda de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) devido ao processo de decomposição do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Espectros obtidos na TG do cimento (CP II F32)



Fonte: Gonçalves *et al.* (2006)

Outro estudo utilizando a dolomita foi de Dollimore *et al.* (2001), onde utilizou os concretos reciclados ricos em dolomita e baixo teor de calcita no estado de Ohio nos Estados Unidos. A primeira ocorrência foi à perda de água adsorvida dentro da faixa 100-150°C e uma perda contínua de água na faixa de 150 a 400°C. De acordo com o autor essa perda é devido aos silicatos de cálcio hidratados presentes no concreto e a 400°C ocorre à dissociação da portlandita. A presença do quartzo podia ser vista em muitas das amostras com uma pequena transição endotérmica a 573°C. A dolomita presente decompõe em dois estágios: o primeiro estágio ocorre a 780°C e pode ser visto no lote do termograma e em torno de 910°C toda a calcita presente decompõe.

#### 2.5.4. Espectrometria de Infravermelho (IV)

A técnica por espectrometria no infravermelho (IV) é utilizada para a identificação de grupos orgânicos / inorgânicos existentes nos agregados. Esta radiação é produzida por uma fonte aquecida eletricamente, usualmente um filamento de *Nernst* ou *Globalar* (bastão de carvão de silício) a temperaturas que alcançam 1000 a 1800°C (SILVERSTEIN E WEBSTER, 2000).

As análises IV permitem uma investigação da estrutura molecular dos materiais, permitindo também a identificação de compostos químicos presentes em um determinado material, completando outras técnicas (WHETSEL, 1968; GHOSH *et al.*, 2001).

Quando uma determinada molécula é exposta à radiação IV, esta sofre determinadas e complexas vibrações de deformação tanto axial (estiramento) como angular com modos vibracionais variados, indicando o movimento dos átomos que se encontram ligados. Nem todos os tipos de vibração são detectadas pelo IV (WHETSEL, 1968; SILVERSTEIN E WEBSTER, 2000). As vibrações moleculares podem ser classificadas conforme o Quadro 10.

Quadro 10 - Tipos de vibração e modos vibracionais de uma molécula

TIPOS DE VIBRAÇÃO MOLECULAR	MODOS VIBRACIONAIS
Deformação axial (estiramento)	Simétrica
	Assimétrica
Deformação angular	Simétrica no plano
	Simétrica fora do plano
	Assimétrica no plano
	Assimétrica fora do plano

Fonte: Adaptado de Silverstein e Webster (2000)

Segundo Haack (2010), a interpretação dos espectros no IV é feita num primeiro momento pelo perfil do espectro e presença de bandas características principais de grupos funcionais como C=O (1.800 a 1.650  $\text{cm}^{-1}$ ), OH (3.500 a 3.200  $\text{cm}^{-1}$ ), banda larga para OH de ácidos (3.400 a 2.700  $\text{cm}^{-1}$ ), C-O (1.300 a 1.000  $\text{cm}^{-1}$ ), entre outros.

O alongamento entre (900 a 1.000  $\text{cm}^{-1}$ ), são sempre encontrados em espectro de Sílica, onde essas vibrações de alongamento referem-se ao silício-oxigênio, devido à presença de



siloxano, com estiramento e deformação da sílica. Para Argenton (2010), a sílica possui grupos siloxano (Si-O-Si) e grupos silanol (Si-OH). Os grupos silanol são os mais importantes devido a sua polaridade. Quanto mais polar o composto, maior a retenção, onde essa ligação é superficial, absorvendo umidade por conta do grupo hidroxila, havendo estiramento e deformação da sílica (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

## CAPÍTULO III

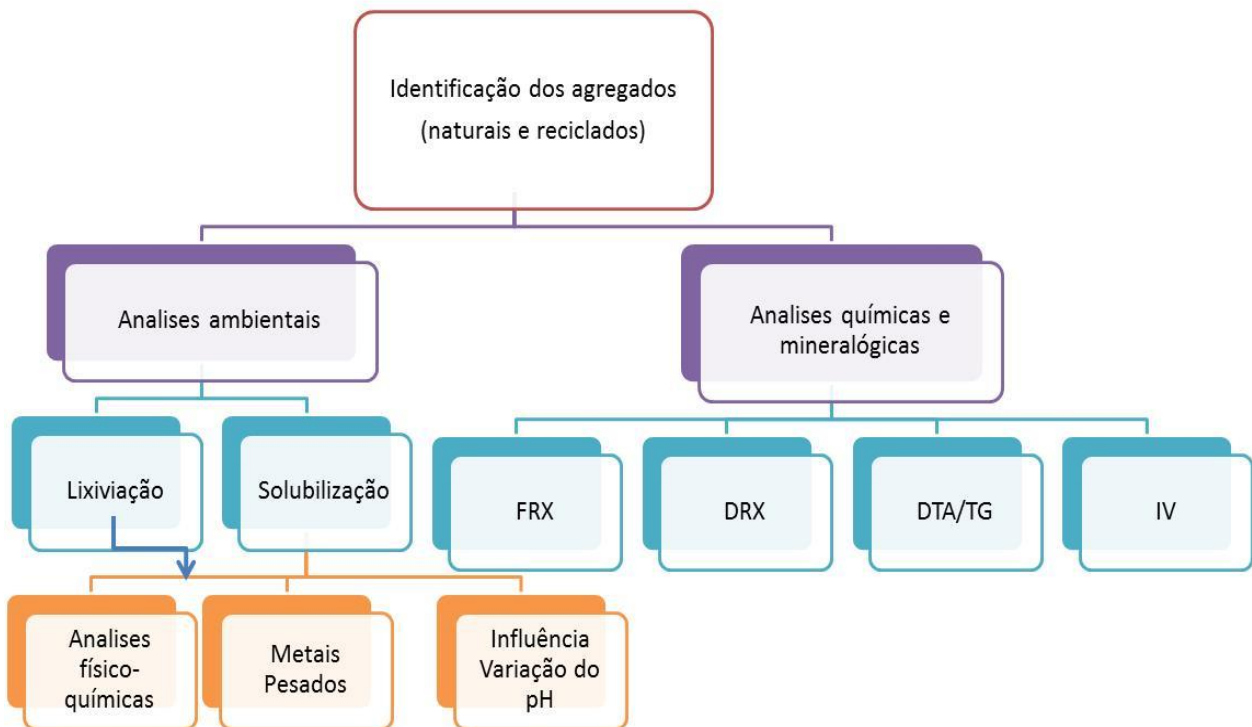
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Planejamento experimental

Nesta pesquisa foram adotados métodos de caráter qualitativo e quantitativo. No caráter qualitativo realizou-se a descrição e interpretação do problema, através da revisão bibliográfica, visitas à Unidade responsável pelo gerenciamento dos AR e registro fotográfico de locais com disposição irregular de RCC. E quantitativo, através da análise de dados e dos cruzamentos entre as diversas informações coletadas, quantificando-se as características dos agregados estudados.

As atividades do procedimento experimental, realizadas nos laboratórios da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), estão descritas no fluxograma mostrado na Figura 10, sintetizando o delineamento da pesquisa.

Figura 10 - Fluxograma das etapas do desenvolvimento experimental



### 3.2. Identificação dos agregados

Nesse estudo, as amostras dos AR foram coletadas na USIBEN e os AN obtidos em usina de asfalto existente no estado da Paraíba. Após, a seleção dos materiais foram preparadas várias amostras destinadas à realização de ensaios. Segundo estudo de Queiroz e Melo (2012), o material estudado foi classificado como ARC, por apresentar mais de 90% de cimento e rochas (brita), conforme NBR 15116 (ABNT, 2004).

Os agregados reciclados utilizados neste estudo foram classificados e denominados conforme mostrado no Quadro 11.

Quadro 11 - Classificação e denominação dos AR analisados nesse estudo

<b>CLASSIFICAÇÃO DO DNIT (2006)</b>	<b>NOVA DENOMINAÇÃO</b>	<b>ETAPA DE UTILIZAÇÃO</b>
Agregado graúdo	Agregado miúdo (AR)	ETAPA I
Agregado graúdo	Brita 25 (AR)	ETAPAI
Agregado graúdo	Brita 12 (AR)	ETAPAS I E II
Agregado miúdo	Areia (AR)	ETAPA II

Após a seleção dos materiais, várias amostras foram preparadas para à realização dos ensaios. Este estudo foi dividido em duas etapas:

ETAPA I - Foram analisadas (7) sete amostras:

- 4 Agregados Naturais (AN): areia; brita 12; pó de pedra; brita 19;
- 3 Agregados Reciclados (AR): agregado miúdo; brita 25; brita 12.

ETAPA II - Para uma melhor comparação e continuidade do trabalho, reduziu-se o numero de amostras estudadas, para apenas 4 (quatro), e neste momento foi acrescentada a areia Reciclada (AR), sendo analisadas duas amostras de cada:

- 2 Agregados Naturais (AN): areia e brita 12;
- 2 Agregados Reciclados (AR): areia e brita 12.

### 3.3. Análises ambientais

#### 3.3.1. Testes de lixiviação e solubilização

O extrato lixiviado foi preparado com base na NBR N° 10005/2004 (Figuras 11 a 14), o extrato solubilizado foi elaborado de acordo com a NBR N° 10006/2004. Utilizou-se as amostras trituradas na USIBEN para ambos os testes realizados.

Figura 11 - Soluções para o teste de lixiviação



Fonte: Acervo pessoal (2013)

Figura 12 - Mesa agitadora do teste de lixiviação



Fonte: Acervo pessoal (2013)

Figura 13 - Sistema de filtração para as amostras



Fonte: Acervo pessoal (2013)

Figura 14 - Amostras preparadas para o teste de solubilização



Fonte: Acervo pessoal (2013)

Os testes de lixiviação e solubilização foram realizados no laboratório de Saneamento (LABSAN) da UFPB, sendo realizadas três bateladas na Etapa I e uma batelada na Etapa II, por causa de problemas operacionais no laboratório.

Na etapa I os parâmetros físico-químicos analisados foram: pH, condutividade, cloretos, nitratos, sulfatos, ferro e alumínio. As análises foram realizadas de acordo com o Manual de Análises Físico-Químicas de Água de abastecimento e Residuárias (SILVA E OLIVEIRA, 2001). Na Etapa II apenas o parâmetro pH foi realizado no LABSAN, as demais análises foram realizadas no Instituto Tecnológico de Estudos e Pesquisas (ITEP), como metais pesados (As, Cd, Pb, Cr, Ni, Al, Cu, Fe, Ni, Se, Zn), cloreto, nitrato e sulfato.

### 3.3.2. Metais pesados

Para as análises de alguns metais pesados, as amostras foram enviadas duas vezes para o ITEP, localizado na cidade de Recife-PE. Na Etapa I (2013) foram enviados três extratos lixiviados e três extratos solubilizados, totalizando seis amostras, dos agregados reciclados (Figura 15). Foram selecionados alguns metais para cada extrato analisado (Quadro 12), com base em trabalhos científicos como, Cauduro e Roberto (2002); Sampaio (2003); Schaefer (2007); e Jacob *et al.* (2009).

Na Etapa II (2014) foram enviadas no total, oito extratos (lixiviado e solubilizado) referentes aos 4 agregados selecionados para esta etapa, tanto os naturais, quanto os reciclados, para uma melhor comparação. O metal Zinco (Zn) foi substituído por Níquel (Ni), na tentativa de abranger uma maior variedade de metais pesados.

Figura 15 - Amostras enviadas para o ITEP para análise dos metais pesados



Fonte: Acervo pessoal (2013)

Quadro 12 - Distribuição das amostras para análise dos metais pesados

	AMOSTRAS	AGREGADOS	ENSAIO	METAIS PESADOS
Etapa I (2013)	1	Ag. Miúdo AR	Lixiviação	Arsênio / Cádmio / Chumbo / Cromo
	2	Brita 12 AR		
	3	Brita 25 AR		
	4	Ag. Miúdo AR	Solubilização	Arsênio / Cádmio / Chumbo / Cromo / Cobre / Ferro / Selênio / Zinco
	5	Brita 12 AR		
	6	Brita 25 AR		
Etapa II (2014)	1	Areia AN	Lixiviação	Arsênio / Cádmio / Chumbo / Cromo / Níquel
	2	Areia AR		
	3	Brita 12 AN		
	4	Brita 12 AR		
	5	Areia AN	Solubilização	Arsênio / Cádmio / Chumbo / Cromo / Cobre / Ferro / Selênio / Zinco / Alumínio / Níquel
	6	Areia AR		
	7	Brita 12 AN		
	8	Brita 12 AR		

Os resultados foram analisados quanto aos limites de metais pesados, conforme mostrado no Quadro 13.

Quadro 13 - Limite de metais pesados segundo a Legislação

Parâmetro (Metais Pesados)	Limite máximo (mg/L)			
	ABNT NBR Nº 10004/2004 Anexo F	ABNT NBR Nº 10004/2004 Anexo G	CONAMA 430/2011	CETESB Nº 152/2007
	Lixiviação	Solubilização	Efluentes	Lixiviado
Arsênio	1,00	0,01	0,50	0,50
Bário	70,00	0,70	5,00	10,00
Cádmio	0,50	0,005	0,20	0,10
Chumbo	1,00	0,01	0,50	0,50
Cromo total	5,00	0,05	1,00	0,50
Fluoreto	150,00	1,50	10,00	14,00
Mercúrio	0,10	0,001	0,01	0,02
Prata	5,00	0,05	0,10	-
Selênio	1,00	0,01	0,30	0,10
Alumínio	-	0,20	-	-
Cloreto	-	250,0	-	2.500,00
Cobre	-	2,00	15,00	2,50
Ferro	-	0,30	-	15,00
Nitrato	-	10,00	-	-
Sódio	-	200,00	-	2.500,00
Sulfato	-	250,00	-	2.500,00
Zinco	-	5,00	5,00	25,00

### 3.3.3. Estudo da influência do pH

Este estudo mediu a variação do pH nas amostras durante o teste de solubilização dos agregados visando analisar a interferência do oxigênio, ou seja, com e sem troca de CO<sub>2</sub> (atmosférica). Para isto foram preparados frascos com e sem tampas. Na Etapa I utilizou-se as 7 amostras dos agregados e na Etapa II analisou-se as 4 amostras.

As amostras dos agregados foram pesadas em uma balança analítica de marca BEL ELETRÔNICA de precisão centigramétrica, utilizou-se um pHmetro de modelo mPA-210, béquers de vidro de 250 mL para colocar as amostras durante as medições, água destilada com pH aproximadamente 6,5 para solubilização e limpeza dos materiais e frascos de plástico (garrafas) com volume de 2L com e sem tampa para armazenar as referidas amostras (Figuras 16 a 19).

Figura 16 - Pesagem para o teste de solubilização



Fonte: Acervo pessoal (2013)

Figura 17 - Amostras nos frascos com tampa



Fonte: Acervo pessoal (2013)

Figura 18 - pHmetro e a medição



Fonte: Acervo pessoal (2013)

Figura 19 - Amostras da solubilização sem tampa



Fonte: Acervo pessoal (2013)

Para verificar a variação do pH, utilizou-se duas formas de solubilização, com a garrafa tampada, onde denominou-se sem troca atmosférica (ST-ATM) e com a garrafa destampada, ou seja, com troca atmosférica (CT-ATM). Na ST-ATM, atentou-se para que a distância do líquido até a tampa fosse à mínima possível, evitando a entrada de CO<sub>2</sub> e, portanto sendo possível observar a diferença entre as duas formas.

Iniciou-se o monitoramento no 1º dia em intervalos de tempo menores, sendo realizadas 7 medições sequenciais, onde verificou-se pequena variação, então optou-se por dar continuidade ao monitoramento com intervalo de 24 horas, sendo realizadas mais 6 medições, totalizando 13, conforme mostrado no Quadro 14. O tempo para o teste da solubilização foi de 7 dias, de acordo com a NRB 10006/2004.

Quadro 14 - Monitoramento do pH das amostras: tempo e horários

TEMPOS	HORÁRIOS
1º dia – tempo 0	08:00hs
1º dia - 15 minutos	08:15hs
1º dia - 30 minutos	08:30hs
1º dia - 1 hora	09:00hs
1º dia - 3 horas	11:00hs
1º dia - 6 horas	14:00hs
1º dia - 8 horas	18:00hs
2º dia	08:00hs
3º dia	08:00hs
4º dia	08:00hs
5º dia	08:00hs
6º dia	08:00hs
7º dia	08:00hs

#### 3.4. Preparação das amostras para análises químicas e mineralógicas

Os extratos lixiviados e solubilizados foram filtrados, enquanto que as amostras sólidas retiradas das garrafas foram colocadas em estufa para secar, com temperatura de 50°C para não alterar as propriedades físico-químicas.

Utilizou-se um almofariz de plástico no destorroamento e para o trituramento, utilizou-se uma ferramenta de metal e martelo para amplificar a força de compressão. Para concluir, as amostras foram peneiradas com malha 325 mesh (Figura 20) e armazenadas em eppendorfs (Figura 21).



Figura 20 - Peneiramento das amostras



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Figura 21 - Eppendorfs para armazenamento de amostras



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Para evitar contaminação, em ambas às etapas, as ferramentas foram lavadas com água destilada e secadas.

### 3.5. Análises químicas e mineralógicas

Na caracterização dos compostos presentes nos agregados estudados, sejam os naturais (AN) ou reciclados (AR), investigou-se os parâmetros químicos e estruturais, sendo possível identificar seus minerais, seu potencial reativo e a presença de traços de metais pesados.

