

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

OTIMIZAÇÃO MULTIVARIADA DA SUBSTITUIÇÃO DE  
AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E  
DEMOLIÇÃO EM CONCRETO

JAYNE CARLOS PIOVESAN

MANAUS  
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JAYNE CARLOS PIOVESAN

OTIMIZAÇÃO MULTIVARIADA DA SUBSTITUIÇÃO DE  
AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E  
DEMOLIÇÃO EM CONCRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira

MANAUS  
2016

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

P662o Piovesan, Jayne Carlos  
Otimização multivariada da substituição de agregados de  
resíduos de construção e demolição em concreto / Jayne Carlos  
Piovesan. 2016  
89 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Raimundo Kennedy Vieira  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade  
Federal do Amazonas.

1. Resíduos. 2. Construção. 3. Concreto. 4. RCD. I. Vieira,  
Raimundo Kennedy II. Universidade Federal do Amazonas III.  
Título

JAYNE CARLOS PIOVESAN

OTIMIZAÇÃO MULTIVARIADA DA SUBSTITUIÇÃO DE  
AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E  
DEMOLIÇÃO EM CONCRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte do requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais e Componentes de Construção.

**Aprovado em 11 de agosto de 2016.**

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira, Presidente  
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos, Membro  
Universidade Federal do Amazonas

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Valdete Santos de Araújo, Membro  
Universidade do Estado do Amazonas

## **DEDICATÓRIA**

A Deus, primeiramente, pois sem ele ao meu lado não teria alcançado meus objetivos e aos meus pais que sempre me ajudaram, me dando forças para enfrentar os obstáculos que a vida nós traz e nunca duvidaram da minha capacidade.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a todos aqueles que de alguma forma me ajudaram para que eu realizasse este sonho de ser Mestre. Alguns contribuíram com um simples gesto de incentivo e força, outros com conhecimento técnico, com informações significativas e também, com a força e suor nos trabalhos pesados quando necessário.

Ao meu orientador Prof Dr Raimundo Kennedy Vieira, por ter me ajudado em todos os momentos que precisei e principalmente por ter se tornado um grande amigo.

A Construtora Bentotech por ter aberto suas portas e me deixado utilizar o seu laboratório e seus equipamentos. Também por ter cedido seus técnicos para me auxiliar em todos os ensaios necessários.

Ao Instituto Federal de Rondônia – IFRO por ter permitido o uso do laboratório para a realização de todos os ensaios de caracterização dos materiais usados na pesquisa com auxílio do Técnico e Engenheiro Reinaldo Morais e também meu amigo que me ajudou em todos os momentos dentro da Instituição.

A faculdade FARO pela iniciativa de fazer a parceria com a UFAM trazendo o mestrado e tornando o sonho de ser mestre real. Também pelo laboratório e os materiais doados para a realização de alguns ensaios.

Aos meus pais e minha irmã que sempre me apoiaram e me impulsionaram para a conclusão do meu trabalho e para mais uma etapa vencida na minha vida, pois a vitória é minha e deles.

Ao meu esposo Raduan que esteve todos os momentos ao meu lado, que me ajudou com força física em todos os meus ensaios realizado e com força moral a todo tempo me apoiando para que eu não desistisse de alcançar meu sonho.

Aos meus amigos da turma do mestrado pela parceria, por sempre um incentivar o outro nos momentos de desânimo.

Em especial a minha amiga Isabel Lopes, que esteve comigo me auxiliando na realização de uma etapa dos testes. Muito obrigada por ter cedido um pouco do seu tempo me ajudando, principalmente nos momentos de desespero.

Aos amigos, realmente amigos, que ao longo da vida eu conquistei, pelo apoio, incentivo, por torcerem pelo meu sucesso e também por entenderem minha ausência em muitos momentos que não pude estar presente.

*“Nós todos temos sonhos. Mas, para tornar os sonhos realidade, é preciso uma enorme quantidade de determinação, dedicação, autodisciplina e esforço.”*

*(Jesse Owens)*

## RESUMO

A indústria da construção civil representa um dos maiores setores no mundo e constitui-se em uma grande geradora de resíduos que são denominados resíduos de construção e demolição (RCD). O reaproveitamento desses resíduos é um fator importante, tanto para o meio ambiente como para as empresas, pois trazem muitos problemas devido à quantidade que é gerada e as substâncias que os compõe já que são de diversos tipos de materiais. Desta forma o objetivo deste trabalho é realizar um estudo para avaliar a possibilidade de reutilização desse tipo de resíduo em concreto utilizando um delineamento experimental para otimizar simultaneamente as variáveis de processo e os componentes de mistura. Neste trabalho, o concreto é composto de três componentes de misturas, sendo eles: cimento, agregado (gráúdo e miúdo) e água, e duas variáveis de processo que são o tamanho das partículas e a porcentagem de RCD que substitui o agregado natural. Os cálculos de regressão e as somas quadráticas da ANOVA são apresentados. O modelo linear-linear é mostrado, uma vez que não apresenta falta de ajuste. Considerando o nível da variável estudada, a condição ótima do concreto com RCD é de: 0,30mm para o tamanho das partículas de RCD, 25% de substituição do agregado natural pelo RCD, com 15% de cimento, 77% de agregados e 8% de água. As condições ótimas de mistura com 25% de RCD mostraram um valor de resistência à compressão do concreto superior a 19 MPA, permitindo o seu uso na construção civil em pré-moldados como blocos para pavimento, blocos de concreto, meio-fio, calçadas, contrapisos dentre outros artefatos de concreto que não requer função estrutural.

**Palavras-Chave:** Resíduos, construção, concreto e RCD.



## ABSTRACT

*The construction industry is one of the largest industries in the world and is in a major generator of waste called waste from construction and demolition (RCD). The reuse of this waste is an important factor, both for the environment and for businesses, as they bring many problems due to the amount generated and substances that makes up as they are of different types of materials. Thus the aim of this study is to conduct a study to assess the possibility of reuse of this type of waste in concrete using an experimental design to optimize simultaneously the process variables and blending components. In this work, the concrete is composed of three components of mixtures, namely: cement, aggregate (coarse and kid) and water, and two process variables which are the particle size and the percentage of RCD replacing natural aggregate. Regression calculations and quadratic sums of ANOVA are presented. The linear-linear model is shown as it presents no lack of fit. Considering the level of the variable under study, the optimal condition with concrete RCD is: 0.30mm for the particle size of the RCD, 25% replacement of natural aggregate by the DCO with 15% cement, 77% aggregates and 8 % of water. The optimum conditions of mixture with 25% of RCD showed a resistance value of concrete compression exceeding 19 MPA, allowing its use in construction in precast and block pavers, concrete blocks, curbs, sidewalks, subfloors among other concrete artifacts that does not require structural function.*

**Keywords:** Waste, construction, concrete and RCD.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Análise de variância - ANOVA .....	35
Figura 2- Fluxograma da metodologia de estudo .....	37
Figura 3 - Cimento Nassau utilizado .....	39
Figura 4 - Agregado miúdo reciclado obtido por moagem de RCD .....	41
Figura 5 - Agregado graúdo reciclado obtido por moagem de RCD.....	42
Figura 6 - Reciclador de entulho .....	43
Figura 7 – Betoneira .....	44
Figura 8 - Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão.....	45
Figura 9 - Local onde o resíduo foi coletado .....	46
Figura 10 - Pesagem e separação do material.....	50
Figura 11 - Corpos de prova em descanso para alcançar à cura.....	51
Figura 12 - Secagem dos corpos de prova .....	52
Figura 13 - Pesagem dos corpos de prova .....	52
Figura 14 - Descanso em água ambiente .....	53
Figura 15 - Fervura dos corpos de prova .....	53
Figura 16 - Pesagem com balança hidrostática .....	54
Figura 17- Pesagem do corpo úmido .....	54
Figura 18- Curva granulométrica média dos agregados miúdos natural e reciclado.	56
Figura 19 - Curva granulométrica média dos agregados graúdos natural e reciclado .....	57
Figura 20 - Gráfico de probabilidade normal dos valores de t - teste. Os pontos sobre a reta foram descartados.....	71
Figura 21 - Gráfico dos valores previstos pela Eq.(9) contra os valores experimentais. A linha representando a combinação exata também é mostrada .....	72
Figura 22 - Gráfico dos valores previstos residuais com os valores experimentais ..	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Ensaio realizados para caracterização do agregado miúdo natural (areia)	38
Tabela 2 - Ensaio realizados para caracterização do agregado graúdo natural (brita)	39
Tabela 3 - Ensaio realizados para caracterização do agregado miúdo reciclado (areia)	40
Tabela 4 - Ensaio realizados para caracterização do agregado graúdo reciclado (brita)	41
Tabela 5 – Características técnicas do reciclador de entulho	42
Tabela 6 - Traços usados e fator a/c	47
Tabela 7 - Planejamento fatorial $3^2$ com os tamanhos e proporções de RCD que substituem os agregados naturais, planejamento de misturas de água e proporções para o CRED	49
Tabela 8 - Massa unitária, massa específica e desvio padrão dos agregados graúdos	59
Tabela 9 - Massa unitária, massa específica e desvio padrão dos agregados miúdos	60
Tabela 10 - Porcentagem e desvio padrão do agregado graúdo reciclado e natural que passa na peneira 75 $\mu\text{m}$	61
Tabela 11 - Porcentagem e desvio padrão do agregado miúdo reciclado e natural que passa na peneira 75 $\mu\text{m}$	62
Tabela 12 - Porcentagem e desvio padrão do teor de torrões de argila e materiais friáveis dos agregados graúdo reciclado e natural	63
Tabela 13 - Porcentagem e desvio padrão do teor de torrões de argila e materiais friáveis dos agregados miúdos reciclado e natural	64
Tabela 14 - Taxa de absorção e desvio padrão dos agregados graúdo reciclado e natural	65
Tabela 15 - Taxa de absorção e desvio padrão dos agregados miúdo reciclado e natural	65
Tabela 16 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão	68
Tabela 17 - CRED anova – Mesa para o modelo linear-linear combinada	69
Tabela 18 - Parâmetros, erros padrão estimado e razão do t-teste para o modelo linear-linear combinado	70
Tabela 19 - Misturas, traços, substituição e peneira das cinco melhores misturas	74
Tabela 20 - Resistência a compressão das 5 misturas em triplicata	74
Tabela 21 - Parâmetros dados pela norma para comparação	76
Tabela 22 - Ensaio realizados para o teste de porosidade	77

## LISTA DE SIMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE – Associação brasileira de empresas e limpeza pública de resíduos especiais

ANOVA – Análise de variância

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CRED – Delineamento experimental inteiramente aleatório

FCK – Resistência característica do concreto à compressão

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

L-L – Linear - Linear

MPA – Mega Pascal

µm- Micrometro

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

RCD – Resíduo de construção e demolição

UFAM – Universidade Federal do Amazonas

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	14
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	17
2.1 Conceitos de Resíduos de Construções e Demolições .....	17
2.2 Classificações do RCD .....	18
2.3 Quantificação do RCD .....	19
2.4 Impactos ambientais causados pelo RCD .....	21
2.5 Soluções para diminuir os impactos ambientais causados pelo RCD .....	24
2.6 Aplicações reutilizando o RCD .....	29
2.7 Planejamento experimental .....	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1 Materiais .....	38
3.1.1 Agregado miúdo natural .....	38
3.1.2 Agregado graúdo natural.....	38
3.1.3 Aglomerante mineral .....	39
3.1.4 Agregado de RCD de uma residência unifamiliar .....	40
3.2 Equipamentos.....	42
3.2.1 Reciclador de RCD.....	42
3.2.2 Betoneira.....	43
3.2.3 Prensa para o ensaio de resistência a compressão.....	44
3.3 Métodos.....	45
3.3.1 Coleta dos resíduos .....	46
3.3.2 Moagem dos resíduos.....	46
3.3.3 Ensaio para determinação das características dos resíduos e dos agregados naturais .....	47
3.3.4 Determinação dos traços aplicados .....	47
3.3.5 Planejamento experimental.....	48
3.3.6 Procedimentos para a produção do concreto com RCD .....	49
3.3.7 Determinação da resistência à compressão dos concretos utilizando resíduo .....	51
3.3.8 Determinação do melhor traço .....	51
3.3.9 Determinação da porosidade do concreto composto por RCD .....	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	55
4.1 Características dos agregados miúdos e graúdos.....	55
4.1.1 Granulometria .....	55
4.1.2 Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro dos agregados graúdos .....	58
4.1.3 Massa específica e massa unitária .....	58
4.1.4 Teor de material fino que passa pela peneira de 75 µm (material pulverulento) .....	61
4.1.5 Teor de torrões de argila e materiais friáveis .....	63
4.1.6 Absorção .....	64
4.2 Resultados dos ensaios mecânico do concreto.....	67
4.2.1 Ensaio de Resistência à Compressão.....	67
4.2.2 Determinação do melhor traço .....	73
4.2.3 Teste para a porosidade do concreto.....	75

5 CONCLUSÕES .....	78
6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	79
REFERÊNCIAS .....	80
ANEXO A .....	89

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil representa um dos maiores e mais ativos setores no mundo e constitui-se em uma grande geradora de resíduos que são denominados resíduos de construção e demolição (RCD).

Segundo Kazmierczak (2008), na União Europeia são gerados em torno de 300 milhões de toneladas/ano de resíduos de construção e demolição, enquanto que no Brasil, só em São Paulo são gerados cerca de 6 milhões de toneladas/ano.

Segundo pesquisas realizadas por Holderbaum (2009), estima-se que no Brasil um total de 65 milhões de toneladas de resíduos de construção civil são gerados por ano. Estudos mostram que no Brasil, com o desperdício de resíduos de 3 obras é possível fazer mais uma.

A geração descontrolada de RCD deve ser freada rapidamente, afinal, o setor da construção civil é de grande importância para a economia brasileira porque serve de maneira eficaz para retomar o crescimento e diminuir o desemprego. E como comprovação uma pesquisa do IBGE de 2006 mostra que a indústria da construção civil foi responsável por 20,26% do PIB nacional, e, além disso, empregou cerca de 1,6 milhões de trabalhadores segundo Scremin (2007).

Mesquita (2012) estima que a massa de resíduos produzida pela construção civil brasileira representa até 60% da massa total de resíduos sólidos gerados pelos centros urbanos. Esta afirmação só vem nos mostrar que a quantidade de resíduos sólidos de RCD ocupa em torno de pelo menos 50% do volume total de resíduos sólidos produzidos pela municipalidade.

No Brasil, uma pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), indica que em 2012 os municípios brasileiros coletaram cerca de 35 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) segundo Brotti (2014).

Este enorme volume de resíduos gerados na construção civil tem, geralmente, como destinação final os aterros sanitários, sendo uma necessidade grande diminuir a utilização destes para este fim.

Além disso, têm-se ainda os recursos naturais que podem se esgotar caso continuem sendo utilizados de uma maneira desenfreada, já que, segundo Mariano

(2008), a construção civil é uma das indústrias que mais utiliza recursos naturais, onde estudos de Brasileiro e Matos (2015) apontam que este setor é responsável pelo consumo de 20 a 50% dos recursos naturais extraídos do planeta.

A disposição inadequada dos resíduos sólidos da construção civil traz vários problemas que podem ser considerados grandes e irreparáveis ao meio ambiente. Para solucionar estes problemas são necessárias soluções rápidas na tentativa de minimizar os impactos ambientais, as quais podem ser obtidas por meio da aplicação de métodos de reutilização ou incineração.

Todavia a reciclagem dos RCD não é uma prática amplamente utilizada que varia muito de um país para o outro, diz Scremin (2007); já Menezes et al (2011) afirmam que a reciclagem de RCD no Brasil é relativamente recente, o que é comprovado pelo número de trabalhos que relatam sobre o tema. A prática de reciclar e/ou reutilizar o RCD, além de minimizar os prejuízos, pode gerar lucro para o empreendedor, passando este a aplicar práticas mais sustentáveis.

A busca para reciclar e reutilizar os resíduos deve ser adotado como uma prática em todos os ramos da construção civil, de modo a possibilitar a diminuição dos resíduos, evitando assim, os desperdícios e conseqüentemente os impactos ambientais decorrentes desta atividade industrial.

As empresas que utilizam a prática de reutilizar o seu material descartado, além de ter um ganho na produção também pode minimizar o uso de material virgem em sua própria obra o que gera uma redução em seu custo de produção.

Em função do constante aumento de novas construções, e da pequena vida útil de boa parte dessas, a quantidade de RCD gerados pelo setor da construção civil tem aumentado, o que justifica a necessidade de buscar alternativas para reduzir a geração e o acúmulo desses resíduos.

Desta forma, o presente trabalho estuda as características do RCD para então verificar a viabilidade de reutilização deste resíduo como agregado no concreto, buscando contribuir para a intensificação de reutilização do RCD e assim tentando também diminuir o uso dos agregados naturais.



## **Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é estudar a viabilidade técnica de reutilização dos resíduos de construção e demolição em concreto utilizando a otimização multivariada.

## **Objetivos Específicos**

- Levantar os principais usos, aplicações e impactos dos resíduos sólidos de demolição e construção;
- Caracterizar o resíduo sólido de construção visando sua utilização como agregado no concreto;
- Determinar a melhor proporção e tamanho de RCD em substituição ao agregado convencional;
- Reconfeccionar os melhores pontos definidos através do planejamento experimental.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

Neste item é apresentada uma revisão da literatura onde serão apresentados conceitos, impactos ambientais e métodos de reaproveitamento, resultados de uma ampla pesquisa bibliográfica realizada na literatura técnica.

### **2.1 Conceitos de Resíduos de Construções e Demolições**

Os RCD são popularmente conhecidos pelo nome “entulho”, onde praticamente todas as atividades desenvolvidas na construção civil são geradoras de entulhos segundo Ribas (2008).

Estudos de Brasileiro (2013) mostram que RCD são resíduos oriundos de obras viárias, material de escavação, demolição de edificações, construções, renovação de edifícios, limpeza de terrenos e até mesmo de catástrofes naturais ou artificiais.

Segundo Cabral (2007) resíduos de construção e demolição são denominados de entulho e são rejeitos provenientes de construções, reformas, demolições de obras de construção civil, restos de obras e os da preparação e da escavação de terrenos.

Mas Ângulo (2011) aponta que a definição de RCD inclui todo e qualquer resíduo proveniente das atividades de construção, sejam eles de novas construções, reformas, demolições, obras de arte e limpeza de terrenos com presença de solos ou vegetação.

Para realizar este trabalho, preferiu-se adotar a definição dada pela Resolução 307 do CONAMA, que fala que resíduos da construção civil são aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os que resultam da preparação e da escavação de terrenos.

Os resíduos podem ser de diferentes tipos de materiais, como por exemplo, plásticos, material betuminoso, concretos em geral, metais, madeiras, argamassas, tijolos, telhas, blocos, gessos, tubulações, fiação elétrica, rochas, solos, resinas, colas, tintas e etc. segundo a resolução Nº 307 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente).

Com estes conceitos de RCD, pode-se então concluir que os resíduos que surgem das atividades de construção, demolição e reformas são materiais de várias composições e podem ser utilizados para reaproveitamento.

