

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Ingrid Zitto

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE
CONCRETOS CONFECCIONADOS COM AGREGADOS
GRAÚDOS DE RESÍDUOS DE CONCRETO BRANCO DE
ALTO DESEMPENHO COM FIBRAS**

Porto Alegre
julho 2014

INGRID ZITTO

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE
CONCRETOS CONFECCIONADOS COM AGREGADOS
GRAÚDOS DE RESÍDUOS DE CONCRETO BRANCO DE
ALTO DESEMPENHO COM FIBRAS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheira Civil

Orientadora: Angela Borges Masuero
Coorientadora: Cristina Vitorino da Silva

Porto Alegre
julho 2014

INGRID ZITTO

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE
CONCRETOS CONFECCIONADOS COM AGREGADOS
GRAÚDOS DE RESÍDUOS DE CONCRETO BRANCO DE
ALTO DESEMPENHO COM FIBRAS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 15 de julho de 2014

Profa. Angela Borges Masuero
Dra. pela UFRGS
Orientadora

Eng. Cristina Vitorino da Silva
Me. pela UFRGS
Coorientadora

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Angela Borges Masuero
(UFRGS)
Dra. pela UFRGS

Profa. Cristina Vitorino da Silva
(URI)
Me. pela UFRGS

Prof. Rafael Mascolo
(UNIVATES)
Me. pela UFRGS

Carina Mariane Stolz
Me. pela UFRGS

Dedico este trabalho a minha mãe, Cleuza, por sempre ter me apoiado, incentivado e acreditado em meu potencial mais do que eu mesma inúmeras vezes.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha mãe, Cleuza, por sempre me apoiar e me incentivar durante todo o curso.

Agradeço à Profa. Angela Borges Masuero, orientadora deste trabalho, pela oportunidade da realização desta pesquisa e pelo incentivo e tranquilidade transmitidos.

Agradeço à Cristina Vitorino da Silva, coorientadora deste trabalho, por todo auxílio e pela imensa disponibilidade para sanar minhas dúvidas e me ensinar, além do incentivo e motivação.

Agradeço à Profa. Carin Maria Schmitt por toda a dedicação e auxílio empregados para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Agradeço à Profa. Denise Dal Molin pelo auxílio durante a realização deste trabalho, principalmente na realização da dosagem experimental.

Agradeço aos laboratoristas do Lamtac/Norie, Sr. Gilmar e Airton, por todo auxílio, carinho e dedicação na realização das moldagens e ensaios.

Sonhos determinam o que você quer.
Ação determina o que você conquista.

Aldo Novak

RESUMO

A sustentabilidade tem sido alvo de preocupação nos mais diversos setores da sociedade. Na construção civil um dos itens mais impactantes ambientalmente são os resíduos de construção e demolição (RCD). Esses resíduos são provenientes de reformas, demolições, reparos, falta de racionalização, entre outros. A fim de diminuir o impacto causado por esse tipo de resíduo estão sendo realizados diversos estudos propondo a utilização do RCD como agregado para novos concretos, de forma que tenham desempenho semelhante aos concretos que utilizam agregados naturais. Sabe-se, porém, que o uso destes resíduos em concretos ainda é bastante restrito. Com o intuito de incentivar o uso desses materiais, desenvolveu-se este trabalho, no qual investigou-se o uso de um resíduo resultante da confecção de peças de concreto branco de alto desempenho com fibras (RECOFI) como agregado graúdo em concretos. Para tanto, avaliou-se quatro teores de substituição do agregado, em 0, 25, 50 e 75%, em três traços, um rico (1:3,5), um intermediário (1:5,0) e um pobre (1:6,5). Foram realizados ensaios de resistência à compressão uniaxial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, a fim de analisar a interferência dos parâmetros definidos nas propriedades mecânicas dos concretos estudados. Concluiu-se que todos os concretos com traço 1:3,5 utilizando esse resíduo como agregado graúdo, alcançaram resistências à compressão uniaxial maiores que o concreto referência, apresentando, para este caso, um acréscimo de 11,61% na resistência. Quanto a resistência à tração por compressão diametral percebeu-se que não há um padrão comportamental para o teor de 75% em relação aos demais teores e, na maioria dos concretos, verificou-se um decréscimo da resistência em relação ao referência, chegando a uma diferença máxima de 28,17%. Já, em relação ao módulo de elasticidade foi possível observar, para os teores de substituição de 25, 50 e 75%, valores inferiores ao referência. A diferença entre o menor e o maior valor de módulo caracteriza uma redução aproximada de 25%.

Palavras-chave: Resíduos de Construção e Demolição. Concretos com Agregados Graúdos Reciclados. Agregados Graúdos Reciclados. Propriedades Mecânicas de Concretos com Agregados Graúdos Reciclados.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas de pesquisa	17
Figura 2 – Composição média de RCD coletado em um aterro de Porto Alegre/RS	23
Figura 3 – Deposição ilegal de resíduos em São Paulo	34
Figura 4 – Hierarquia da disposição de RCD	35
Figura 5 – Fluxograma de usina de reciclagem de RCD em São Paulo	39
Figura 6 – Fluxograma de planta de usina de reciclagem de RCD para produção de agregados	41
Figura 7 – Diagrama esquemático do programa experimental	45
Figura 8 – Fatores controláveis	47
Figura 9 – Variáveis de resposta	47
Figura 10 – Aspecto visual do cimento CP – V ARI RS utilizado	51
Figura 11 – Aspecto visual do agregado miúdo utilizado	53
Figura 12 – Aspecto visual do agregado graúdo natural	54
Figura 13 – Agregado graúdo reciclado de concreto I	56
Figura 14 – Agregado graúdo reciclado de concreto II	56
Figura 15 – Pesagem de material	58
Figura 16 – Identificação do material pesado	58
Figura 17 – Formas de corpo de prova com desmoldante	59
Figura 18 – RECOFI imerso em água	59
Figura 19 – RECOFI escorrendo água de saturação	59
Figura 20 – Teste de abatimento	59
Figura 21 – Diagrama de dosagem para concretos com teor de substituição de 0%.....	60
Figura 22 – Diagrama de dosagem para concretos com teor de substituição de 25%	61
Figura 23 – Diagrama de dosagem para concretos com teor de substituição de 50%	62
Figura 24 – Diagrama de dosagem para concretos com teor de substituição de 75%.....	63
Figura 25 – Desmoldagem de corpo de prova	64
Figura 26 – Equipamento de retificação	65
Figura 27 – Vista do ensaio de compressão uniaxial	65
Figura 28 – Vista do ensaio de tração por compressão diametral	66
Figura 29 – Vista do ensaio de módulo de elasticidade	66
Figura 30 – Valores médios da resistência à compressão uniaxial de concretos com diferentes teores de substituição para diferentes traços aos 28 dias	69
Figura 31 – Efeito isolado do traço na resistência à compressão uniaxial dos concretos aos 28 dias	70

Figura 32 – Efeito isolado do teor de substituição na resistência à compressão uniaxial dos concretos aos 28 dias	72
Figura 33 – Efeito combinado do traço e teor de substituição na resistência à compressão uniaxial dos concretos aos 28 dias	73
Figura 34 – Valores médios da resistência à tração por compressão diametral de concretos com diferentes teores de substituição para diferentes traços aos 28 dias	75
Figura 35 – Efeito isolado do traço na resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias	77
Figura 36 – Efeito combinado do traço e teor de substituição na resistência à tração por compressão diametral nos concretos aos 28 dias	78
Figura 37 – Valores médios do módulo de elasticidade de concretos com diferentes teores de substituição para diferentes traços aos 28 dias	80
Figura 38 – Efeito isolado do traço no módulo de elasticidade nos concretos aos 28 dias	81
Figura 39 – Efeito isolado do teor de substituição no módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias	82
Figura 40 – Efeito combinado entre traço e teor de substituição no módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação entre impurezas e consequências do uso em concreto	25
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constituintes percentuais de RCD coletado em um aterro em Porto Alegre/RS	23
Tabela 2 – Composição média percentual de caçambas de RCD de algumas cidades brasileiras	24
Tabela 3 – Matriz experimental	50
Tabela 4 – Número de corpos de prova por ensaio	50
Tabela 5 – Caracterização do cimento CP-V ARI RS utilizado	52
Tabela 6 – Caracterização química do cimento CP-V ARI RS utilizado	52
Tabela 7 – Caracterização física do agregado miúdo	53
Tabela 8 – Caracterização física do agregado graúdo natural	55
Tabela 9 – Granulometria do RECOFI	56
Tabela 10 – Dados da dosagem experimental para o teor de 75% de substituição	57
Tabela 11 – Dados de dosagem para concretos com teor de substituição de 0%	60
Tabela 12 – Dados de dosagem para concretos com teor de substituição de 25%	61
Tabela 13 – Dados de dosagem para concretos com teor de substituição de 50%	62
Tabela 14 – Dados de dosagem para concretos com teor de substituição de 75%	62
Tabela 15 – Valores médios da resistência à compressão uniaxial dos concretos com diferentes teores de substituição aos 28 dias	68
Tabela 16 – Análise de variância na resistência à compressão uniaxial	69
Tabela 17 – Valores médios da resistência à tração por compressão diametral	74
Tabela 18 – Análise de variância na resistência à tração por compressão diametral	76
Tabela 19 – Valores médios de módulo de elasticidade	79
Tabela 20 – Análise da variância do módulo de elasticidade	80