#### 3.5.1. Fluorescência de raios X (FRX)

O ensaio de FRX foi realizado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), na Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais (UAEM). As pastilhas foram preparadas no laboratório de solidificação rápida, da UFPB. Para a execução do ensaio, as amostras foram preparadas da seguinte forma: adição de Ácido Acetil Salicílico (AAS), que atua como ‘cola’ para fixar a amostra, visando à aglutinação e quebra das amostras; Pulverização, por aproximadamente 4 minutos, com a finalidade de misturar o material da amostra com o AAS; Prensagem da mistura na forma de pastilha (Figura 22). Para análise utilizou-se o Espectrômetro de raios X, modelo EDX – 720 da marca Rayny (Figura 23).

Figura 22 - Prensagem das pastilhas



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Figura 23 - Espectrômetro de raios X



Fonte: Acervo pessoal (2014)

### 3.5.2. Difração de raios X (DRX)

Os testes foram realizados em uma máquina Bruker D2 Phaser, no Laboratório de Materiais no Centro de Tecnologia, da UFPB (Figuras 24 e 25). Foi utilizado um intervalo de varredura de 5 a 60° (2 $\theta$ ), tamanho do passo 0,0200, radiação de 30 kV e 10 mA, com 97 segundos de tempo de varredura, gerando os difratogramas para as análises com o software. Na preparação das amostras foi utilizado um disco de vidro sobre o qual ficaram os materiais a serem testados e, com auxílio de uma placa de vidro, esses materiais foram prensados manualmente para gerar uma superfície plana.

A análise dos resultados realizou-se através de sistema computacional específico X'Pert High Score Plus, que analisa o pico da incidência de elétrons e compara com um banco de dados para caracterização dos elementos constituintes. Uma vez devidamente instalado e carregado o banco de dados PDF2, o programa fornece informações importantíssimas sobre os componentes, bem como cristalografia da amostra.

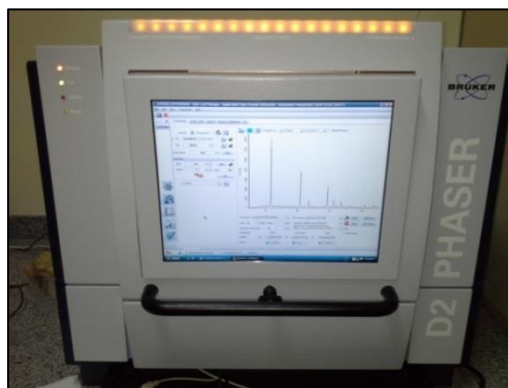
Após a fase de identificação foram gerados relatórios que representam a ocorrência das fases mineralógicas dos padrões difratométricos, no qual cada pico é marcado com uma pequena linha vertical.

Figura 24 - Equipamento aberto



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Figura 25 - Análises do DRX

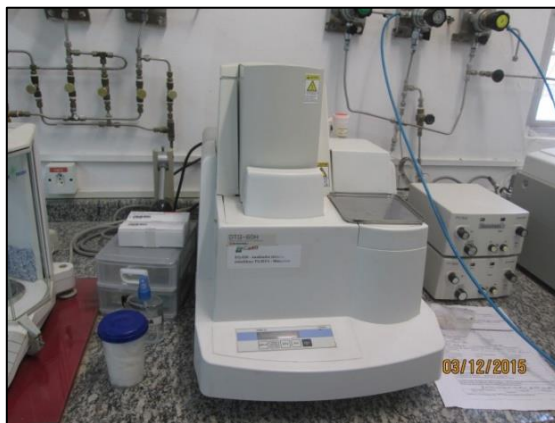


Fonte: Acervo pessoal (2014)

### 3.5.3. Análises térmicas (DTA e TG)

As análises térmicas foram realizadas na UFPB, no Laboratório de Combustíveis (LACOM) do Departamento de Química. Para a avaliação do perfil térmico, foram obtidas as curvas de TG e da DTA, utilizando um analisador térmico simultâneo TG/DTA (Shimadzu), modelo DTG-60H em nitrogênio, utilizando fluxo de  $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$  e aquecimento gradativo de  $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  até  $1.000^\circ\text{C}$ , com aproximadamente 10 mg de cada amostra (Figura 26).

Figura 26 - Analisador térmico



Fonte: Acervo pessoal (2014)

### 3.5.4. Espectrometria de Infravermelho

As amostras previamente preparadas (cerca de 1mg) foram maceradas conjuntamente com brometo de potássio (KBr) seco, material que não interfere na absorção da amostra da radiação do IV. Em seguida esse material foi transferido para um pastilhador e compactado a vácuo (Figura 27), para obtenção de uma pastilha transparente com 13mm de diâmetro, na proporção de 1% da amostra em relação ao KBr. As amostras foram analisadas por transmissão normal na região de infra médio, 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$  e as intensidades das bandas expressas em transmitância.

Este ensaio também foi realizado no LACOM, através de um espectrofotômetro de IV por transformada de Fourier, marca SHIMADZU, modelo IRPrestige-21, conforme mostrado na Figura 28.

Figura 27 - Preparação das amostras



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Figura 28 - Equipamento para o ensaio



Fonte: Acervo pessoal (2014)

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS

#### 4.1. Parâmetros físico-químicos no extrato lixiviado

- *Etapa I*

Nesta etapa, os agregados reciclados (brita 25 AR, brita 12 AR e o agregado miúdo AR) foram os que apresentaram alterações significativas durante os processos de agitação, aquecimento e adição da solução de extração. Tal situação pode ser devido à origem desse material, pois considerou-se que a maior parte é de concreto mas existem outros elementos que podem ter sido introduzidos durante o preparo do reciclado e isso ter influenciado no teste.

Os valores encontrados nas análises de pH, alcalinidade e dureza estão mostrados na Tabela 2. Entretanto, tais parâmetros não apresentam limites em normas para esse tipo de resíduos. Mas para qualidade da água é importante verificar tais parâmetros visando não comprometer os organismos desse recurso natural.

Tabela 2 - Análises químicas com o extrato lixiviado (pH, alcalinidade e dureza)

LIXIVIAÇÃO															
Nº	AMOSTRA	ANÁLISES				ANÁLISES				ANÁLISES			ANÁLISES		
		1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª
		pH Inicial				pH final				ALCALINIDADE			DUREZA		
1	BRITA 19 AN	9,54	9,80	9,61	NR	4,67	5,06	6,28	NR	NR	166,05	56,70	NR	234,00	120,00
2	BRITA 12 AR	8,70	9,71	9,52	9,22	5,00	6,71	7,27	6,54	NR	129,60	85,05	NR	734,00	200,00
3	AREIA AN	6,64	7,44	7,47	6,52	4,51	4,95	4,54	5,18	NR	44,55	121,50	NR	56,00	60,00
4	BRITA 25 AR	10,32	10,12	10,03	NR	4,97	6,51	5,67	NR	NR	105,30	324,00	NR	1.860,00	4.600,00
5	PÓ DE PEDRA AN	7,12	7,39	9,01	NR	4,50	5,28	4,68	NR	NR	64,80	89,10	NR	120,00	50,00
6	AGREG. MÍU. AR	8,92	9,11	9,11	NR	5,13	6,80	5,89	NR	NR	202,50	283,50	NR	136,00	700,00
7	BRITA 12 AN	6,68	7,29	8,32	7,73	4,53	5,11	4,52	5,02	NR	24,30	0,00	NR	50,00	50,00
8	AREIA AR	NR	NR	NR	9,43	NR	NR	NR	6,98	NR	NR	NR	NR	NR	NR

NR – Não Realizado; Alcalinidade (mg/L CaCO<sub>3</sub>); Dureza (mg/L CaCO<sub>3</sub>)

Verificou-se que a maioria do pH inicial dos agregados (naturais e reciclados) foram alcalinos, ou seja, pH > 7, com exceção da areia AN e da brita 12 AN (1ª análise). Esses

resultados assemelham-se ao estudo com agregados provenientes de uma central de beneficiamento, na Itália em que Sani *et al.* (2005), observaram que o pH da solução oscilou entre 10,3 e 11,4, mantendo o meio alcalino durante todo o período de ensaio.

No final do teste (após 18 horas de agitação) os extratos lixiviados dos agregados supracitados apresentaram pH final variando entre 4,51 e 7,27. Dessa forma houve semelhança com trabalhos como Schaefer, Rocha e Cheriaf (2007); Lima e Cabral (2013), onde o pH de algumas amostras foram levemente alcalinos enquanto em outras se apresentaram levemente ácidos. Eles acrescentaram que um dos fatores que pode contribuir para a alcalinidade do extrato lixiviado é o volume de água limitado, pois no meio ambiente as condições diferem das propostas no ensaio, uma vez que o volume de água é ilimitado, induzido a diferentes condições de lixiviação. Na análise de metais pesados, as amostras foram acidificadas, uma vez que ambientes ácidos favorecem a mobilidade de metais pesados, que se tornam mais solúveis.

Ressalta-se que aqueles abaixo de 5,0 não são permitidos pela Resolução CONAMA N° 430/2011, nas condições e padrões de lançamento de efluentes, sendo necessário corrigir esses pH, para evitar alterações dos corpos d'água, caso esses extratos sejam lançados.

Para a Alcalinidade não há limites definidos, a qual geralmente é associada a dureza, que influencia na precipitação de carbonatos. Os resultados da Dureza indicaram que os extratos dos Agregados Reciclados (brita 25 AR; brita 12 AR; e agregado miúdo AR) poderiam ser classificados como “água muito dura”, pois o valor da dureza esteve acima de 300 mg/L. Os extratos dos agregados naturais ( brita 19 AN) como “água dura” e os demais (areia AN, brita 12 AN e pó de pedra AN), água com dureza moderada.

- *Etapa II*

Nesta etapa analisou-se também a condutividade elétrica. Este parâmetro químico, nas águas superficiais é bastante variado, podendo ser baixa, em valores como 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (locais onde a precipitação é pobre em solutos iônicos e a litologia local é formada por rochas resistentes ao intemperismo), até valores de 50.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (condutividade da água do mar). Como não existe limite definido em norma, pode-se por comparação verificar que o extrato lixiviado das quatro amostras selecionadas possuem compostos que conferem alta condutividade em relação à água doce (Tabela 3).

Tabela 3 - Condutividade no extrato lixiviado dos agregados estudados

Amostra	Condutividade (Lixiviação) - $\mu\text{s/cm}$
Areia AN	1.623
Areia AR	1.850
Brita 12 AN	1.676
Brita 12 AR	1.641

De acordo com Mota (2006), as quatro amostras (areia AN e AR e brita 12 AN e AR) apresentaram valores que podem indicar alto risco de salinidade, pois a condutividade medida ficou entre 250 e 2.250  $\mu\text{s/cm}$ .

Também foram realizados ensaios para determinar a presença de cloreto, sulfato, ferro e alumínio nos extratos lixiviados em ambas as etapas estudadas (I e II). Ressalta-se que para melhor comparação, selecionou apenas as 4 amostras na etapa II (areia AN e AR e brita 12 AN e AR) as quais também foram analisadas na Etapa I, exceto a areia reciclada que só foi incluída na Etapa II (4ª análise).

A CETESB possui a Resolução N° 152/2007 que dispõe sobre as condições e padrões permitidos no extrato lixiviado, que define como concentração máxima de poluente no lixiviado neutro para cloretos e sulfatos é 2.500 mg/L e ferro 15,0 mg/L.

Ao analisar os resultados de cloretos e sulfatos obtidos nos extratos lixiviados da Etapa II (4ª análise) observou-se que as quatro amostras (areia AN e AR e brita 12 AN e AR) atendem aos padrões estabelecidos na Resolução da CETESB (2007), (Figuras 29 e 30).

Figura 29 - Análise de cloreto no extrato lixiviado

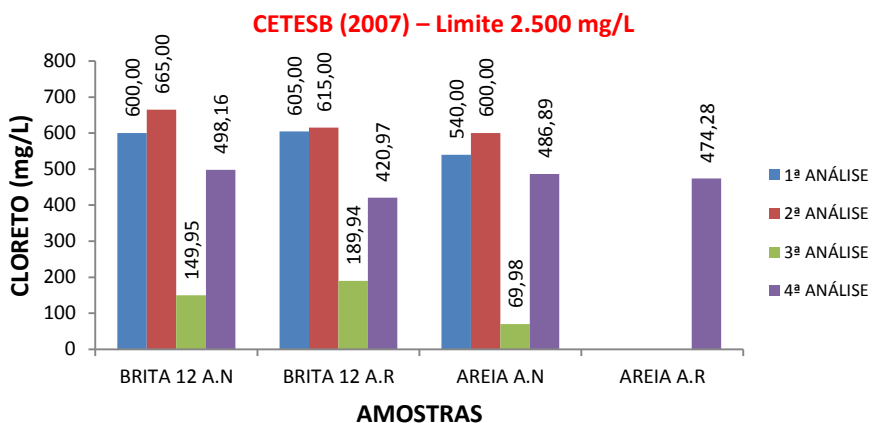
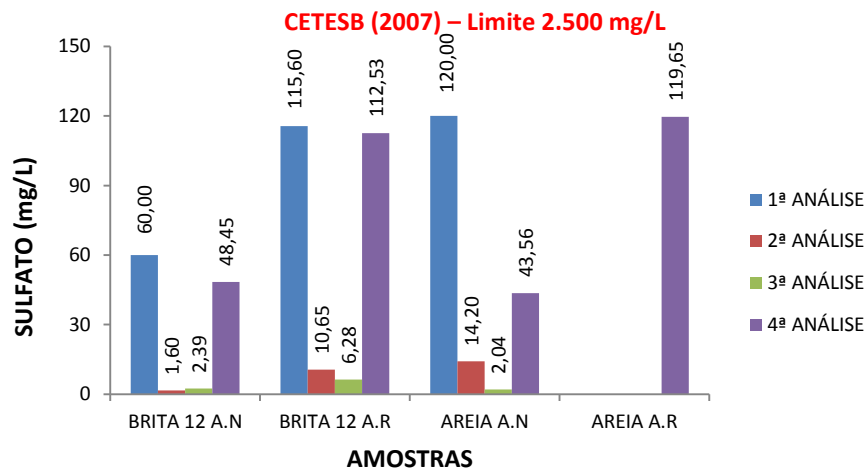


Figura 30 - Análise de sulfato no extrato lixiviado



Para o ferro, observa-se na Figura 31, que os AR atenderam aos padrões estabelecidos na referida Resolução. Para o elemento, alumínio, não foi encontrada norma que determine concentrações permitidas no extrato lixiviado, sendo definido apenas para o extrato solubilizado. Por isso, utilizou-se como parâmetro o estudo de Rodrigues (2005) que investigou alumínio e ferro do extrato lixiviado de resíduos industriais. A autora obteve um valor máximo entre suas amostras de 0,40 mg/L para o alumínio e de 0,06 – 0,28 mg/L para o ferro, indicando que este parâmetro varia de acordo com a origem dos resíduos. Verificou-se que o alumínio (Figura 32) também resultou valores inferiores comparados com o de Rodrigues (2005).

Figura 31 - Análise de ferro no extrato de lixiviado

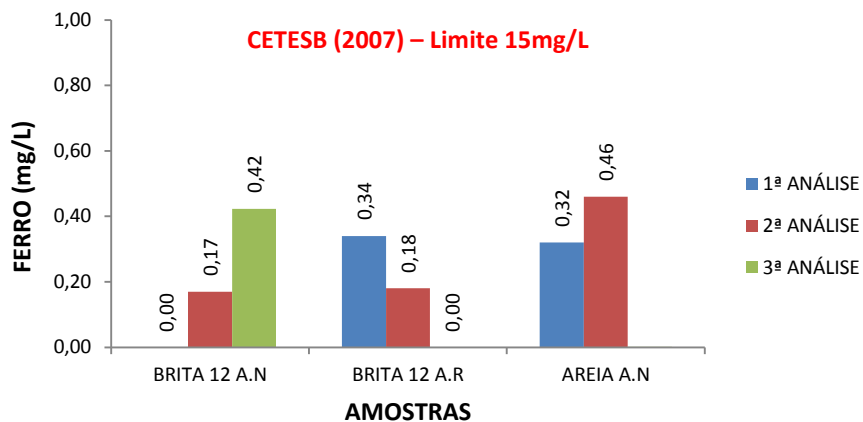
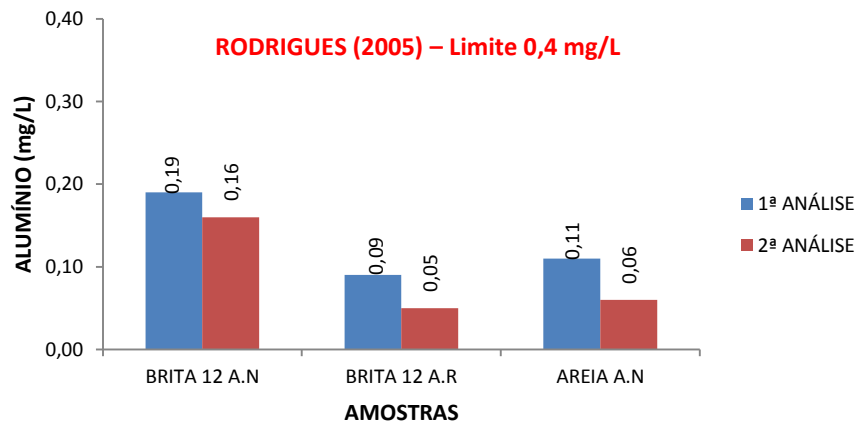




Figura 32 - Análise de alumínio no extrato de lixiviado



Verificou-se que todas as amostras estudadas resultaram valores inferiores às concentrações das referências consultadas, porém é necessária uma investigação mais detalhada para verificar se outros compostos presentes nesse extrato são capazes de contaminar o meio ambiente. Outros trabalhos corroboram com os nossos resultados, onde Cassa *et al.* (2001), após avaliação de toxicidade em AR gráudo e miúdo, constataram que os produzidos na cidade de Salvador/BA também foram mensurados como não tóxicos. Ramos (2007), na cidade de Vitória/ES, concluiu que em 100% das amostras foram classificadas como não tóxicos, de acordo com a NBR 10004; e Lima e Cabral (2013) ao analisar RCC da cidade de Fortaleza/CE, também observou que nenhum parâmetro ultrapassou os limites nas análises do extrato lixiviado.