## 2.2 Classificações do RCD

De acordo com a NBR 10.004/2004, os resíduos podem ser classificados em:

- Resíduos classe I – Perigosos;
- Resíduos classe II – Não perigosos, estes por sua vez subdividem em:
  - ✓ Resíduos classe II A – Não inertes;
  - ✓ Resíduos classe II B – Inertes.

Os “Resíduos de Construção e Demolição” estão caracterizados nos resíduos de classe II B, por que possuem componentes minerais não poluentes e por serem praticamente inerte quimicamente.

Porém Rosa (2011), diz que o RCD é heterogêneo e os índices de ocorrência de substâncias tóxicas dependem da origem, do acondicionamento e da composição desses resíduos, o que poderia classificá-los em qualquer outra classe.

A Resolução nº 307 do CONAMA classifica os RCD, quanto ao seu potencial de reciclagem, da seguinte maneira:

- Classe A – São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis, tais como:
  - a) De construção, demolição, reforma e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
  - b) De construção, demolição, reformas e reparos de edificações – componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, etc.), argamassa e concreto;
  - c) De processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fio, etc.), produzidas nos canteiros de obras;
- Classe B – São resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

- Classe C – São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;
- Classe D – São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

### 2.3 Quantificação do RCD

Quantificar os RCD não é uma tarefa fácil, e Santos (2007) mostra que podem ser usadas três formas diferentes para isso: pela área construída, pela movimentação de cargas dos coletores e pela monitoração das descargas.

Porém os estudos de Santos (2007) mostram ainda que o monitoramento de cargas é a forma de quantificação mais difícil de ser realizada, pois não existe uma fiscalização eficiente na movimentação e descarga dos resíduos, e ainda conseqüentemente existe a ocultação destes resíduos no ambiente urbano onde ficam jogados em lugares indevidos.

Ganiron Jr (2015) exhibe em seu trabalho que a quantidade exata de RCD gerada nos EUA é desconhecida, pois muitos estados não fazem o controle da quantidade de detritos de RCD descartados ou reciclado.

Castaño et al (2013), apresenta nas suas pesquisas que no ano de 2013 foi gerado em Bogotá cerca de 15 milhões de toneladas/ano de resíduos de RCD, o que causa preocupação principalmente referente às questões ambientais.

Segundo Juric et al (2006), na Eslovénia cerca de 600 a 1000 kg de detritos de RCD são produzidos por pessoa ao ano, o que também se compara com outros países europeus.

Segundo Tam et al (2006), a quantidade de detritos de demolição despejados nos aterros sanitários do Reino Unido por ano chega a ser superior a 20 milhões de toneladas, sendo o grosso desse material composto por 50 a 55% de concreto, 30 a 40% de alvenaria e apenas pequenas porcentagens de outros materiais, tais como metais, vidros e madeira. Na Holanda cerca de 14 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição são gerados por ano, mas desse número já são reciclados cerca de 8 milhões de toneladas.

Em Portugal, estudos de Rodrigues et al (2013) apontam que a indústria da construção civil foi responsável pelo consumo de 37,4 bilhões de toneladas anuais de recursos retirados da natureza e, estima-se que até o ano de 2015 esses números possam chegar a 48 bilhões de toneladas.

Smical et al (2015) afirmam que na Europa anualmente são gerados cerca de 750 milhões de toneladas de RCD e isso representa cerca de 32,6% do total de resíduos resultantes da população e das indústrias.

Segundo Kazmierczak (2008) a quantidade de RCD gerada é significativa: na União Europeia, são gerados em torno de 300 milhões de toneladas/ano e no Brasil, somente na cidade de São Paulo, são gerados 6 milhões de toneladas/ano.

Segundo a Redimob (2010) no Brasil, estima-se que a geração dos resíduos de construção e demolição (RCD) seja na ordem de  $68,5 \times 10^6$  t/ano, e segundo o entrevistado Eng. Drº Sérgio Eduardo Zordan, no processo construtivo o alto índice de perdas do setor é a principal causa do entulho gerado, embora, nem toda perda se transforme efetivamente em resíduo a quantidade de entulho gerado correspondente, em média, a 50% do material desperdiçado.

Em diversos países, os resíduos da construção representam de 19 a 52% (m/m) do RCD, enquanto que os resíduos de demolição representam cerca de 50 a 81% (m/m) do RCD segundo Domingues (2013, apud Ângulo, 2000). No Brasil, cerca de 50% do RCD é originado da construção (construção informal e canteiros de obras) segundo o SINDUSCON-SP (2005).

Pesquisas realizadas pelo SINDUSCON – MG (2008) mostram que em Belo Horizonte os resíduos da construção civil representam em média aproximadamente 34% dos resíduos destinados diariamente para os equipamentos públicos. Atualmente, existem três unidades de em funcionamento: Usina do Estoril, Usina da Pampulha e Usina BR 040.

Segundo Miranda et al (2009) apesar de ter aumentado significativamente a quantidade de usinas depois da criação da resolução CONAMA 307 (2002), a capacidade brasileira de potencial de produção de agregados reciclados está muito abaixo da geração de RCD em todo o país.

Levando em consideração que todas as usinas brasileiras em funcionamento ou em fase de instalação estivessem reciclando RCD em sua capacidade nominal, ainda assim teríamos uma estimativa de que somente 3,6% do RCD produzido no país estariam sendo reciclado. Segundo Malta (2012), isso mostra que para que a

reciclagem no país se torne expressiva ainda é necessário instalar muitas usinas de reciclagem.

## **2.4 Impactos ambientais causados pelo RCD**

A resolução 01 do CONAMA define impacto ambiental como sendo qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, que é causada por qualquer forma de matéria ou energia que resultem das atividades humanas e que possam afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população.

A construção civil gera vários impactos em todas suas etapas, desde o início da construção até no fim da sua vida útil. Neste período é quando surge a maior quantidade de resíduos sólidos com a demolição da obra.

Além dos impactos negativos causados pela extração de matéria-prima para o uso na construção civil. Estes quantitativos de resíduo passam a ser percebidos pelas empresas e, novas maneiras de diminuí-los passam a ser aplicadas cada vez mais. Segundo Juric et al (2006), embora os resíduos de construção e demolição sejam classificados como não perigosos, causam poluição do ar, água e do solo.

Para Lu & Yuan (2011), os impactos negativos causados pela construção civil são muitos, como por exemplo, o esgotamento do solo e deterioração, emissão de consumo de energia, geração de resíduos sólidos, gás e poeira, ruído e poluição e o consumo de recursos naturais não renováveis.

Segundo Bravo et al (2015), o uso dos agregados naturais no concreto leva a altos impactos ambientais, tanto por causa da quantidade de emissão de CO<sup>2</sup> que são produzidos durante a sua extração, quanto pelo esgotamento dos recursos naturais.

Lockrey et al (2016) mostraram que reciclando os resíduos de construção e demolição seria limitado o uso de aterros sanitários para a deposição destes resíduos e também a necessidade de produzir materiais a partir de fontes virgens.

Calvo et al (2014) e Tam et al (2006) apresentam nos seus estudos que os resíduos de construção e demolição não são tratados adequadamente e acabam sendo levados para aterros de forma descontrolada consumindo assim uma taxa muito grande de aterros sanitários.

Os recursos naturais estão se esgotando com o passar do tempo, já se pode observar que em alguns lugares, certos tipos de materiais estão escassos diz Del

Rio Merino et al (2010), pois não há uma reutilização dos resíduos gerados, por isso a necessidade de um desenvolvimento sustentável com urgência.

Castaño et al (2013) e Marrero et al (2011), dizem que o grande volume de RCD causa vários impactos ao meio ambiente, pois sempre acabam em locais inadequados e não autorizados, causando alteração na paisagem e poluindo o solo e os aquíferos (recursos hídricos).

Poon e Chan (2006), Yuan e Shen (2010) e Yu et al (2012) destacam que há um crescimento grande de resíduos e isso preocupa muito, pois não há gerenciamento desses resíduos e assim acabam por utilizar espaços em aterros sanitários que em alguns lugares são preciosos pela falta de espaço para acomodar outros aterros.

Segundo Kumutha e Vijai (2006), a possibilidade de reciclagem dos resíduos de construção e demolição em indústrias de construção é de importância crescente. Além dos benefícios ambientais na redução da demanda de terras para eliminação do lixo, a reciclagem de resíduos de demolição também pode ajudar a preservar os materiais naturais e reduzir o custo de tratamento dos resíduos antes do descarte.

Os estudos de Ribas et al (2012) apontam que em Manaus, os maiores problemas urbanos são devidos as grandes quantidades de resíduos gerados pela construção civil, isso faz com que os aterros sanitários fiquem superlotados e eles não dispõem de capacidade para tanta demanda, além de que, este material ocupa o espaço que seria destinado ao lixo urbano da cidade.

Segundo Vancura et al (2009), embora os resíduos de RCD serem poucos utilizados em lajes correntes de pavimentos no Estados Unidos, o impulso para o seu uso contínuo permanece. Pois existe falta de espaços nos aterros sanitários e há também a falta de qualidade nas proximidades naturais de agregados.

Segundo Cabral et al (2012), o gerenciamento inadequado de resíduos de construção e demolição (RCD) vem causando graves problemas para a população, uma vez que eles são responsáveis por impactos negativos, como inundações, por causa dos fluxos de assoreamento, danos à paisagem, obstrução de estradas, proliferação de doenças, entre outros danos à saúde humana.

Os impactos causados pelos RCD apresentados nos estudos de Marzouk e Azab (2013) incluem: diminuição do espaço do aterro para a real necessidade devido a grandes quantidades destes resíduos dispostos na mesma e também os materiais de construção que estão se esgotando.

Além disso, Marzouk e Azab (2013) ainda apontam o aumento da contaminação dos aterros que levam a sérios efeitos negativos a saúde, os danos ao meio ambiente e o aumento do consumo de energia para transporte e fabricação de novos materiais.

O problema posterior é atribuído, por exemplo, à perda de energia incorporada dos resíduos dispostos que podem ser utilizados para produzir novos materiais de construção.

Os estudos de Wu et al (2013), Baniyas et al (2011) e Leiva et al (2012), mostram que se os resíduos de construção e demolição forem descarregados sem razão, os efeitos produzidos ao meio ambiente serão sérios, como a poluição do ar, poluição do solo e poluição da água.

Estes efeitos apresentados podem representar uma seria ameaça para a saúde humana e resultar em desperdício de recursos que são potencialmente recicláveis. Leiva et al (2012) ainda destaca o impacto econômico devido à eliminação de resíduos sem reciclagem ou reutilização de materiais.

Segundo Liu e Wang (2013) e Jingkuang et al (2012), os resíduos provocam um custo de transporte elevado e também ocupa terras que podem ser utilizadas para outros meios de recursos valiosos além de poluir o ambiente ecológico.

Liu e Wang (2013) destaca ainda a questão do pó que é gerado e distribuído no ar no transporte desses resíduos. Que além de causar uma grande poluição no ar, também prejudica a saúde do ser humano podendo causando doenças sérias.

Segundo Seror et al (2014), os resíduos de construção e demolição são despejados em terra nua, em florestas e em áreas cênicas, também causam danos estéticos à paisagem natural. Como materiais de construção geralmente contêm petróleo, solventes e combustíveis, estes produtos químicos podem vazar para o aquífero subterrâneo, contribuindo para a poluição da água subterrânea.

Segundo Yeheyis et al (2012), as atividades de construção consomem cerca de 32% de recursos do mundo, incluindo 12% de água e até 40% de energia. Aproximadamente, 40% de todas as matérias-primas são extraídas a partir da terra, e 25% de madeira virgem são utilizados para construção.

São mostrados através dos estudos de Hemalatha et al (2008), que os resíduos de construção e demolição criam impactos negativos sobre o meio ambiente, a economia e a saúde pública, como a poluição da água e do solo, poluição do ar, alterações climáticas, efeitos adversos sobre a flora e a fauna, perda



de recursos primários, efeito sobre o turismo e consumo de combustível para o transporte, riscos de saúde e a proliferação de pragas.

Considerando todos os impactos ambientais apresentados, é perceptível que os danos causados pelos resíduos de RCD são muitos, e eles atacam o meio ambiente, o meio social e a saúde humana, como exemplo, no meio ambiente causando a poluição da água, do solo e do ar.

Devido a isso, é necessário fazer mais aterros sanitários, pois os RCD superlotam os aterros existentes que seriam destinados para o lixo urbano, aumentam o consumo de energia, podem causar o assoreamento dos rios e ainda contribui com as mudanças climáticas.

O meio social também sofre, pois, o RCD causa várias alterações na paisagem com resíduos espalhados ou jogados em qualquer lugar. Além disso, temos ainda os danos causados a saúde humana que são muitos, como, por exemplo, a proliferações de doenças por causa do resíduo espalhado, o transporte que pode causar doenças pulmonares e também a água e o ar quando estão poluídos.

Os recursos naturais estão se esgotando com o passar do tempo, já se pode observar em alguns lugares que certos tipos de materiais estão escassos, por isso a necessidade de um desenvolvimento sustentável com urgência.

## **2.5 Soluções para diminuir os impactos ambientais causados pelo RCD**

A sustentabilidade no processo construtivo torna-se cada vez mais necessária para minimizar os impactos ambientais causados pelo setor. Por isso são procurados mais meios de reutilizar os resíduos sólidos de RCD para então diminuir os impactos.

Lockrey et al (2016) dizem em seus estudos que os benefícios da gestão de resíduos nas nações de países desenvolvidos são bem conhecidos, porém o potencial para aplicação destas práticas nos países em desenvolvimento não são.

Estudos realizados por Ganiron Jr (2015) mostram que a reciclagem é muitas vezes perseguida como o método mais preferível ambientalmente para a gestão de RCD. E ainda segundo ele encontrar um mercado para um produto de resíduo reciclado é o passo mais importante na determinação de um programa de reciclagem.

Segundo Kazmierczak (2008), a construção de políticas voltada para o gerenciamento de resíduos de construção civil, recentemente demanda aos municípios em função da regulamentação do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA N°307, está exigindo que as empresas de construção elaborem estratégias para minimização e destinação dos resíduos gerados durante o processo de construção.

Ainda segundo Ângulo et al (2011) a publicação da resolução CONAMA 307 motivou alguns municípios no Brasil a implantarem planos de gerenciamento, mas mesmo assim a maioria dos municípios ainda não implantaram nenhuma gestão de resíduo.

Segundo Saéz et al (2011), a DQA – Diretiva Quadro de Desperdício da União Europeia estabeleceu um alvo para os resíduos de RCD, em que até 2020 a reutilização, recuperação e a reciclagem utilizando resíduos como substituto de outros materiais, será aumentada para um mínimo de 70%.

Para isso será feita uma regulamentação para aterros diz os estudos de Saéz et al (2011), com um controle mais rigoroso de RCD, uma política de gestão de resíduos que deve ser desenvolvida por produtores de resíduos, compromisso voluntário da indústria da construção civil para reduzir resíduos de RCD em aterros sanitários e padrões de qualidade com a implementação de regulamentação e normas para matérias primas.

Segundo Del Rio Merino et al (2010), na Holanda a estratégia de gestão de resíduos deu certo, pois lá são reutilizados ou reciclados 90% dos resíduos de RCD. Essa alta taxa pode ser atribuída à política ambiental direcionada na redução da produção de resíduos, a separação de resíduos para evitar a contaminação e os incentivos para a indústria da construção civil no uso de materiais reciclados a partir de resíduos.

Saéz et al (2013), diz que a gestão realizada para os resíduos C & D ainda está longe de atingir o objetivo de reciclagem estabelecido no âmbito da Diretiva Quadro de Desperdício (DQA). Mas, na realidade, apenas 50% da C & D resíduos gerados na UE está reciclado.

Ao mesmo tempo ainda segundo Saéz et al (2013), vários países estão desenvolvendo leis específicas para estabelecer um quadro jurídico para produção e gestão dos RCD, para incentivar a prevenção, reutilização e reciclagem, garantindo que os resíduos serão devidamente tratados.

Uma maneira de alcançar este objetivo é aplicar o design sustentável de construção. Estudos de Kozlovská e Spisáková (2013) mostram que em termos de produção e gestão de resíduos de construção é o design sustentável que é relacionado com a utilização de novas tecnologias de construção inovadoras que proporcionam a redução de resíduos de construção, em seguida, diminuindo o custo total para a eliminação de resíduos e da eliminação do impacto negativo da construção para o ambiente.

A efetiva gestão de RCD é indispensável para a realização de construções sustentáveis segundo Yuan (2013). E Nagalli (2013) apontam que os engenheiros precisam incorporar novas práticas além da gestão de resíduos para alcançar uma forma aceitável de desenvolvimento sustentável. Mas infelizmente existem alguns construtores e empresários que consideram um custo alto para realizar a gestão de resíduos principalmente aqueles que não praticam de nenhuma forma de gestão.

Segundo Calvo et al (2014), nos últimos anos, tem sido desenvolvidas tentativas de criações de modelos de gestão de resíduos de RCD na Espanha, tentando conciliar o progresso econômico com projetos sustentáveis de construção e demolição.

Na União Europeia foi criado um quadro regulamentar com a Diretiva 99/31/CE relativo à disposição em aterros segundo Calvo et al (2014), o regulamento dos 3R – Reduzir, Reutilizar e Reciclar – visando à construção sustentável. Alguns dos objetivos do quadro incluem reduzir os resíduos que acabam em alienações finais, incineração ou aterros locais, também economizar recursos naturais, e ganhando um melhor controle dos resíduos de RCD e aterros não autorizados.

Estudos de Santos (2007), diz que países como a Finlândia, Dinamarca, Inglaterra e a Suécia impõe taxas para a exploração e extração de matérias-primas provenientes das atividades de mineração, isto é usado como forma de minimizar a exploração de recursos naturais e para incentivar a utilização dos resíduos de construção e demolição.

Yuan e Shen (2010), também apresentam três estratégias (reduzir, reutilizar e reciclar) na hierarquia da gestão de resíduos e os métodos são conhecidos como 3Rs da gestão de RCD, que tem sido utilizado como princípios básicos para a realização outra gestão de resíduos de construção e demolição.

A União Europeia e outros organismos internacionais têm estabelecido políticas e hierarquias de gestão de resíduos sólidos que incentiva a reutilização e redução dos resíduos sólidos através de esforços de reciclagem. No campo destas políticas, os estudos de López-Gayarre et al (2009) mostram que sob o Segundo Plano Nacional de resíduos de construção e demolição, realizado na Espanha, estão sendo realizados os estudos para avaliar a viabilidade do uso agregados, obtidos a partir do RCD em produtos de concreto estruturais.

Sob o desenvolvimento global da construção sustentável, o governo de Taiwan se esforça para tratar e reciclar resíduos de construção e demolição segundo Lin et al (2010). E para controlar o envio destes resíduos para usinas de reciclagem ou aterros sanitários, um número crescente de municípios está exigindo que os locais (empresas) de construção apresentem um planejamento do tratamento de resíduos antes de começar um projeto.

O plano deve estimar a quantidade esperada de construção e demolição de resíduos, e apresentar claramente tanto para onde eles vão ir e como a maneira que eles serão tratados. E segundo Leiva et al (2012), o primeiro passo para a correta gestão e controle de resíduos é a quantificação correta, o segundo passo é a classificação destes para assim partir para a análise de reciclagem.