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA	15
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	15
2.2.1 Objetivo principal	15
2.2.2 Objetivos secundários	15
2.3 PREMISSE	16
2.4 DELIMITAÇÕES	16
2.5 DELINEAMENTO	16
3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	19
3.1 CONCEITO	19
3.2 CLASSIFICAÇÃO	20
3.3 COMPOSIÇÃO	22
3.4 IMPUREZAS NA COMPOSIÇÃO DE RCD	24
3.4.1 Matéria orgânica ou solos argilosos	26
3.4.2 Materiais betuminosos	26
3.4.3 Gessos	27
3.4.4 Vidros	27
3.4.5 Metais	27
3.4.6 Cloretos	28
3.5 GERAÇÃO DE RESÍDUOS	28
3.6 PERDAS NA CONSTRUÇÃO	29
3.7 IMPACTOS AMBIENTAIS	31
3.7.1 Impactos ambientais e a construção civil	32
3.7.2 Impactos ambientais e os resíduos de construção e demolição	33
4 RESÍDUOS RECICLADOS	36
4.1 BENEFÍCIOS DA RECICLAGEM	36
4.2 PRODUÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS A PARTIR DE RCD	37
4.3 CONTROLE DE HETEROGENEIDADE DE RESÍDUOS	42
4.4 RESÍDUOS DE CONCRETO BRANCO DE ALTO DESEMPENHO COM FIBRAS	43
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	45
5.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	46

5.1.1 Fatores controláveis	47
5.1.2 Variáveis de resposta	49
5.2 MATRIZ EXPERIMENTAL	50
5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	51
5.3.1 Cimento	51
5.3.2 Agregado miúdo	52
5.3.3 Agregado graúdo natural	54
5.3.4 Agregado graúdo reciclado	55
5.3.5 Água	56
5.4 DOSAGEM EXPERIMENTAL	57
5.5 PRODUÇÃO DE CONCRETOS	57
5.6 REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTOS	64
5.6.1 Ensaio de abatimento	64
5.6.2 Ensaio de resistência à compressão uniaxial	64
5.6.3 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	65
5.6.4 Ensaio de módulo de elasticidade	66
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL	67
6.1.1 Efeito isolado do traço	70
6.1.2 Efeito isolado do teor de substituição	71
6.1.3 Efeito combinado do traço e teor de substituição	72
6.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	74
6.2.1 Efeito isolado do traço	76
6.2.2 Efeito combinado do traço e teor de substituição	77
6.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE	78
6.3.1 Efeito isolado do traço	81
6.3.2 Efeito isolado do teor de substituição	82
6.3.3 Efeito combinado do traço e teor de substituição	83
7 CONCLUSÕES	85
REFERÊNCIAS	88
APÊNDICE A	91
APÊNDICE B	93
APÊNDICE C	95

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade no consumo de bens e serviços tem sido alvo de estudos em todas as áreas da sociedade devido ao uso indiscriminado de recursos naturais pouco ou não renováveis. Com essa preocupação, a construção civil vem buscando alternativas para tornar a sua atividade menos impactante ao meio ambiente, através de soluções com sistemas construtivos sustentáveis. Porém, um dos maiores impactos causados pela indústria da construção é a produção de resíduos. Já na fabricação dos diversos materiais empregados no setor há resíduos da matéria-prima utilizada. Além desses, há os resíduos sólidos gerados durante a execução sem racionalização e os produzidos pela reexecução de determinadas imperfeições ou manifestações patológicas que a construção venha a apresentar. E, por fim, ficam disponíveis resíduos pela demolição de parte ou toda de uma edificação ou obra de arte.

Alguns estudos realizados indicam que os resíduos provenientes do setor industrial, e nessa classificação se insere a construção civil, estão entre os principais poluentes do meio-ambiente e, nem sempre, discrimina-se a porcentagem correspondente a essa atividade. Por outro lado, “O peso específico do **resíduo da construção civil** é bastante elevado. Por ser mais pesado, ele se destaca nas estatísticas em relação a outros tipos de resíduos. Mas não há dados suficientes que permitam comparar setores que produzem mais ou menos resíduos.” (SANTOS, 2011, grifo do autor)¹.

Embora ainda não haja uma mensuração mais precisa, estima-se que a construção civil é responsável por grande parte da geração de resíduos poluentes e esse número cresce a cada ano. Devido ao desenvolvimento econômico e social que o setor da construção promove ao País, os investimentos nesta área aumentam consideravelmente, o que resulta em um índice de produção crescente. Outrossim, ainda vivencia-se um déficit de habitações muito elevado em relação a sua população, diferença essa que, presume-se, tende a diminuir com o desenvolvimento da economia do País.

¹ O autor informa que as afirmações são de Carlos Alberto Vieira da Silva Filho, diretor-executivo da Abrelpe (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais).

Analisando esse contexto, tem-se a preocupação de reutilizar os resíduos gerados pela construção civil, pois a porcentagem reutilizada no Brasil ainda é muito pequena comparada ao que poderia ser. Em alguns países, a reciclagem já é tratada há algum tempo e utilizada de forma a demonstrar bons resultados. Em relação a este aspecto, Dorsthorst e Hendriks² (2000 apud LEITE, 2001) citam que em alguns países como Holanda, Dinamarca e Bélgica são reciclados 80% dos resíduos. Na Grécia, Irlanda, Portugal e Espanha, por exemplo, não chegam a aproveitar 50%. Da mesma forma, ao que se refere à normatização relativa à aplicação de resíduos de construção há países que já a possuíam desde 2000, tais como Japão e Holanda.

Uma das preocupações existentes com a utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) para a reciclagem é a qualidade dos materiais que os incorporam, pois originalmente são heterogêneos e oriundos de variadas fontes, com diferentes composições e resistências. Fato esse, tem se mostrado como impedimento para um melhor e maior aproveitamento desses materiais e percebe-se, assim, a necessidade de controlá-los de forma mais intensa. Com isso, torna-se possível retirar impurezas, e reciclá-los com garantia de qualidade e resistência para o uso em concretos.

Esta pesquisa, assim, propõe o estudo de concretos que utilizam resíduos de concreto branco de alto desempenho com fibras (RECOFI). Neste estudo objetiva-se a avaliação das propriedades mecânicas desses concretos, o que possibilita, também, avaliar as propriedades mecânicas de cada concreto estudado.

Apresenta-se neste trabalho 7 capítulos, sendo o primeiro o que compreende esta introdução e o segundo apresenta as diretrizes do trabalho. No capítulo 3, apresenta-se conceitos básicos de resíduos de construção e demolição, a fim de proporcionar o conhecimento elementar sobre RCD. O capítulo 4 apresenta temas relacionados à reciclagem.

O capítulo 5 compreende o planejamento experimental do trabalho, no qual apresenta-se os fatores controláveis e variáveis de resposta, bem como metodologia adotada. Já o capítulo 6 apresenta os dados obtidos através de ensaios e as análises correspondentes. Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho.

² DORSTHORST, B. J. H.; HENDRIKS, C. F.. Re-use of construction and demolition waste in the EU. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo. **Proceedings...**São Paulo: CIB, 2000. 1CD-ROM.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: como variam as propriedades mecânicas dos concretos que utilizam resíduos provenientes de concreto branco de alto desempenho com fibras como agregado graúdo?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a avaliação das propriedades mecânicas de concretos com agregado graúdo de concreto branco de alto desempenho com fibras.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) influência do teor de substituição na resistência à compressão de concretos para diferentes traços;
- b) influência do teor de substituição na resistência à tração por compressão diametral de concretos para diferentes traços;
- c) influência do teor de substituição no módulo de elasticidade de concretos para diferentes traços.

2.3 PREMISSA

O trabalho tem a premissa de que a utilização de resíduos de construção e demolição como agregado graúdo em concreto tem sido prejudicada devido a grande variabilidade de suas propriedades mecânicas e, portanto, deve-se buscar soluções para esse problema.