Sani *et al.* (2005) em seu estudo, verificaram que ocorreu grande liberação de cálcio durante o período do ensaio de lixiviação no concreto produzido com agregados naturais devido à alta concentração de portlandita, responsável pela solubilidade do cálcio (Ca). Os autores comentam que a lixiviabilidade de íons é influenciada por efeitos físicos e químicos e uma maior reatividade química dos agregados reciclados justifica uma taxa mais baixa de liberação do cálcio.

#### 4.2. Parâmetros físico-químicos no extrato solubilizado

- *Etapa I (pH, alcalinidade e dureza)*

Nos extratos solubilizados dos agregados (naturais e reciclados), verificou-se que a maioria dos mesmos apresentaram pH final alcalino ou bem próximo da neutralidade (pH=7),

havendo uma variação entre de 6,70 à 9,58 após o período de repouso do teste conforme NBR N° 10006/2004 (7 dias). Entre os agregados, a brita 25 AR apresentou o pH mais elevado em relação aos demais resíduos. Ressalta-se que a Resolução CONAMA N° 430/2011 define que o pH para lançamento de efluentes deverá ser entre 5,0 à 9,0, logo alguns extratos necessitariam de correção antes do seu lançamento nos corpos hídricos (Tabela 4).

Tabela 4 - Análises químicas com o extrato solubilizado

SOLUBILIZAÇÃO								
Nº	AMOSTRA	ANÁLISES			ANÁLISES		ANÁLISES	
		2ª	3ª	4ª	2ª	3ª	2ª	3ª
		pH final			ALCALINIDADE		DUREZA	
1	BRITA 19 AN	8,43	8,87	-	60,75	97,20	44,00	72,00
2	BRITA 12 AR	8,73	9,24	8,20	28,35	44,55	92,00	188,00
3	AREIA AN	7,96	8,46	7,97	24,30	44,55	18,00	28,00
4	BRITA 25 AR	9,58	9,52	-	56,70	44,55	172,00	172,00
5	PÓ DE PEDRA AN	8,21	8,18	-	20,25	52,65	20,00	24,00
6	AGREG. MÍU. AR	7,81	6,99	-	36,45	44,55	200,00	380,00
7	BRITA 12 AN	7,85	6,70	8,27	20,25	12,15	22,00	32,00
8	AREIA AR	-	-	8,18	-	-	-	-

Em relação às duas análises de alcalinidade que foram realizadas, observou-se que a brita 19 AN e a brita 25 AR apresentaram os maiores valores. Em termos de dureza, os agregados reciclados (brita 12 AR, brita 25 AR e o agregado miúdo AR) apresentaram os maiores valores nas duas análises realizadas quando tais resíduos foram comparados com os outros resíduos investigados. Quanto a classificação da dureza, o extrato do agregado miúdo AR seria “muito duro” (> 300 mg/L), a brita 25 AR e brita 12 AR, extratos classificados como “duro” (entre 150 e 300 mg/L), e os outros agregados como “dureza moderada ou mole”, pois ficaram na faixa de <50 até 150 mg/L (Tabela 4). Como nos agregados reciclados estão presentes o cálcio e provavelmente o magnésio, por conta do cimento e argamassa aderida, tais compostos podem justificar os valores elevados nos resultados da dureza.

- *Etapa II (condutividade)*

Nesta etapa analisou-se o pH final das 4 amostras selecionadas (4ª análise – Tabela 4) e a Condutividade (Tabela 5) dos extratos CT-ATM e ST-ATM.

Tabela 5 - Condutividade dos extratos solubilizados dos agregados naturais e reciclados

Amostra	Condutividade (Solubilização) - $\mu\text{s/cm}$	
	ST-ATM	CT-ATM
Brita 12 AR	243,00	404,00
Brita 12 AN	33,80	40,45
Areia AR	236,00	230,00
Areia AN	33,00	30,75

Também não há limite definido em norma para este parâmetro em extratos do teste de solubilização. Por comparação com Mota (2006), verificou-se que a brita 12 NA e as areias AN e AR apresentaram baixa condutividade, ou seja, baixo risco de salinidade à água doce, pois foram abaixo de 250  $\mu\text{s/cm}$ , com exceção da brita 12 AR CT-ATM, que foi acima desse valor, indicando um risco médio de salinidade.

- *Etapa I e II (cloreto, nitrato, sulfato, ferro e alumínio)*

As amostras do extrato da solubilização (Tabela 6) foram comparadas com a NBR N° 10004/2004, que determina o limite máximo de cloretos de 250,0 mg/L. Observou-se na Etapa I, que todas as amostras ficaram bem abaixo do limite da norma supracitada.

Em relação ao nitrato todos os valores encontrados, independente da Etapa (I e II) estiveram dentro dos padrões definidos na NBR N° 10004/2004 (10 mg/L).

Para o sulfato o limite é de 250 mg/L. Verificou-se durante as análises da Etapa I que as amostras (brita 12 AR), (agregado miúdo AR) e (brita 12 AN) apresentaram valores acima dos padrões exigidos pela referida norma (1ª análise). Na 2ª análise observou-se que a (brita 25 AR), foi à única que apresentou valor acima dos padrões exigidos pela mesma norma. Como o material estudado é bastante heterogêneo, estudou-se a composição química e mineralógica dos agregados em questão, para verificar uma provável contaminação. Asakura *et al.* (2010) verificaram que nos RCC mistos no Japão teve concentração alta de sulfato (1.100 mg/L) e atribuíram este valor à presença de gesso nos RCC.

Tabela 6 - Análises de cloretos, nitrato, sulfato, ferro e alumínio dos extratos solubilizados

SOLUBILIZAÇÃO																					
Nº	AMOSTRA	ANÁLISES				ANÁLISES				ANÁLISES				ANÁLISES				ANÁLISES			
		1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª
		CLORETO				NITRATO				SULFATO				FERRO				ALUMÍNIO			
1	BRITA 19 AN	9,00	19,99	2,00	-	0,39	0,00	0,00	-	15,54	4,78	3,90	-	0,00	0,00	0,03	-	0,18	0,18	-	-
2	BRITA 12 AR	9,50	10,00	14,00	30,89	2,75	1,59	2,51	5,39	346,00	85,73	46,86	157,97	Alta Abs.	0,60	0,04	0,05	0,23	0,08	-	0,08
3	AREIA AN	7,00	19,99	4,00	1,00	0,64	0,56	0,46	0,20	115,60	28,95	24,78	1,00	0,11	0,07	0,01	0,05	0,05	0,03	-	0,07
4	BRITA 25 AR	8,00	19,99	2,00	-	1,85	2,04	2,36	-	226,40	298,35	34,05	-	0,00	0,00	0,01	-	0,17	0,59	-	-
5	PÓ DE PEDRA AN	20,00	19,99	2,00	-	0,16	0,68	0,33	-	35,48	15,58	6,02	-	0,24	0,80	0,02	-	0,14	0,08	-	-
6	AGREG. MÍU. AR	7,00	19,99	33,99	-	2,87	3,29	3,59	-	984,00	76,20	208,94	-	0,00	0,12	0,01	-	0,12	0,07	-	-
7	BRITA 12 AN	3,00	19,99	25,99	1,00	0,18	0,29	0,15	0,20	953,00	4,46	6,02	1,49	0,06	0,00	0,02	0,13	0,17	0,06	-	0,39
8	AREIA AR	-	-	-	24,78	-	-	-	5,25	-	-	-	166,67	-	-	-	0,05	-	-	-	0,12

Em relação aos valores máximos de ferro permitido no extrato solubilizado o limite é de 0,3 mg/L, segundo a NBR N° 10004/2004 e para o alumínio, o valor máximo permitido é de 0,2 mg/L. Observou-se que na 2ª análise, o valor de ferro, para a (brita 12 AR) e o (pó de pedra AN) ultrapassaram o valor de referência da referida norma. Para o alumínio os limites foram ultrapassados na 1ª análise (brita 12 AR), na 2ª (brita 25 AR) e na 4ª análise (brita 12 AN).

Na Etapa II, verificou-se que a (brita 12 AR), na 2ª análise, ultrapassou o valor padrão para o ferro, e quanto ao alumínio, a (brita 12 AN) ultrapassou o valor padrão (4ª análise) e a (brita 12 AR) na 1ª análise, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Comparação dos valores e limites máximos para os extratos solubilizados dos agregados

ENSAIO	PARÂMETRO	UNIDADE	LIMITE MÁXIMO PERMITIDO	VALORES E AGREGADOS QUE ULTRAPASSARAM
Solubilização	Sulfato	mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Al/ L	250,00	346,00 - Brita 12 AR
				298,35 - Brita 25 AR
				984,00 - Ag. Miúdo AR
				953,00 - Brita 12 AN
	Ferro	mg Fe/L	0,30	0,60 - Brita 12 AR
				0,80 - Pó de pedra AN
	Alumínio	mg Al/ L	0,20	0,23 - Brita 12 AR
				0,59 - Brita 25 AR
				0,39 - Brita 12 AN

Portanto, por não atendimento aos limites máximos da legislação, a classificação dos agregados mencionados acima, mudam de Classe II B – Inertes, para Classe II A, isto é, resíduo não perigoso e não inerte. Essa mudança de classificação também ocorreu em outros trabalhos, como Oliveira (2002), em Rio Claro/SP; Ramos (2007), na cidade de Vitória/ES; Silva e Arnosti Jr. (2007), na cidade de Piracicaba/SP; e Lima e Cabral (2013) que caracterizou os RCC de Fortaleza/CE e os resultados de parâmetros como alumínio, cádmio, chumbo, cromo e sulfato em algumas amostras analisadas, estiveram acima do limite permitido pela NBR 10004/2004.

Vale destacar que em estudos como Cassa *et al.* (2001); Grubba e Parreira (2009); e Lima e Cabral (2013), através de ensaios de lixiviação e solubilização, encontraram concentrações de alumínio acima dos limites recomendados pela ABNT: NBR 10004/2004. Eles associaram esses resultados ao óxido de alumínio presente em cimentos *Portland*. Altas quantidades de alumínio podem contaminar a água, oferecendo riscos à saúde humana, porém afirmaram, que este fato não inviabilizaria o uso dos agregados reciclados em pavimentação, tendo em vista que muitos materiais empregados na construção de camadas de pavimentos são considerados não inertes, a exemplo de cimento, cal, emulsão asfáltica, e, até mesmo alguns solos tropicais.

#### 4.3. Análises dos metais pesados nos extratos lixiviado e solubilizado

Os metais pesados investigados nas duas Etapas (I e II) foram comparados com os anexos F e G da NBR N° 10004/2004. Na Etapa I (2013), os valores obtidos estiveram abaixo dessa referência (Tabela 8). Na Etapa II, todos os agregados estudados obtiveram concentração de metais pesados inferiores as referências, exceto o cádmio no extrato solubilizado, tendo como limite 0,005 mg/L, e resultando 0,01 mg/L, para a brita 12 AR (Tabela 9), mudando sua classificação para Classe II A. O cádmio é mais utilizado na fabricação de baterias de níquel-cádmio encontradas em telefones celulares e equipamentos sem fio. Entretanto, também é empregado no revestimento de metal, algumas tintas e plásticos, materiais presentes em RCC, o que justificaria a sua alta concentração nas amostras dos RCC estudados, assim como observado no estudo de Lima e Cabral (2013), onde quatro amostras de extrato solubilizado apresentaram presença de cádmio acima do limite permitido.

Tabela 8 - Resultados das análises dos metais pesados - Etapa I (2013)

METAIS PESADOS	REFERÊNCIAS		ITEP - ABRIL DE 2013					
	NORMAS		LIXIVIAÇÃO			SOLUBILIZAÇÃO		
	NBR N° 10004 LIXIVIAÇÃO	NBR N° 10004 SOLUBILIZAÇÃO	1 - AG. MIUDO	2 - BRITA 12	3 - BRITA 25	4 - AG. MIUDO	5 - BRITA 12	6 - BRITA 25
ARSÊNIO - As	1,0 mg/L	0,01 mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
CÁDMIO - Cd	0,5 mg/L	0,005 mg/L	0,003	< 0,003	0,004	< 0,003	< 0,003	< 0,003
CHUMBO - Pb	1,0 mg/L	0,01 mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
COBRE - Cu	-	2,0 mg/L	-	-	-	< 0,05	< 0,05	< 0,05
CROMO - Cr	5,0 mg/L	0,05 mg/L	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,05
FERRO - Fe	-	0,3 mg/L	-	-	-	< 0,05	< 0,05	< 0,05
SELÊNIO - Se	1,0 mg/L	0,01 mg/L	-	-	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ZINCO - Zn	-	5,0 mg/L	-	-	-	< 0,05	< 0,05	< 0,05

Schaefer, Rocha e Cheriaf (2007) obtiveram resultados semelhantes quando analisaram extratos lixiviados de argamassa produzida com AR provenientes de RCC e verificaram que metais pesados como arsênio, cádmio, cromo e selênio são lixiviados das argamassas produzidas, entretanto, nenhum parâmetro ultrapassou os limites recomendados pela NBR 10004/2004. Portanto, uma possibilidade é que tenha ocorrido contaminação no processo de reciclagem, já que a separação dos RCC foi realizada manualmente, havendo possibilidade de sobras de outros materiais como plástico, madeira, tinta, entulho de edificações industriais, etc, participarem do processo de moagem e, conseqüentemente contaminando os AR. No estudo de Barros (2005), o valor de alumínio no ensaio da solubilização para o agregado reciclado miúdo dos RCC também foi classificado como resíduo classe II A (resíduo não-inerte), podendo estar relacionado a permanência de algumas impurezas de materiais no beneficiamento.

Destaca-se que o cádmio está presente em águas doces em concentrações traço, geralmente inferiores a 1 mg/L. Ele pode ser liberado para o ambiente através da queima de combustíveis fósseis; ou na produção de pigmentos, baterias, soldas, equipamentos eletrônicos, lubrificantes, acessórios fotográficos, praguicidas etc. Pode causar disfunção renal, hipertensão, arteriosclerose, doenças crônicas em idosos e câncer. Possui uma grande mobilidade em ambientes aquáticos e é bio-acumulativo (BACCAN, 2004).

Tabela 9 - Resultados das análises dos metais pesados - Etapa II (2014)

METAIS PESADOS	REFERÊNCIAS		ITEP - MAIO DE 2014							
	NORMAS		LIXIVIAÇÃO				SOLUBILIZAÇÃO			
	NBR N° 10004 LIXIVIAÇÃO	NBR N° 10004 SOLUBILIZAÇÃO	AREIA AN	AREIA AR	BRITA 12 AN	BRITA 12 AR	AREIA AN	AREIA AR	BRITA 12 AN	BRITA 12 AR
ARSÊNIO – As	1,0 mg/L	0,01 mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
CÁDMIO – Cd	0,5 mg/L	0,005 mg/L	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	0,003	<b>&lt; 0,01</b>
CHUMBO – Pb	1,0 mg/L	0,01 mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
COBRE – Cu	-	2,0 mg/L	-	-	-	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
CROMO – Cr	5,0 mg/L	0,05 mg/L	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,04
FERRO – Fe	-	0,3 mg/L	-	-	-	-	<0,05	<0,05	0,13	<0,05
NÍQUEL – Ni	-	-	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
SELÊNIO – Se	1,0 mg/L	0,01 mg/L	-	-	-	-	<0,001	<0,01	<0,01	<0,01

As frações consideradas não degradáveis biologicamente são responsáveis por quantidades consideráveis de metais pesados, a exemplo dos plásticos, que são a principal fonte de Cd, e ligas metálicas que concentram quantidades importantes de Pb, Cu, Cr e Ni, dentre outros. Sendo possível, o aumento da concentração de metais-traço na fração biodegradável durante a decomposição dos resíduos, através dos processos de lixiviação e/ou solubilização (ALCÂNTARA, 2007).

Ressalta-se que no estudo de Bianchini *et al.*(2005), os autores comentam que metais como Ni, Co, Cr, V, Zn e Pb (elementos traços) apresentam concentrações maiores nas frações mais finas, pois permanecem presos por minerais argilosos que são mais abundantes nas frações inferiores a 0,075mm. Esses elementos perigosos não estão associados com fases meta-estáveis, mas dentro de frações argilosas, sugerindo que não sejam facilmente lixiviados.