Segundo Kumbhar et al (2013) um plano de gestão de resíduos de construção bem-sucedida envolve todas as principais partes de um projeto: proprietário, arquiteto, engenheiro, empreiteiro e subempreiteiro. Envolvendo cada uma das partes no início do projeto e processá-lo assim é mais fácil de alcançar as metas estabelecidas.

Além disso, Ying et al (2011) destaca que a consciência ambiental da sociedade também deve ser aumentada para que o governo incentive o entusiasmo de utilização de recursos de resíduos de construção.

Kofoworola e Gheewala (2008) concluiu nos seus estudos que para desenvolver uma indústria da construção sustentável, o plano de gestão de resíduos deve ser totalmente implementado em conjunto com medidas que estimulem a recuperação e reciclagem de resíduos de construção. Esforço também deve ser dirigido para minimizar geração de resíduos de construção através da melhoria da capacidade de gestão das empresas na concepção, aquisição e produção estágios.

Segundo Ismam e Ismail (2014), que ao permitir o crescimento do desenvolvimento, é importante para o governo formular estratégias de planejamento

da gestão de resíduos com base em algumas medidas para facilitar a todas as partes interessadas identificadas como ação estratégica que poderia ser feito para lidar com os resíduos criados em diferentes fases da construção indústria. Caso contrário é padronizar a gestão de resíduos na indústria da construção.

Segundo Mália et al (2011), a fim de preservar o meio ambiente e garantir a correta gestão dos RCD, uma grande variedade de regulamentações ambientais tem sido estabelecida. A maioria dessas leis procura minimizar e controlar os RCD. No entanto, é difícil cumprir e fazer cumprir a legislação existente quando não existem ferramentas que permitam controlar a quantidade de RCD produzidos.

Após o fim da Segunda Guerra Mundial, a maioria dos regulamentos em nações desenvolvidas tem incentivado a gestão de resíduos de construção e demolição dizem os estudos de Yeheyis et al (2012). Muitos destes regulamentos foram promulgados para reduzir os impactos ambientais.

Segundo Ortiz et al (2010) os resultados de vários outros estudos sugerem que a reciclagem é a maneira mais ecológica de descarte de resíduos de construção, seguido por incineração e aterro sanitário.

É importante avaliar a quantidade de resíduos de construção e demolição sendo gerado e práticas adequadas também são necessárias para lidar com os resíduos, a fim de propor uma abordagem sustentável.

A gestão de resíduos de construção e demolição deve ser dada a devida consideração durante toda a duração de um projeto, a fim de promover uma abordagem integrada. Para Shetty (2013), o sistema de gestão de resíduos deve ser planejado e implementado, integrado e sustentável.

Segundo Porras et al (2014), a inadequada gestão de resíduos dos centros urbanos tem sido objeto de análise a nível nacional e internacional. Efetuando soluções como a implementação de sistemas produtivos, e projetos de unidades de reciclagem, uma que os agregados reciclados têm permitido considera-los como matérias prima de alto potencial para reincorporação na produção de novos produtos.

Tam (2011) diz ainda que a redução de custos de eliminação ainda na fase de projeto pode ser uma solução, e também que o custo de transporte e custo de novos materiais fazem com que seja buscado mais a reutilização dos resíduos.

É necessário continuar agindo, porém com mais rapidez, pois cada dia fica mais complicado para solucionar estes problemas causados pelos resíduos de

construção e demolição, e como mostrado através dos vários trabalhos literários citados existem diferentes maneiras de diminuir esses impactos.

## **2.6 Aplicações reutilizando o RCD**

Segundo Valdés et al (2010), na Espanha da quantidade de resíduos de construção e demolição que são gerados, são reciclados 28% deles, já os países que tem conhecimento nesta área como, por exemplo, na Holanda são reciclados 95%, a Inglaterra com 45% e a Bélgica com 87 % de resíduos reciclados.

Dentre tantas possibilidades as pesquisas de Malta (2012) mostram que a reciclagem de RCD pode ser utilizada em diferentes aplicações, tais como: camadas de base e sub-base para pavimentação, coberturas primárias de vias, fabricação de novos concretos, fabricação de argamassas de assentamento e revestimento, fabricação de pré-moldados como blocos, meio-fio, camadas drenantes e muitas outras aplicações.

Rosa (2011) apresenta em seus estudos que agregados mistos, como o RCD tem sua aplicação limitada a concretos de menor resistência, como blocos de concreto, contra-pisos, camadas drenantes, etc.

São mostrados nos estudos de Ferreira (2010), que o RCD pode ser utilizado em várias situações, como a incorporação dos agregados reciclados no concreto, na argamassa, também em pavimentos rodoviários e sistemas de drenagem. São inúmeras as aplicações que se podem dar aos agregados reciclados de RCD podendo estes substituir os agregados naturais na grande maioria das situações.

Muitas empresas já estão adotando as gestões de resíduos como regulamentam as normas de resíduos sólidos na tentativa de minimizar os impactos causados ao meio ambiente que infelizmente são grandes e alguns já irreparáveis.

Uma aplicação importante do derivado de reciclagem do RCD é a produção de agregados para ser utilizado em outras construções. E segundo Del Rio Merino et al (2010), há uma oportunidade significativa para expandir o uso de agregados recuperados para reduzir tanto o uso de fontes virgens quanto o volume de RCD. Isto requer a eliminação dos resíduos para não ocuparem um lugar que já não existe.

A principal forma de reciclagem de RCD consiste na moagem do resíduo e sua posterior utilização na confecção de concretos, argamassas ou na execução de

bases de pavimentação. Um dos principais exemplos de reciclagem de RCD, no Brasil como aponta os estudos de Kazmierczak (2008), é o de Belo Horizonte, onde o material reciclado é usado para a construção de bases para pavimentação.

Com relação ao uso do resíduo de construção e demolição na pavimentação os estudos de Silva et al (2015), mostraram que o agregado reciclado usado na pavimentação não afeta a resistência e nem a durabilidade do pavimento. E, além disso, o uso do RCD contribui para a redução dos resíduos gerados pela construção civil.

Segundo Morand (2016), aterramento, base e sub-base de pavimentação são alguns dos mais usuais procedimentos de reutilização do RCD. Vários estudos já apontaram que o resíduo pode ser reutilizado para estes fins.

Após estudos e testes realizados por Smical et al (2015), foi possível verificar que os RCD obtiveram bom resultados e o concreto se mostrou de boa qualidade quando comparado com o concreto padrão. Ainda apresentam que estes resíduos podem ser utilizados como matérias-primas secundárias, para a obtenção de novos produtos para serem utilizadas principalmente na indústria da construção.

Estão sendo realizados estudos na Espanha como é apresentado por López-Gayarre et al (2009), para avaliar a viabilidade da utilização de agregados derivados de resíduo de RCD em produtos de concreto estrutural dizem os estudos realizados.

Segundo Valdés et al (2010), há um aumento espetacular da procura de agregados, e em conjunto com as restrições ambientais óbvias em pedreiras sem controle, levou à proposta de dentro do setor de substituição de resíduos reciclados como uma alternativa para parte dos agregados utilizados na mistura do concreto. Um concreto capaz de incorporar estes resíduos seria um eficiente eco- material.

Após a separação a partir de outros resíduos RCD, o entulho de concreto pode ser esmagado e utilizado como um substituto para agregados graúdos naturais como é mostrado por Safiuddin et al (2010). O concreto processado de escombros passa a ser conhecido como agregado reciclado de concreto.

Evangelista e Brito (2007) realizaram ensaios utilizando resíduos de construção e demolição de granulometria miúda, e os resultados experimentais indicam que é viável a produção de concreto feito com o material de agregado reciclado fino, sendo adequado para concreto estrutural.

E logo depois, Evangelista e Brito (2009) aprofundaram o estudo no uso do RCD de granulometria miúda, estudando os efeitos quanto à permeabilidade à água, a absorção capilar e a difusão de cloreto.

Kumutha e Vijai (2006) realizaram ensaios de compressão utilizando agregado reciclado e o traço por ele utilizado foi 1(cimento) :1,66(agregado fino) :3,46(agregado grosso). A força alvo da sua pesquisa era de 20 MPA, e substituiu 20%, 40%, 60% e 100% (em peso) de agregado reciclado utilizando um fator água/cimento de 0,50 em todas as misturas.

Os resultados dos rompimentos do estudo de Kumutha e Vijai (2006) mostraram que com 28 dias e com 20% de substituição do agregado natural por agregado reciclado foi possível obter uma resistência à compressão de até 28,86 MPA, as outras porcentagens também obtiveram resultados acima de 20 MPA, porém nenhum chegou ao resultado utilizando a substituição de 28,86 MPA.

Ribas et al (2012), realizou ensaios usando o traço convencional de 1:2:3, e fazendo substituições de agregados naturais por agregados reciclados, utilizou um fator água/cimento de 0,58 e obteve resultados positivos, pois os rompimentos para 28 dias apresentaram resultados de até 24,53 MPA. Cabral et al (2012), mostrou com uma serie de ensaios realizados que se usar um fator água/cimento de 0,60 os resultados da resistência a compressão podem chegar até 34 MPA.

Lintz et al (2012), efetuou seus ensaios de resistência à compressão usando o traço 1:3,5:2,5 e fez substituições do agregado natural pelo agregado reciclado de 20%, 50%, 80% e 100%. O fator água/cimento utilizado neste estudo foi de 0,80 e o rompimento foi realizado com 14 e 28 dias de cura.

Os resultados dos ensaios de Lintz et al (2012) mostraram que os valores de resistência à compressão não diferem estatisticamente entre cada um, pois o nível de significância é menor do que 5% entre o rompimento com 14 dias e o rompimento com 28 dias. Também concluiu que para o concreto a resistência à compressão limita o uso de RCD em até 50%, pois acima de 50% de substituição houve uma grande queda da resistência.

Lage et al (2010) dizem que os restos de resíduos de RCD podem ser usados para enchimento e nivelamento de áreas industriais, edifícios industriais, obras de construção, obras de trincheiras, caminhos florestais e estradas rurais.

Nos países em desenvolvimento usos mais específicos foram encontrados para reciclagem do RCD é o que afirmam os estudos de Malta et al (2013), e um



deles é a produção de areia reciclada para argamassas. Tais como argamassas para o assentamento de alvenaria ou para reboco, pois como há uma escassez habitação de baixo custo em tais países sendo necessárias estratégias para um custo benefício.

Pesquisas de Tam et al (2006), indicam que no Reino Unido 40% dos resíduos de demolição são reciclados, sendo usados principalmente para aplicação de baixo grau, como preenchimentos e assentamentos. A utilização para um grau superior tais como concreto, foi desencorajada devida a falta de especificações adequadas.

Como foi demonstrado por todos os autores citados, são várias as maneiras de reutilização dos RCD, como por exemplo, na execução de pavimentos tanto para estradas rodoviárias como para pistas de aeroportos, também podem ser usados para cobrir os aterros depois que são retirados às substancias perigosas. Porém onde são mais utilizados e na fabricação de concreto para funções não estruturais.

## **2.7 Planejamento experimental**

Vieira et al (2010) utilizou esta metodologia para determinar a proporção ideal e tamanho do pneu de borracha que pode ser adicionado ao concreto para melhor desempenho. A primeira etapa desta metodologia é definir o delineamento experimental para planejar como as variáveis serão estudadas.

O delineamento experimental utiliza a otimização multivariada, que é uma técnica que tem ganhado bastante força, apontam os estudos de Peralta-Zamora et al (2005). E assim demonstrando a sua utilidade nos mais variados campos do conhecimento.

Segundo Vieira et al (2015), a vantagem do design experimental multivariado é que o custo configuração é mínimo, porém, é improvável que seja detectado ou identificado um erro de configuração. Além disso, tem a interação entre os fatores que só pode ser descoberto por meio de estratégias multivariadas.

Cada problema de otimização depende da natureza estatística das variáveis envolvidas e irá exigir um tipo específico de concepção experimental para ser aplicada. As variáveis podem ser agrupados em duas classes gerais:

Misturas - nessas variáveis, as suas propriedades dependem da proporção de cada componente e não as suas quantidades absolutas. A quantidade de cada

componente do sistema deve ser tratada como uma variável (variável de mistura), que não é independente dos outros (isto é, quando a uma alteração de quantidade, as proporções dos outros também mudam), que, em termos matemáticos, podem ser como descritos na Eq 1, segundo Bahiense et al (2008):

$$0 \leq x_i \leq 1, \quad \sum_{i=1}^q x_i = 1 \quad (1)$$

Logo, temos o “q” como o número de componentes da mistura e o  $x_i$  como os próprios componentes.

Variáveis de processo - estes são fatores que não fazem uso de qualquer porção da mistura, embora quando os níveis são mudanças de variáveis, que podem afetar as propriedades do componente da mistura. As variáveis de processo são independentes e podem mudar sem limitação segundo Coscione et al (2005).

E segundo Bortoloti et al (2004), os modelos geralmente usados para descrever os efeitos das variáveis de processo são os modelos lineares (Eq 2) e modelos bilineares (Eq 3):

$$\text{Linear: } \hat{y} = \alpha_0 + \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 \quad (2)$$

$$\text{Bilinear: } \hat{y} = \alpha_0 + \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 + \alpha_{12} z_1 z_2 \quad (3)$$

Ainda segundo Bortoloti et al (2004), os modelos que são mais utilizados para descrever a influência da mistura são as variáveis: linear (Eq 4), quadráticas (Eq 5) e cúbica especiais (Eq 6) descritas:

$$\text{Linear: } \hat{y} = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \quad (4)$$

$$\text{Quadrática: } \hat{y} = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 \quad (5)$$

$$\text{Cúbica especial: } \hat{y} = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (6)$$

Onde:

$\alpha$  é os parâmetros do modelo do processo neste caso, os efeitos;

$\beta$  é os parâmetros do modelo de mistura;

$z$  é a variável de processo;

$x$  a variável de mistura e

$y$  representa o valor da resposta prevista pelo modelo de regressão.

No entanto, estas variáveis (de processo e de mistura) podem ser de diversos sistemas em que qualquer um tem uma influência decisiva. Bahiense et al (2008) diz que existem outros tipos de sistemas em que a variável de resposta depende de ambas as proporções dos componentes da mistura (variáveis de mistura) e os efeitos das variáveis de processo.

Segundo Vieira et al (2015), o processo do concreto, onde as variáveis da mistura são os componentes da mistura (ex. Agregados, água e cimento), são afetadas por alterações nas condições do processo (tais como o tamanho e proporção de substituição de agregado).

Para esta situação, é vantajoso utilizar uma estratégia de concepção que gera um modelo de quantificar este tipo de interação. Neste caso as interações entre as variáveis podem ser percebidas através de um modelo combinado que pode ser obtido através da combinação de modelos de mistura e modelos de processo.

Assim, é possível obter um modelo combinado da multiplicação de um modelo variável de processo por um modelo de mistura. Vieira et al (2015) exemplifica o modelo combinado bilinear-linear que é obtido multiplicando a Eq. (2) pela Eq. (4), que chegará na seguinte equação:

$$\hat{y} = \delta_{01}X_1 + \delta_{02}X_2 + \delta_{03}X_3 + \delta_{11}X_1 Z_1 + \delta_{21}X_2 Z_1 + \delta_{31}X_3 Z_1 + \delta_{12}X_1 Z_2 + \delta_{22}X_2 Z_2 + \delta_{32}X_3 Z_2 \quad (7)$$

Onde,  $\delta_{ij}$  é a combinação dos fatores  $\alpha_i$  e  $\beta_j$ .

Os problemas que envolvem forma simultânea de mistura e variáveis do processo podem ser encontrados na literatura, em que as experiências foram realizadas de um modo completamente aleatório dizem os autores Hosseini et al (2014), Coetzer e Haines (2013) e Vieira et al (2010).

Existem centenas de problemas de otimização multivariada descritos na literatura citados, por exemplo, por Vieira et al (2015) e também Jamil e Yang (2013). Mas, há um número limitado de casos em que a aplicação de ambos os tipos de variáveis podem ocorrer de forma simultânea.

Por isso os estudos de Coscione et al (2005), mostram que este tipo de concepção envolve frequentemente o ajuste de um grande número de variáveis, a fim de obter o conjunto ideal de condições experimentais que produzem os resultados desejados.

Ainda segundo Vieira et al (2010), algumas destas variáveis não são facilmente ajustadas e não pode ser incluídas em um delineamento experimental inteiramente casualizado, mantendo um programa de otimização viável. As partes variáveis estão incluídas em um subconjunto, geralmente aquelas que são difíceis de ajustar e as outras variáveis de um segundo subconjunto.

Por sugestão de Montgomery (2008), o planejamento fatorial contém apenas dois fatores, A e B, com “a” e “b” sendo os respectivos níveis e “n” replica. Considerando então as experiências aleatórias realizadas, a análise do modelo de variância pode ser representada por:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (8)$$

Onde:  $i = 1, 2, \dots, a$ ;  $j = 1, 2, \dots, b$ ;  $k = 1, 2, \dots, n$ ;

$\mu$  é a média global de todas as respostas;

$\alpha_i$  representa os efeitos de tratamento com o fator A  $i^{\text{th}}$ ;

$\beta_j$  representa os efeitos de tratamento com fator B  $j^{\text{th}}$ ;

$\delta_{ij}$  efeito das interações entre A e B;

$\varepsilon_{ijk}$  representa um erro aleatório.

Para se validar o modelo, há a necessidade de fazer uma análise de variância, a ANOVA, que é o caminho comum para verificar se os efeitos são estatisticamente significativos ou não segundo Timossi (2009). O princípio geral da ANOVA que é apresentada na Figura 1 é dividir a variabilidade total das observações nos seus componentes.

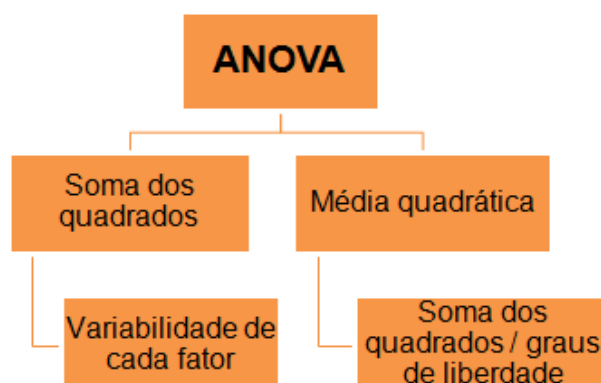


Figura 1 - Análise de variância - ANOVA

Assim, a soma dos quadrados é calculada, o que representa a variabilidade atribuída a cada um dos fatores, bem como o que vem a partir do erro experimental e dividindo o valor da soma ao quadrado pelos seus respectivos graus de liberdade, significa que a média quadrática é obtida, o qual é usado em testes de F, a fim de verificar a hipótese de testes anteriormente mencionados. É mostrado por Vieira et al (2010), o design ANOVA com aleatorização completa de experiências.

Vieira et al (2015), também apresenta nos seus estudos que os coeficientes do modelo estatístico são normalmente obtidos por método dos mínimos quadrados, pela equação matricial:  $(X^T X)^{-1} (X^t y)$ , em que X representa a matriz de desenho convencional e o Y, o vetor de resposta observada.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados, os equipamentos necessários para os ensaios e os métodos e procedimentos que foram adotados e desenvolvidos para atingir os objetivos propostos pelo trabalho de pesquisa. O fluxograma, apresentado na Figura 2, mostra como foi a metodologia do presente estudo.