2.4 DELIMITAÇÕES

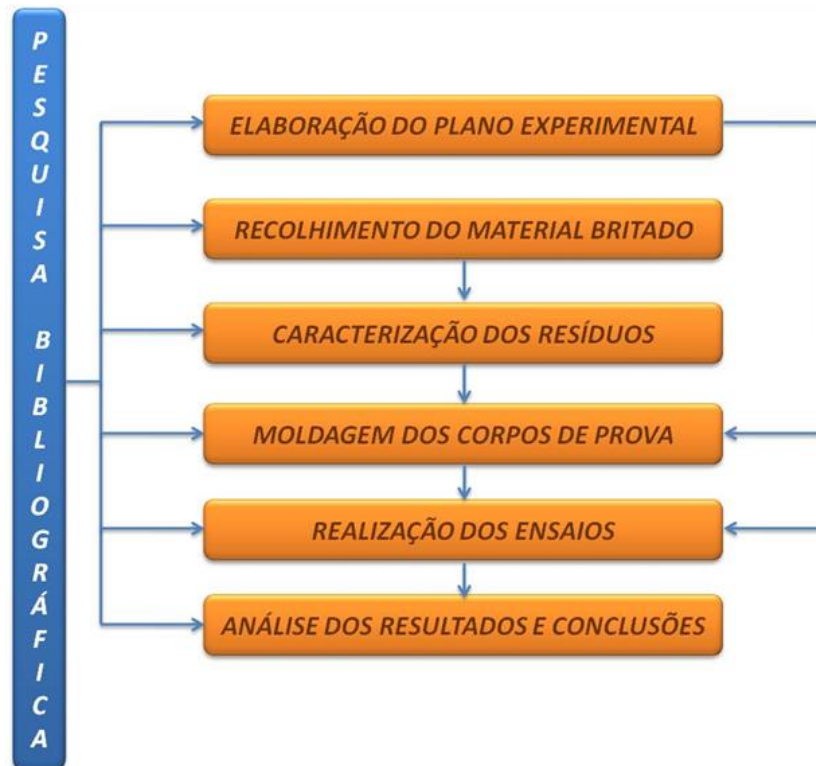
O trabalho delimita-se ao estudo de resíduos resultante do processo de produção de concreto branco de alto desempenho com fibras.

2.5 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, representadas no diagrama da figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do plano experimental;
- c) recolhimento do material britado;
- d) caracterização dos resíduos;
- e) moldagem dos corpos de prova;
- f) realização dos ensaios;
- g) análise dos resultados e conclusões.

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborada pela autora)

Inicialmente foi realizada a **pesquisa bibliográfica** para possibilitar o aprimoramento do conhecimento do tema escolhido e foi baseada em teses e dissertações, além de normas e periódicos. Esta etapa serviu de base para diversas outras etapas seguintes e ocorreu durante todo o trabalho, embora tenha sido mais intensa nos meses iniciais. Após, tem-se a etapa da **elaboração do plano experimental**, no qual se definiu de que forma iria ser realizado o preparo dos corpos de prova e em qual quantidade, bem como a especificação dos ensaios.

Na sequência da elaboração do plano experimental, ocorreu o **recolhimento do material britado**, que consiste em resíduos provenientes de concreto branco de alto desempenho com fibras, sendo este o agregado graúdo ensaiado. A seguir, ocorreu a **caracterização dos resíduos**, através de ensaios específicos em laboratório. Nessa etapa, foram quantificadas e identificadas as frações percentuais da composição de cada uma das amostras, em laboratório, que foram utilizadas na moldagem dos corpos de prova.

Posteriormente, ocorreu a **moldagem dos corpos de prova**, a qual consistiu primeiramente em definir os parâmetros ideais do concreto e, também, o preparo do concreto em si. Após o tempo de cura do concreto de 28 dias, ocorreu a **realização dos ensaios** de resistência à

compressão uniaxial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade em laboratório, os quais permitiram colher dados experimentais para se definir as propriedades mecânicas dos concretos que utilizaram o RECOFI recolhido.

Na fase de **análise dos resultados e conclusões** foram avaliados os dados obtidos pela realização dos ensaios, bem como realizada a análise estatística dos dados, a fim de verificar a confiabilidade desses resultados. Paralelamente a essa análise pode-se efetuar as **conclusões** referente aos resultados das propriedades mecânicas dos concretos que utilizaram RECOFI e compará-las entre os diferentes teores de substituição e traços.

3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o conceito de resíduos de construção e demolição (RCD), a classificação, a composição, as impurezas que podem estar presentes e as perdas que ocorrem na construção. Por fim, uma breve análise do impacto ambiental, primeiramente do ponto de vista mais abrangente relacionado à construção civil e, em seguida, do ponto de vista mais específico aos impactos gerados diretamente pelos RCDs.

3.1 CONCEITO

O conceito de resíduos de construção e demolição pode ser encontrado em diversas obras e se mostra muito semelhante entre elas, a exceção de alguns autores que diferem levemente a abrangência a ele aplicado. Segundo Leite (2001, p. 11), “De forma mais simplificada o resíduo de construção e demolição pode ser definido como um resíduo proveniente de construções, reparos, reformas e demolições de estruturas e estradas.”.

Outrossim, o RCD pode ser definido como “[...] todo e qualquer resíduo oriundo das atividades de construção, seja ele de novas construções, reformas, demolições, que envolvam atividades de obras de arte, solos ou resíduos de vegetação presentes em limpezas de terreno.” (ANGULO, 2000, p. 8). Angulo (2005) informa ainda que os resíduos de construção e demolição são compostos por diversos materiais tais como plásticos, materiais betuminosos, papéis, isolantes, madeiras, metais, concretos, argamassas, blocos, telhas, gesso, solos entre outros.

Por outro lado, a Resolução n. 307 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002, p. [1]), em seu artigo 2., parágrafo I, define resíduos da construção civil como sendo:

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

A Resolução n. 307 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002) denomina em seu artigo 2., parágrafo I, esses resíduos como metralha, caliça ou entulhos de obras. No entanto, Angulo (2000) defende que o termo mais coerente é RCD pois emite a ideia da natureza dos resíduos gerados de atividade de construção e demolição enquanto que o termo entulho emite uma ideia mais geral de resíduo.

3.2 CLASSIFICAÇÃO

Principalmente sobre o aspecto da composição do resíduo e impacto ambiental que ele pode causar, existem algumas classificações aplicáveis, conforme normas e alguns autores. Segundo Leite (2001) todos os resíduos, independente de suas origens, devem ser classificados conforme o impacto e risco ambiental que proporcionem, a fim de que possam ser encaminhados aos destinos corretos, seja aterro, reaproveitamento ou reciclagem.

No Brasil, há normatização referente a classificação de resíduos sólidos, conforme os riscos que pode causar ao meio ambiente e à saúde pública. A NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), classifica os resíduos em:

- a) classe I – perigosos;
- b) classe II – não perigosos,
 - classe II A – não inertes;
 - classe II B – inertes.

O RCD se enquadra na Classe II B, segundo Hood (2006). No entanto a classificação inerte sugerida ao RCD tem sido questionada por diversos estudos, devido a sua heterogeneidade e consequente presença de diversos materiais que podem ser não-inertes. Estes materiais podem ser adesivos, tintas, óleos, baterias e biocidas incorporadas em madeiras tratadas, os quais podem lixiviar e conter substâncias tóxicas (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY³, 1995 apud JOHN, 2000).

³UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Construction and demolition waste landfills**. 1995. Draft Report. 43 p. [Demais informações não foram fornecidas pela obra.]

O Conselho Nacional do Meio Ambiente, através da Resolução n. 307 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002), artigo 3., classifica o RCD em quatro classes distintas (grifo do autor):

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

Assim, Leite (2001, p. 12) afirma ser “[...] prudente que sejam realizados testes de lixiviação e solubilização nos resíduos de construção e demolição com finalidade de garantir que estes não sejam prejudiciais ao meio ambiente.”. Isso se justifica pelo fato de alguns resíduos conterem substâncias químicas prejudiciais a saúde pública, como por exemplo em alguns tipos de tintas.

Lima (1999) propôs uma classificação com seis categorias para o RCD, conforme sua composição, disponibilidade dos resíduos para utilização em reciclagem, sistemas de classificação já existentes no País e no exterior, além das experiências estrangeiras de locais nos quais a reciclagem de resíduos ocorre há mais tempo. Essa classificação é:

- a) classe 1: resíduo de concreto sem impurezas – material composto de concreto estrutural simples ou armado, com teores limitados de alvenaria, argamassa e teores limitados de impurezas;
- b) classe 2: resíduo de alvenaria sem impurezas – material composto de argamassa, alvenaria e concreto, com presença de outros materiais inertes como areias, pedras britadas entre outros com teores limitados de impurezas;

- c) classe 3: resíduo de alvenaria sem materiais cerâmicos e sem impurezas – material composto de argamassa, concreto e alvenaria com baixo teor de materiais cerâmicos, podendo conter outros materiais inertes como areia e pedra britada, entre outros, com teores limitados de impurezas;
- d) classe 4: resíduo de alvenaria com presença de terra e vegetação – semelhante ao resíduo classe 2, mas pode ter presença de volume de terra ou terra misturada com vegetação, em maiores porcentagens;
- e) classe 5: resíduo composto por terra e vegetação – material composto por terra e vegetação, com presença de argamassa e concretos e outros materiais inertes com maior teor de impurezas;
- f) classe 6: resíduo com predominância de material asfáltico – composto predominantemente de material asfáltico, com presença de argamassa, terra, alvenarias, vegetação, gesso, vidros, entre outros.