#### 4.4. Estudo da influência do pH na solubilização com e sem troca atmosférica

Na solubilização, o tempo de repouso das amostras em água destilada foram de 7 dias, conforme NBR 10006/2004. Dessa forma, realizou-se os testes durante os 7 dias, com as duas condições ambientais: com troca atmosférica (CT-ATM) e sem troca atmosférica (ST-ATM).

Na Etapa I verificou-se que nas sete amostras analisadas houve o decréscimo de pH, (Figuras de 33 a 39), havendo uma tendência a estabilizar acima de 7 (sete), ou seja, pH básico. Além disso, notou-se que nas medições realizadas em amostras armazenadas sem contato com a atmosfera (ST-ATM) o valor do pH foi maior, apresentando menor taxa de decaimento.

Shaefer (2007) também observou que os valores de pH obtidos no ensaio também foram alcalinos, assim como no nosso estudo. Na maioria das amostras do trabalho de autor supracitado ocorreu uma queda no valor de pH em função do avanço do período de ensaio, associando essa queda à exaustão do  $\text{Ca(OH)}_2$  das argamassas. Esse decréscimo no pH foi também observado por Van Gerven *et al.* (2004), visto que, argamassas consistem em grande parte por material silicoso, desta forma o conteúdo de  $\text{Ca(OH)}_2$  é baixo, ocorrendo rapidamente a exaustão dos componentes alcalinos lixiviáveis.

Dessa forma, a utilização dos agregados estudados em subcamada da pavimentação, por exemplo, seria viável considerando que possíveis compostos não seriam liberados, já que o pH alcalino não favorece sua solubilização, ou seja, sua dissolução ou liberação em contato com a água.

Figura 33 - Comportamento do pH da brita 19 AN, na solubilização ST-ATM e CT-ATM

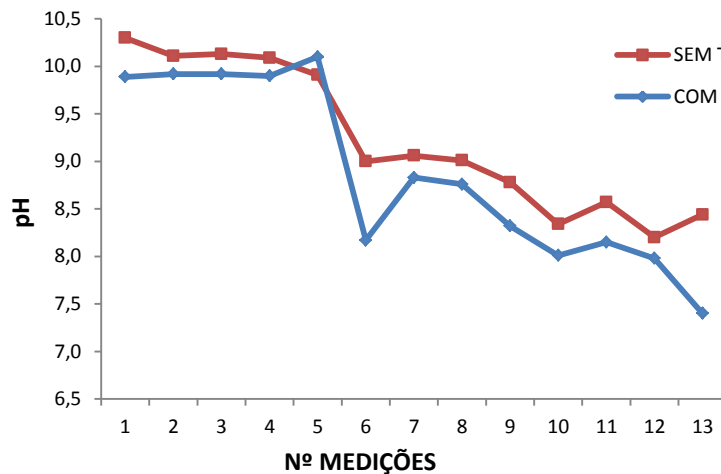




Figura 34 - Comportamento do pH da brita 12 AR, na solubilização ST-ATM e CT-ATM

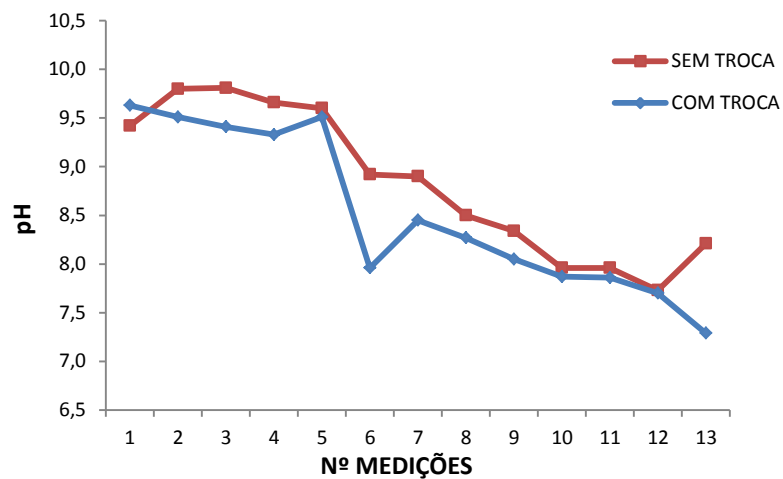


Figura 35 - Comportamento do pH da areia AN, na solubilização ST-ATM e CT-ATM

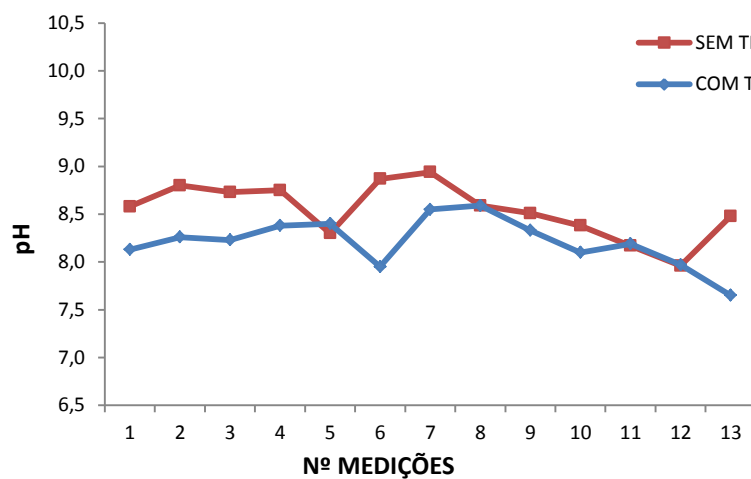


Figura 36 - Comportamento do pH da brita 25 AR, na solubilização ST-ATM e CT-ATM

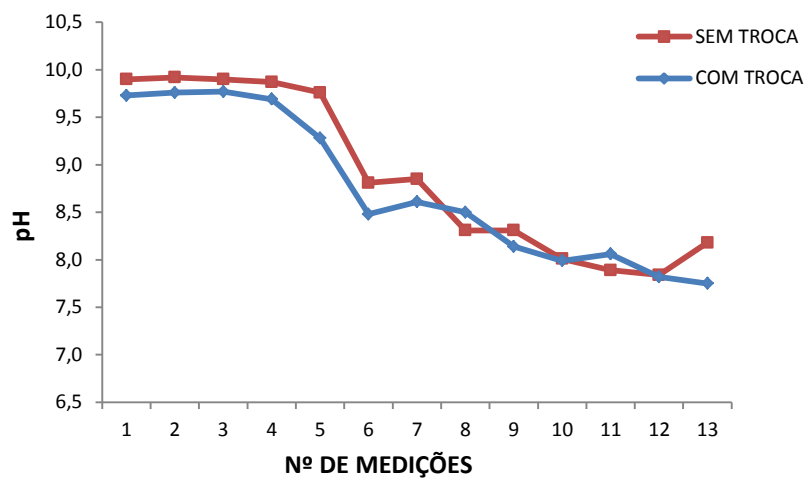


Figura 37 - Comportamento do pH do pó de pedra AN, na solubilização ST-ATM e CT-ATM

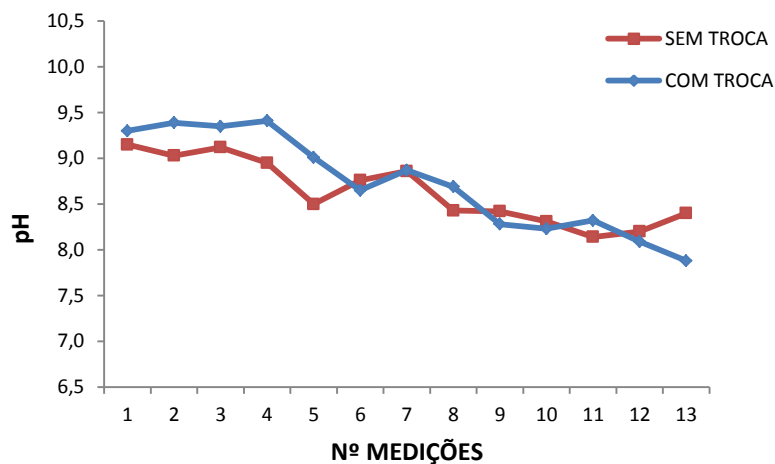


Figura 38 - Comportamento do pH do agregado miúdo AR, na solubilização ST-ATM e CT-ATM

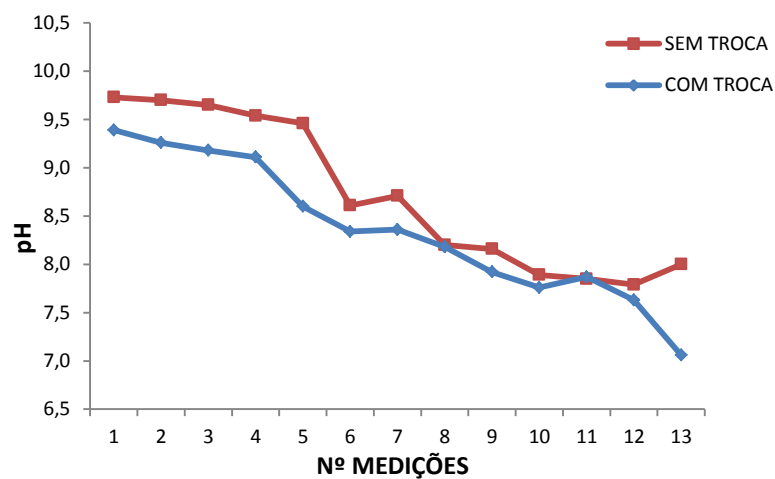
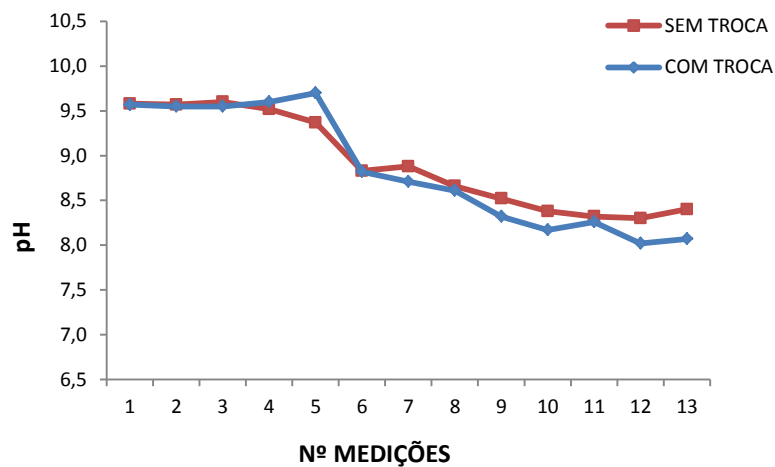
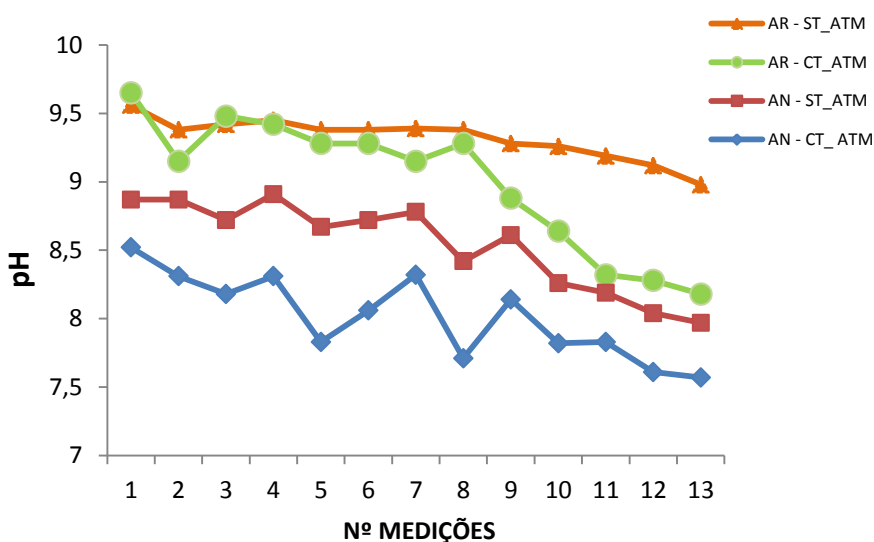


Figura 39 - Comportamento do pH da brita 12 AN, na solubilização ST-ATM e CT-ATM



Na Etapa II, também houve o decaimento do pH, durante os sete dias para as quatro amostras. Observou-se que o pH inicial das amostras de agregados reciclados, foram maiores (acima de 9,5), em relação aos agregados naturais, isso é explicado devido à presença de argamassa aderida nos agregados reciclados, onde o pH inicial é de aproximadamente 12,5 e carbonata em torno de 9,0. As areias AN e AR (Figura 42) apresentaram à tendência de estabilização acima de 7 (sete), ou seja, pH alcalino. Logo, o pH das areias semelhantes indica que não haveria problema na substituição da areia (AN) pela areia reciclada (AR) já que os compostos químicos normalmente não solubilizam em pH alcalino.

Figura 40 - Comportamento do pH das areias (AN e AR) na solubilização ST-ATM e CT-ATM



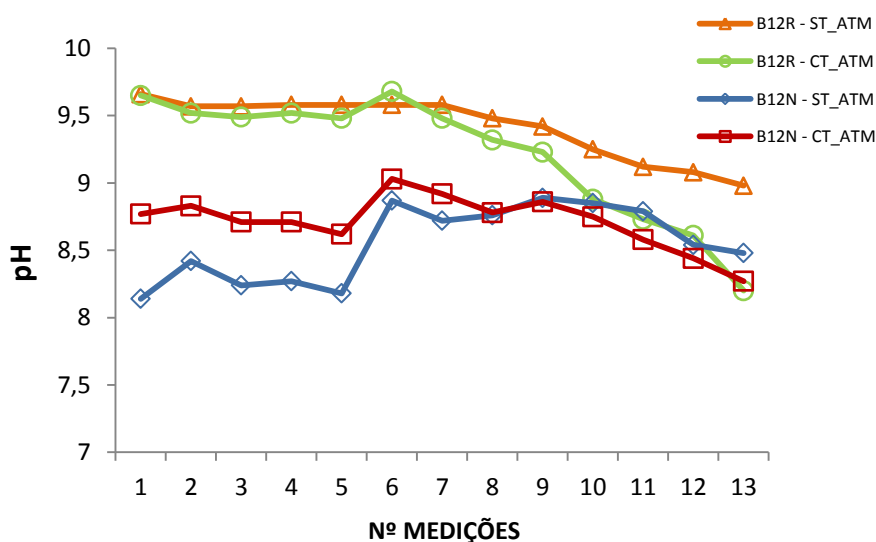
Para Engelsen *et al.* (2012), o pH do material diminuirá gradualmente devido à carbonatação, o que pode levar a uma alteração na concentração de substâncias liberadas. A lixiviação e/ou solubilização de substâncias orgânicas e inorgânicas em materiais de pavimentação de concreto e asfalto foi avaliada em experimentos de laboratório (Kayhanian *et al.*, 2009, 2010), onde verificou-se que apenas cromo e vanádio foram liberados a partir do pavimento, que continha ligante de cimento *Portland*.

O pH da solução de lixiviação contribuiu para a baixa lixiviabilidade do metal pesado. Embora o pH inicial tenha sido de 4,2, após as 18 horas de rotação o valor do pH esteve entre 6,4 e 10,4, deixando os metais menos solúveis. Inúmeros componentes dos finos provenientes dos

resíduos da construção e demolição poderiam ter contribuído para a alcalinidade da amostra, os mais notáveis são o cimento não reagido e o pó de cimento (TOWNSEND *et al.*, 2004).

As britas 12 AN e 12 AR (Figura 43) apresentaram bastante semelhança com a duas areias anteriormente mostradas, com possível tendência a estabilizar em pH acima de 7 (sete), encontrando equilíbrio entre 7,5 e 9,0, com leve caimento. O pH inicial das amostras recicladas foram acima de 9,5 e o pH inicial das amostras naturais entre 8 e 9, conforme à presença da argamassa aderida nos agregados reciclados.

Figura 41 - Comportamento do pH das britas 12 (AN e AR) na solubilização ST-ATM e CT-ATM



Elevados índices de solubilização são considerados normais na fase inicial de decomposição de resíduos, quando o pH ainda é ácido, pois segundo Monteiro (2003) durante essa fase, metais presentes nos resíduos tendem a se solubilizar quando são liberados da fração sólida aumentando, assim, a sua concentração e conferindo mais perigo ao meio, em função da lixiviação dos microrganismos e da acidez. Somente com o aumento do pH, a concentração de metais tende a diminuir devido à precipitação que ocorre no meio por causa do tamponamento e da formação de hidróxidos, tornando os metais menos solúveis e menos perigosos.

De acordo com os estudos citados anteriormente, percebeu-se que os resultados foram favoráveis, pois o pH final após 7 dias foi alcalino, com provável estabilização acima de 7,5, onde com esse pH a tendência dos metais é permanecer estável, minimizando os riscos ao meio ambiente e as pessoas.

#### 4.5. Análise química (FRX)

Na análise da FRX, obteve-se resultados semi-quantitativos em porcentagem dos compostos químicos e composições químicas e o teor de óxidos encontrados nas amostras estudadas na Etapa II, areia AN e AR (Tabela 10) e brita 12 AN e AR (Tabela 11).

Observou-se que a maior quantidade encontrada foi de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), que provavelmente se deva às características da rocha de origem, sendo que a areia AN foi quase em sua totalidade (94,700%). No estudo de Paiva (2013) sobre areia, o  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  representaram mais de 90% da amostra de areia, havendo similaridade com o nosso resultado.