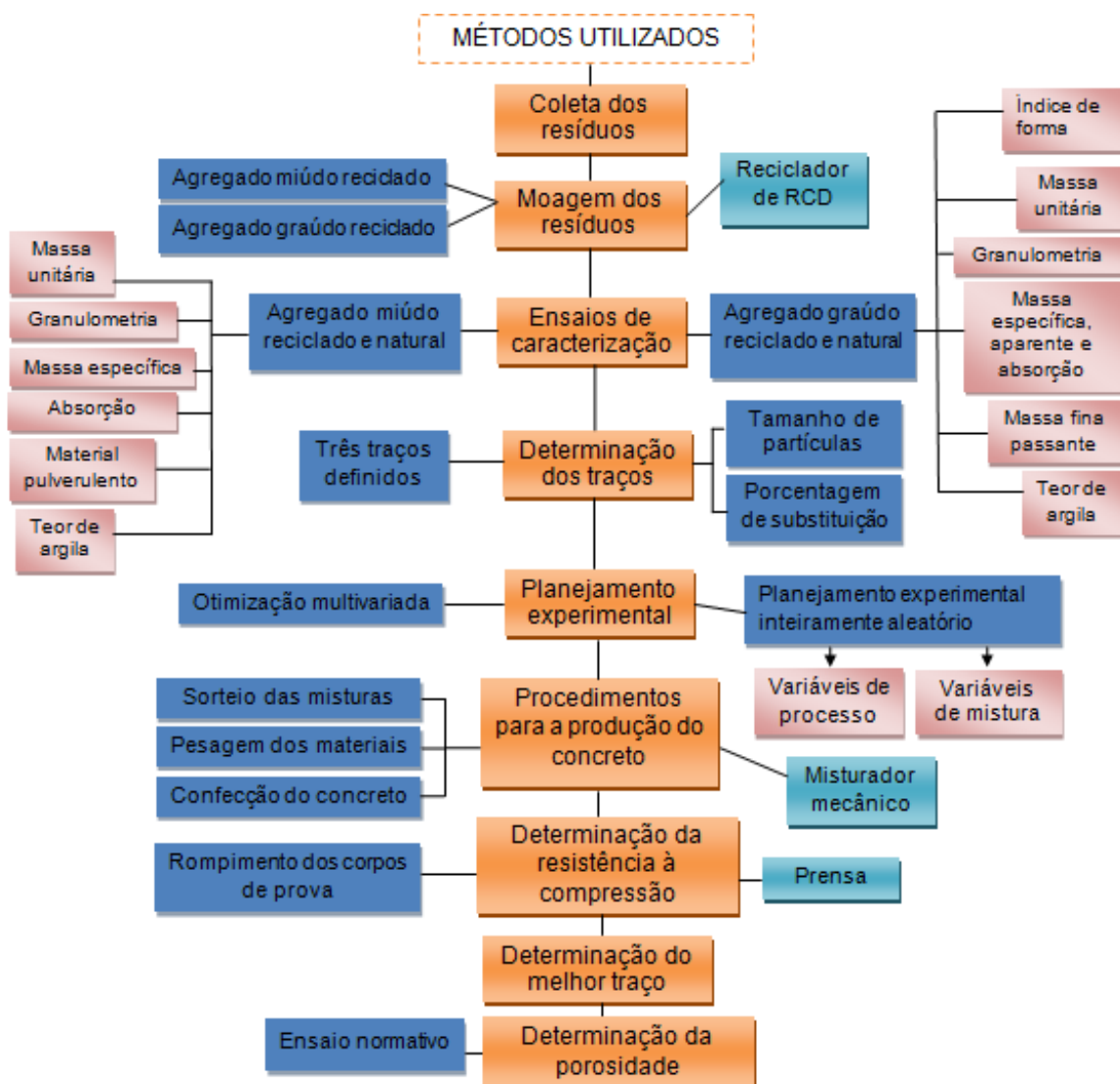


Figura 2- Fluxograma da metodologia de estudo

### 3.1 Materiais

Os ensaios de caracterização dos materiais foram desenvolvidos conforme as normas da ABNT necessárias para classificar os materiais que foram utilizados. A caracterização do material foi realizada no Laboratório de Edificações II no IFRO - Instituto Federal de Rondônia. São descritos a seguir os materiais utilizados na pesquisa.

#### 3.1.1 Agregado miúdo natural

O agregado miúdo natural utilizado foi à areia natural quartzosa, que foi adquirida no comercio local de Porto Velho. Os ensaios granulométricos foram realizados conforme a NBR NM 248:2003. A Tabela 1 apresenta todos os ensaios que foram realizados para caracterizar o agregado miúdo natural.

Tabela 1- Ensaios realizados para caracterização do agregado miúdo natural (areia)

Características	Métodos
Composição granulométrica – Módulo de finura	NBR NM 248: JUL/03
Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro	NBR 7809: SET/05
Massa unitária	NBR 7251: ABR/82
Teor de material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem	NBR NM 46: JUL/03
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	NBR 7218: AGO/87
Massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman	NBR 9776: MAR/87
Absorção de água	NBR NM 30/ MAI/01

#### 3.1.2 Agregado graúdo natural

O agregado graúdo natural utilizado foi à brita natural, que também foi adquirida no comercio local de Porto Velho. A brita utilizada em Porto Velho é obtida através de granitóides e foi a mesma que é usada para concreto, conhecida como

brita 1. A Tabela 2 mostra os ensaios que foram realizados para caracterizar o agregado gráudo natural.

Tabela 2 - Ensaio realizados para caracterização do agregado gráudo natural (brita)

Características	Método
Composição granulométrica	NBR NM 248: JUL/03
Massa unitária	NBR 7251:ABR/82
Teor de material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem	NBR NM 46:JUL/03
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	NBR 7218:AGO/87
Agregado gráudo – Determinação massa específica, massa específica aparente e absorção	NBR NM 53:JUL/03

### 3.1.3 Aglomerante mineral

O aglomerante utilizado na pesquisa foi o cimento Portland CP IV-32 como mostra na Figura 3, da marca NASSAU, cujas características são fornecidas pelo fabricante do produto.



Figura 3 - Cimento Nassau utilizado

O trabalho foi realizado em três etapas distintas, onde na primeira etapa confeccionou-se 54 corpos de prova, em seguida foram confeccionados 15 corpos de prova e por fim apenas 6 corpos de prova, logo foram usados três lotes de cimento com datas diferentes, porém sendo todos da mesma marca e do mesmo tipo.



Os lotes utilizados foram das fabricações de agosto de 2014, abril de 2015 e setembro de 2015, todos eles referentes ao período que foram realizadas as diferentes etapas do estudo.

### 3.1.4 Agregado de RCD de uma residência unifamiliar

O resíduo sólido objeto de estudo (RCD) foi coletado em uma obra de residência unifamiliar que se encontrava em fase de demolição da alvenaria, ou seja, é um resíduo composto de argamassa, alvenaria e concreto. O material foi coletado de uma só vez e passou por um processo de moagem para chegar ao tamanho necessário das partículas, já que foram utilizadas partículas dos tamanhos grãos e miúdos.

Os ensaios realizados para a caracterização dos resíduos foram os mesmos ensaios realizados para a caracterização dos agregados naturais. Logo os ensaios realizados para o agregado reciclado miúdo foram os mesmos usados para a caracterização do agregado natural miúdo e estes ensaios constam na Tabela 3.

Tabela 3 - Ensaios realizados para caracterização do agregado miúdo reciclado (areia)

<b>Características</b>	<b>Métodos</b>
Composição granulométrica – Módulo de finura	NBR NM 248: JUL/03
Massa unitária	NBR 7251:ABR/82
Teor de material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem	NBR NM 46:JUL/03
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	NBR 7218:AGO/87
Massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman	NBR 9776:MAR/87
Absorção de água	NBR NM 30/ MAI/01

Já os ensaios realizados para a caracterização do agregado reciclado grão, foram os mesmos realizados com o agregado natural grão. Na Tabela 4 estão descritos os ensaios e suas respectivas normas:

Tabela 4 - Ensaio realizados para caracterização do agregado graúdo reciclado (brita)

Características	Método
Composição granulométrica	NBR NM 248: JUL/03
Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro	NBR 7809: SET/05
Massa unitária	NBR 7251:ABR/82
Teor de material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem	NBR NM 46:JUL/03
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	NBR 7218:AGO/87
Agregado graúdo – Determinação massa específica, massa específica aparente e absorção	NBR NM 53:JUL/03

Após a coleta como já mencionado anteriormente, esses materiais foram triturados utilizando um reciclador de entulho na Empresa Casa Fácil, e separados no processo de trituração pelo próprio equipamento que já separa automaticamente o material graúdo do material miúdo, como mostrado nas Figuras 4 e 5:

- Material que passa na peneira 4,8mm, considerado agregado miúdo (Figura 4);
- Material retido na peneira 4,8mm, considerado agregado graúdo (Figura 5).



Figura 4 - Agregado miúdo reciclado obtido por moagem de RCD



Figura 5 - Agregado graúdo reciclado obtido por moagem de RCD

### 3.2 Equipamentos

São apresentados alguns dos equipamentos utilizados neste estudo, são eles: o reciclador de entulho usado para triturar o resíduo, a betoneira usada para confeccionar as misturas de concreto e a prensa onde foi realizado os rompimentos dos corpos de prova.

#### 3.2.1 Reciclador de RCD

O equipamento utilizado para triturar o RCD, foi um moinho que minimiza os grãos transformando-os em agregado reciclado miúdo e graúdo. Este equipamento é acionado por motor elétrico blindado e de baixo consumo com a possibilidade de trabalhar isoladamente com alimentação manual, ou ser incorporado a um sistema de reciclagem com alimentação constante. Os dados técnicos estão listados na Tabela 5 e foram descritos pelo seu fabricante.

Tabela 5 – Características técnicas do reciclador de entulho

Dados técnicos	
Produção média (fino + brita)	1,1 m <sup>3</sup> /h
Altura de descarga dos finos	510 mm
Abertura das mandíbulas ajustáveis	6 – 16 mm
Largura total	760 mm
Abertura de entrada das mandíbulas	200 x 170 mm

Comprimento total	1950 mm
Altura da moega de alimentação	1500 mm
Motor elétrico, trifásico, blindado, 200/380 v	3 / 4 kW / cv
Altura de descarga da brita	570 mm
Consumo de energia	3 kW/h
Peso	780 Kg

Autor: VEGEDRY

Como mostrado na Tabela 5, este equipamento foi fabricado pela Vegedry máquinas e equipamentos do Paraná, o modelo é o Queixada 200 P. Conforme o resíduo for sendo inserido no equipamento, já vai sendo moído e separado embaixo como mostra a Figura 6. Somente uma empresa em Porto Velho – RO tem esse equipamento, que é na Empresa Casa Fácil, do Engenheiro Fábio.



Figura 6 - Reciclador de entulho

### 3.2.2 Betoneira

O equipamento utilizado para misturar os agregados foi uma betoneira das marcas Vencedora/Maqtron, uma empresa que iniciou em 1995 com a marca Maqtron, porém logo foi adicionada à empresa a marca Vencedora. A Vencedora/Maqtron é uma empresa de importação e exportação Ltda.

O modelo do equipamento utilizado é o M-130 que tem capacidade para 130 litros, motor elétrico de 1/3 CV, 1.730 rotações por minuto com a correia A-42. A

empresa se situa em Joaçaba/SC. A Figura 7 mostra uma foto do equipamento sendo utilizado na preparação das misturas.



Figura 7 – Betoneira

### 3.2.3 Prensa para o ensaio de resistência a compressão

O equipamento utilizado para o ensaio de resistência a compressão dos corpos de prova foi uma “Prensa Hidráulica Elétrica com Indicador Digital”, da marca solotest com capacidade para 100 toneladas força, com indicador eletrônico digital simples ou microprocessado e bomba eletro-hidráulica. Possui pistão especial com guias e vedações em teflon e bronze para maior durabilidade e função S.U.P. no mostrador, que mantém eletronicamente a carga máxima atingida pelo corpo de prova. A prensa também tem as seguintes características:

- Menor divisão do mostrador: 0,01tf (10kgf);
- Curso máximo do pistão: 30 mm;
- Alimentação: 110/220 V - 50/60 Hz.

É possível a aquisição de dispositivos não inclusos para rompimento de outros tipos de corpos de provas. Conforme normas: NBR 12767, 7680, 5739; DNER-ME091e NM 101. A prensa é mostrada na Figura 8.



Figura 8 - Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão

### 3.3 Métodos

O trabalho dividiu-se em nove fases, e as quais serão detalhadas nesta seção na mesma sequência de execução a seguir:

- ✓ Coleta dos resíduos
- ✓ Moagem dos resíduos
- ✓ Ensaio para determinação das características do resíduo e dos agregados naturais
- ✓ Determinação dos traços aplicados
- ✓ Planejamento experimental
- ✓ Procedimentos para a produção do concreto com RCD
- ✓ Determinação da resistência à compressão dos concretos com resíduo
- ✓ Determinação do traço ótimo
- ✓ Determinação da porosidade do concreto composto por RCD

### 3.3.1 Coleta dos resíduos

O presente trabalho estudou o resíduo proveniente de uma demolição feita em uma residência unifamiliar, que por motivos de alagamento teve que ser demolida para a construção de uma nova residência, pois a estrutura estava comprometida.

O resíduo utilizado no trabalho foi retirado apenas dessa obra para facilitar a coleta e também por que não havia muitas obras no estágio inicial e que disponibilizasse o RCD na cidade no período do desenvolvimento da pesquisa. Os resíduos foram coletados no próprio local onde foi gerado, no mês de junho de 2014, quando a residência foi demolida, conforme a Figura 9.



Figura 9 - Local onde o resíduo foi coletado

### 3.3.2 Moagem dos resíduos

Após a coleta como já descrito anteriormente, os resíduos foram levados para serem triturados, pois como apresentado os resíduos foram recolhidos com uma dimensão grande. Estes foram triturados utilizando o reciclador de RCD, onde o próprio equipamento faz uma separação primária dos resíduos, dividindo-os em miúdos e graúdos.

Depois de concluída a trituração do material, este foi levado ao laboratório para realizar os ensaios de caracterização. Os agregados naturais como foram adquiridos no comercio local já estavam dentro das dimensões utilizadas.

### 3.3.3 Ensaio para determinação das características dos resíduos e dos agregados naturais

Os ensaios realizados para caracterizar os resíduos e os agregados naturais já foram descritos acima. Foram usadas então as mesmas normas para caracterizar o resíduo graúdo e o agregado natural graúdo, como estão descritos nos itens 2.1.2 e 2.1.3.

Para o agregado reciclado miúdo e o agregado natural miúdo também foram utilizadas as mesmas normas que já foram mencionadas e estão descritas nos itens 2.1.1 e 2.1.3. Todos os ensaios foram executados seguindo as normas, não foram realizados mais ensaios por falta de tempo e pelo trabalho ter outro objetivo.

### 3.3.4 Determinação dos traços aplicados

Conforme a revisão bibliográfica apresentada, foram escolhidos três traços a partir dos trabalhos de Kumutha e Vijai (2006), Ribas et al (2012) e Lintz et al (2012), os quais obtiveram valores para resistência à compressão acima de 20 MPa, cujo concreto com este valor é considerado estrutural, de acordo com a NBR 6118/2013.

Após os traços escolhidos, foi montado um planejamento combinando as substituições do agregado natural pelo agregado reciclado, com valores de 15%, 20% e 25% (em peso) e variando os tamanhos das partículas usadas nas misturas, que podiam variar de acordo com os tamanhos de 0,30mm, 4,80mm e 9,50mm. Na Tabela 6 constam os traços com seus respectivos fatores água/cimento e o consumo de cimento para o traço padrão que variou conforme as combinações das substituições dos agregados.

Tabela 6 - Traços usados e fator a/c

Traços usado	Fator a/c	CP (kg/m <sup>3</sup> )	Autor
1:1,66:3,46	0,5	482,6 kg	Kumutha e Vijai (2006)
1:2:3	0,6	482,6 kg	Ribas et al (2012) / Cabral et al (2012)
1:3,5:2,5	0,8	482,6 kg	Lintz et al (2012)



Para realizar o planejamento foram escolhidas as variáveis de processo, que são o tamanho das partículas dos resíduos através das malhas das peneiras e a proporção de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado. A proporção escolhida foi de 15%, 20% e 25%, pois a literatura mostra que quanto mais aumenta a proporção de substituição mais a resistência à compressão baixa.

Para a escolha do tamanho das partículas, foram usadas como parâmetro as granulometrias encontradas dos agregados naturais e reciclados na caracterização destes, logo a peneira 0,3 mm foi escolhida, pois nela ficou retida a maior quantidade de agregado natural (areia) e de agregado reciclado miúdo. Já a peneira 4,8 mm por que nela ficou retida a maior quantidade de agregado reciclado graúdo, e a peneira 9,5 mm porque foi onde ficou retida a maior quantidade de agregado graúdo natural (brita).

### **3.3.5 Planejamento experimental**

Na elaboração deste trabalho, foram utilizados agregados miúdos e graúdos naturais e reciclados de RCD como variáveis de produção do concreto juntamente com água e cimento, que constituem as variáveis de mistura.

As variáveis do processo foram escolhidas, assim como descrito anteriormente utilizando a granulometria das partículas de RCD e sua porcentagem que substituiu o agregado natural no concreto.

O delineamento experimental utilizado neste estudo seguiu o CRED (planejamento experimental inteiramente aleatório) com uma mistura de variáveis incorporadas dentro das variáveis do processo, como apresentado por Vieira (2010).

As variáveis de mistura utilizadas foram: cimento, agregado e água, e as duas variáveis de processo: tamanho das partículas de RCD e a proporção de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado que foram ajustadas simultaneamente.

A Tabela 7 mostra as três misturas de cimento incluídas no delineamento e as suas respectivas proporções de cimento, agregados e água, bem como a concepção fatorial  $3^2$  para as variáveis de processo definidas.

Tabela 7 - Planejamento fatorial  $3^2$  com os tamanhos e proporções de RCD que substituem os agregados naturais, planejamento de misturas de água e proporções para o CRED

Processo	Z <sup>a1</sup>	Z <sup>a2</sup>	Tamanho RCD (mm)	% substituída de RCD
1	-1	-1	0,30	15,0
2	0	-1	4,80	15,0
3	1	-1	9,50	15,0
4	-1	0	0,30	20,0
5	0	0	4,80	20,0
6	1	0	9,50	20,0
7	-1	1	0,30	25,0
8	0	1	4,80	25,0
9	1	1	9,50	25,0

Misturas	Cimento (X1)	Agregado (X2)	Água (X3)
1	0,15	0,77	0,08
2	0,15	0,76	0,09
3	0,13	0,77	0,10

Foram usadas como respostas analíticas as resistências à compressão (MPa) com referencia de 28 dias para todas as condições experimentais que são apresentados logo mais nos resultados. Foram testados diferentes modelos de combinações, que foram formados por modelos combinando duas variáveis de processo com as variáveis mistura como mostradas na Eq. 2-6 e também na Eq. 7.