3.3 COMPOSIÇÃO

Segundo Levy (1997), a composição dos resíduos de construção é muito variável e depende da fonte de geração e do momento de coleta da amostra. A diversidade de materiais utilizados para desenvolvimento das atividades em canteiro de obras é bastante vasta. O resíduo resultante da demolição de construção demonstra uma heterogeneidade tão alta que se torna praticamente impossível sua separação total. Zordan (1997) afirma que o RCD pode ser o resíduo mais heterogêneo entre os diversos resíduos resultantes do setor industrial.

Leite (2001, p. 126) em sua pesquisa coletou amostras de resíduos no aterro de inertes na Zona Sul de Porto Alegre provenientes de construção e demolição e após o beneficiamento determinou a composição das amostras visualmente. A determinação ocorreu somente para agregados graúdos, uma vez que classificar os agregados miúdos através do método visual era inviável. Constatou-se na composição os seguintes constituintes:

- a) concreto: todo material composto por cimento, areia e brita, cuja identificação não deixasse dúvidas;
- b) material cerâmico: todo material cerâmico polido, ou não, constituído de blocos, tijolos, telhas, revestimento cerâmico de piso e parede, ladrilhos, entre outros;
- c) argamassa: parcela de material constituído de cimento e/ou cal e areia sem a presença de agregado graúdo ou pedrisco;
- d) rochas naturais: qualquer tipo de fragmento de rocha natural que foi usado, ou não, e que não apresenta nenhum tipo de material aglomerante;
- e) outros: todas as partículas de material como papel, madeira, metal, plástico, têxteis, amianto, entre outros.

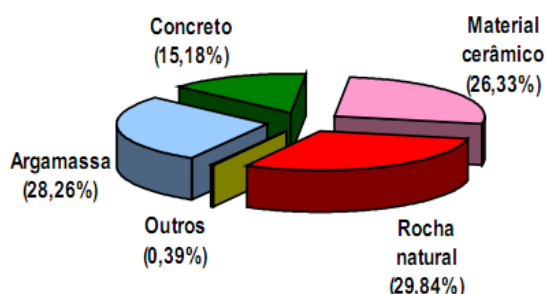
Em seguida da separação das amostras coletadas, a autora obteve a massa de cada fração e, conseqüentemente, a porcentagem de cada constituinte, conforme a tabela 1. Após calculou a média das amostras e obteve uma constituição média que pode ser visualizada na figura 2.

Tabela1 – Constituintes percentuais de RCD coletado em um aterro de Porto Alegre/RS

<i>Constituinte</i>	<i>Amostra 1(%)</i>	<i>Amostra 2(%)</i>	<i>Valor Médio (%)</i>
<i>Argamassa</i>	25,91	30,62	28,26
<i>Concreto</i>	15,88	14,49	15,18
<i>Material cerâmico</i>	25,89	26,77	26,33
<i>Arenito</i>	14,19	11,28	12,74
<i>Demais rochas naturais</i>	17,75	16,44	17,1
<i>Outros</i>	0,39	0,39	0,39
<i>Total</i>	100	100	100

(fonte: adaptada de LEITE, 2001, p. 126)

Figura 2 – Composição média de RCD coletado em um aterro de Porto Alegre/RS



(fonte: LEITE, 2001, p. 127)

Kazmierczak et al.⁴ (2006 apud HOOD, 2006) realizaram um estudo no qual compararam a composição de RCD, já tendo ocorrido a separação de impurezas, de São Leopoldo e Novo Hamburgo, cidades da região metropolitana de Porto Alegre, e concluíram as seguintes porcentagens, respectivamente para cada cidade:

⁴ KAZMIERCZAK, C. S.; KULAKOWSKI, M. P.; BOITO, D.; GARCIA, A. C. Estudo comparativo da geração de resíduos de construção e demolição em São Leopoldo e Novo Hamburgo – RS. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONTRUÍDO, 11., 2006, Florianópolis. *Anais...* [S. l.: s. n.], 2006. [Número de páginas não fornecidos pela obra lida.]

- a) argamassa: 22 e 34%;
- b) cerâmica vermelha: 32 e 23%;
- c) concreto: 26 e 27%.

Angulo (2005) afirma que as demolições geram resíduos mistos no Brasil, nos quais se encontram, principalmente, concretos, argamassas, cerâmicas e rochas. Já Angulo et al. (2013), reforçam que a porção de concreto no RCD brasileiro possui fração inferior a 45%, conforme tabela 2. Geralmente, o resíduo de construção e demolição é misto pois, no País, ainda não existe a cultura do desmonte seletivo de estruturas de concreto, enquanto, aproximadamente 30% do RCD dos demais países é misto (ANGULO et al., 2013).

Tabela 2 – Composição média percentual de caçambas de RCD de algumas cidades brasileiras

<i>Cidades (Estado)</i>	<i>Solo misturado com o RCD (% das caçambas)</i>	<i>Resíduos de concreto puro (% das caçambas)</i>
<i>Maceió (AL)</i>	não determinado	0
<i>Macaé (RJ)</i>	27	18
<i>São Paulo (SP)</i>	25	44

(fonte: adaptada de ANGULO et al.⁵, 2013, p. 62)

3.4 IMPUREZAS NA COMPOSIÇÃO DE RCD

A variabilidade da composição do RCD é bastante vasta, contendo diversos materiais minerais. Ocorre que materiais não inertes se tornam contaminantes ou impurezas quando se deseja reciclar o RCD. Conforme Leite (2001, p. 25), “Este tipo de material pode provocar efeitos negativos, tanto nas propriedades mecânicas do concreto reciclado, quanto na sua durabilidade.”. Lima (1999) define como impureza ou contaminante todo material que possua características danosas ao desempenho e durabilidade de concretos e argamassas que incorporem os agregados reciclados.

⁵ A obra consultada informa que os dados foram recolhidos de Convênio FINEP/CETEM/Poli USP/UFAL/Prefeitura de Macaé 01.05.0100.00 – Aperfeiçoamento do processo de reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição. [Sem demais dados]

Lima (1999) cita que um material novo pode ser gravemente prejudicado quando é formado por agregados que contenham determinados materiais, tais como:

- a) solos argilosos;
- b) plásticos;
- c) resíduos de pavimentos betuminosos;
- d) madeira;
- e) gesso;
- f) refratários;
- g) vidros;
- h) metais;
- i) cloretos;
- j) álcalis;
- l) areias industriais quimicamente contaminadas.

Leite (2001) realizou estudo em alguns desses materiais a fim de analisar as propriedades, principalmente as mecânicas, do concreto quando utiliza agregado reciclado contaminado por algum deles. O quadro 1 apresenta um resumo das principais impurezas encontradas em RCD e suas respectivas consequências negativas quando utilizadas em concreto. Após, é apresentada cada uma das impurezas estudadas pela autora com mais detalhes.

Quadro 1 – Relação entre impurezas e consequências do uso em concreto

<i>Tipo de impureza</i>	<i>Consequências no concreto</i>
Matéria orgânica ou solos argilosos	Diminuição de resistência mecânica e instabilidade em ciclos de gelo/degelo ou umedecimento/secagem
Materiais betuminosos	Grave diminuição de resistência
Gesso	Fissurações
Vidros	Diminuição de resistência e fissurações
Metais	Manchas, fissurações, degenerações na superfície
Cloretos	Corrosão grave de armaduras

(fonte: adaptado de LEITE, 2001)

3.4.1 Matéria orgânica ou solos argilosos

A matéria orgânica ou solos argilosos presentes em agregados reciclados podem diminuir a resistência mecânica ou causar instabilidade em concretos que os incorporem quando passam por ciclos de gelo/degelo ou umedecimento/secagem. No entanto, esses materiais contaminantes estão presentes também nos agregados naturais e causam as mesmas restrições. Por esse motivo as normas para agregados naturais também valem para os agregados reciclados (LEITE, 2001; LEVY, 1997).

De acordo com Hansen⁶ (1992 apud LEITE, 2001, p. 26), “A presença dos solos argilosos no resíduo é de difícil remoção. [...]”. No entanto o autor afirma que com a utilização de “[...] *sprinklers* acima das correias transportadoras e peneiras, ou então, com o uso de peneiramentos sucessivos [...]” é possível retirar esse tipo de impureza.