Para a areia AR seus constituintes majoritários foram o quartzo (46,592%), óxido de cálcio (30,514%), seguido dos óxidos de alumínio, ferro e magnésio, provavelmente devido à presença de argamassa aderida e concreto (Tabela 10). Esses constituintes majoritários também foram identificados por Angulo (2005) e Schaefer (2007) em estudo com AR de RCC.

Tabela 10 - Comparação da composição química da areia natural (AN) e reciclada (AR)

ÓXIDOS	AREIA AN	AREIA AR
$\text{SiO}_2$ - Dióxido de silício	<b>94,700%</b>	<b>46,592%</b>
$\text{Al}_2\text{O}_3$ - Óxido de alumínio	<b>2,268%</b>	11,736%
$\text{CaO}$ - Óxido de cálcio	0,877%	<b>30,514%</b>
$\text{MgO}$ - Óxido de magnésio	0,711%	2,226%
$\text{SO}_3$ - Trióxido de enxofre	0,395%	1,676%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ - Óxido de ferro III	0,367%	4,370%
$\text{TiO}_2$ - Dióxido de titânio	0,360%	0,900%
$\text{ZrO}_2$ - Dióxido de zircônio	0,172%	0,086%
$\text{K}_2\text{O}$ - Óxido de potássio	0,079%	1,715%
$\text{Cs}_2\text{O}$ - Óxido de cério	0,072%	-
C - Carbono	0,000%	0,000%
$\text{CuO}$ - Óxido de cobre	-	0,084%
$\text{MnO}$ - Óxido de manganês	-	0,046%
$\text{SrO}$ - Óxido de estrôncio	-	0,043%
$\text{Rb}_2\text{O}$ - Óxido de rubídio	-	0,013%

Na Tabela 11 tem-se a comparação das britas 12 (AN e AR), mostrando que a maior quantidade foi de quartzo para a brita 12 AN (65,134%), seguido dos óxidos de alumínio, potássio, sódio e ferro. Para a brita 12 AR a maior incidência foi de óxido de cálcio (40,214%), seguido do quartzo (40,063%) e depois os óxidos de alumínio, ferro e magnésio. Como comentado anteriormente, compostos químicos comuns em agregados reciclados de RCC são ricos em concretos e argamassas.

Em outros estudos (Bianchini *et al.*, 2005; Ângulo, 2005; Limbachiya *et al.*, 2007; Toledo *et al.*, 2007) também foram encontrados nos agregados reciclados o  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$ . Os autores também investigaram o agregado gráúdo natural, comprovando a predominância de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). Eles destacaram que a origem das espécies químicas  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dos agregados de RCC reciclados está associada aos diversos tipos de silicatos, provenientes das partículas de pasta de cimento endurecida e de agregados naturais, rochas naturais, cerâmica vermelha, etc. Percebeu-se percentuais semelhantes na composição dos AN e AR com os estudos citados anteriormente, principalmente nos compostos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{MgO}$ ).

Tabela 11 - Comparação da composição química da brita 12 AN e brita 12 AR

ÓXIDOS	BRITA 12 AN	BRITA12 AR
$\text{SiO}_2$ - Dióxido de silício	<b>65,134%</b>	<b>40,063%</b>
$\text{Al}_2\text{O}_3$ - Óxido de alumínio	<b>16,595%</b>	<b>9,266%</b>
$\text{K}_2\text{O}$ - Óxido de potássio	5,888%	2,029%
$\text{Na}_2\text{O}$ - Óxido de sódio	3,599%	-
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ - Óxido de ferro III	3,524%	<b>3,700%</b>
$\text{CaO}$ - Óxido de cálcio	2,451%	<b>40,214%</b>
$\text{MgO}$ - Óxido de magnésio	1,181%	<b>2,509%</b>
$\text{BaO}$ - Óxido de bário	0,530%	-
$\text{P}_2\text{O}_5$ - Pentóxido de fósforo	0,395%	-
$\text{TiO}_2$ - Dióxido de titânio	0,242%	0,593%
$\text{SO}_3$ - Trióxido de enxofre	0,225%	1,520%
$\text{SrO}$ - Óxido de estrôncio	0,121%	0,050%
$\text{MnO}$ - Óxido de manganês	0,090%	0,040%
$\text{Rb}_2\text{O}$ - Óxido de rubídio	0,011%	0,015%
$\text{ZnO}$ - Óxido de zinco	0,009%	-
$\text{Y}_2\text{O}_3$ - Óxido de ítrio	0,004%	-
C - Carbono	0,000%	0,000%

Outro ponto observado foi à ausência de matéria orgânica, comprovada com 0% de Carbono. Essas composições químicas foram comparadas nas outras análises realizadas, para confirmar essas predominâncias e avaliar sua periculosidade ao meio ambiente.

#### 4.6. Análise mineralógica (DRX)

Na análise de DRX foram identificados os principais constituintes mineralógicos dos 4 agregados estudados. A Figura 42 descreve o difratograma da areia AN e na Tabela 12 as respectivas cartas encontradas para este agregado.

Figura 42 - Difratograma da areia AN

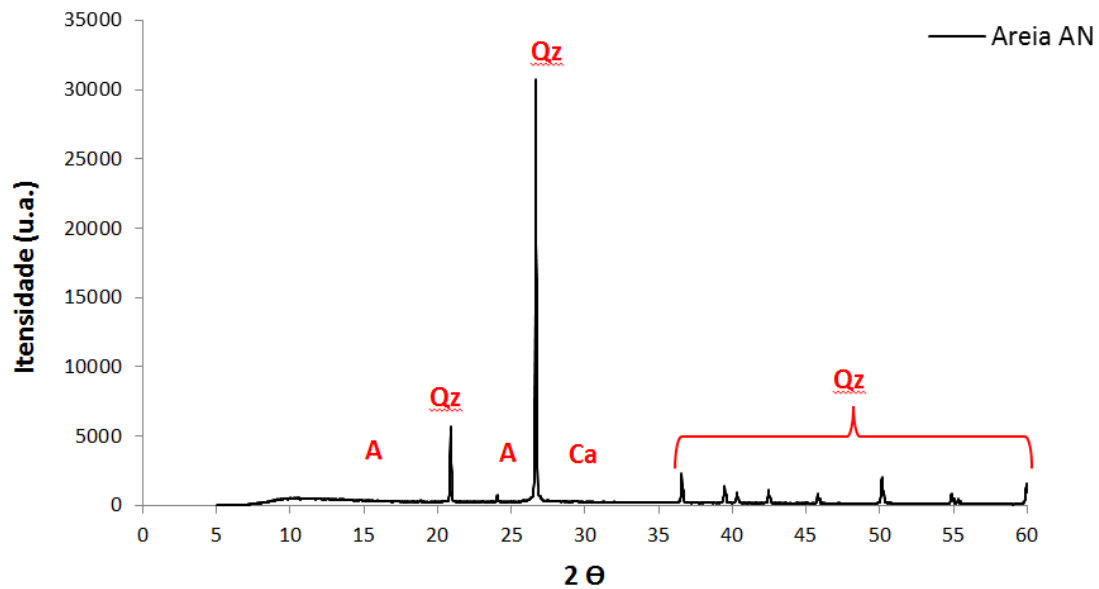


Tabela 12 - Legenda da Figura 42 (areia AN)

REF.	MINERAIS OU FASES	FÓRMULA QUÍMICA	CARTAS (CÓDIGO DE REFERÊNCIA)
Qz	Quartzo	SiO <sub>2</sub>	01-085-0930
Ca	Calcita	CaCO <sub>3</sub>	00-001-0837
A	Albita	(Na,Ca) (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	00-009-0456

Outros estudos com análise mineralógica da areia se assemelham com os resultados obtidos, como exemplo, Reis (2004) que identificou os minerais: quartzo e calcita, no DRX da areia de calcário; quartzo e feldspato, na areia lavada; e quartzo, feldspato, mica, piroxênio e

caulinita na areia de gnaiss; Paiva (2013) encontrou quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), Albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) e  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ; Silva (2013) observou a presença também de quartzo, de caulinita e hematita, em seus estudos. Para Mansur (2007), muitos dos picos identificados nos resultados obtidos para a areia estão de acordo com o padrão de difração do quartzo.

O difratograma da Figura 43 e Tabela 13 mostram os constituintes mineralógicos da areia AR.

Figura 43 - Difratograma da areia AR

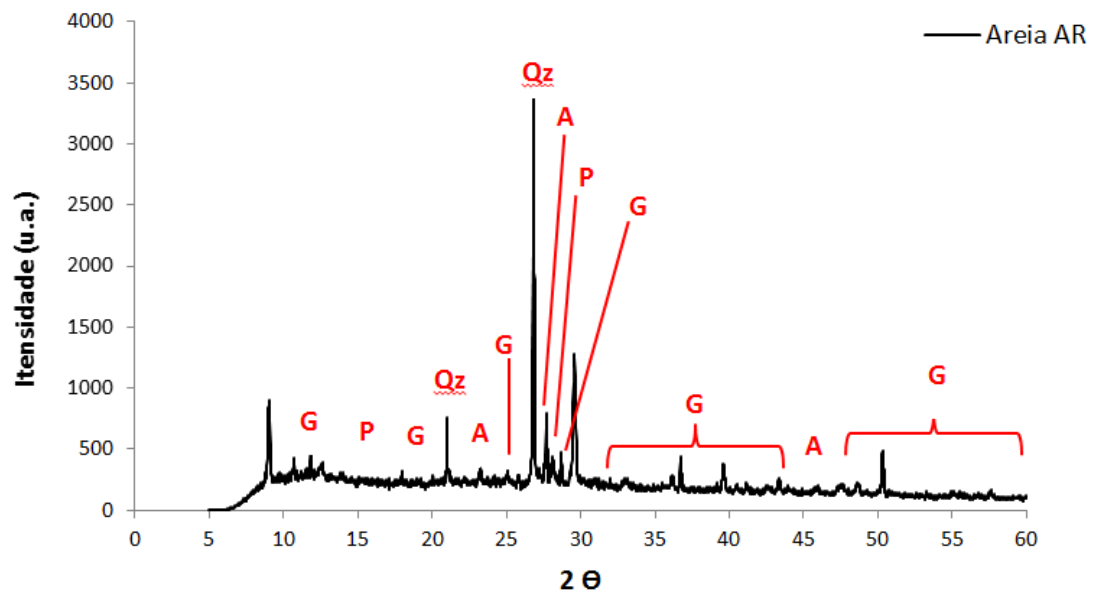


Tabela 13 - Legenda da Figura 43 (areia AR)

REF.	MINERAIS OU FASES	FÓRMULA QUÍMICA	CARTAS (CÓDIGO DE REFERÊNCIA)
Q	Quartzo	$\text{SiO}_2$	01-083-2467
P	Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	00-001-1079
G	Gipsita (gesso)	$\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2$	01-072-0596
A	Albita	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot 6\text{SiO}_2$	00-002-0515

Para este agregado reciclado no DRX foi possível confirmar os elementos químicos encontrados no seu teste de FRX (Tabela 10). As duas areias AN e AR, apresentaram em comum o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), a albita e o Ca de diversas formas. Na areia AR, observou-se componentes usuais do cimento: portlandita e gipsita (gesso). Comparando-se os dois difratogramas, observou-



se, como esperado, que a maior diferença é a presença do cálcio e produtos da hidratação do cimento, na areia reciclada.

Outros trabalhos corroboram com os resultados encontrados, como Mansur (2007), no difratograma obtido para o cimento *Portland*, observou a presença de alita, belita, aluminato, ferrita, portlandita e porção calcária. Schaefer (2007) estudou argamassa de RCC, identificando etringita; quartzo, portlandita; calcita e alita. Este autor ainda descreve que na argamassa produzida com a fração fina (0,15mm) percebeu-se a formação da etringita, independentemente da idade. Ele justifica que a calcita encontrada deve -se à fase de carbonatação através do contato da argamassa com  $\text{CO}_2$ , presente na atmosfera. No pico da portlandita [ $\text{Ca(OH)}_2$ ] constatou-se que ocorreu maior fixação nas argamassas produzidas com agregados reciclados de RCC.

Na Figura 44 e na Tabela 14 estão mostrados os picos da brita 12 AN e seus constituintes mineralógicos.

Figura 44 - Difratograma da brita 12 AN

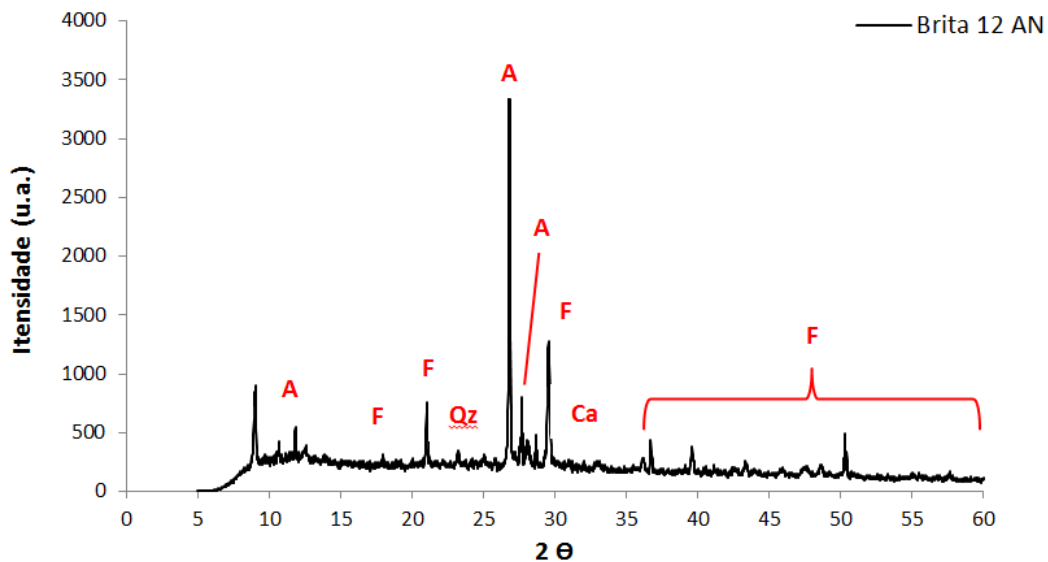


Tabela 14 - Legenda da Figura 44 (brita 12 AN)

REF.	MINERAIS OU FASES	FÓRMULA QUÍMICA	CARTAS (CÓDIGO DE REFERÊNCIA)
Qz	Dióxido de Silício (quartzo)	$\text{SiO}_2$	01-081-0065
A	Albita	$\text{Na (Si}_3\text{Al) O}_8$	00-010-0393
F	Feldspato de Potássio	$\text{K}_5\text{Na}_5 \text{Al Si}_3 \text{O}_8$	01-084-0710
Ca	Calcita	$\text{CaCO}_3$	00-004-0637

No teste de DRX da brita 12 AN, os minerais encontrados corroboram com o resultado obtido na análise quantitativa realizada no teste de fluorescência para esse agregado (Tabela 11), ou seja, o maior teor de quartzo, seguido dos óxidos de alumínio, potássio, sódio, ferro e cálcio.

Reis (2004) em seu estudo quando analisou por DRX a brita N° 0 identificou a calcita e na brita de calcário foi possível verificar calcita, quartzo e feldspato, compostos semelhantes aos encontrados na brita estudada.

O próximo difratograma é da brita 12 AR, mostrado na Figura 45 e na Tabela 15.

Figura 45 - Difratograma da brita 12 AR

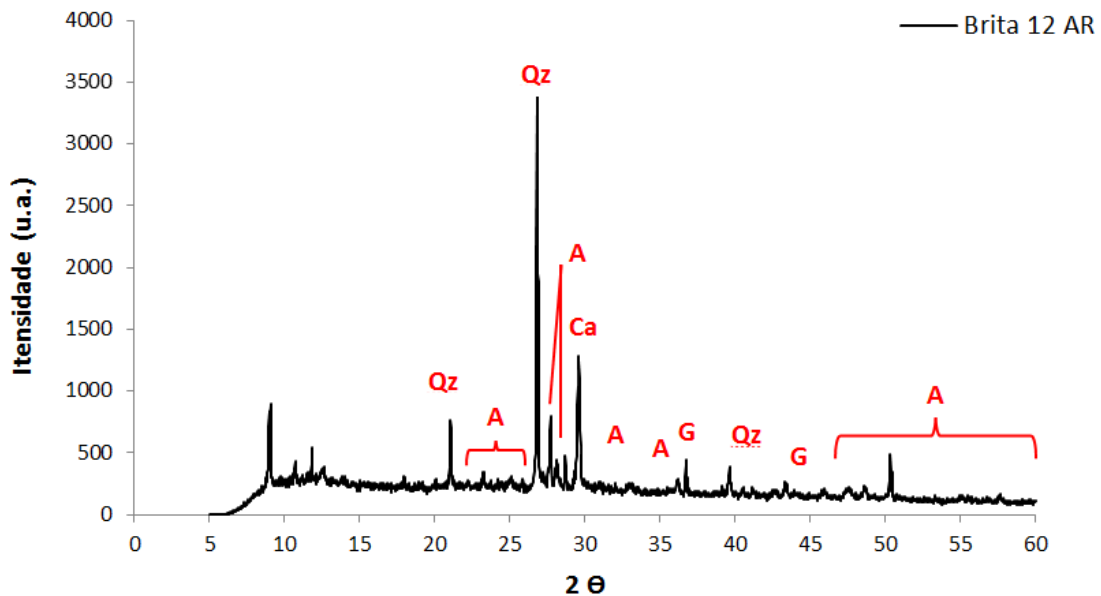


Tabela 15 - Legenda da Figura 45 (brita 12 AR)

REF.	MINERAIS OU FASES	FÓRMULA QUÍMICA	CARTAS (CÓDIGO DE REFERÊNCIA)
Ca	Carbonato de cálcio (calcita)	$\text{CaCO}_3$	01-085-0849
Qz	Dióxido de silício (quartzo)	$\text{SiO}_2$	01-085-0794
A	Albita	$\text{Na (AlSi}_3\text{O}_8)$	01-071-1153
G	Gipsita (gesso)	$\text{Ca SO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	00-033-0311

Analisando-se as fases mineralógicas encontradas nos resultados dos difratogramas das britas 12 AN e AR, foi possível constatar concordância com os resultados de fluorescência, sendo

identificado o dióxido de silício e outros elementos em comum, como Na, Al e Ca, e produtos da argamassa aderida na brita 12 AR.