### 3.3.6 Procedimentos para a produção do concreto com RCD

Após as escolhas dos parâmetros foi montado o planejamento experimental que totalizou 54 corpos de prova para a primeira etapa do trabalho, onde 27 foram gerados por todas as possíveis combinações e os outros 27 são as replicas necessárias para fazer a comparação e obter o desvio padrão entre eles.

Logo após montar o planejamento, foi realizado um sorteio das misturas ao qual foi sorteado em qual sequencia seria pesado e separado o material. O sorteio é uma etapa importante da realização do trabalho, pois o planejamento experimental para obter êxito necessita que suas etapas sejam realizadas de uma maneira

aleatória, por isso, desde a pesagem até a confecção dos traços foi seguido esse padrão. Logo após o sorteio de cada mistura os materiais foram pesados e acondicionados em sacos como mostra na figura 10.



Figura 10 - Pesagem e separação do material

Para a produção do concreto utilizou-se a seguinte sequência para adição dos componentes na betoneira: Agregado graúdo natural ou reciclado - parte da água de amassamento – cimento - agregado miúdo natural ou reciclado - restante da água. A moldagem dos corpos de provas foi conforme a NBR 5738/1994 - Moldagem e Cura de Corpos de Prova Cilíndricos.

Foram utilizadas fôrmas cilíndricas nas dimensões de 15x30cm com uma fina camada de óleo mineral para facilitar a desforma. O adensamento foi manual com 25 golpes dados em cada camada, e as camadas totalizavam em 3 de acordo com o tamanho do corpo-de-prova conforme a NBR 5738/94.

Após 24 horas da moldagem os corpos de prova foram desformados e identificados com pincel a base de água, além disso, utilizou-se uma espécie de “mapa” quando os corpos de prova foram depositados na água por questões de precaução.

Logo, depois de retirados das formas os corpos de prova foram levados para uma caixa de concreto com água a um nível que os cobrissem possibilitando a sua cura. Os corpos de prova permaneceram até a data do rompimento realizando o processo de cura do concreto por 28 dias, como mostra na Figura 11.



Figura 11 - Corpos de prova em descanso para alcançar à cura

### **3.3.7 Determinação da resistência à compressão dos concretos utilizando resíduo**

Para a realização deste ensaio utilizou-se a ABNT NBR NM 101/96 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. A resistência à compressão dos concretos produzidos foi determinada aos 28 dias e os resultados constam mais abaixo.

### **3.3.8 Determinação do melhor traço**

Após os primeiros corpos de prova confeccionados, foram realizadas análises através do planejamento experimental e se encontrou as melhores misturas. Estas foram confeccionadas utilizando novamente a ABNT NBR NM 101/96 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos e os resultados foram novamente analisados para encontrar o traço ótimo.

### **3.3.9 Determinação da porosidade do concreto composto por RCD**

Para determinar a porosidade do concreto já em estado endurecido utilizou-se a ABNT NBR 9778:2005 – Corrigida em 2009 que trata de “Argamassa e concreto endurecidos – Absorção de água, índices de vazios e massa específica.”. O ensaio foi realizado apenas no traço ótimo e logo após completar a cura, ou seja, com 28 dias de confeccionados e de imergidos em água.

O ensaio dura aproximadamente uma semana, pois são várias as etapas que devem ser realizadas para a conclusão deste. Na Figura 12 os corpos de prova estão na estufa, onde ficaram por um período de 72 horas para passar pela primeira fase.



Figura 12 - Secagem dos corpos de prova

Depois das 72 horas que os corpos de prova passaram na estufa, eles foram retirados e pesados como mostra a Figura 13 e depois imersos em um recipiente com água e com temperatura ambiente onde permaneceram por mais 72 horas como mostra a Figura 14.



Figura 13 - Pesagem dos corpos de prova



Figura 14 - Descanso em água ambiente

Para o próximo passo, os corpos de prova foram colocados em um recipiente cheio de água e foram levados à ebulição ao qual permaneceram por 5 horas, e conforme a água ia evaporando ela era repostada na mesma temperatura como mostra a Figura 15.



Figura 15 - Fervura dos corpos de prova

Após as 5 horas em que os corpos de prova ficaram em ebulição, foram retirados da água e deixados por algumas horas para esfriarem naturalmente e então com uma balança hidrostática foi determinada a massa de cada amostra imersa em água mostrada na Figura 16. E por fim as amostras foram secas com um pano úmido e determinado as suas massas como mostra a Figura 17.



Figura 16 - Pesagem com balança hidrostática



Figura 17- Pesagem do corpo úmido

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais, os resultados das resistências no rompimento de 28 dias juntamente com os dados obtidos pelo planejamento experimental elaborado, a reconfeção dos corpos de prova para apresentar a melhor proporção de substituição e o melhor tamanho das partículas do resíduo utilizado no concreto e a porosidade da melhor mistura de concreto obtida.

### **4.1 Características dos agregados miúdos e graúdos**

A seguir serão apresentados os resultados das propriedades de todos os ensaios realizados de acordo com suas respectivas normas para caracterizar o material que foi utilizado no concreto.

#### **4.1.1 Granulometria**

A distribuição granulométrica do agregado graúdo e miúdo, natural e reciclada, foi determinada de acordo com a norma NBR NM 248:2003. Foram realizados para cada agregado (areia, brita, resíduo graúdo e resíduo miúdo) três ensaios para precisão dos dados.

A distribuição granulométrica miúda de acordo com a NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação, apresentou um módulo de finura do agregado de resíduo miúdo que o classifica na zona utilizável inferior.

Por outro lado, o módulo de finura do agregado natural (areia) ficou entre a zona ótima e foi classificada como sendo areia média. As curvas granulométricas mostradas na Figura 18 apresentam as porcentagens médias das amostras do agregado natural e reciclado miúdo.



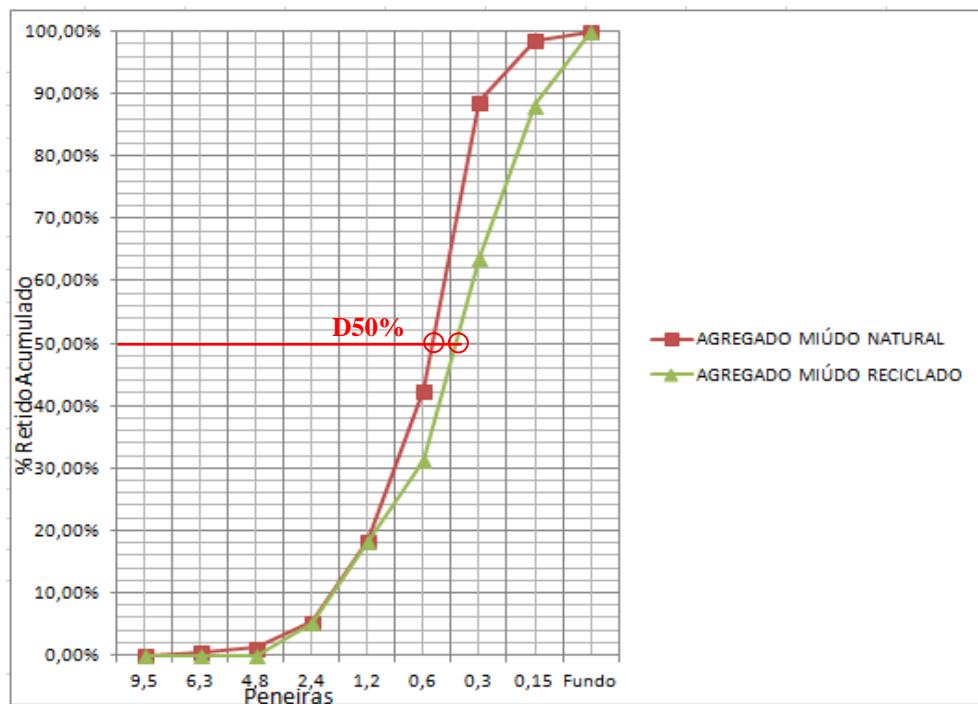


Figura 18- Curva granulométrica média dos agregados miúdos natural e reciclado

Pode-se verificar a partir da Figura 18 que o resíduo miúdo tem uma granulometria mais fina que a areia. Isto pode ser observado através do parâmetro conhecido como D50%, em que 50% do percentual de material retido acumulado do resíduo miúdo estava presente na peneira de diâmetro de 0,30mm, e 50% do material retido acumulado do agregado miúdo natural também ficou na peneira 0,30mm, porém com esta porcentagem muito próxima a peneira 0,60mm.

Percebe-se também que o resíduo miúdo começou a ficar retido a partir da peneira de 2,4mm, enquanto o agregado miúdo natural obteve massa retida desde a peneira 6,3mm. A porcentagem de material inferior à peneira de 0,30mm (ou seja, peneira de 0,15mm e fundo) do resíduo miúdo foi de aproximadamente 30% maior em relação ao agregado miúdo natural.

Através da análise da curva granulométrica resultante pode-se perceber que os agregados não deram resultados absurdamente diferentes, porém o diâmetro máximo que caracteriza o agregado miúdo natural foi maior, sendo este de 6.3mm e a do agregado miúdo reciclado de 2,4mm.

Logo, nota-se que o agregado miúdo reciclado possui uma dimensão de partícula menor quando comparado ao agregado natural, o que pode ser observado através do D50%. Esse fato deve-se as características do britador e também do

próprio tipo de resíduo utilizado, devido o resíduo ser composto por alvenaria de tijolos cerâmicos e argamassas, o que se desagrega e se rompe com facilidade.

As curvas granulométricas que estão representadas na Figura 19 apresentam as porcentagens médias rebitada acumuladas nas peneiras das amostras do agregado natural e reciclado graúdo.

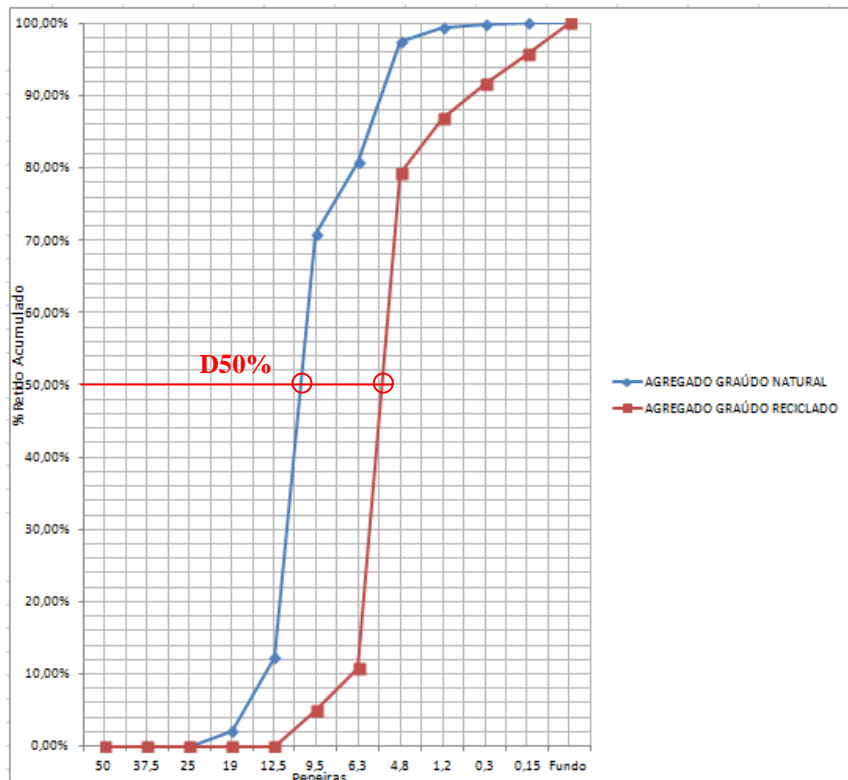


Figura 19 - Curva granulométrica média dos agregados graúdos natural e reciclado

De acordo com a Figura 19 percebe-se que o resíduo graúdo tem os tamanhos de suas partículas menores que o agregado graúdo natural. Isto pode ser observado através do parâmetro D50%, em que 50% do percentual de material retido acumulado do resíduo graúdo ficou na peneira de diâmetro de 4,8mm, já o agregado graúdo natural ficou com 50% retido acumulado na peneira 9,5mm.

Observa-se que os diâmetros máximos dos agregados do resíduo graúdo e da brita foram diferentes, pois a brita utilizada para esse trabalho foi a utilizada em concreto que é a brita 1, e o fato de o resíduo ter sido moído mecanicamente contribuiu para que o diâmetro máximo fosse menor.

Em também consequência disto, pode-se observar que a porcentagem de material do resíduo graúdo que ficou retido na peneira de diâmetro 4,8 mm foi consideravelmente maior.

O fato de ter ficado retido porcentagens de material do agregado reciclado graúdo nas peneiras inferiores a 0,30 mm, pode ter sido por causa da constituição do material que têm em sua composição partículas de alvenaria de tijolos cerâmicos e argamassa que se destorroa com facilidade quando está sendo vibrado para peneirar o material.

Os materiais inferiores a 0,3mm ajudam, porque torna a mistura de concreto menos áspera, e diminui assim a tendência de o concreto segregar, já a fração inferior a 0,15mm presente na granulometria do agregado pode ter vantagens e desvantagens, dependendo da porcentagem pode melhorar ou prejudicar algumas propriedades, por exemplo, a resistência do concreto segundo Ribas (2008).

#### **4.1.2 Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro dos agregados graúdos**

Os resultados dos ensaios do índice de forma dos agregados graúdos pelo método do paquímetro foram determinados conforme exige a norma NBR 7809. Foram realizados apenas nos agregados graúdo natural e reciclado.

Após a realização dos ensaios, o valor encontrado para o índice de forma do agregado graúdo reciclado foi de 2,16. Para o agregado graúdo natural, a brita, foi encontrada um índice de forma com o valor médio de 2,24. Os valores encontrados foram próximos um do outro.

Os índices de forma encontrados atendem aos requisitos exigidos pela norma, que não deve ser maior que 3 para o emprego como agregado em concreto. Isto indica que o agregado tem eficiência na produção de concreto, pois agregados com o índice de forma maior que 3 podem atrapalhar a trabalhabilidade da mistura do concreto.

#### **4.1.3 Massa específica e massa unitária**

Os ensaios da massa específica e unitária para os agregados graúdos e miúdos foram realizados conforme exigem as normas NBR NM 53, NBR 9776 e NBR

7251 respectivamente. Os ensaios foram realizados para cada agregado em tréplica para a precisão dos resultados.

Todas as médias com os respectivos desvios padrão relativas aos resultados encontrados para os ensaios do agregado gráudo reciclado e agregado natural constam na Tabela 8.

Tabela 8 - Massa unitária, massa específica e desvio padrão dos agregados gráudos

<b>Tipo de agregado gráudo</b>	<b>Massa unitária (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa específica saturada seca (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa específica (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa aparente (kg/dm<sup>3</sup>)</b>
Reciclado	1,05 ±0,0361	2,08 ± 0,1012	2,50 ±0,0208	1,80 ±0,0568
Natural (Brita)	1,52 ±0,0500	2,45 ± 0,0556	2,93 ±0,0208	2,20 ±0,0264

Analisando os dados mostrados na Tabela 8, percebe-se que a massa unitária do resíduo gráudo ficou consideravelmente abaixo da massa unitária da brita, isso pode ter sido influenciado por uma serie de fatores, como por exemplo, a granulometria, o diâmetro das partículas, a forma dos agregados e o índice de vazios de cada tipo.

Observando as médias dos resultados, é possível ver que a massa específica do agregado reciclado gráudo com relação ao agregado natural gráudo é de aproximadamente 15% mais baixa. São mostrados pelos estudos de Gonçalves (2011), que os agregados reciclados geralmente possuem massa específica menor do que os agregados naturais.

Porém, segundo Ribas (2008, apud Leite, 2001), esta porcentagem encontrada com os resultados está fora da faixa de valores para massa específica de agregado reciclado, que pelos seus estudos é considerado de 5% a 10% mais baixo do que o agregado natural.

No entanto, os agregados reciclados têm origens e granulometria diferentes, portanto, essa porcentagem de pode variar entre os agregados reciclados, pois dependem destes fatores entre outros.

Ainda segundo Cordeiro (2013) vários podem ser os fatores envolvidos para a grande variabilidade da massa específica e da massa unitária dos agregados

reciclados encontrados nas literaturas, como por exemplo, a resistência do concreto que originou o reciclado, o tipo de britador utilizado, método de ensaio utilizado ou a granulometria.

A massa unitária média do agregado reciclado graúdo foi cerca de 30% menor do que o agregado natural graúdo, e essa diferença elevada entre eles pode ter sido influenciada por causa da granulometria e também pelo diâmetro das partículas.

Com relação ao agregado reciclado, foi observado que os valores para a massa específica e massa unitária são estatisticamente iguais tanto para os agregados reciclados graúdos quanto para os agregados reciclados miúdo.

Na Tabela 9 são apresentados os valores médios e o desvio padrão para as massas unitárias e específicas do agregado miúdo reciclado e do agregado miúdo natural, neste caso a areia.

Tabela 9 - Massa unitária, massa específica e desvio padrão dos agregados miúdos

<b>Tipo de agregado miúdo</b>	<b>Massa unitária (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa específica (kg/dm<sup>3</sup>)</b>
Reciclado	1,21 ± 0,01	2,50 ± 0,0643
Natural (Areia)	1,33 ± 0,0208	2,63 ± 0,0450

Pode-se observar através da Tabela 9 que a massa unitária da areia também ficou maior que a massa unitária do agregado reciclado miúdo que pode ter sido influenciada pelos mesmos fatores que levaram a brita ter uma massa unitária maior que o agregado reciclado graúdo.

Porém, é possível verificar que a massa específica do agregado reciclado miúdo com relação ao agregado natural miúdo é de aproximadamente 5% mais baixa, o que segundo foi relatado na literatura está dentro da faixa de valores para a massa específica diferindo assim do acontecido com a comparação entre os agregados reciclado e natural graúdo que ficou fora desta faixa.

A massa unitária média do agregado reciclado miúdo foi cerca de 9% menor do que o agregado natural graúdo, e essa diferença pequena entre eles mostra que suas partículas são próximas umas das outras.

Logo, a massa específica e massa unitária dos agregados utilizados demonstraram que os agregados miúdos naturais e reciclados tiveram uma melhor aproximação de resultados e ficaram dentro da faixa de valores para comparação que foi encontrado na literatura. E já os agregados graúdos naturais e reciclados ficaram com resultados distantes entre eles e assim não ficaram dentro dos valores encontrados na literatura para comparação.

#### 4.1.4 Teor de material fino que passa pela peneira de 75 µm (material pulverulento)

A NBR NM 46:2003 determina a percentagem de partículas de argila e outros materiais que se dispersam por lavagem, como os materiais solúveis em água. Na Tabela 10 constam as percentagens de material fino que passa na peneira 75µm, por lavagem, dos agregados graúdo reciclado e natural.