Segundo Quebaud⁷ (1996 apud LEITE, 2001, p. 26), “[...] esta prática só é possível devido à pequena densidade apresentada pelo material. [...]”. Afirma, ainda, que é a parte mais fina do agregado reciclado que apresenta maiores quantidades de solos argilosos e sugere a remoção da fração fina do material a ser reciclado.

3.4.2 Materiais betuminosos

Alguns estudos demonstram que a resistência do concreto quando incorpora agregado reciclado contaminado com materiais betuminosos pode diminuir drasticamente. Segundo Leite (2001, p. 26), a composição de RCD no Brasil raramente inclui material asfáltico, mas a autora alerta que “De qualquer forma, nos locais onde há a demolição de pavimentos asfálticos, seria interessante proceder a remoção e reciclagem seletiva dos seus diferentes constituintes.”.

⁶ HANSEN, T.C Recycled aggregates and recycled aggregate concrete In: **Recycled of demolished concrete and masonry**. London: Chapman & Hall, 1992. p. 1-160. (RILEM TC Report 6).

⁷ QUEBAUD, M. **Caracterisation des granulats recyclés etude de la composition et du comportement de betons incluant ces granulats**. 1996. 247 f. Thèse (Doctorat) – Universidade d’Artois, França, 1996.

3.4.3 Gessos

É possível que o gesso prejudique gravemente o concreto através da formação de etringita secundária, a qual possui elevada expansividade. Essa manifestação causa grandes tensões internas que, por sua vez, podem provocar fissurações no concreto (LEITE, 2001).

Segundo Leite (2001, p. 27):

O gesso deve ser cuidadosamente eliminado da composição do resíduo antes do seu beneficiamento. Ao ser britado, este material, por ser muito friável, transforma-se em pequenas partículas que ficam completamente misturadas aos agregados produzidos, principalmente na fração do agregado miúdo. A eliminação da fração miúda com sucessivos peneiramentos poderia diminuir a quantidade de gesso porventura existente nos agregados reciclados produzidos. Todavia, ensaios de qualidade dos agregados devem mesmo assim ser realizados para garantir que não haja nenhum problema decorrente do uso deste material na produção de concretos.

3.4.4 Vidros

O vidro pode reagir com o concreto através de uma reação álcali-sílica em meio aquoso, o que, por vezes, causa expansões e conseqüente fissuração do concreto, além de diminuir a resistência do concreto (LEITE, 2001). Segundo Quebaud⁸ (1996 apud LEITE, 2001, p. 27) há três requisitos para que as reações deletérias ocorram:

- a) existência de agregados reativos;
- b) elevadas concentrações de álcalis nas soluções intersticiais;
- c) umidade entre 80 a 85%.

3.4.5 Metais

Aço ou pedaços de arames em presença de cloretos podem acarretar manchas ou leves degenerações à superfície do concreto (LEVY, 1997). Por outro lado, as fissurações podem ser provocadas devido à expansão que ocorre no concreto quando partículas de hidrogênio se

⁸QUEBAUD, M. **Caracterisation des granulats recyclés etude de la composition et du comportement de betons incluant ces granulats**. 1996. 247 f. Thèse (Doctorat) – Universidade d'Artois, França, 1996.

desprendem no momento em que metais como o zinco e alumínio entram em contato com o concreto fresco (LEITE, 2001).

Os metais geralmente são reciclados em separado por possuírem um valor comercial imediato, devido a isso são encontrados em número inferior ao que realmente são produzidos (PINTO, 1999). De acordo com Leite (2001, p. 27), “A remoção da maior parte dos metais presentes nos resíduos de construção e demolição ocorre antes do seu beneficiamento, seja manual ou mecanicamente.”.

3.4.6 Cloretos

Sabe-se que a presença de cloretos pode causar corrosão de armaduras, conseqüentemente, agregados reciclados contendo esta impureza, podem causar o mesmo efeito (VIEIRA, 2003). Além disso, os cloretos podem contaminar os agregados reciclados em duas situações (QUEBAUD⁹, 1996 apud LEITE, 2001, p. 28):

- a) através da penetração dos íons cloreto nas estruturas, principalmente em áreas marinhas, pontes ou pavimentos submetidos a saís de degelo;
- b) através do uso de agregados retirados de zonas marinhas, ou de aditivos aceleradores de pega a base de cloretos nas misturas do concreto.

Segundo Leite (2001, p. 28), a presença de cloretos em agregados reciclados para uso em concretos deve ser analisada através de um controle no momento do recebimento do resíduo com a realização de rastreamento do local de origem do material. Destaca ainda, que “[...] existe a possibilidade da adoção da verificação permanente da qualidade do agregado produzido nas centrais de reciclagem.”.

3.5 GERAÇÃO DE RESÍDUOS

Os diversos segmentos da construção civil causam a geração de resíduos na produção de materiais e componentes, nas atividades de execução de obras e nas atividades de manutenções e, por fim, em demolições. As manifestações patológicas e falhas dos

⁹QUEBAUD, M. **Caracterisation des granulats recyclés etude de la composition et du comportement de betons incluant ces granulats**. 1996. 247 f. Thèse (Doctorat) – Universidade d’Artois, França, 1996.

procedimentos executivos, que as construções apresentam ou os componentes que chegam ao final da sua vida útil causam as atividades de manutenção (JOHN¹⁰, 1986 apud JOHN, 2000). Além disso, John (2000) destaca que a modernização devido a evolução tecnológica de parte de uma edificação acaba causando a geração de resíduos também.

Em relação a geração de RCD em diversos países, Angulo (2000) afirma, ainda, que há uma faixa entre 19 a 52% gerados diretamente nas construções e entre 48 a 81% gerados por demolição. De acordo com Pinto (2005), no Brasil há uma estimativa de produção de resíduos causada pela atividade de construção, seja ela informal ou em canteiro de obras, de 50%. Conforme Angulo (2005), a fração de produção de RCD gerada devido a manutenção é desconhecida pelo fato de ser, na maioria das vezes, abalizada como demolição.

Segundo John e Agopyan (2000), na fase da manutenção, para que seja possível a redução de geração de resíduos, deve-se melhorar a qualidade nos processos construtivos. Defendem, também, a necessidade de estudos preliminares, incluindo projetos que majorem o aumento da vida útil da estrutura.

John e Agopyan (2000) alertam, ainda, que outras medidas preventivas para a redução de geração de RCD dependem da conscientização e comprometimento das pessoas envolvidas nos processos construtivos e que isso só ocorrerá a longo prazo. Hood (2006) afirma que se faz necessário o incentivo a modernização das construções ao invés da demolição e salienta a importância no aumento da vida útil dos componentes utilizados, além da inovação em metodologias que proporcionem o reaproveitamento dos materiais.

3.6 PERDAS NA CONSTRUÇÃO

Em todo processo de produção, seja ele qual for, é comum que haja uma quantidade de perda, devido a variabilidade natural. O desperdício se caracteriza pela fração que ultrapassa o limite dessa quantidade comum conforme a tecnologia utilizada (ANDRADE¹¹, 1999 apud JOHN, 2000). Segundo Paliari (1999), perda é a diferença percentual entre o consumo efetivo de material e o pré-estabelecido.

¹⁰ Não foram fornecidos dados catalográficos de JOHN, 1986 pela obra consultada.

¹¹ Não foram fornecidos dados catalográficos de ANDRADE, 1999 pela obra consultada.

De acordo com Andrade¹² (1999 apud JOHN, 2000, p. 19), a dificuldade está justamente em determinar o limite entre a perda inevitável ao processo e o desperdício, pois depende de características que variam conforme a região e o tempo. Acrescenta ainda, que “Parte das perdas permanecem incorporadas ao edifício na forma de espessuras excessivas e outra parcela é retirada na forma de resíduo de construção.”. Nesse sentido, Hood (2006) reforça relatando que parte das perdas devido aos processos construtivos se incorpora aos sistemas na medida em que as dimensões dos componentes são excessivas, enquanto outra parte constitui o RCD.

Angulo (2000) relata que os resíduos produzidos em obra alcançam uma faixa entre 20 a 30% de material desperdiçado em relação a massa total. Por outro lado Pinto (1995) defende que este valor representa 50%. Segundo Zordan (1997), a construção civil artesanal é predominante em nosso País e responsável por grandes índices de perdas, tanto de material quanto de mão de obra devido ao gerenciamento de qualidade inferior e a baixa produtividade.