Os compostos majoritários identificados na amostra estão de acordo com a literatura (REIS, 2004; CÔRREA, 2005; e MANSUR, 2007). A maior parcela encontrada no referido agregado diz respeito ao carbonato de cálcio, estando compatível com o cimento que compõe grande parte desse agregado reciclado.

No estudo de Tavares *et al.* (2010), foram apresentados difratograma de DRX das pastas com diferentes tipos de cimentos, verificando-se a formação de portlandita [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ], calcita [ $\text{CaCO}_3$ ], etringita [ET], alita [ $\text{C}_3\text{S}$ ], fase aluminato [ $\text{C}_3\text{A}$ ], belita [ $\text{C}_2\text{S}$ ] e brownmillerita [ $\text{C}_4\text{AF}$ ], indicando que a hidratação da pasta não foi completa. Em outros trabalhos, como exemplo, Rezende (2013) as fases observadas foram: portlandita ou hidróxido de cálcio [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ]; etringita ou monossulfato hidratado [ $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ]; quartzo ou dióxido de silício cristalino [ $\text{SiO}_2$ ]. Sendo o dióxido de silício oriundo dos agregados, materiais cuja massa é predominante nas composições, verificando-se ainda a presença de celita [ $\text{C}_3\text{A}$ ] e de calcita [ $\text{CaCO}_3$ ] esta resultante da carbonatação. De acordo com Siddique e Klaus (2009) e Cassagnabère *et al.* (2010), a existência de picos relativos à portlandita demonstra que a reação pozolânica não se completou, podendo se prolongar após 360 dias.

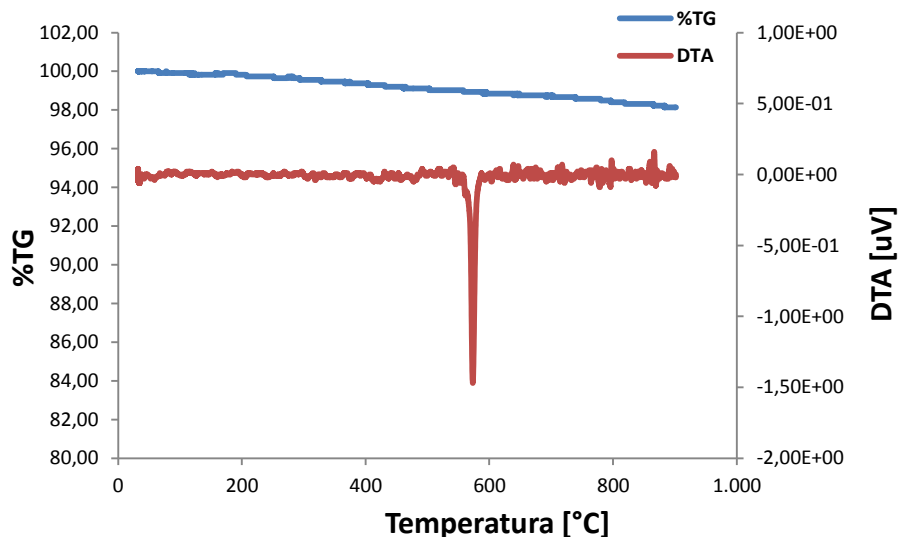
#### 4.7. Análise térmica (DTA e TG)

As curvas mostradas nas Figuras 48 a 51 foram obtidas no software do equipamento (TA-60WS – *Thermal Analysis*, versão 2.11), onde a curva ou linha azul representa a TG e a vermelha é a DTA.

As duas amostras analisadas inicialmente foram referente aos naturais, a areia AN e a brita 12 AN que são minerais (inorgânicos), originando-se basicamente do meio físico externo. Não possuem estruturas baseadas em cadeias de carbono e têm uma estrutura molecular muito simples (Figuras 46 e 47).

Percebeu-se que na areia AN (Figura 46), não se verificou nenhum pico característico de decomposição, obtendo-se uma pequena perda de massa, cerca de 2,0%.

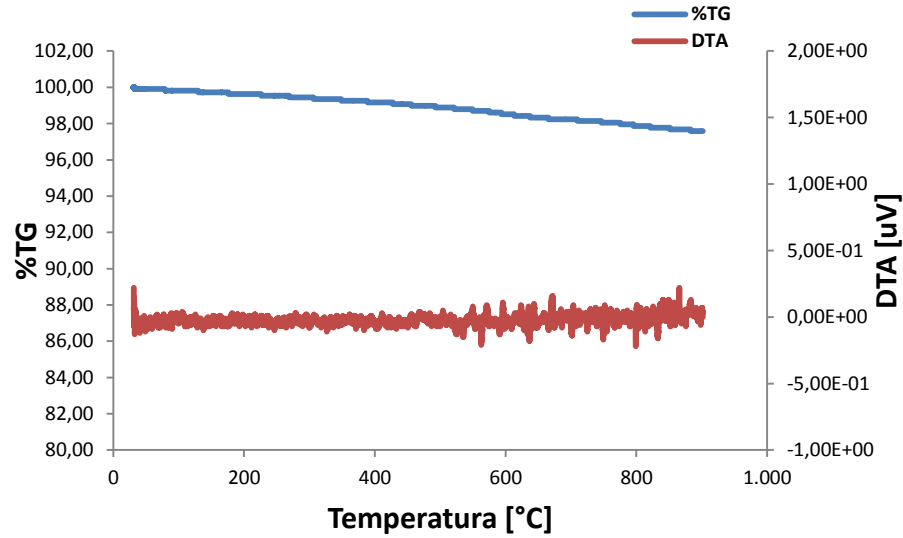
Figura 46 - Curva TG/DTG da areia AN



O único pico encontrado na DTA (curva vermelha), provavelmente é da transição do quartzo alfa para o quartzo beta, na temperatura de aproximadamente 570°C, estando em conformidade com outros trabalhos, como Menezes *et al.* (2007), que na curva de DTA do resíduo de granito observou um pequeno pico endotérmico em aproximadamente 560°C, associando a uma provável transformação alfa-beta do quartzo; Oliveira *et al.* (2010) verificaram, um pico a 573°C provavelmente a transformação de quartzo alfa para quartzo beta, mostrando a presença de quartzo na argila estudada; e Pinto *et al.* (2010), que observaram um pico em torno de 566°C, o evento endotérmico, em ambas as argilas estudadas, indicando a transformação do quartzo alfa para beta, acompanhado de expansão volumétrica.

Na brita 12 AN (Figura 47) também não ocorreu nenhum pico característico de decomposição, provavelmente devida às características da rocha de origem, não sendo possível nenhuma transição com uma discreta perda de massa (aproximadamente 2%) nesse intervalo de temperatura (0°C a 1.000°C).

Figura 47 - Curva TG/DTG da brita 12 AN



Observando-se a curva da areia reciclada AR (Figura 48), foi possível notar uma diferença significativa em relação à curva da amostra natural (areia AN), onde a areia reciclada apresentou eventos definidos pela derivada, por se tratar de resíduos reciclados de concreto, com concreto e argamassa aderida na sua composição (Tabela 16).

Figura 48 - Curva TG/DTG da areia AR

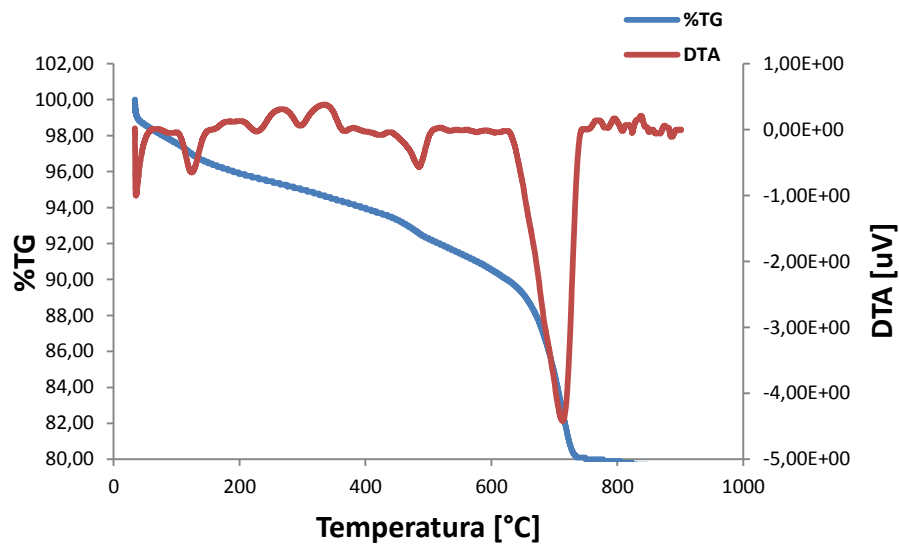


Tabela 16 - Dados termogravimétricos da areia AR

AMOSTRA	ETAPAS	INTERVALO DE TEMPERATURA (°C)	PERDA DE MASSA (%)	TEMPERATURA DE PICO DA DERIVADA (°C)	TEMPERATURA DE PICO DA DTA (°C)
AREIA AR	1	47,59 – 225,21	3,014	117,46	124,05
	2	225,21 – 421,81	1,970	-	-
	3	481,21 – 543,97	2,127	484,94	484,94
	4	543,97 – 901,19	12,143	713,40	714,37

Estudos desenvolvidos por Dweck *et al.* (2000) e Ramachandran e Beaudoin (2001), utilizando análise termogravimétrica em pastas de cimento, mostraram que, na ausência de água livre, a desidratação do silicato de cálcio hidratado inicia-se a partir de 50°C e que a faixa de decomposição do silicato de cálcio hidratado e etringita é de 50°C a 200°C. Outros pesquisadores, como Massazza (1998) e Vedalakshmi *et al.* (2003), utilizam 105°C e 100°C, respectivamente, como a temperatura inicial para a determinação do teor de água combinada.

A areia AR obteve-se 4 picos principais, sendo o primeiro evento provavelmente da evaporação da água livre na temperatura a partir de 100°C e no segundo seria provavelmente da água quimicamente combinada (de ligação), onde não visualiza-se pico definido, sem perda significativa de massa. Taylor (1997), observou-se que os produtos hidratados presentes na matriz do cimento perdem a água quimicamente combinada em picos característicos, que podem ocorrer nas faixas de temperatura, para o hidróxido de cálcio (425 - 550°C). Para o silicato de cálcio hidratado, etringita e aluminato de cálcio hidratado (100 - 300°C) - LEA, 1974.

Já no terceiro evento iniciou-se a decomposição térmica dos inorgânicos, primeiramente pelos compostos hidratados do cimento, onde se tem o pico em aproximadamente 480°C, que provavelmente seria a portlandita, conforme observado por Gonçalves *et al.* (2006); e o quarto e último evento, com maior perda de massa (12,143%), seria provavelmente dos carbonatos e compostos da argamassa e concreto, em aproximadamente 700°C, em consonância com Gonçalves *et al.* (2006) que na temperatura muito próxima (680°C), referiu-se à perda de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) devido ao processo de decomposição do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>).

Na Figura 49, verifica-se a brita 12 AR, com três eventos definidos, assemelhando-se a curva da areia AR, ambas com elementos de concreto e argamassa aderida na sua composição, conforme eventos mostrados na Tabela 17.

Figura 49 - Curva TG/DTG da brita 12 AR

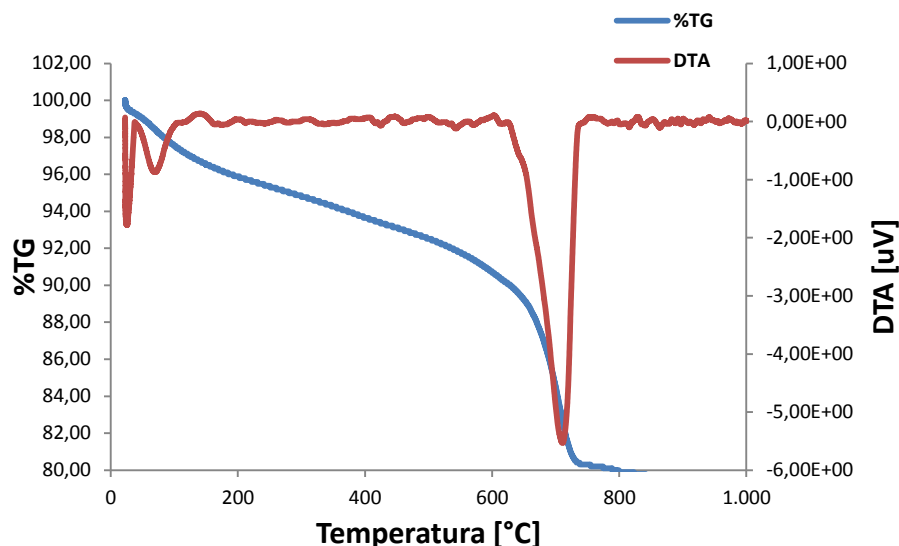


Tabela 17 - Dados termogravimétricos da brita 12 AR

AMOSTRA	ETAPAS	INTERVALO DE TEMPERATURA (°C)	PERDA DE MASSA (%)	TEMPERATURA DE PICO DA DERIVADA (°C)	TEMPERATURA DE PICO DA DTA (°C)
BRITA 12 AR	1	28,08 - 250,34	4,165	68,07	69,87
	2	250,34 - 477,05	2,528	-	-
	3	477,05 - 1001,30	13,816	710,92	707,34

Todos esses eventos são endotérmicos, pois quando há separação de um composto, cuja energia total dos seus produtos é maior que a de seus reagentes, absorve-se energia (na forma de calor). Na brita 12 AR encontram-se 3 picos, com bastante similaridade com a areia AR. O primeiro pico também correspondeu à evaporação da água livre e o segundo seria provavelmente da água estruturada (de ligação). A diferença em relação a areia AR, que não apareceu à decomposição de produto hidratado, onde o terceiro evento obteve-se 13,816% de perda de massa.

Tavares *et al.* (2010) estudaram pastas de cimento sintetizadas, onde a curva de TG da pasta padrão apresentou três principais perdas de massa: evaporação da água fisicamente adsorvida, entre 50-120°C; desidroxilação do  $\text{Ca(OH)}_2$ , entre 400 e 500 °C; e decomposição das

fases carbonatos (tipicamente  $\text{CaCO}_3$ ), entre 500 e 650°C. Picos endotérmicos na pasta padrão, localizados por volta de 50-150°, bem como entre 400-500°C foram atribuídos à evaporação da água fisicamente adsorvida e a desidroxilação da portlandita, sendo observada semelhança com nosso estudo.

#### 4.8. Análise química (IV)

Na análise de IV obteve-se os espectros das quatro amostras estudadas. Segundo Haack (2010), a interpretação dos espectros no IV é feita num primeiro momento pelo perfil do espectro e presença de bandas características principais de grupos funcionais como C=O (1.800 a 1.650  $\text{cm}^{-1}$ ), OH (3.500 a 3.200  $\text{cm}^{-1}$ ), banda larga para OH de ácidos (3.400 a 2.700  $\text{cm}^{-1}$ ), C-O (1.300 a 1.000  $\text{cm}^{-1}$ ), entre outros.

Analisando-se os quatro espectros percebeu-se similaridade em ambos, em relação à presença de umidade na superfície dos agregados estudados, conforme os picos no comprimento de onda em aproximadamente 3.460  $\text{cm}^{-1}$ , vibração de estiramento de X-OH (X=Si, H), atribuída ao OH e em torno de 1.640  $\text{cm}^{-1}$  vibração de deformação da água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), conforme observado por Hasparyk (2005). Além de vibração de estiramento simétrico da ligação Si-O (1.037  $\text{cm}^{-1}$ ); vibração de deformação da ligação O-Si-O (457 e 600  $\text{cm}^{-1}$ ); vibração de estiramento assimétrico da ligação O-Si-O (1.154  $\text{cm}^{-1}$ ); vibração de estiramento simétrico da ligação O-Si-O (783 a 827  $\text{cm}^{-1}$ ); e vibração de estiramento do Si-O- $\text{X}^+$ : X-íons alcalinos como K e Na (953  $\text{cm}^{-1}$ ).