Tabela 10 - Percentagem e desvio padrão do agregado graúdo reciclado e natural que passa na peneira 75 µm

Tipo de agregado graúdo	Percentagem de material fino que passa na peneira de 75 µm	Percentagem exigida pela NBR 15116
Reciclado	1,38% ± 0,0057%	10%
Natural (Brita)	0,32% ± 0,0006%	1%

A NBR 15116 estabelece para o agregado reciclado e natural graúdo a percentagem máxima de material fino que pode passar na peneira de 75 µm que é 10% para o agregado reciclado graúdo e 1% para o agregado natural graúdo. Observa-se pelo resultado que os agregados reciclado e natural graúdo ficaram dentro das percentagens estabelecidas.

O agregado reciclado graúdo apresentou uma percentagem de material fino que passa na peneira de 75 µm cerca de 77% maior do que o agregado natural graúdo. Isso pode ocorrer pelo fato do agregado natural graúdo, neste caso a brita, ser pobre de materiais finos, e já no caso do resíduo por mais que seja graúdo tem mais resquícios de materiais finos pelo tipo de material que o compõe.

Segundo estudos de Tenório (2007), o teor de finos e de materiais pulverulentos é variável e depende de alguns fatores como a composição do resíduo, a sua origem, a granulometria do resíduo, do equipamento usado na minimização dos resíduos e ainda outros fatores.

Tabela 11 - Porcentagem e desvio padrão do agregado miúdo reciclado e natural que passa na peneira 75  $\mu\text{m}$

<b>Tipo de agregado miúdo</b>	<b>Porcentagem de material fino que passa na peneira de 75 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Porcentagem exigida pela NBR 15116</b>
Reciclado	15,6% $\pm$ 0,0162%	20%
Natural (areia)	4,7% $\pm$ 0,0015%	3 a 5%

Na Tabela 11 constam as porcentagens de material fino que passa na peneira 75 $\mu\text{m}$ , por lavagem, dos agregados reciclado e natural miúdo. É possível observar que os agregados miúdos natural e reciclado continham porcentagens de materiais pulverulento inferior ao exigido pela norma.

É notório que também houve uma diferença de material fino que passa na peneira de 75  $\mu\text{m}$  do agregado reciclado miúdo quando comparado com o agregado natural miúdo. O agregado miúdo reciclado tem cerca de 30% mais materiais pulverulentos do que o agregado miúdo natural.

Com relação a todas as porcentagens encontradas, é possível observar que tanto o agregado reciclado miúdo quanto o gráudo tiveram porcentagens maiores que os agregados naturais miúdo e gráudo. Segundo Tenório (2007) isto é normal, pois o teor de finos e de materiais pulverulentos dos agregados reciclados tende a ser maior do que nos agregados naturais.

É importante os agregados atenderem a norma quanto à porcentagem de material fino inferior a 75 $\mu\text{m}$ , pois isto ajuda ainda mais na possibilidade de usar os agregados reciclados em concretos. Outro fator que deve ser levado em consideração é quanto à presença de partículas de cimento e de materiais cerâmicos nesse material, o que pode favorecer um ganho na resistência e a redução no consumo de cimento segundo Ribas (2008, apud Leite, 2001).

A partir então dos resultados da porcentagem de material fino que passa na peneira de 75 $\mu\text{m}$  presente nos agregados tanto miúdo quanto gráudo percebe-se

que estes atenderam ao limite máximo permitido pela NBR15116, se tornando favorável ao desempenho do concreto por terem em sua composição partículas de materiais cerâmicos e de cimento, o que ajuda no aumento da resistência.

#### 4.1.5 Teor de torrões de argila e materiais friáveis

O ensaio para determinação do teor de torrões de argila e materiais friáveis foi realizado de acordo com que estabelece a NBR 7218/87. Nas Tabelas 12 e 13 constam os percentuais encontrados dos agregados graúdo e miúdo reciclado e natural respectivamente e os exigidos pela NBR 15116.

Tabela 12 - Percentagem e desvio padrão do teor de torrões de argila e materiais friáveis dos agregados graúdo reciclado e natural

<b>Tipo de agregado graúdo</b>	<b>Percentagem de teor de torrões de argila e materiais friáveis</b>	<b>Percentagem exigida pela NBR 15116</b>
Reciclado	5,95% ± 0,0092%	2%
Natural (brita)	0,0%	1 a 3%

Pode-se observar que a média do teor de torrões de argila e materiais friáveis para o resíduo graúdo ficou acima do exigido pela norma, isso pode ter sido influenciado pelas características do material que apresenta em sua composição uma grande parcela de material cerâmico e também devido ao processamento do material que foi obtido por moagem.

Essa percentagem de materiais friáveis encontrada pode estar relacionada a maior percentagem do resíduo utilizado que foi de alvenaria (pois foi a etapa em que o resíduo foi colhido), além disso, existem também partículas de argamassa aderida aos tijolos, e isso pode ser outro fator contribuinte para esse resultado.

Segundo Ribas (2008), isso não pode inviabilizar o uso dos agregados em concreto, pois esse material mesmo desagregando-se e aumentando o teor de finos no concreto, pode contribuir para o aumento da resistência devido às partículas de cimento não hidratadas.

Com respeito ao agregado natural, é possível perceber que não houve percentagem nenhuma de torrões de argila e materiais friáveis na média dos



resultados colhidos, isto se dá devido esse material ser brita, obtida a partir de uma rocha sem nenhum resquício de argila ou material friável.

Tabela 13 - Porcentagem e desvio padrão do teor de torrões de argila e materiais friáveis dos agregados miúdos reciclado e natural.

<b>Tipo de agregado miúdo</b>	<b>Porcentagem de teor de torrões de argila e materiais friáveis</b>	<b>Porcentagem exigida pela NBR 15116</b>
Reciclado	3,55% ± 0,0085%	2%
Natural (areia)	1,5% ± 0,0002%	1,5%

Analisando os dados das médias dos resultados para o agregado miúdo reciclado, é possível observar que a porcentagem de teor de torrões de argila e materiais friáveis não atendeu ao parâmetro de 2% aceitável pela norma, assim como o resíduo graúdo, porém obteve um resultado inferior quando comparado com a porcentagem obtida para o resíduo graúdo. O resultado pode ter sido influenciado pelos mesmos fatores que fizeram com que o resíduo graúdo também tivesse uma porcentagem maior do que o exigido pela norma.

Outro fator importante é o resíduo ser miúdo, ou seja, muito fino quando se analisa a granulometria, o que provavelmente pode ter sido outra influencia para chegar aos resultados. O agregado natural apresentou médias de resultados no limite do exigido pela norma, e com isso pode-se perceber que o agregado natural é um pouco argiloso, porém isso não inviabiliza a utilização deste agregado natural miúdo no concreto.

Portanto, a porcentagem de materiais friáveis nas amostras do agregado graúdo comprovou que a presença de argamassa aderida é maior em grãos superiores a 4,8mm. O resíduo graúdo apresentou uma maior porcentagem em relação ao resíduo miúdo, que apesar da origem do agregado ser o mesmo, pode ter sido influenciado pelas diferentes granulometrias.

#### **4.1.6 Absorção**

Os resultados da absorção foram obtidos de acordo com os ensaios para agregados graúdos e miúdos estabelecidos pelas normas: NBR NM 53:2003 e NBR NM 30:2001.

Existem literaturas que mostram que alguns ensaios são realizados de várias formas distintas, de modo a testar se a saturação máxima dos grãos acontece nas primeiras 24 horas. Mas já existem registros que mostram que a saturação máxima dos grãos acontece antes mesmo do período de 24 h.

Porém, também há testes que verificam as amostras submetidas a períodos maiores que 24 horas e foi comprovada que a variação é muito pouca em relação às amostras submetidas a períodos de 24 horas. Na Tabela 14 é apresentada a taxa de absorção e o desvio padrão dos agregados graúdo reciclado e natural para análise.

Tabela 14 - Taxa de absorção e desvio padrão dos agregados graúdo reciclado e natural

<b>Tipo de agregado graúdo</b>	<b>Taxa de absorção</b>	<b>Porcentagem exigida pela NBR 15116</b>
Reciclado	15,69% ± 0,0161%	12%
Natural (brita)	11,15% ± 0,0014%	-

É possível perceber que a taxa de absorção do agregado reciclado graúdo foi um pouco maior que 15% o que ficou acima do valor máximo estabelecido pela norma que é de 12%.

Isso pode ter sido influenciado pelo tipo de resíduo utilizado, já que o resíduo de alvenaria contém maiores porcentagens de fragmentos de tijolos e além do mais, existe o teor de argamassa aderida aos fragmentos de tijolos que também absorve muita água. Outro fator importante é a forma que os resíduos foram triturados, o que também influencia na absorção de água.

Tabela 15 - Taxa de absorção e desvio padrão dos agregados miúdo reciclado e natural

<b>Tipo de agregado miúdo</b>	<b>Taxa de absorção</b>	<b>Porcentagem exigida pela NBR 15116</b>
Reciclado	9,64% ± 0,0122%	17%
Natural (areia)	0,13% ± 0,0002%	-

Vários estudos da literatura apresentam que os agregados miúdos têm uma taxa de absorção maior que os agregados graúdos, pois quanto maior o tamanho máximo do agregado menor é a absorção, porém os ensaios com os agregados utilizados no estudo mostraram ao contrário.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 15 são possíveis verificar que o agregado miúdo reciclado obteve uma taxa de absorção de quase 40% menor do que o agregado graúdo reciclado, enquanto o agregado natural apresentou uma taxa de absorção baixíssima de 0,13%.

Pode-se observar que a média dos resultados da absorção do agregado reciclado miúdo não ultrapassou a porcentagem exigida pela norma que é de 17%, o que influencia para um bom resultado na mistura concreto.

Mesmo não ultrapassando a porcentagem exigida se obteve um valor alto, o que pode ter sido influenciado pelo resíduo ser muito fino e o tipo do material utilizado, que contém muitos fragmentos miúdos de tijolos que foi processado através do triturador e também fragmentos de argamassa o que também tem uma elevada taxa de absorção.

Os estudos de Cordeiro (2013) mostram que o tipo de processamento usado nos resíduos é um dos fatores que influencia na taxa de absorção. Logo a taxa de absorção dos agregados reciclados pode ter sido alta também devido à moagem do resíduo, além de outros fatores.

Segundo Fonseca (2006), os agregados reciclados de alvenaria apresentam altas taxas de absorção, superiores a 15%, como os componentes de cerâmicos para alvenaria de vedação. É possível confirmar esta informação com a média do resultado apresentado do agregado graúdo reciclado, já o agregado miúdo reciclado a taxa de absorção foi menor que 15%.

Nos agregados graúdos a taxa elevada de absorção pode ter sido devido aos fragmentos de concreto existente no material utilizado que são muito porosos, os fragmentos de argamassa endurecida, além do material cerâmico presente na composição do resíduo que pode também ter influenciado.

Segundo Cabral (2007), é necessário considerar que a alta absorção pode influenciar a favor da absorção da mistura, penetrando nos poros do agregado e formando cristais precipitados de cimento hidratado, e assim favorecendo uma maior aderência entre a massa e o agregado, melhorando então a resistência à compressão do concreto.

Portanto, pode-se dizer que a taxa de absorção foi maior nos agregados graúdos reciclados devido à porosidade dos fragmentos de concreto existente no material utilizado e os fragmentos de argamassa endurecida presentes no material o que pode ter influenciado também.

Já a taxa de absorção ter sido menor nos agregados miúdo reciclados mostra que a absorção dos agregados também é influenciada pela granulometria, neste caso o tamanho das partículas. Porque por mais que o teor de material fino seja maior nos agregados miúdos do que nos agregados graúdos isso não influenciou aumentando a taxa de absorção já que o resíduo utilizado é o mesmo apenas com tamanho de partículas diferentes.

## **4.2 Resultados dos ensaios mecânico do concreto**

A seguir serão apresentados os resultados do ensaio mecânico de resistência à compressão que foi realizado nos corpos de prova, a porosidade da mistura ideal do concreto com RCD e os resultados finais apresentados pelo planejamento experimental.

### **4.2.1 Ensaio de Resistência à Compressão**

Os ensaios de compressão foram realizados quando completaram os 28 dias de cura dos corpos de prova. Na primeira etapa 54 corpos de prova foram confeccionados e todos no mesmo dia, sendo que do número total, 27 corpos de prova foram combinados a partir dos parâmetros escolhidos e os outros 27 são as duplicatas.

Em função do número de ensaios realizados, e do tipo de planejamento aplicado, apenas dois modelos combinando variáveis de processo e de mistura foram testados, devido ao número do grau de liberdade limitante.

Os modelos testados foram obtidos através da combinação dos modelos variáveis de processo linear e bilineares Eqs. (2) e (3), com o modelo de mistura linear (Eq. (4)).

Como já mencionado antes, não foi possível testar os outros modelos de misturas, tais como a quadrática (Eq. 5) e a cúbica especial (Eq. 6), porque

requerem números maiores de grau de liberdade, que o projeto experimental realizado, neste estudo, não pode fornecer.

A Tabela 17 mostra os resultados da análise de variância para o modelo combinado envolvendo o modelo variável de processo linear e o modelo de mistura linear (Combinado modelo L-L).

Os resultados para o modelo combinado que inclui o modelo de variáveis de processo linear e o modelo de mistura bilinear não são apresentados, porque apresentaram valores que não são significativos nem para a regressão quanto para a falta de ajuste.

Na Tabela 16 são apresentados os resultados do ensaio mecânico de resistência à compressão que foram realizados com os 54 corpos de prova, sendo que estão enumerados pelos três diferentes traços e depois são mostrados os ensaios e suas duplicatas.

Tabela 16 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão

Formulação do número <sup>a</sup>	1		2		3	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2
$z_1 = -1; z_2 = -1$	22,17	20,84	19,74	17,52	13,14	10,61
$z_1 = 0; z_2 = -1$	15,25	11,52	10,13	12,49	13,32	10,09
$z_1 = 1; z_2 = -1$	8,00	5,24	8,80	10,90	10,80	9,94
$z_1 = -1; z_2 = 0$	21,80	18,68	18,69	16,57	9,60	9,46
$z_1 = 0; z_2 = 0$	23,31	8,47	4,48	15,05	9,55	10,10
$z_1 = 1; z_2 = 0$	15,92	16,20	16,98	15,20	11,38	9,21
$z_1 = -1; z_2 = 1$	19,20	10,19	16,03	16,39	9,80	8,14
$z_1 = 0; z_2 = 1$	21,66	18,70	17,33	14,48	8,51	8,67
$z_1 = 1; z_2 = 1$	17,04	13,33	21,05	12,29	12,38	9,75

Observando os resultados apresentados na Tabela 16, verifica-se em algumas situações que existe uma diferença entre os valores obtidos para uma medida e sua réplica, este tipo de diferença é mensurado através da estimativa do erro puro que é justamente a diferença entre uma duplicata e outra.

Com a estimativa do erro puro podemos verificar se o modelo escolhido é bom ou se há a necessidade de modifica-lo e a falta de ajuste é a média entre as duas duplicatas e o modelo apresentado.

O erro puro e a falta de ajuste são apresentados juntamente com todos os resultados da análise de variância (ANOVA) na Tabela 17 para o modelo combinado envolvendo o modelo variável de processo linear e o modelo de mistura linear (modelo combinado LL).

Tabela 17 - CRED anova – Mesa para o modelo linear-linear combinada

Modelo	Fonte	SS	DF	MS
	Regressão	451,24	3	150,41
	Resíduos	739,51	50	14,79
Linear –	Falta de ajuste	435,19	23	18,92
Linear	Erro puro	304,31	27	11,27
	Total	1037,58	53	19,57
	% Var. explicado	43,49		
	% Max. Explicável	70,67		

O modelo combinado LL não apresentou uma falta de ajuste significativa. Pois a relação entre media quadrática da falta de ajuste e a média quadrática do erro puro (MQFA / MQEP) é de  $18,92 / 11,27 = 1,67$  que é um valor menor do que o valor do teste F tabelado para os graus de liberdade do modelo utilizados a um nível de 95% de confiança neste caso de  $F_{23,27} = 1,95$ .

Este resultado indica uma estimativa da variância devido à incerteza puramente experimental, com isto pode-se dizer que não é evidente que o modelo apresente uma falta de ajuste em um nível de confiança de 95%.

A porcentagem máxima de variação explicável pela regressão é de 70,67%. Depois de realizada a análise da variância (ANOVA), são calculados os parâmetros que são os efeitos das variáveis e os erros padrão de cada uma. Para este cálculo são utilizados os resultados da ANOVA mostrados na Tabela 17.

A partir então dos efeitos e do erro padrão se calcula o t-test que é um teste de hipótese que usa conceitos estatísticos para eliminar ou não uma hipótese nula e isto segue a distribuição do t de Student. É necessário que seja calculado o t-test para que uma análise mais rigorosa do modelo seja realizada.

Segundo Hosseini et al (2014), não existe um teste exato de hipótese que pode ser realizada para o teste t,  $t = bkl / s.e. (bkl)$ ;  $s.e. (s.e. (bkl))$  representa o erro padrão envolvendo a variável de mistura e a variável de processo. A Tabela 18 apresenta os parâmetros do modelo, seus erros padrão e valores t-teste para o modelo linear-linear.

Tabela 18 - Parâmetros, erros padrão estimado e razão do t-teste para o modelo linear-linear combinado

Variáveis	Parâmetros (Efeitos)	Erro padrão	T-teste
X1	159,2331	82,89	1,9210
X2	2,9275	25,79	0,1135
X3	-127,0725	100,26	-1,2674
X1Z1	-32,4242	101,52	-0,3193
X2Z1	105,4171	101,52	1,0383
X3Z1	-11,5908	31,59	0,3669
X1Z2	-17,6246	31,59	-0,5579
X2Z2	133,6592	122,79	1,0885
X2Z3	-10,2079	122,79	-0,0831

Possíveis valores críticos podem ser investigados utilizando um traçado de probabilidade normal dos pontos centrais com os valores de t-teste que são mostrados na Tabela 18. Os valores de t-test são obtidos através da razão entre os parâmetros e o erro padrão de cada uma.

Uma das grandes vantagens da inclusão de experimentos no centro do planejamento é devida à estimativa do erro com poucas repetições, pois a partir das repetições é possível obter a média e a variância das replicatas.

Com os valores gera-se um gráfico que é mostrado na Figura 20, onde os valores de corte situam-se em baixo da linha que cortam os pontos que são retirados do modelo para o ajuste.

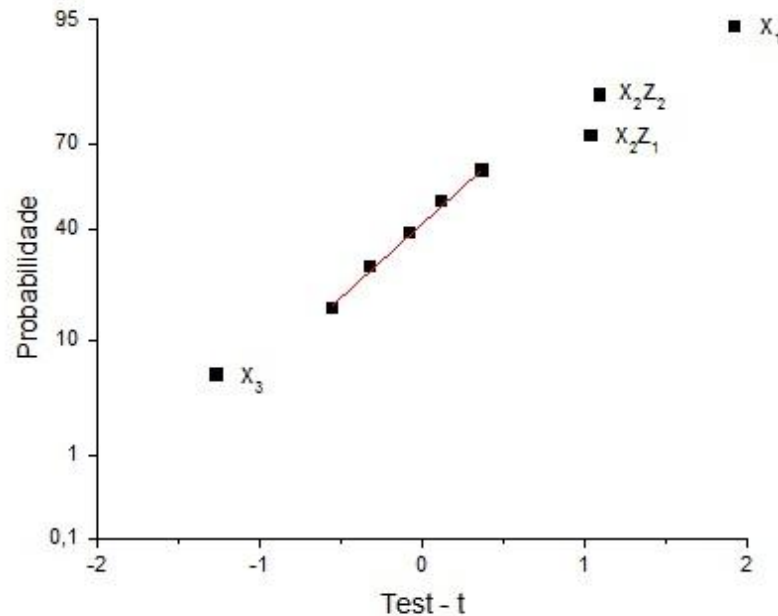


Figura 20 - Gráfico de probabilidade normal dos valores de t - teste. Os pontos sobre a reta foram descartados.