As diversas fases do ciclo de vida de uma edificação provocam perdas. A etapa de planejamento pode provocar perdas ao optar por determinado processo construtivo inadequado ou até mesmo desnecessário. Assim como, por exemplo, a etapa de projeto pode dimensionar algumas soluções além do suficiente ou indicar a utilização de alguma tecnologia inapropriada (JAQUES¹³, 1998 apud JOHN, 2000). Segundo John (2000, p. 20), “A fase de execução é certamente geradora da parcela mais visível das perdas, inclusive porque é somente nesta fase que as decisões anteriores ganham dimensão física, consumindo recursos naturais.”.

Essas escolhas acabam sendo fonte de geração de resíduos através de perdas. Galivan e Bernold¹⁴ (1994 apud ANGULO, 2000) relacionam algumas etapas da construção com as principais falhas ou más escolhas que favorecem ao aumento de perdas, conforme listado a seguir:

¹² Não foram fornecidos dados catalográficos de Andrade, 1999 pela obra consultada.

¹³ JAQUES, R. **The influence of design and procurement on construction site waste generation: a pilot study.** Judgeford: Branz, 1998. Study Report n. 81

¹⁴ GALIVAN, R. M.; BERNOLD, L. E. Source evaluation of solid waste in building construction. **Journal of Construction Engineering and Management.** p. 536-552, [S. l.], Dec. 1994.

- a) principais causadores de perdas na etapa de projetos,
 - erro nos contratos;
 - contratos incompletos;
 - modificações de projeto;
- b) principais causadores de perdas na etapa de intervenção,
 - ordens erradas, ausência ou excesso de ordens;
 - erros no fornecimento;
- c) principais causadores de perdas na etapa de manipulação de materiais,
 - danos durante o transporte;
 - estoque inapropriado;
- d) principais causadores de perdas na etapa de operação,
 - erros do operário;
 - mau funcionamento de equipamentos;
 - ambiente impróprio;
 - dano causado por trabalhos anteriores e posteriores;
 - uso de materiais incorretos em substituições;
 - sobras de cortes;
 - sobras de dosagem;
 - resíduos de processo de aplicação;
- e) principais causadores de perdas em outras etapas,
 - vandalismo e roubo;
 - falta de controle de materiais e de gerenciamento de resíduos.

3.7 IMPACTOS AMBIENTAIS

Os impactos ambientais ocasionados pela indústria da construção civil ganham destaque a medida que o País se desenvolve. Países, como o Brasil, que estão em desenvolvimento e países já desenvolvidos enfrentam situações em que o progresso faz com que as atividades tenham um impulso repentino e, com isso, as produtividades aumentam significativamente. No entanto, esses mesmos países não estão prontos para gerenciar de forma suficientemente adequada todo o tipo de poluição, geração de resíduos e os demais impactos ambientais.

Isso vale não somente para a indústria da construção civil, como também para as demais indústrias e atividades financeiras. Assim, nos próximos itens apresenta-se sucintamente

alguns aspectos relacionados ao impacto ambiental causado pela construção como um todo e após concentra-se na questão dos resíduos de construção e demolição.

3.7.1 Impactos ambientais e a construção civil

John (2000, p. 15) relata alguns fatores que contribuem para o consumo de recursos naturais na área da construção civil, tais como:

- a) taxa de resíduos gerados;
- b) vida útil ou taxa de reposição das estruturas construídas;
- c) necessidades de manutenção, inclusive as manutenções que visam corrigir falhas construtivas;
- d) perdas incorporadas nos edifícios;
- e) tecnologia empregada.

Segundo John (2000), a mensuração de quantidades de recursos naturais consumidos é uma tarefa bastante difícil de ser executada. No entanto, Sjöström¹⁵ (1996 apud JOHN 2000) afirma que uma faixa entre 14 a 50% dos recursos naturais extraídos no planeta são direcionados ao setor da construção.

John (2000) aponta outros fatores envolvidos na construção que também implicam em impacto ambiental, tais como o meio de transporte, distância e a própria produção de materiais, pois consomem uma quantia razoável de energia. Por exemplo, na Inglaterra, no final dos anos 1990 havia indícios de que chegava a 10% da energia total consumida (DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, TRANSPORT AND THE REGIONS¹⁶, 1998 apud JOHN, 2000).

Segundo John (2000), existe poluição sonora e poluição do ar por material particulado respirável, além da contaminação de águas através da lavagem de caminhões betoneiras ao final do dia de trabalho entre outras atividades do setor. Há ainda, alguns fatores de extrema

¹⁵SJÖSTRÖM, C. Service life of the building. In: APPLICATIONS OF THE PERFORMANCE CONCEPT IN BUILDING, n. 2, 1996, Tel Aviv. **Proceedings...**Tel Aviv: Cib, 1996. p. 6-11.

¹⁶ DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, TRANSPORT AND THE REGIONS. (UK) Sustainable Development: opportunities for change. **Sustainable construction**. 1998. Disponível em <www.environment.detr.gov.uk/sustainable/construction/consult/index.htm>. Acesso em: 22 jan. 2000.

relevância tais como a grande quantidade de gás carbônico liberada por fábricas de cimento e cal, a destruição causada em flora, fauna, paisagem e, por fim, o consumo de água potável.

O ambiente construído é agente responsável pelas mudanças climáticas, pelo aumento do buraco na camada de ozônio, pelas chuvas ácidas, pelos desmatamentos e pela perda da biodiversidade, juntamente com as indústrias, sistemas de transportes e atividades econômicas. Os edifícios consomem recursos naturais não somente na etapa de sua construção, mas sim em todo o tempo de seu uso, porque altera também o ambiente das regiões lindeiras, através do consumo de energia e água (ALAVEDRA et al.¹⁷, 1997 apud LEITE, 2001).

De acordo com Leite (2001, p. 14), apesar da indústria da construção ser uma das mais antigas da história, os métodos utilizados na execução de suas atividades praticamente não se alteraram. Ou seja, a produção de diversos materiais e processos dentro da construção não teve um avanço tecnológico que pudesse auxiliar na diminuição do impacto ambiental. Acrescenta ainda, que “A preocupação com o meio ambiente têm levado todas as indústrias a começar a repensar métodos e técnicas.”.

Segundo John (2000), a construção civil é a principal consumidora de energia e, ainda, contribui fortemente com a poluição ambiental, incluindo o efeito estufa. John (2000, p. 25) finaliza afirmando que o desenvolvimento sustentável só será possível a partir do momento que a cadeia produtiva sofra transformações consideravelmente altas. Alerta, também, que “Provavelmente estas mudanças serão muito mais profundas que as causadas recentemente pela adoção do paradigma de gestão de qualidade.”.

3.7.2 Impactos ambientais e os resíduos de construção e demolição

Países em desenvolvimento e desenvolvidos, consomem grande quantidade de materiais e, em consequência, produzem um número expressivo de resíduos, enquanto ampliam o seu ambiente construído. Internacionalmente, os maiores problemas enfrentados com a questão de resíduos de construção e demolição são relativos a sua disposição, que por vezes, acaba sendo

¹⁷ ALAVEDRA, P.; DOMINGUEZ, J.; GONZALO, E. et al. La construcción sostenible. El estado de la cuestión. **Informes de la Construcción**, v. 49, n. 451 p. 41-47, 1997.

ilegal e em locais inapropriados, além do grande volume produzido para armazenar em aterros (JOHN; AGOPYAN, 2000).

Sabe-se que mais de 20% dos RCD gerados em São Paulo são depositados em locais irregulares dentro da cidade, figura 3, e que isso gera custos ao governo devido a sua coleta, transporte, transbordo e deposição em aterro legal. De forma geral, os governos sistematizam a limpeza desses depósitos ilegais e os depositam em aterros sanitários. Esse vem sendo o único gerenciamento de resíduos praticado pelos governos e a multa ao infrator acaba sendo a única forma de incentivo ao depósito em local adequado (ANGULO, 2005).

Os principais efeitos dos depósitos irregulares são (PINTO, 1999):

- a) enchentes provenientes de assoreamento de córregos e rios;
- b) entupimento de galerias e bueiros;
- c) degradação de áreas urbanas;
- d) proliferação de insetos e roedores que afetam a saúde pública.

Figura 3 – Deposição ilegal de resíduos em São Paulo



(fonte: ANGULO¹⁸, 2005, p. 8)

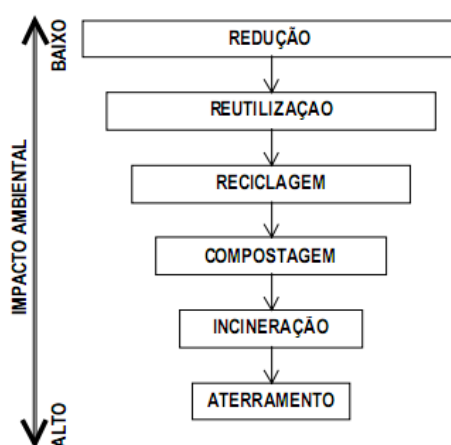
Pinto (1999) afirma que a problemática em relação aos aterros legais é o esgotamento de espaço e que os depósitos acabam se afastando, fixando-se a grandes distâncias, o que interfere no transporte do material. Hood (2006) destaca, ainda, a preocupação com lixiviação de materiais poluentes que estão sendo depositados nesses aterros e não recebem o correto cuidado.