Verificou-se também que todas as amostras (areia AN, areia AR, brita 12 AN e brita 12 AR) apresentaram semelhança nas prováveis bandas de Sílica e suas ligações correspondentes a faixa de 500 a 1.470  $\text{cm}^{-1}$ . Segundo Oliveira *et al.* (2013), o alongamento entre (900 a 1.000  $\text{cm}^{-1}$ ), são sempre encontrados em espectro de Sílica, onde essas vibrações de alongamento referem-se ao silício-oxigênio, devido à presença de siloxano, com estiramento e deformação da sílica. Para Argenton (2010), a sílica possui grupos siloxano (Si-O-Si) e grupos silanol (Si-OH). Os grupos silanol são os mais importantes devido a sua polaridade. Quanto mais polar o composto, maior a retenção, onde essa ligação é superficial, absorvendo umidade por conta do grupo hidroxila, havendo estiramento e deformação da sílica.

Nas Figuras 50 e 51 (areia AN e brita 12 AN), pode-se observar picos em aproximadamente 670  $\text{cm}^{-1}$ , que provavelmente é dióxido de titânio (656, 540, 426  $\text{cm}^{-1}$ ) e



silicato de alumínio ( $1.150 - 1.000 \text{ cm}^{-1}$ ), pois esses valores estão dentro da região citada por (HAACK, 2010). Bem como o feldspato ( $1.159 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1096 \text{ cm}^{-1}$  e  $1.052 \text{ cm}^{-1}$ ), citado por Mansur (2007) que estudou o agregado miúdo e o cimento. Para o agregado miúdo ele verificou picos associados ao quartzo, identificam-se picos em  $1.188 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1.096 \text{ cm}^{-1}$ ,  $875 \text{ cm}^{-1}$ ,  $798 \text{ cm}^{-1}$ ,  $779 \text{ cm}^{-1}$ ,  $695 \text{ cm}^{-1}$ ,  $517 \text{ cm}^{-1}$  e  $468 \text{ cm}^{-1}$  que podem ser relacionados a este mineral. Conforme Long *et al.* (2001), a absorção no número de onda de  $3.424 \text{ cm}^{-1}$  pode ser associada à presença de água aprisionada na matriz de quartzo.

As presenças desses compostos corroboram com os resultados encontrados nos testes de FRX e DRX dos referidos agregados.

Figura 50 - Espectro de IV da areia AN

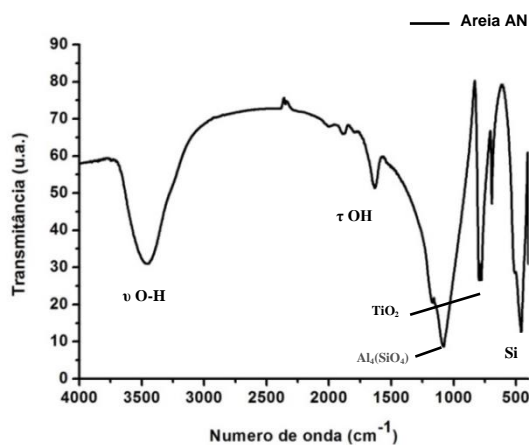
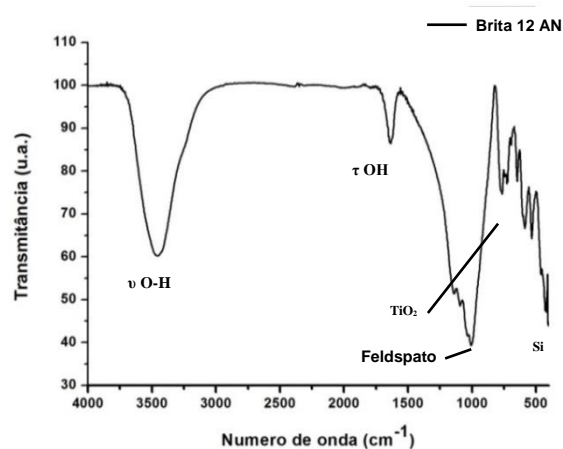


Figura 51 - Espectro de IV da brita 12 AN



Nas Figuras 52 e 53 relacionadas aos AR, observou-se uma diferença na banda de aproximadamente  $1.470 \text{ cm}^{-1}$ , que foi associado à vibração do ânion  $\text{CO}_3^{-2}$  (carbonatos), de acordo com (HASPARYK, 2005).

No mesmo trabalho mencionado anteriormente, Mansur (2007) analisou o cimento através de IV. Verificou-se os picos correspondentes aos silicatos de cálcio  $\text{C}_3\text{S}$  ( $922 \text{ cm}^{-1}$ ,  $525 \text{ cm}^{-1}$  e  $450 \text{ cm}^{-1}$ ), e ao aluminato de cálcio,  $\text{C}_3\text{A}$  ( $745 \text{ cm}^{-1}$  e  $424 \text{ cm}^{-1}$ ). Ainda foi possível verificar picos correspondentes ao gesso,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $1.165 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1.137 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1.107 \text{ cm}^{-1}$  e  $657 \text{ cm}^{-1}$ ), além dos materiais carbonáticos ( $2.516 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1.795 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1.497\text{-}1.425 \text{ cm}^{-1}$ ,  $878 \text{ cm}^{-1}$  e  $713 \text{ cm}^{-1}$ ). Como resultado de hidratação, identificou-se os picos associados à portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), em  $3.641 \text{ cm}^{-1}$  (FARMER, 1974; YOUSUF *et al.*, 1995; MOLLAH *et al.*, 2000; MOHAN e PRASAD, 2002).

Figura 52 - Espectro de IV da areia AR

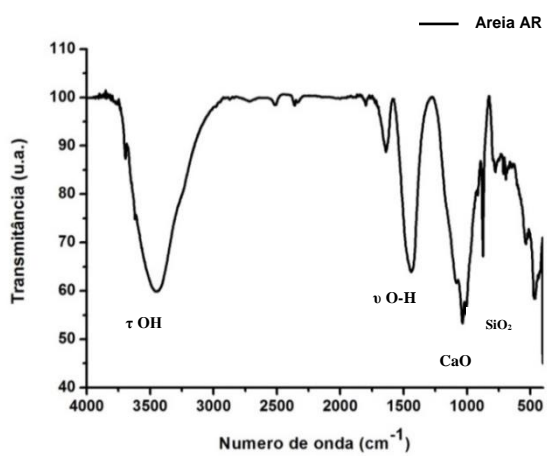
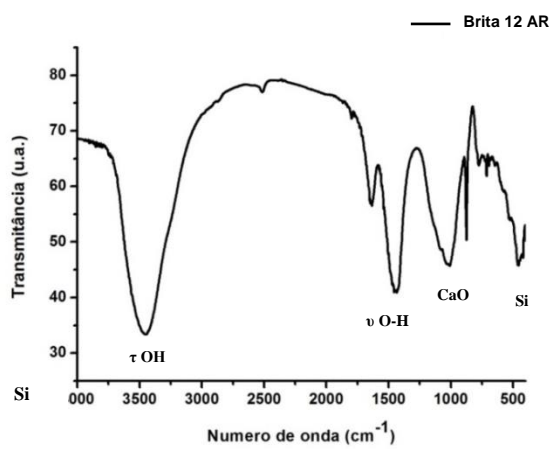


Figura 53 - Espectro de IV da brita 12 AR



## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos nos ensaios e análises realizadas em laboratórios, utilizando os Agregados Naturais (AN) e os Agregados Reciclados (AR), pode-se concluir que:

- Na análise ambiental, a partir do ensaio de solubilização, percebeu-se que os resultados de alguns parâmetros químicos, como sulfato, ferro e alumínio, ultrapassaram os limites da ABNT NBR N° 10004/2004, sendo alterada a classificação de alguns agregados: brita 12 AR, brita 25 AR, agregado miúdo AR, brita 12 AN e pó de pedra AN, de Classe II B (inertes) para Classe II A (não-inertes), comprovando a necessidade de ensaios sistemáticos e frequentes dos RCC reciclados, de modo a garantir o uso seguro em relação ao potencial risco ao meio ambiente.
- Na análise dos metais pesados, o único metal que ultrapassou a concentração da ABNT NBR N° 10004/2004, foi o cádmio para a brita 12 AR. Esse resultado corrobora na mudança da classificação e acompanhamento dos AR, conforme comentado anteriormente.
- Para a variação e influência do pH na solubilização com e sem troca atmosférica verificou-se que as quatro amostras tiveram um comportamento decrescente, estabilizando-se em pH alcalino, contribuindo para que os metais pesados não sejam liberados para o meio ambiente por processos de lixiviação e solubilização, mesmo estando com valores acima dos limites permitidos.
- As análises químicas e mineralógicas (FRX, DRX, DTA/TG e IV) corroboraram entre si para caracterizar e semi-quantificar os compostos presentes nos agregados, sendo constatado que nos AR predominou os compostos presentes em argamassa e concreto, bem como, a ausência de matéria orgânica e quantidades insignificantes de metais pesados.
- Desta forma, os resultados da análise ambiental, química e mineralógica demonstraram que os AR podem ser utilizados para diversos fins, como substitutos parcial ou integral dos agregados naturais (AN), pois a maioria dos compostos encontrados neles também faz parte dos AN, usados diariamente na construção civil. Sendo assim, a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados trazem benefícios econômicos e ambientais para toda a sociedade.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Fazer a análise microestrutural (MEV) dos agregados reciclados e assim caracterizar a morfologia e textura das partículas;
- Realizar análises como condutibilidade térmica e perda de massa ao fogo, avaliando parâmetros estruturais e identificando a estrutura e composição dos agregados reciclados;
- Estudar a presença de outros metais pesados, como antimônio, bário, cério, cobalto, mercúrio, manganês, magnésio e titânio nesses agregados reciclados;
- Avaliar outros agregados reciclados, como o Agregado Reciclado Misto (ARM), quantos aos parâmetros ambientais, químicos e mineralógicos;
- Identificar constituintes que podem ser potencialmente lixiviados através de outros testes de lixiviação de padronização internacionais: “Environmental Protection Agency’s Extraction Procedure (EP), Toxicity Test”, o “Toxic Characterisitics Leaching Procedure” (TCLP) e o “Essai de lixiviation - AFNOR X-31-210/92”.

## REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Cimento Portland comum**. NBR 5732. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **Resíduos Sólidos - Classificação**. NBR 10004. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. NBR 10005. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. NBR 10006. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **Resíduos Sólidos – amostragem de Resíduos**. NBR 10007. Rio de Janeiro, 2004. 25p.

\_\_\_\_\_. **Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação**. NBR 15112. Rio de Janeiro, 2004. 7p.

\_\_\_\_\_. **Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação**. NBR 15113. Rio de Janeiro, 2004. 12p.

\_\_\_\_\_. **Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação**. NBR N° 15114. Rio de Janeiro, 2004. 7p.

\_\_\_\_\_. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos**. NBR 15115. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: Requisitos**. NBR 15116. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **Agregados para concreto - Especificação**. NBR 7211. Petrobrás, 2009.

\_\_\_\_\_. **Sistemas da gestão ambiental – Requisitos com orientações para uso**. NBR ISO 14001. Rio de Janeiro, 2004.

ABRECON, 2013. **Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição**.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos Sólidos no Brasil, 2013.**

[http://www.abrelpe.org.br/panorama\\_apresentacao](http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao). Acessado em 16/02/2015.

AGUIAR, M. R. M. P., *et al.* **Remoção de metais pesados de efluentes industriais utilizando alumino silicatos.** Química Nova. São Paulo, 2002.

AGUIAR, G. de. **Estudos de argamassas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção.** Dissertação apresentada à Escola Politécnica de Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados.** Tese de Doutorado. UFPE. Recife, 2007

ANGULO, S. C., *et al.* **Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição.** In: Seminário de Desenvolvimento sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 6., 2003, São Paulo. **Anais.** São Paulo: IBRACON; IPEN. 2003. CD-ROM

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos.** Tese de doutorado. Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2005.

ANGULO S. C.; JOHN V. M. **Requisitos para execução de aterros de resíduos de construção e demolição.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/436. São Paulo, 2006.

ARAÚJO, V. M. **Práticas Recomendadas para a Gestão mais Sustentável de Canteiros de Obras.** Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. 2009.

ARGENTON, A. **Conceitos fundamentais de Cromatografia a líquido de Alto Desempenho (HPLC).** Conselho Regional de Química - IV Região (SP). Apoio CAIXA, São José do Rio Preto, 29 de maio de 2010.

ASAKURA, H., *et al.* **Characteristics of fine processed construction and demolition waste in Japan and method to obtain fines having low gypsum component and wood contents.** *Waste Management & Research*, v. 28, n. 7, p. 634-646 / 2010.

BACCAN, N. **Metais Pesados: Significado e Uso da Terminologia.** In: ANAIS IX Encontro Nacional sobre Contaminantes Inorgânicos, IPEN, São Paulo, 2004.

BARRETO, J. G. F. **Os resíduos de Construção Civil no Município de Itabuna.** IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Salvador/BA – 25 a 28/11/2013.

BARROS, M. C. de. **Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura.** Rio de Janeiro/RJ – Maio de 2005.

BAVARESCO, R. C. **Utilização de entulho reciclado para produção de argamassa.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis – SC, 2001.

BAZZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para produção de novos concretos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis-SC, 1999.

BENNERT, T., *et al.* **Utilization of Construction and Demolition Debris Under Traffic-Type Loading in Base and Subbase Applications.** *Transportation Research Record*, n.1714, p. 33-39. National Academy Press, Washington, USA (2000).

BIANCHINI, G., *et al.* **Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical–mineralogical appraisal.** *Waste Management*, volume 25, pages 149–159, 2005.

BIDONE, F. R. A. **Resíduos sólidos provenientes de coletas especiais: reciclagem e disposição final.** Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2001. 240 p.

BIONDI, C. M. **Teores naturais de Metais Pesados nos solos de referência do Estado de Pernambuco.** Doctor Scientiae. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife – 2010.

BLUMENSCHIN, R. N. **A Sustentabilidade na Cadeia Produtiva da Indústria da Construção.** Dissertação (Doutorado), Universidade de Brasília. 2004.

BODI, J., *et al.* **Utilização de Entulho de Construção Civil Reciclado na Pavimentação Urbana.** *Anais da XXIX Reunião Anual de Pavimentação*, ABPv, Cuiabá, p.409-436 (1995).

CAPELLO, G. **Entulho vira matéria-prima - Agregados reciclados chegam aos canteiros das construtoras, adquiridos de empresas especializadas ou gerados na própria obra.** *Revista Técnica: a revista do engenheiro civil*, São Paulo: Editora Pini. Edição 112 – Julho/2006.

CASSA, J. C. S., *et al.* **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção: projeto entulho bom.** Salvador: EDUFBA – Caixa Econômica Federal, 312 p/ 2001.

CASSAGNABÈRE, F., *et al.* **Metakaolin a solution for the precast industry to limit the clinker content in concrete: mechanical aspects.** Construction and Buildings Materials. v. 24, p. 1109-1118, 2010.

CAUDURO, F.; ROBERTO, S. **Avaliação comparativa de testes de Lixiviação de Resíduos Sólidos.** XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Cancun, México, 27 a 31 de outubro, 2002.

CETESB 152/2007. **Procedimento para gerenciamento de Areia de Fundição.** São Paulo, 2007.

CHAVES, E. V. **Absorção de metais pesados de solos contaminados do aterro sanitário e pólo industrial de Manaus pelas espécies de plantas *Senna multijuga*, *Schizolobiumamazonicum* E *Caesalpiniaechinata*.** Tese de doutorado. Manaus: UFAM - Universidade Federal do Amazonas, 2008. 87 f.

CHERIAF, M.; ROCHA, J. C. **Caracterização dos Resíduos Industriais do Estado de Santa Catarina e as Possibilidades de Valorização na Construção Civil.** In: Encontro sobre edificações e comunidades sustentáveis, 1997. Canela. p. 81-86.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (CEC). **Criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills.** Bruxelas, 2002. 28p. (Working Document of the Commission Services, Committee For The Adaptation To Scientific And Technical Progress Of EC-Legislation On Waste).

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental.** RESOLUÇÃO Nº 01 de 23/01/1986. Alterada pelas Resoluções Nº 11, de 1986, Nº 05, de 1987, e Nº 237, de 1997.

\_\_\_\_\_. **Dispõe sobre o gerenciamento de resíduos sólidos de construção.** RESOLUÇÃO Nº 307 de 05/07/2002.

\_\_\_\_\_. **Altera a Resolução CONAMA Nº 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na Classe de resíduos perigosos.** RESOLUÇÃO Nº 348 de 16/08/2004.

\_\_\_\_\_. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e da outras providencias.** RESOLUÇÃO Nº 357 de 17/03/2005.

\_\_\_\_\_. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução Nº 357, de 17/03/2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.** RESOLUÇÃO Nº 430 de 13/05/2011.



CONSTRUIR – NE – Revista Construir Nordeste. **Para onde vão?** – Disponível em [www.construironordeste.com.br](http://www.construironordeste.com.br). Acessado em setembro de 2014.

CORRÊA, S. M. **Compósito à base de resíduos de concreto e resíduos de produção de cal.** Dissertação. Curitiba, 2005.

COSTA, R. V. G. da. **Taxa de geração de resíduos da construção civil em edificações na cidade de João Pessoa.** Dissertação. João Pessoa, 2012.

CURTIUS, A. J.; FIEDLER, H. D. **Análise de metais e qualidade analítica. Meio ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização.** Porto Alegre: FEPAM, 2002. p. 211-227.

DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, E. T. G. **Princípios e Aplicações de Análise Térmica – Material de apoio, Curso Teórico/Prático.** Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos. Julho/Agosto, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação.** Rio de Janeiro. DNIT, 2006.