Fonte: Origin 2016

Os pontos que estão sobre a reta foram descartados uma vez que o modelo para ser ajustado retira os pontos errôneos, ou seja, os pontos que não são significativos para o modelo. O modelo combinado LL após este ajuste é apresentado na Eq. 9 juntamente com os seus respectivos erros padrão:

$$\hat{y} = 168,2545x_1 - 116,5147x_3 - 1,9615x_{2Z1} + 0,8808x_{2Z2} \quad (9)$$

$(\pm 76.40) \quad (\pm 121.44) \quad (\pm 2.64) \quad (\pm 2.64)$

A Figura 21 apresenta o gráfico dos valores experimentais em comparação com valores previstos a partir da Eq.(9). O ajuste de R ao quadrado corresponde a um valor de 0,3544 que foi dado pelo programa Origin 2016 onde foram feitos os gráficos.

O  $R^2$  é chamado de coeficiente de determinação do modelo e o valor máximo de  $R^2$  é 1 expressando que o modelo de regressão descreve completamente a variação total dos dados em torno da média.



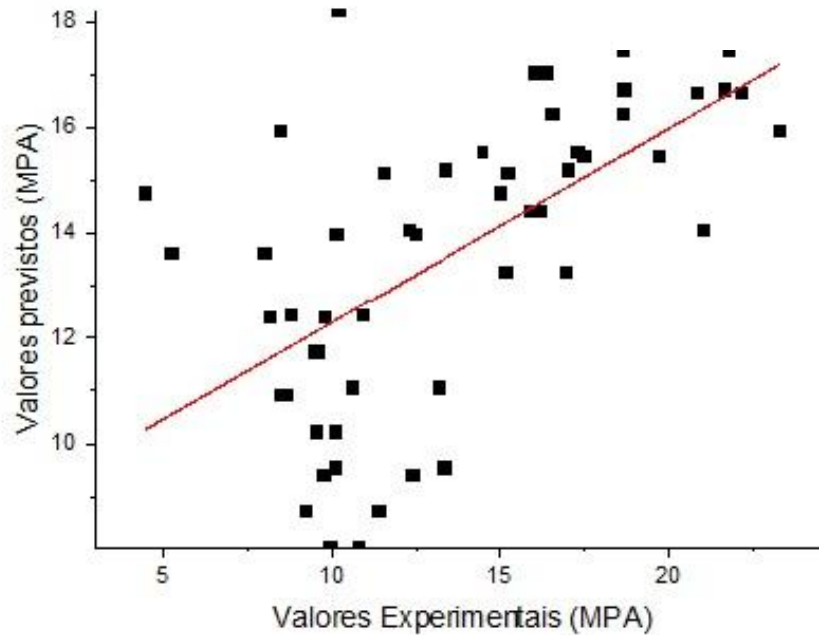


Figura 21 - Gráfico dos valores previstos pela Eq.(9) contra os valores experimentais. A linha representando a combinação exata também é mostrada  
 Fonte: Origin 2016

Os pontos são quase distribuídos aleatoriamente sobre a linha que representa a combinação exata, desde que não haja evidência de falta de ajustamento para o modelo LL. Ao analisar a Eq. (9), observa-se que X1 obteve um alto resultado podendo ter sido causado pela composição química do cimento utilizado nas misturas, já que não tivemos acesso ao laudo de composição química do cimento logo não sabemos de como é formado e composto.

A variável X3 mostrou também um valor alto e este resultado era inesperado, porque o concreto segue a lei de Abrams (1919). Esses concretos utilizam um alto consumo de água além de precisar de uma quantidade necessária para a hidratação do cimento. E quanto maior for à relação água / cimento menor será a resistência à compressão do concreto.

A presença do termo significativo cruzando XZ mostrado no modelo representa que as variáveis de mistura correspondentes ao estudo dependem dos níveis de tamanho e proporção de substituição do RCD.

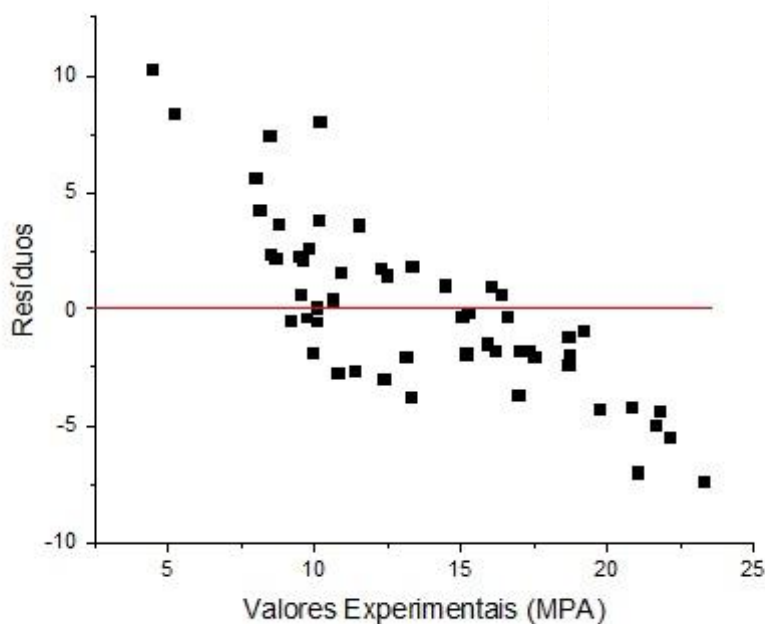


Figura 22 - Gráfico dos valores previstos residuais com os valores experimentais  
Fonte: Origin 2016

O gráfico de resíduo da Figura 22 mostra que a distribuição é aleatória, portanto pode ser aplicada e considerada a distribuição normal. Se caso o gráfico apontasse que os resíduos não estivessem aleatoriamente distribuídos, seria necessário investir em outros recursos para a sua melhoria, pois o modelo não seria confiável.

#### 4.2.2 Determinação do melhor traço

Esta segunda etapa dos traços foi realizada através dos resultados da primeira etapa, em que foi empregada uma análise na curva gerada pelo programa e então retirada os cinco traços ótimos e confeccionados cada um com sua tréplica para confirmar os resultados, neste caso então foram refeitos cinco traços cada um triplicado, totalizando assim 15 corpos de prova.

Os traços que foram dados como ótimos pelo programa, foram os traços das misturas 1, 4, 7, 8 e 13. Pode-se perceber que destes cinco traços apenas um é usando o resíduo graúdo, ou seja, todos os outros são utilizando o resíduo fino que fica retido na peneira de 0,30 mm. Na Tabela 19 abaixo são apresentados os traços que foram testados para assim descobrir o ótimo entre eles.

Tabela 19 - Misturas, traços, substituição e peneira das cinco melhores misturas

Mistura	Traços	% de substituição	Peneira (mm)
1	1,00:1,66:3,46:0,50	15%	0,30
4	1,00:1,66:3,46:0,50	20%	0,30
7	1,00:1,66:3,46:0,50	25%	0,30
8	1,00:1,66:3,46:0,50	25%	4,80
13	1,00:2,00:3,00:0,60	20%	0,30

Como observado na Tabela 19, é possível verificar que de todos os três traços já apresentados, o que mais se destacou quanto a resistência a compressão foi o traço 1:1,66:3,46 e quanto ao tamanho das partículas é perceptível na tabela que o material que ficou entre os melhores é o que ficou retido na peneira 0,30mm.

Depois dos traços rodados e da espera pela cura do concreto imergido na água por 28 dias, foi realizado os ensaios de resistência à compressão para se certificar do melhor traço, substituição e tamanho das partículas.

Os resultados dos ensaios mecânico de resistência à compressão das 5 melhores misturas que foi realizado em triplicata (R1, R2, R3) são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Resistência a compressão das 5 misturas em triplicata

Mistura	R1	R2	R3
1	20,60	16,02	15,34
4	15,44	17,70	18,59
7	20,10	19,44	19,96
8	11,20	21,06	20,61
13	21,65	19,80	17,57

É possível perceber com os resultados que praticamente todas as misturas obtiveram resistência acima de 15 MPa, o que já apresenta uma boa resistência à compressão das misturas de concreto com RCD.

No entanto quando se compara os três níveis de mistura pode-se perceber que houve uma mistura que se destacou mais perante as outras, sendo essa mistura a de número 7, em que a diferença entre seus resultados é menor em relação à

diferença entre os resultados das outras misturas, ou seja, existe um erro e um desvio menor entre os resultados da mistura 7 que se aproximam mais uma da outra.

A melhor proporção de substituição encontrada foi de 25% substituindo o agregado natural pelo reciclado. Analisando o resultado foi encontrada uma boa porcentagem de substituição, pois como Lintz et al (2012) mostra em seus estudos a substituição acima de 50% não traz ganho de resistência ao concreto, pelo contrário, faz com que perca a resistência.

Em relação ao tamanho das partículas a melhor mistura utilizou o tamanho de 0,30mm. Como já explicado foram utilizados alguns critérios para escolha dos tamanhos das partículas testadas, pois a literatura ainda não trás muitos testes envolvendo este tipo de variável.

A partir do melhor traço encontrado obteve-se a melhor mistura que para este caso foi de  $X_1 = 0,15$ ,  $X_2 = 0,77$  e  $X_3 = 0,08$ . Cada composição da mistura apresentou uma relação água / cimento diferente, mas este conjunto apresenta a maior relação.

Assim, considerando este nível de variável estudada a melhor proporção de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado foi de 25% com o tamanho das partículas de 0,30mm. A condição para obter uma mistura ótima no concreto é de 15% de cimento, 77% de agregados e 8% de água.

Para estes quantitativos da melhor mistura e do melhor traço com a substituição do agregado natural pelo reciclado de 25%, foram calculados através das propriedades dos agregados encontradas, que para  $1\text{m}^3$  de concreto em peso são necessários 481,43 kg de cimento.

#### **4.2.3 Teste para a porosidade do concreto**

Segundo Cordeiro (2013), normalmente os concretos confeccionados com agregados reciclados são caracterizados por uma alta porcentagem de meso e macro poros, pois existe uma variabilidade grande de tamanhos e estruturas de poros.

Os estudos de Gonçalves (2011) complementam dizendo que a durabilidade das estruturas de concreto está intimamente ligada à sua permeabilidade, e a distribuição dos poros em concretos que substitui o agregado natural pelo agregado

reciclado é modificada e ainda é mais sentida quando são substituídos altos teores de agregados naturais pelos reciclados.

Domingues (2013) mostra em seus estudos que a porosidade parece aumentar à medida que se aumenta o teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado.

O ensaio para testar a porosidade foi realizado no concreto endurecido como manda à norma e como já frisada foi utilizado a NBR 9778 para então obter os resultados necessários para a análise no concreto. A NBR 9778 passa alguns parâmetros para realizarmos uma comparação entre os resultados obtidos através dos ensaios, são eles apresentados na Tabela 21:

Tabela 21 - Parâmetros dados pela norma para comparação

<b>POROSIDADE</b>	<b>AValiação</b>
< 10%	Concreto de boa qualidade e bem compacto.
Entre 10% e 15%	Concreto bom, porém, permeável e não adequado para ambientes agressivos.
> 15%	Concreto muito permeável e não adequado para proteger a armadura por longos períodos.

Fonte: NBR 9778

O ensaio foi realizado apenas na melhor mistura encontrada pela otimização do planejamento experimental, neste caso a mistura 7 como já apresentada na Tabela 20.

Foram confeccionados para essa mistura seis corpos de prova, onde três foram utilizados para o teste de resistência a compressão apenas para confirmar os resultados dos outros ensaios de resistência à compressão, e os outros três foram usados para a realização do teste de porosidade.

Logo após a realização de todas essas etapas foram colhidos todos os dados e inseridos nas formulas dadas pela norma para então encontrar todos os resultados que a norma requer.

Foram encontrados os resultados dos índices de vazios, absorção, massa especifica seca, massa especifica saturada e massa especifica real. Na Tabela 22

está descrito os resultados dos ensaios e os resultados detalhados constam no anexo A, juntamente com resultados de outros ensaios já realizados:

Tabela 22 - Ensaio realizados para o teste de porosidade

<b>Ensaio</b>	<b>Média dos três ensaios</b>	<b>Desvio padrão</b>
Índice de vazios	14,36 %	± 1,1485
Absorção	6,86 %	± 0,7139
Massa Esp. Seca	2,09 g/cm <sup>3</sup>	± 0,0503
Massa Esp. Saturada	2,24 g/cm <sup>3</sup>	± 0,0404
Massa Esp. Real	2,45 g/cm <sup>3</sup>	± 0,0251

Analisando os resultados e fazendo um comparativo com as porcentagens limite estabelecidas pela norma é possível verificar que o índice de vazios ficou dentro da faixa de 10 a 15% ou seja, é um concreto bom como a norma descreve, porém é permeável e por isso não é adequado a sua utilização em ambientes agressivos e que podem prejudicar o concreto.

Cabral (2009) realizou uma pesquisa que envolveu agregados reciclados graúdos e miúdos tanto de concreto quando de cerâmica vermelha e encontrou uma maior absorção de água e um maior índice de vazios para os concretos com agregados graúdos de cerâmica vermelha.

Cordeiro (2013) ainda complementa mostrando em seus estudos que os agregados reciclados têm maior porosidade quando são comparados com os agregados naturais.

É mostrado por Vidal (2014) em seus estudos que a resistência do concreto está intimamente ligada à porosidade dos materiais. Quanto mais porosos os agregados forem, menor tende a ser a sua resistência.

Segundo estudos de Gomes et al (2015) os concretos que são confeccionados com agregados reciclados de cerâmica apresentam um volume de vazios maior, ou seja, uma porosidade maior que os concretos que são fabricados utilizando os agregados reciclados de concretos.

## 5 CONCLUSÕES

No levantamento bibliográfico foi possível perceber que RCD é um tema muito estudado e com uma gama de ensaios realizado para diferentes fins do RCD, ou seja, existem vários tipos de estudo, porém todos objetivando a reutilização do RCD. É perceptível no estudo à necessidade urgente de reutilização destes resíduos, pois a cada dia que passa este problema vai tomando grandes proporções e ficando mais difícil de ser resolvido.

Os resultados da pesquisa foram satisfatórios por terem permitido a caracterização dos resíduos utilizados quanto as suas propriedades como agregados reciclados para a sua utilização em concretos.

Com intuito de encontrar o melhor traço ou a melhor mistura de concreto utilizando RCD, foi elaborado um planejamento experimental visando à otimização dos traços usados e minimizando os erros da sua confecção. O modelo variável que combina variáveis de processo e mistura onde é capaz de explicar como este processo responde a esse meio, e mostrar que a mudança das variáveis de níveis acontece à medida que variam as condições de mistura.

Depois de todas as etapas de ensaios concluídas, os resultados obtidos e analisados e considerando este nível de variável estudada, a condição para a mistura ideal do concreto reutilizando o RCD é de: 0,30mm de tamanho das partículas do agregado reciclado, 25,0% do agregado reciclado que substituí o agregado natural, com 15,0% de cimento, 77,0% de agregados e 8,0% de água.

A porosidade do concreto ficou dentro da segunda condição fornecida pela norma o que fica claro que esta mistura pode gerar um bom concreto, porém também pode ser permeável por isso não é indicado que seja utilizado em ambientes agressivos e que podem causar problemas futuros com sua utilização.

Com base nos resultados obtidos através do ensaio mecânico de compressão verificaram-se resistências superiores a 19 MPa após 28 dias. Tal resultado mostra que essas misturas mesmo não sendo otimizadas, sem sofrer algum tipo de tratamento e sem aditivos é possível serem utilizadas em concretos sem função estrutural, como para a pavimentação, blocos de concretos, calçadas, meio-fio, contrapiso e ainda diversas utilidades na construção civil que não requer concreto estrutural.

## 6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Visto que o estudo pelas variáveis propostas, e que durante a sua realização surgiram novos questionamentos, sugere-se:

- Realizar a separação primária das partículas do RCD para então reutilizar os agregados reciclados no concreto.
- Confeccionar um corpo de prova com o traço estudado, utilizando apenas agregados naturais para realizar uma comparação ao final do estudo.
- Realizar um estudo de viabilidade econômica para a reutilização dos agregados reciclados em concreto.
- Realizar um estudo de dosagem, através das propriedades dos agregados reciclados e naturais encontrado.



## REFERÊNCIAS

ABRAMS, D. A. Design of Concrete Mixtures. Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute. V.1. 1919.

ÂNGULO, S. C. **Variabilidade De Agregados Graúdos De Resíduos De Construção E Demolição Reciclados**. 2000. 155p. Dissertação de Mestrado. São Paulo. 2000.

ÂNGULO, S. C. et al. Resíduos De Construção E Demolição: Avaliação De Métodos De Quantificação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Vol. 16, nº 3. São Paulo, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: JUL/2003. Composição Granulométrica. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7251: ABR/1982. Massa Unitária. Rio de Janeiro. 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 46: JUL/2003. Teor De Material Fino Que Passa Através Da Peneira 75µm, Por Lavagem. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7218: AGO/1987. Teor De Argila Em Torrões E Materiais Friáveis. Rio de Janeiro. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: JUL/2003. Agregado Graúdo – Determinação Massa Específica, Massa Específica Aparente E Absorção. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 30: MAO/2001. Agregado Miúdo – Absorção De Água. Rio de Janeiro. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776: MAR/1987. Massa Específica De Agregados Miúdos Por Meio Do Frasco De Chapman. Rio de Janeiro. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778:2005 – Corrigida em 2009. Argamassa E Concreto Endurecidos – Absorção De Água, Índices De Vazios E Massa Específica. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738:1994 – Modelagem E Cura De Corpos De Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 101:1996 – Ensaio De Compressão De Corpos De Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro. 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116:2004 – Agregados Reciclados De Resíduos Sólidos Da Construção Civil – Utilização Em

Pavimentação e Preparo De Concreto Sem Função Estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004:2004 – Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211:2005 – Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7809:2005 – Agregados graúdos – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método do ensaio. Rio de Janeiro. 2005.

BACCHI, A. V. et al. Use of The Experimental Design in The Incorporation of The Ceramic Waste in Mortars For Obtaining Water Retention Capacity. **Cerâmica**, v.54, nº332, p.395-403. 2008.

BANIAS, G. et al. A Web-Based Decision Support System For The Optimal Management Of Construction And Demolition Waste. **Waste Management**, v. 16, nº 12, p. 2497-2502. Grécia, 2011.

BORTOLOTTI, J. A. et al. Split-Plot Design Optimization For Trace Determination Of Lead By Anodic Stripping Voltammetry In A Homogeneous Ternary Solvent System. **Chemometrics and intelligent laboratory systems**, v. 70, nº 2, p.113-121. 2004.