¹⁸ ANGULO, 2005 informa que as fotos são de JOHN, V. M. e informa que o local foi limpo pela prefeitura em 30 ago. 2002 e em apenas dois meses já estava com entulhos novamente.

A figura 4, apresenta a hierarquia da disposição de RCD conforme o impacto ambiental que ocasiona, percebe-se que o aterramento é a última opção. Cada uma das etapas é conceituada a seguir (PENG et al.¹⁹, 1997 apud LEITE, 2001, grifo nosso):

- a) **redução da geração de resíduos**: opção ideal e a que acarreta menor impacto ambiental;
- b) **reutilização**: se caracteriza pela movimentação direta dos materiais de uma utilidade para outra e é uma boa opção por necessitar o mínimo de processamento e energia;
- c) **reciclagem**: consiste na transformação dos materiais em novos materiais ou bens;
- d) **compostagem**: se conceitua pela modificação da fração orgânica em húmus e possui a finalidade de uso em tratamento de solos;
- e) **incineração**: é a extração de energia dos resíduos sem originar substâncias tóxicas, quando corretamente operada;
- f) **aterramento**: o mais ineficaz dentro do modelo hierárquico e, portanto, o que causa maior impacto ambiental.

Figura 4 – Hierarquia da disposição de RCD



(fonte: PENG et al.²⁰, 1997 apud LEITE, 2001, p. 16)

¹⁹ PENG et al. Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations. **Construction, Management and Economics**, n. 15, p. 49-58, 1997.

²⁰ op. cit.

4 RESÍDUOS RECICLADOS

No Brasil, a reciclagem de resíduos de materiais de construção ainda é pequena quando comparada a países de primeiro mundo, com a possível ressalva da acentuada reciclagem praticada pelas indústrias de cimento e de aço (JOHN, 2000). Por outro lado, segundo Angulo et al. (2001), “A reciclagem de resíduos pela indústria da construção civil vem se consolidando como uma prática importante para a sustentabilidade, seja atenuando o impacto ambiental gerado pelo setor ou reduzindo os custos.”.

Neste capítulo são apresentados alguns pontos relevantes referente à reciclagem de RCD. Inicialmente, apresenta-se os principais benefícios da reciclagem em diferentes aspectos, tais como econômico e ambiental. Após, aborda-se a produção de agregados reciclados a partir de resíduos de construção e demolição e, por fim, apresenta-se uma breve análise do controle de heterogeneidade de resíduos.

4.1 BENEFÍCIOS DA RECICLAGEM

Pinto²¹ (2000 apud LEITE, 2001, p. 45, grifo do autor) afirma que a reciclagem de resíduos apresenta algumas grandes vantagens. Primeiramente apresenta o benefício referente ao **ambiente de trabalho**, o qual será mais organizado, causando, desta forma, um novo comportamento aos operários. Em seguida destaca, “Vantagens de âmbito **institucional**, visto que a organização e reciclagem dos resíduos são excelentes promotores de vendas de produtos.”.

Outrossim, Pinto²² (2000 apud LEITE, 2001) afirma a vantagem **econômica** propriamente, pois defende que reciclar é mais viável financeiramente que descartar. Nesse mesmo sentido, Lima (1999) afirma que reciclar os resíduos é menos dispendioso que gerenciá-los através da remoção ou do aterro.

²¹ PINTO, T. P. Recycling in construction sites: environmental responsibility and cost reduction. In: SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: CIB, 2000. 8 p. CD-ROM

²² op. cit.

A reciclagem de resíduos da construção e demolição apresenta diversas vantagens potenciais seguindo a visão de sustentabilidade. A mais notável das contribuições é a **preservação de recursos naturais**, os quais quando substituídos por resíduos proporcionam o aumento da vida útil das reservas naturais e diminuem a devastação da paisagem, flora e fauna (JOHN, 2000).

Além disso, a **redução do volume de aterros** e incineração é um aspecto positivo, visto que os aterros podem conter substâncias tóxicas que, por sua vez, podem contaminar o lençol freático e sofrer a lixiviação. Outro fator a considerar é a **redução de consumo energético** durante a produção de bens, pois na maioria das circunstâncias os materiais já possuem energia (JOHN, 2000).

Pode-se afirmar, ainda, que “A reciclagem também permite a **geração de empregos** e aumenta a competitividade da economia.” (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY²³, 1998 apud JOHN, 2000, p. 30, grifo do autor). E, por fim, diversos estudos na área de adições de escória de alto forno e pozolanas com aplicação em cimento comprovam que a utilização de resíduos proporciona acréscimo da **durabilidade** da construção em algumas situações (JOHN, 2000, grifo nosso).

4.2 PRODUÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS A PARTIR DE RCD

Conforme analisou-se no capítulo anterior, o ideal é sempre verificar primeiramente a possibilidade de redução de geração de resíduos de construção. Mas, como se sabe, a geração de resíduos, por vezes, se torna inevitável e então a melhor opção é tentar a reutilização dos materiais diretamente em novos destinos, sem a necessidade de beneficiamento (LEITE, 2001).

No entanto, se não for possível reutilizar todos os materiais, como, provavelmente, não é possível fazê-lo, a opção menos impactante ambientalmente é a reciclagem. Ela se torna uma boa alternativa para tentar amenizar a problemática causada pela grande quantidade de

²³ UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Characterization of building-related construction and demolition debris in the United States**. Report n. EPA530-R-98-010. 100 p. 1998. [Demais informações não foram fornecidas pela obra consultada.]

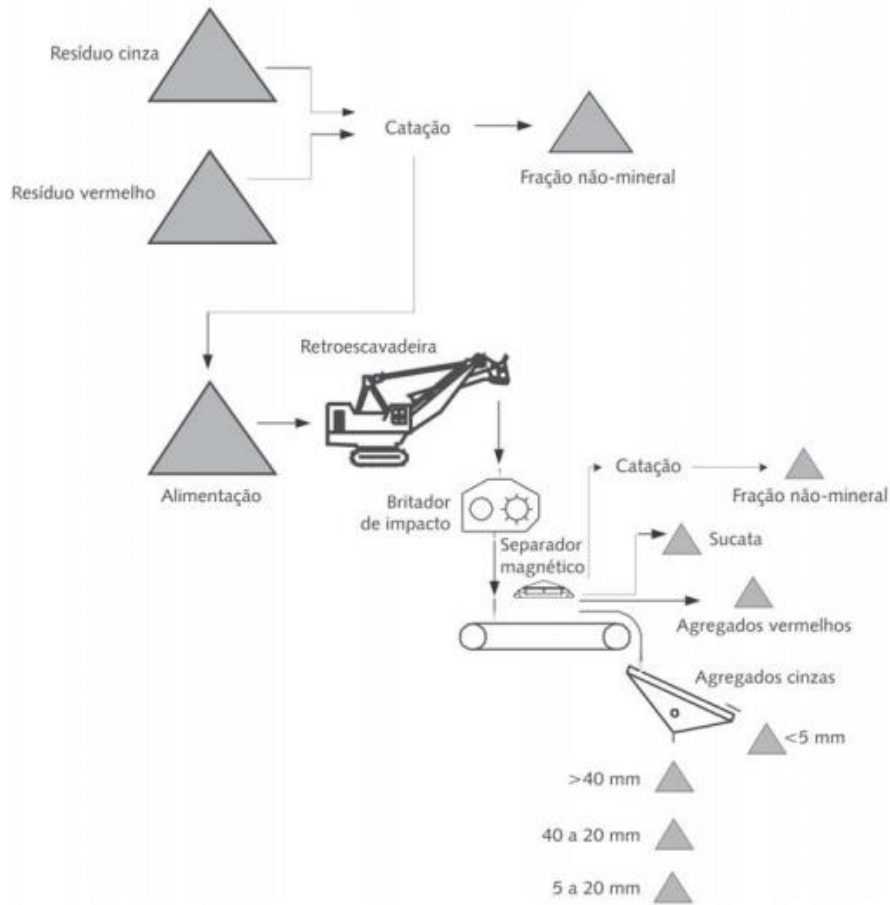
resíduos, pela necessidade crescente de matéria-prima e dos problemas de gerenciamento de resíduos (LEITE, 2001).

Na escolha pela reciclagem de resíduos se faz necessário que os materiais passem pelo processo de beneficiamento. Segundo Leite (2001, p. 30), resumidamente “O beneficiamento dos resíduos de construção e demolição envolvem desde sua coleta e transporte, passando por separação, britagem e peneiramento, até a sua estocagem para posterior utilização.” (figura 5). Conforme alguns estudos, o beneficiamento de RCD se assemelha muito com o tratamento direcionado aos agregados naturais, incluindo os equipamentos, os quais na maioria são os mesmos (LEITE, 2001).