DIN 4226-100. **Aggregates for mortar and concrete - Part 100: Recycled aggregates.** 2002-02.

DOLLIMORE, D., *et al.* **An examination of recycled Portland cement concrete rich in dolomite and low in calcite obtained from various locations in Ohio.** Thermochemica Acta; pages 311 – 319, 2001.

DORSTHORST, B. J. H.; HENDRIKS, Ch. F. **Re-use of construction and demolition waste in the EU.** In: CIB Symposium: Construction and Environment – theory into practice. São Paulo, 2000. Proceedings. EPUSP.

DWECK, J., *et al.* **Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate.** Thermochemica Acta, n. 346, p. 105-113, 2000.

ENGELSEN, C., *et al.* **Field site leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction.** Science of the Total Environment, 2012.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Construction and demolition waste landfills.** 1995. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acessado em: Janeiro, 2015.

FARMER, V. C. **The Infrared Spectra of Minerals**. London: Adlard & Son Ltd., 1974.

FATMA – **Fundação do Meio Ambiente: Programa Nacional de Meio Ambiente**. Disponível em: < [www.fatma.sc.gov.br/projetos/conveio\\_pnmaII.htm](http://www.fatma.sc.gov.br/projetos/conveio_pnmaII.htm)>. Acesso em: 22 fevereiro 2015.

FERNANDES, D. P. **Estudo de estabilização química, geo-mecânica e ambiental das escórias de aciaria LD para fins de aplicação como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas**. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UFOP, Ouro Preto, julho de 2010.

FERREIRA, K. C., *et al.* **Avaliação de parâmetros físicos e químicos para a produção de argamassas utilizando cinza volante e resíduo de construção civil**. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. 19 a 22 de outubro de 2014, Florianópolis/SC.

GARCIA, C., *et al.* **The influence composting and maturation processes on the heavy-metal extractability from some organic wastes**. Biological wastes Barking, v. 31. 10p. 1990.

GHOSH, S. N., *et al.* **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology**. Norwich/New York/U.S.A, 2001, cap. 5, p.174-203.

GÓMEZ, A. M. J. **Estudo Experimental de um Resíduo de Construção e Demolição (RCD) para Utilização em Pavimentação**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília - DF. 148p. 2011.

GONÇALVES, J. P., *et al.* **Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 83-94 out./dez. 2006.

GONÇALVES, P.; BRITO J. **Utilização de agregados reciclados em betão. Análise comentada da regulamentação existente**. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa – 2008.

GRUBBA, D. C. R. P.; PARREIRA, A. B. **Emprego de agregado reciclado de concreto em camadas de base e sub-base de pavimentos**. XXIII ANPET – Congresso Brasileiro de Pesquisa e Ensino em Transportes. Vitória. Cd-rom, pp. 1-12, 2009.

GUEDES, A. L. P. G. **Avaliação da geração de resíduos da construção civil e suas implicações em bairros populares. O caso do bairro de Gramame em João Pessoa – PB**. Dissertação de Mestrado da UFPB, João Pessoa, junho de 2014.

HAACK, M. de S. **Análise de materiais por espectroscopia de Infravermelho dentro do sistema de gestão de qualidade conforme ABNT NBR ISO/IEC N° 17025**. TCC – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, 2010.

HARTLÉN, J. **Environmental consequences of using residues**. Waste Management, vol 16, pages 1-6, 1996.

HASPARYK, N. P. **Investigação do concreto afetado pela reação Álcali-Agregado e Caracterização avançada do gel exsudado**. Tese – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

HENDRIKS, C. F. **Certification system for aggregates produced from building waste and demolished buildings**. In: Environmental aspects of construction with waste materials. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 821-834.

HENDRIKS, C. F. **The building cycle**. Holanda: Aeneas, 2000. 231 p.

HENDRIKS, C. F.; JANSSEN, G. M. T.. **Reuse of construction and demolition waste in the Netherlands for road constructions**. Heron, v. 46, n.2, pp. 1-9, 2001, ISSN 0046-7316.

HORTEGAL, M. V., *et al.* **Utilização de agregados resíduos sólidos da construção civil para pavimentação em São Luís – MA**. pp. 1-15. Pesquisa em Foco, v. 17, n.2, p. 60-74, 2009.

JACOB, J. de S., *et al.* **Análise da lixiviação de metais pesados em concretos produzidos com agregados reciclados**. V Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre edificações e Comunidades Sustentáveis. 28 a 30 de outubro de 2009, Recife.

JADOVSKI, I. **Diretrizes Técnicas e Econômicas para Usinas de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição**. 178 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

JOÃO PESSOA. PREFEITURA MUNICIPAL DE JOÃO PESSOA – PB. **Relatórios de dados – período de 2007 à 2014**. João Pessoa. PMJP/EMLUR, 2015.

JOHN, V. M. **Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil**. In: II Sem. Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. São Paulo, IBRACON, 1999.v.1. p. 44-55.

JOHN, V. M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Livre Docente). São Paulo, fevereiro de 2000.

KAYHANIAN, M., *et al.* **Leachability of dissolved chromium in asphalt and concrete surfacing materials.** J Environ Manage 2009.

KAYHANIAN, M., *et al.* **Water quality evaluation of leachate produced from pavement specimens under controlled laboratory conditions.** Road mater pavement design 2010.

KULAIF, Y. **Análise dos mercados de matérias-primas minerais: estudo de caso da indústria de pedras britadas do Estado de São Paulo.** São Paulo, 2001.

LA SERNA, H. A. de.; REZENDE, M. M. **Agregados para a Construção Civil.** 2008.

LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete.** 4th ed. London: Edward Arnold, 1974.

LEI Nº 11.176, de 10 de outubro de 2007. **Institui o sistema de gestão sustentável de Resíduos da Construção Civil e Demolição e o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e Demolição de acordo com o previsto na Resolução CONAMA Nº307, de 05 de julho de 2002, e dá outras providências.**

LEI Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** PNRS, 2010.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição.** Tese de doutorado. UFRGS – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para a produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassa e concretos.** São Carlos, 1999. 240 p. Dissertação (Mestrado). EESC. Universidade de São Paulo.

LIMA, A. S.; CABRAL, A. E. B. **Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE).** Eng Sanit Ambient, v.18 n.2. Abr/jun 2013.

LIMBACHIYA, M. C., *et al.* **Chemical–mineralogical characterization of coarse recycled concrete aggregate.** Waste management; volume 27, pages 201-208, 2007.

LONG, D. G. F., *et al.* **Chert Analysis by Infrared Spectroscopy.** In: 33<sup>rd</sup> Annual Meeting of the Canadian Archaeological Association, 2000, Ottawa. **A Collection of Papers Presented at the**

**33rd Annual Meeting of the Canadian Archeological Association.** Ontario: Canadian Archaeological Association and Ontario Archaeological Society, 2001. p. 255-267.

MANSUR, A. A. P. **Mecanismo físico-químico de aderência na interface argamassa modificada com polímeros/cerâmica de revestimento.** Tese (Doutorado) Engenharia Metalúrgica, Ciência e Eng. de Materiais. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2007. 365p.

MARION, A. M., *et al.* **Study of the leaching behaviour of paving concretes: quantification of heavy metals content in leachates issued from tank test using demineralized water.** *Cement and Concrete Research*, pages 951-957, 2005.

MARQUES, R. B. **Resíduos da construção civil em Araguari-MG: do diagnóstico à proposta de um modelo gerencial proativo.** 2007. 158 f. : il.

MASSAZZA, F. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete.** 4th ed. London: Arnold, 1998.

MELBOUCI, M.; FAZIA, B. **Study of the durability of demolition aggregates on pavements.** In: 6TH International Conference on Micromechanics of Granular Media, 2009.

MELLIS, E. V. **Adsorção e dessorção de Cd, Cu, Ni e Zn, em solo tratado com esgoto.** Tese de doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 2006.

MELO, R. A.; NÓBREGA, R. D. **Uso de agregados de resíduos da construção civil na pavimentação urbana em João Pessoa.** In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2009, Feira de Santana Anais.

MENEZES, R. R., *et al.* **Análise da co-utilização do resíduo do beneficiamento do caulim e serragem de granito para produção de blocos e telhas cerâmicos.** *Cerâmica* 53 (2007) 192-199.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral - SGM. **Agregados para construção civil.** Agosto 2009.

MINOCHA, A. K., *et al.* **Effect of inorganic materials on the solidification of heavy metal sludge.** *Cement and Concrete Research*, v 33 P. 1695-1701, 2003.

MIRANDA, L. F. R. **Estudo dos fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado.** Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

MOHAN, M. R.; PRASAD, P. S. R. **FTIR Investigation on Fluid Inclusions in Quartz Veins of the Penalacheria Schist Belt.** Current Science, 83 (6), p.755-760, 2002.

MOLLAH, M. Y. A., *et al.* **A Fourier transform infrared spectroscopy of the early hydration of Portland cement and the influence of sodium lignosulfonate.** Cem Concr Res, v. 30, p. 267-273, 2000.

MONTEIRO, V. E. D. **Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento de aterro da Muribeca.** Tese de Doutorado. UFPE. 2003.

MOTA, S. **Introdução à Engenharia Ambiental.** 4. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

MOTHÉ, C. G.; AZEVEDO, A. D. **Análise térmica de materiais.** São Paulo: Editora São Paulo, 2002.

MOTTA, R. S., *et al.* **Aplicação de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil em Camadas de Pavimentos.** Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte. ANPET, Florianópolis, p. 259-269, 2004.

MULDER, E., *et al.* **Immobilisation of PAH in waste materials.** In: Waste Materials in Constructions, Inglaterra, 2000. p. 953-62.

NETO, J. da C. M.; SCHALCH, V. **Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição: Estudo da Situação no Município de São Carlos-SP, Brasil.** Nº 36, 2010.

NUNES, M. C. M., *et al.* **Assessment of secondary materials for pavement construction: technical and environmental aspects.** Waste Management, 1996. Vol. 16, nos 1-3, pp. 87-96.

OLIVEIRA, M. J. E. **Materiais descartados pelas obras de construção civil: estudo dos resíduos de concreto para reciclagem.** 2002. 191 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São Carlos.

OLIVEIRA, O. M., *et al.* **Caracterização de uma argila de Vitória da Conquista - Bahia, por análise térmica.** 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, 21 a 25 de novembro de 2010, Campos do Jordão, SP, Brasil.

OLIVEIRA, F. J. V. E., *et al.* **Inorganic–organic hybrids presenting high basic center content: SBA-15 incorporation, toxic metals sorption and energetic behavior.** Materials Research Bulletin 48 (2013) 1045–1056. Elsevier.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo 189p. São Paulo.

PINTO, R. C. A., *et al.* **Estudo de formulações para aplicação em placas cerâmicas**. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 18 a 21 de agosto de 2010. Campina Grande/PB.

PIRES, A. M. M.; ANDRADE, C. **Metais pesados em solos tratados com águas de esgoto**. In: Gestão de resíduos na agricultura e na agroindústria. Botucatu. FEPAF, 2006. 27p.

PIVELI, R. P.; KATO, M. **Qualidade das águas e poluição: Aspectos físico-químicos**. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo, 2006.

PORTARIA MINISTÉRIO DA SAÚDE Nº 2914 de 12/12/2011. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. (MS, 2011).

QUEBAUD, M. R.; BUYLE-BODIN, F. **A reciclagem de materiais de demolição: utilização dos agregados reciclados no concreto**. In: Congresso Brasileiro de Cimento (CBC). São Paulo, 1999. 14p.

QUEIROZ, B. O. de.; MELO, R. A. **Redução de impactos ambientais causados por resíduos sólidos oriundos da construção civil pelo uso em pavimentação**. I Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 21 a 24 de novembro de 2010 – Bauru/SP.

QUEIROZ, B. O. de.; MELO, R. A. **Análise laboratorial de Agregado Reciclado de concreto para uso em camadas de pavimento**. In: 18ª RPU – Reunião de Pavimentação Urbana. São Luís, MA - 18 a 20 de junho de 2012.

RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology - Principles, Techniques, and Applications**. Institute for Research in Construction National Research Council Canada. Ottawa, Ontario, Canada, 2001.

RAMOS, B. F. **Indicadores de qualidade dos resíduos da construção civil do município de Vitória-ES**. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2007.

REIS, R. J. P. **Influência de Areias artificiais de rochas britadas na estrutura e nas propriedades de concretos de cimento Portland**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte, 2004.

REZENDE, M. L. de S. **Resíduo de caulim primário como material pozolânico em concreto seco: propriedades físico-mecânicas e durabilidade.** Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da UFCG, Campina Grande, 2013.

RILEM RECOMMENDATION. **Specification for concrete with recycled aggregates.** Materials and Structures. v 27, p.557-9, 1994.

RODRIGUES, N. L. V. **Testes de toxicidade aguda através de bioensaios no extrato solubilizado dos resíduos Classe II A – não inertes e Classe II B- Inertes.** Dissertação de Mestrado, da Universidade Federal do Paraná. Curitiba (2005).

RUSTOM, R., *et al.* **Properties of recycled aggregate in concrete and road pavement applications.** The Islamic University Journal Vol.15, N°. 2, pp 247-264, 2007, ISSN 1726-6807.

SAMPAIO, A. C. S. **Metais pesados na água e sedimentos dos rios da Bacia do Alto Paraguai.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande - 2003.

SANI, D., *et al.* **Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates.** Waste Management, pages 177-182, 2005.

SARDA, M. C. **Diagnóstico do entulho gerado na cidade de Blumenau - SC: potencialidades de uso em obras públicas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, SC. 2003.

SCHAEFER, C. O. **Avaliação dos metais pesados presentes nos agregados reciclados de resíduos da construção e demolição (RCC) e influência no potencial de lixiviação de matrizes cimentícias.** Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

SCHAEFER, C.O.; ROCHA, J.C.; CHERIAF, M. **Estudo do comportamento de lixiviação de argamassas produzidas com agregados reciclados.** *Exacta*, v. 5, n. 2, p. 243-252/2007.

SIDDIQUE, R.; KLAUS, J. **Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review.** Applied Clay Science. n. 43, p. 392-400, 2009.

SILVA, E. C. da R., *et al.* **Análise da presença de contaminantes em areias recicladas produzidas com resíduos de construção de obras da cidade de Recife.** V Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis. Recife, 28 a 30 de outubro de 2009.



SILVA, M. A. da. **Obtenção e caracterização de compósitos cimentícios reforçados com fibras de papel de embalagens de cimento.** Dissertação (Mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2013.

SILVA, R. & ARNOSTI JR., S. **Caracterização do resíduo de construção e demolição (RCD) reciclado.** *Holos Environment*, v. 5, n. 2, 2007, p. 137-151.

SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. de. **Manual de Análises físico-químicas de Águas de Abastecimento e Residuárias.** 266p. Campina Grande, Paraíba - 2001.

SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X. **Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos.** 6. Ed. Rio de Janeiro/Brasil: LTC Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., 2000, cap. 3, 4 e 7.

SOBRAL, R. F. C. **Viabilidade Econômica de Usina de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil: Estudo de Caso da USIBEN - João Pessoa/PB.** Dissertação apresentada ao PPGEUA da UFPB. João Pessoa, 2012.

SPADOTTO, A., *et al.* **Impactos ambientais causados pela construção civil.** Unoesc & Ciência – ACSA, Joaçaba, v. 2, n. 2, p. 173-180, jul./dez. 2011.

TAVARES, A. M. G., *et al.* **Síntese e Caracterização de pastas de cimento aditivadas com Resina Epóxi – Análises cinéticas, Termodinâmicas e Calorimétricas.** 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, 21 a 25 de novembro de 2010, Campos do Jordão, SP, Brasil.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry.** 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

TOLEDO F. R. D., *et al.* **Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil.** *Cement and Concrete Research*, volume 37, pages 1357 – 1365, 2007.

TOWNSEND, T., *et al.* **Leaching Tests for Evaluating Risk in Solid Waste Management Decision Making.** Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management. Report No. 03-01. Gainesville, FL, USA. 2003.

TOWNSEND, T., *et al.* **Heavy metals in recovered fines from construction and demolition debris recycling facilities in Florida.** *Science of the Total Environment*, pages 1 -11, 2004.

VAN DER SLOOT, H. A. **Quick techniques for evaluating the leaching properties of waste materials: their relation to decisions on utilization and disposal.** *Elsevier Science*, v. 17, n. 5, 1998.

VAN GERVEN, T., *et al.* **Influence of carbonation and carbonation methods on leaching of metals from mortars.** *Cement and Concrete Research*, volume 34, pages 149-156, 2004.

VEDALAKSHMI, R., *et al.* **Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique.** *Thermochimica Acta*, n. 407, p. 49-60, 2003.

WHETSEL, K. **Infrared spectroscopy.** *Chemical & Engineering News*, v46, p. 82-96, 1968.

XAVIER, L. L. **Diagnóstico do resíduo da construção civil na cidade de Florianópolis.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, SC. 2001.

YOUSUF, M., *et al.* **Chemical and physical effects of sodium lignosulfonate superplasticizer on the hydration of Portland cement and solidification/stabilization consequences.** *Cem Concr Res*, v. 25, p. 671-682, 1995.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, SP. 1997.

ZWAN, J. T. **Application of waste materials – a success now, a success in the future.** In: *Waste Materials in Constructions: Putting Theory into Practice*. Great Britain, 1997. *Proceedings*. Great Britain, 1997.p.869-81.