BRASILEIRO, L. L. **Utilização de Agregados Reciclados Provenientes de RCD em Substituição ao Agregado Natural no Concreto Asfáltico**. 2013. 118p. Dissertação de Mestrado. Piauí. 2013.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão Bibliográfica: Reutilização De Resíduos Da Construção e Demolição Na Indústria Da Construção Civil. **Cerâmica**, v.61, p.178-189. 2015.

BRAVO, M. et al. Mechanical Performance Of Concrete Made With Aggregates From Construction And Demolition Waste Recycling Plants. **Journal of Cleaner Production, Elsevier**, v.99, p.59-74. 2015.

BROTTI, R. C. W. **Contribuição Ao Estudo De Resíduos De Construção E Demolição (Rcd) Visando À Fabricação De Peças De Pavimentação**. 2014. 98p. Trabalho de Conclusão de Curso. Pato Branco. 2014.

CASTAÑO, J. O. et al. Gestión De Residuos De Construcción Y Demolición (RCD) en Bogotá: Perspectivas Y Limitantes. **Tecnura**, v.17, nº38, p.121-129. 2013.

CALVO, N.; VARELA-CANDAMIO, L.; NOVO-CORTI, I. A Dynamic Model For Construction And Demolition (C&D) Waste Management In Spain: Driving Policies Based On Economic Incentives And Tax Penalties. **Sustainability**, v.6, p.416-435. 2014.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de Propriedades Mecânicas e de Durabilidade de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados, Considerando-se a Variabilidade da Composição do RCD**. 2007. 254p. Tese de Doutorado. São Carlos. 2007.

CABRAL, A. E. B. et al. Desempenho de Concretos com Agregados Reciclado de Cerâmica Vermelha. **Cerâmica**. V.55, p.448-460. 2009.

CABRAL, A. E. B. et al. Performance Estimation For Concretos Made With Recycled Aggregates Of Construction And Demolition Waste Of Some Brazilian Cities. **Materials Research**, v.15, n°6, p.1037-1046. 2012.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução n° 307** – Diretrizes, Critérios e Procedimentos Para A Gestão Dos Resíduos Da Construção Civil. Brasília. 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução n° 001**. Brasília. 1986.

COETZER, R. L.; HAINES, L. M. Optimal Designs For Multiple-Mixture By Process Variable Experiments. **mODa 10 – Advances in Model-Oriented Design and Analysis**, p. 45- 53. Springer International Publishing. 2013.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise dos Parâmetros Principais que Regem a Variabilidade de Concretos Produzidos com Agregados Graúdos de Concreto**. 2013. 127p. Tese de Doutorado. Porto Alegre. 2013.

COSCIONE, A. R. et al. O Modelamento Estatístico de Misturas: Experimento Tutorial Usando Voltametria de Redissolução Anódica. **Química Nova**, v.28, n°6, p. 1116 – 1122. 2005.

DEL RIO MERINO, M.; GRACIA, P. I.; AZEVEDO, I. S. W. Sustainable Construction: Construction And Demolition Waste Reconsidered. **Waste Management and Research**, v.28, n°2, p.118-129. 2010.

DOMINGUES, D. **Contribuição ao Estudo de Dosagem do Concreto com Agregado de RCD**. 2013. 113p. Trabalho de Conclusão de Curso. Belém. 2013.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Mechanical Behaviour Of Concrete Made Withfine Recycled Concrete Aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v.29, n°5, p.397-401. 2007.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Durability Performance Of Concrete Made With Fine Recycled Concrete Aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v.32, n°1, p.9-14. 2009.

FERREIRA, A. S. **Reaproveitamento de Materiais em Grandes Obras de Reabilitação**. Dissertação de Mestrado. 2010. 146p. Portugal. 2010.

FONSECA, A. P. **Estudo Comparativo De Concretos Com Agregado Graúdo Reciclado De Telha Cerâmica E Agregado Graúdo Natural**. 2006. 223p. Dissertação de Mestrado. Uberlândia. 2006.

GANIRON JR, T. U. Recycling Concrete Debris From Construction And Demolition Waste. **International Journal of Advanced Science and Technology**, v. 77, p.7-24. 2015.

GONÇALVES, M. S. **Análise da Viabilidade Técnica de Utilização de Resíduos de Concreto Oriundos da Pré-fabricação Como Agregado Graúdo Para a Produção de Novos Concretos**. 2011. 118p. Dissertação de Mestrado. São Leopoldo. 2011.

GOMES, P. C. C. et al. Obtenção de Concreto Leve Utilizando Agregados Reciclados. **Ambiente Construído**, v.15, n°3, p.31-46. 2015.

HEMALATHA, B.R.; PRASA, N.; SUBRAMANYA, B. V. Construction And Demolition Waste Recycling For Sustainable Growth And Development. **Journal of Environmental Research and Development**, v.2, n°4, p.759-765. 2008.

HOLDERBAUM, M. **Gestão de Resíduos da Construção Civil: Análise da Cidade de Porto Alegre**. 2009. 58p. Trabalho de Conclusão de Curso. Porto Alegre. 2009.

HOSSEINI, S. A. et al. Modeling And Optimization Of Combustion Process Of 2-Propanol Over Perovskite-Type  $\text{La}_{m-1}\text{Co}_1\text{O}_3$  Nanocatalysts By An Unreplicated Experimental Design With Mixture-Process Variables And Genetic Algorithm Methodology. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v.45, n°1, p.85-91. 2014.

ISMAM, J. N.; ISMAIL, Z. Sustainable Construction Waste Management Strategic Implementation Model. **Wseas transactions on environment and development**, v.10, p.48-59. 2014.

JAMIL, M.; YANG, X. A literature survey of benchmark functions for global optimization problems. **Int. Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation**, v.4, n°2, p.150-194. 2013.

JINGKUANG, L.; YOUSONG, W.; YIONG, L. A Model For Quantification Of Construction Waste In New Residential Buildings In Pearl River Delta Of China. **The Open Construction and Building Technology Journal**, v.6, p.398-403. 2012.

JURIC, B. et al. Utilization Of Municipal Solid Waste Bottom Ash And Recycled Aggregat In Concret. **Waste Management**, v.26, n°12, p.1436-1442. 2006.

KAZMIERCZAK, C. S. Resíduos De Construção E Demolição: Um Problema Ou Uma Oportunidade De Negócios? **Conselho em revista**, N°43. Rio Grande do Sul, 2008.

KOFOWOROLA, O. F.; GHEEWALA, S. H. Estimation Of Construction Waste Generation And Management In Thailand. **Waste Management**, v.29, n°2, p.731-738. 2008.

KOZLOVSKÁ, M.; SPISÁKOVÁ, M. Construction Waste Generation Across Construction Project Life-Cycle. **Technology and management in construction - an international journal**, v.5, n°1, p.687-695. 2013.

KUMBAR, S. A.; GUPTA, A.; DESAI, D. B. Recycling And Reuse Of Construction And Demolition Waste For Sustainable Development. **OIDA International journal of sustainable development**, v.6, n°7, p.83-92. 2013.

KUMUTHA, R.; VIJAI, K. Effect Of Recycled Coarse Aggregates In Properties Of Concrete. **Journal of green building**, v.3, n°4, p.130-137. 2006.

LAGE, I. M. et al. Generation Of Recycled Aggregates And Technical Requirements For Some Applications. **Dyna**, v.77, n°161, p.89-97. 2010.

LEIVA, C. et al. Recycled Blocks With Improved Sound And fire Insulation Containing Construction And Demolition Waste. **Waste Management**, v.33, n°3, p.663-671. 2012.

LEITE, M. B. **Avaliação De Propriedades Mecânicas De Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados De Resíduo De Construção E Demolição**. 2001. 290p. Tese de Doutorado. Porto Alegre. 2001.

LEVY, S. M. **Contribuição Ao Estudo Da Durabilidade De Concretos Produzidos Com Resíduos De Concreto E Alvenaria**. 2001. 194 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LIN, K. et al. Recycling Waste Brick From Construction And Demolition Of Buildings As Pozzolanic Materials. **Waste Management & Research**, v.28, n°7, p.653-659. 2010.

LINTZ, R. C. C. et al. Study Of The Reuse Of Construction Residues In Concrete Employed By Blocks Manufacture. **IBRACON de estruturas e materiais**, v.5, n°2, p.166-181. 2012.

LIU, J.; WANG, Y. Cost Analysis Of Construction And Demolition Waste Management: Case Study Of The Pearl River Delta Of China. **The Open Construction and Building Technology Journal**, v.7, p.251-263. 2013.

LOCKREY, S. et al. Recycling The Construction And Demolition Waste In Vietnam: Opportunities And Challenges In Practice. **Journal Of Cleaner Production, Elsevier**, v.133, p.757-766. 2016.

LÓPEZ-GAYARRE, F. et al. Influence Of Recycled Aggregate Quality And Proportioning Criteria On Recycled Concrete Properties. **Waste Management**, v.29, n°12, p.3022-3028. 2009.

LU, W.; YUAN, H. A Framework For Understanding Waste Management Studies In Construction. **Waste Management**, v.31, n°6, p.1252-1260. 2011.

MALTA, J. L. **Dosagem De Concretos Produzidos Com Agregado Miúdo Reciclado De Resíduo De Construção E Demolição**. 2012. 192p. Dissertação de Mestrado. Salvador. 2012.

MÁLIA, M.; BRITO, J.; BRAVO, M. Indicadores De Resíduos De Construção E Demolição Para Construções Residenciais Novas. **Ambiente Construído**, v.11, n° 3. Rio Grande do Sul, 2011.

MALTA, J. O. et al. Argamassa Contendo Agregado Miúdo Reciclado de Resíduo de Construção e Demolição. **Gesta**, v.1, n°2, p. 176-188. 2013.

MARRERO, M. et al. Demolition Waste Management In Spanish Legislation. **The Open Construction and Building Technology Journal**, v.5, p.162-173. 2011.

MARZOUK, M.; AZAB, S. Environmental And Economic Impact Assessment Of Construction And Demolition Waste Disposal Using System Dynamics. **Resources, conservation and recycling**, v.82, p.41-49. 2013.

MARIANO, L. S. **Gerenciamento De Resíduos Da Construção Civil Com Reaproveitamento Estrutural: Estudo De Caso De Uma Obra Com 4.000m²**. 2008. 114p. Dissertação. Curitiba - PR. 2008.

MENEZES, M. S. et al. Panorama Dos Resíduos De Construção e Demolição. Universidade Federal do Rio de Janeiro. **RQI**, 4° trimestre, p.17-21. 2011.

MESQUITA, A. S. G. Análise da Geração de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Teresína, Piauí. **Holos**, v.2, n°28, p.58-65. 2012.

MIRANDA, L. F. R.; ÂNGULO, S. C.; CARELI, E. D. A Reciclagem De Resíduos De Construção E Demolição No Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 9, n°1, p. 57-71. 2009.

MONTGOMERY, D. C. Design And Analysis Of Experiments. **John Wiley & Sons, Inc.** 8 ed. 725 p. 2008.

MORAND, F. G. **Estudo das Principais Aplicações de Resíduos de Obra Como Materiais de Construção**. Trabalho de Conclusão de Curso. 2016. 91p. Rio de Janeiro. 2016.

NAGALLI, A. The Sustainability of Brazilian Construction and Demolition Waste Management System. **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v.18, p.1755-1759. 2013.

ORTIZ, O.; PASQUALINO, J. C.; CASTELLS, F. Environmental Performance Of Construction Waste: Comparing Three Scenarios From A Case Study In Catalonia, Spain. **Waste Management**, v.30, n°4, p.646-654. 2010.

PERALTA-ZAMORA, P.; MORAIS, J. L.; NAGATA, N. Por Que Otimização Multivariada? **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n°2, p.106-110. 2005.

PERDIZ, R. S. **Avaliação da Utilização do Granito da Região de Moura do Município de Barcelos Como Agregado Graúdo em Concreto**. 2009. 150p. Dissertação de Mestrado. Manaus. 2009.

POON, C.; CHAN, D. The Use of Recycled Aggregate in Concrete in Hong Kong. **Resources, conservation and recycling**, v.50, n°3, p.293-305. 2006.

PORRAS, A. C. et al. Unidad Logística De Recuperación De Resíduos De Construcción Y Demolición: Estudio De Caso Bogotá D. C. Universidad militar Nueva Granada – **Ciência e ingeniería neogranadina**, v.23, n°2, p.95-118. 2014.

RIBAS, L. F. **Caracterização Dos Resíduos De Construções Residenciais De Multipavimentos Da Cidade De Manaus**. 2008. 124p. Dissertação de Mestrado. Manaus. 2008.

RIBAS, L. F. et al. A Methodology For Collection Of Residential Construction Residue In Manaus. **Journal of Environmental Science and Engineering**, v.1, p.1149-1163. 2012.

RODRIGUES, F.; EVANGELISTA, L.; BRITO, J. A New Method To Determine The Density And Water Absorption Of Fine Recycled Aggregates. **Materials Research**, v.16, n°5, p.1045-1051. 2013.

ROSA, F. R. **Identificação e Cadastramento de Áreas de Descarte de Resíduos de Construção e Demolição na Região da AMREC, Santa Catarina**. 2011. 109p. Trabalho de Conclusão de Curso. Santa Catarina. 2011.

SAFIUDDIN, M. et al. Utilization Of Solid Wastes In Construction Materials. **International Journal of the Physical Sciences**, v.5, n°13, p.1952-1963. 2010.

SAÉZ, P. V.; MERINO. M. R.; PORRAS-AMORES, C. Managing Construction And Demolition (C&D) Waste – A European Perspective. **International Conference on Petroleum and Sustainable Development**, v.26, p.27-31. 2011.

SAÉZ, P. V. et al. Best Practice Measures Assessment For Construction And Demolition Waste Management In Building Constructions. **Resources, conservation and recycling**, v.75, p.52-62. 2013.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de Resíduos De Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) Em Estruturas De Solo Reforçado**. 2007. 157p. Escola De Engenharia De São Carlos Da Universidade De São Paulo. São Carlos. 2007.

SCREMIN, L. B. **Desenvolvimento De Um Sistema De Apoio Ao Gerenciamento De Resíduos De Construção e Demolição Para Municípios De Pequeno Porte**. 2007. 152p. Dissertação de Mestrado. Florianópolis. 2007.

SEROR, N. et al. Evaluating The Effect of Vehicle Impoundment Policy on Illegal Construction and Demolition Waste Dumping: Israel as a Case Study. **Waste Management**, v.34, n°8, p.1436-1445. 2014.

SHETTY, R. S. Construction And Demolition Waste – An Overview Of Construction Industry In India. **International Journal Of Chemical, Environmental & Biological Sciences**, v.1, n°4, p.640-642. 2013.

SILVA, W. et al. Utilização de Agregados do Resíduos da Construção e Demolição (RCD) em Pavimentos. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC**. Fortaleza. 2015.

SMICAL, I. et al. Research On Recycling Of Hardened Mortar From Construction And Demolition Waste. **Journal Of Applied Engineering Sciences**, v.5, n°18, p.81-86. 2015

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M.; WANG, Y. Optimization On Proportion For Recycled Aggregate In Concrete Using Two-Stage Mixing Approach. **Construction and building materials**, v.21, n°10, p.1928-1939. 2006.

TAM, V. W. Y. Rate Of Reusable And Recyclable Waste In Construction. **The open waste management journal**, v.4, p.28-32. 2011.

TENÓRIO. J. J. L. **Avaliação de Propriedades do Concreto Produzido com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição Visando Aplicações Estruturais**. 2007. 157p. Dissertação de Mestrado. Maceió. 2007.

TIMOSSI, L. S. **Correlações Entre a Qualidade de Vida e a Qualidade de Vida no Trabalho em Colaboradores das Indústrias de Laticínios**. 2009. 180p. Dissertação de Mestrado. Ponta Grossa. 2009.

VANCURA, M.; KHAZANOVICH, L.; TOMPKINS, D. Reappraisal Of Recycled Concrete Aggregate As Coarse Aggregate In Concretes For Rigid Pavements. Transportation research record: **Journal of the transportation research board annual meeting**. 2009.

VALDÉS, A. J. et al. Re-Use Of Construction And Demolition Residues And Industrial Wastes For The Elaboration Or Recycled Eco-Efficient Concretes. **Spanish journal of agricultural research**, v.8, n°1, p.25-34. 2010.

VIEIRA, R. K. et al. Completely Random Experimental Design With Mixture And Process Variables For Optimization Of Rubberized Concrete. **Construction and Building Materials**, v.24, n°9, p.1754-1760. 2010.

VIEIRA, R. K. et al. Optimization Of Expanded Polystyrene Lightweight Aggregate In Pre-Cast Concrete Blocks By A Completely Random Experimental Design With Mixture And Process Variables. **Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica – FUCAPI**. Brasil. 2015.



VIDAL, A. S. **Caracterização de Concreto Permeável Produzido Com Agregados Reciclados de Construção e Demolição Para Utilização em Pavimentação Permeável em Ambiente Urbano**. 2014. 132p. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro. 2014.

WU, Z.; FAN, H.; LIU, G. Forecasting Construction And Demolition Waste Using Gene Expression Programming. **Journal of computing in civil engineering**. 2013.

YEHEYIS, M. et al. An Overview Of Construction And Demolition Waste Management In Canada: A Lifecycle Analysis Approach To Sustainability. **Clean technologies and environmental policy**, v.15, n°1, p.81-91. 2012.

YING, L. et al. Study Of The Resource Utilization Management Of Construction Waste. **Procedia environmental sciences**, v.11, part B, p.869-873. 2011.

YUAN, H.; SHEN, L. Trend Of The Research On Construction And Demolition Waste Management. **Waste Management**, v.31, n°4, p.670-679. 2010.

YUAN, H. Key Indicators For Assessing The Effectiveness Of Waste Management In Construction Projects. **Ecological Indicators**, v.24, p.476-484. 2013.

YU, A. et al. Impact Of Construction Waste Disposal Charging Scheme On Work Practices At Construction Sites In Hong Kong. **Waste Management**, v.33, n°1, p.138-146. 2012.

ZAHARIEVA, R. et al. Assessment Of The Surface Permeation Properties Of Recycled Aggregate Concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.25, n°2, p.223-232. 2003.

## ANEXO A

Resultados dos ensaios realizados em tréplica para obter a porosidade do concreto na melhor mistura:

Ensaio	Resultado 1	Resultado 2	Resultado 3	Média	Desv. Padrão
Índice de vazios	13,33%	15,60%	14,16%	14,36%	1,1485
Absorção	6,22%	7,63%	6,73%	6,86%	0,7139
Massa Esp. Seca	2,14g/cm <sup>3</sup>	2,04g/cm <sup>3</sup>	2,10g/cm <sup>3</sup>	2,09g/cm <sup>3</sup>	0,0503
Massa Esp. Sat.	2,28g/cm <sup>3</sup>	2,20g/cm <sup>3</sup>	2,25g/cm <sup>3</sup>	2,24g/cm <sup>3</sup>	0,0404
Massa Esp. Real	2,47g/cm <sup>3</sup>	2,42g/cm <sup>3</sup>	2,45g/cm <sup>3</sup>	2,45g/cm <sup>3</sup>	0,0251