A variabilidade na composição do resíduo de construção e demolição é muito grande, como já mencionado anteriormente. Com isso se torna inevitável que o processo de reciclagem efetue a divisão da fração reciclável como agregado da fração com outros fins (ANGULO, 2000).

Segundo Angulo (2000, p. 23), “As atividades de britagem, peneiramento e lavagem são uma forma de se reciclar a fração inorgânica não-metálica dos RCD, sendo a reciclagem como um todo algo bem mais complexo, inclusive com a necessidade de outros equipamentos.”. O autor destaca ainda que é necessário ter atenção com as impurezas, conforme citadas anteriormente.

Figura 5 – Fluxograma de usina de reciclagem de RCD em São Paulo



(fonte: JOHN et al., 2006, p. 183)

A seguir, descreve-se alguns processos para a separação e classificação dos RCD (PENG et al.²⁴, 1997 apud ANGULO, 2000; QUEBAUD; BUYLE-BODIN²⁵, 1999 apud ANGULO, 2000, p. 24):

- a) separador magnético: utilizado para remover materiais ferrosos pela força eletromagnética;
- b) tanques de depuração por flutuação: separando pela densidade madeiras e plásticos;
- c) classificador por ar: separando densidades diferentes pelo escoamento de ar horizontal e vertical.

²⁴PENG et al. Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations. **Construction, Management and Economics**, n. 15, p. 49-58, 1997.

²⁵ QUEBAUD, M. R.; BUYLE-BODIN, F. A reciclagem de materiais de demolição: utilização dos agregados reciclados em concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, n. 5, 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s. n], 1999. 14 p. [Páginas consultadas não informadas]

Quebaud e Buyle-Bodin²⁶ (1999 apud ANGULO, 2000, p. 24) acrescentam ainda:

Os RCD devem passar por seleção rigorosa e serem estocados segundo qualidade e facilidade de tratamento. Em seguida, devem ser quebrados até atingirem dimensões compatíveis com a entrada dos britados. Controles de teor de sulfatos, oriundos do gesso, devem ser realizados em diferentes estágios da britagem dos agregados, em razão dos componentes de gesso.

Os britadores podem ser classificados conforme seu propósito em quatro classes (PENG et al.²⁷, 1997 apud ANGULO, 2000; PINTO, 1999):

a) de impacto,

- possui unidades primárias e secundárias;
- fornece agregados com granulometria boa para obras rodoviárias;
- pouco sensível a presença de barras de aço;
- geram maiores quantidades de agregados miúdos;
- possuem capacidade de redução de partículas superiores aos britadores de mandíbula;

b) de mandíbula,

- especialmente desenvolvido para britar rochas e materiais similares;
- produz bons agregados para concretos estruturais;
- apresentam menor quantidade de agregados miúdos;
- são mais sensíveis e eficientes para agregado reciclado de concreto quando possuem sistema de britagem secundário;

c) de martelo,

- reduz, pelo impacto, partículas maiores em partículas menores;
- produz material de granulometria fina;

d) de rolos,

- reduz a diâmetros de 7,5 a 10,0 cm;
- alguns modelos podem ser utilizados como betoneira.

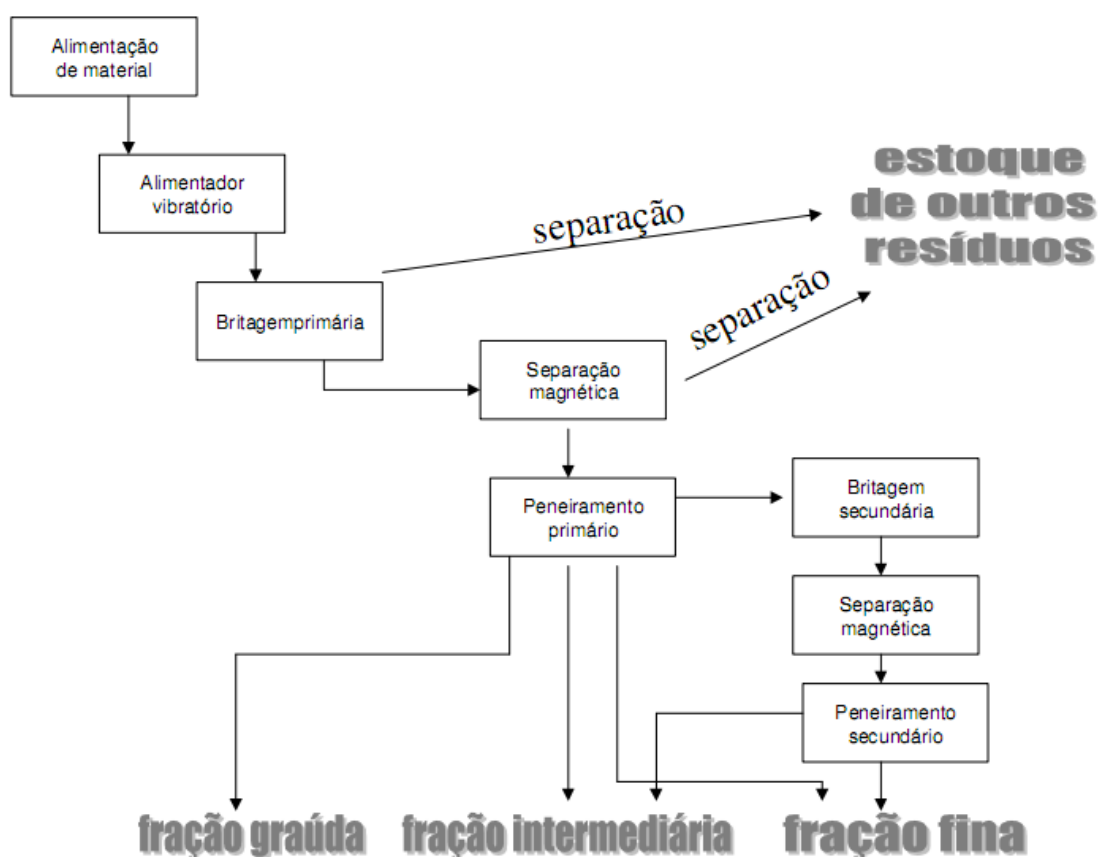
A figura 6 apresenta um esquema de planta de reciclagem utilizando o processo de britagem para a geração de agregados de RCD reciclados, normalmente utilizada nas centrais de reciclagem do País. Geralmente as centrais brasileiras não possuem separação por tanques de

²⁶ QUEBAUD, M. R.; BUYLE-BODIN, F. A reciclagem de materiais de demolição: utilização dos agregados reciclados em concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, n. 5, 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s. n], 1999. 14 p. [Páginas consultadas não informadas]

²⁷PENG et al. Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations. **Construction, Management and Economics**, n. 15, p. 49-58, 1997.

flutuação ou por injeção de ar. Além disso, raramente apresentam a etapa de britagem secundária (ANGULO, 2000).

Figura 6 – Fluxograma de planta de usina de reciclagem de RCD para produção de agregados



(fonte: WILBURN; GOONAN²⁸, 1998 apud ANGULO²⁹, 2000, p. 25)

Angulo (2000, p. 24) expõe que, conforme o tipo de britagem utilizado na central de reciclagem, pode se fazer necessária a etapa de britagem primária e secundária, dependendo do tamanho do agregado que se deseja obter, majoritariamente. De acordo com o autor, “[...] elevada quantidade de agregados miúdos favorecem a utilização para argamassas em blocos, enquanto alta quantidade de agregados graúdos favorece o emprego em concretos.”.

²⁸ WILBURN, D. R.; GOONAN, T. G. **Economic assessments for construction applications: a materials flow analysis.** Geological Survey Circular 1176. 1998. 37 p. Disponível em: <<http://greenwood.cr.usgs.gov/pub/circulars/c1176/c1176.html>>. [Acesso não fornecido]

²⁹ Angulo, 2000, informa ter modificado a figura de WILBURN; GOONAN, 1998.

4.3 CONTROLE DE HETEROGENEIDADE DE RESÍDUOS

Alguns fatores dificultam o uso de resíduos reciclados para concreto (JOHN et al., 2006, p. 175):

- a) pouca eficiência na triagem da fração mineral do RCD;
- b) variabilidade intrínseca dos agregados de RCD reciclados;
- c) insuficiência dos métodos de controle de qualidade desses agregados;
- d) deficiência de controle de processamento.

Atualmente no Brasil não se utilizam agregados reciclados em concretos estruturais, pois as normas existentes nesse sentido obrigam a utilização de resíduos exclusivamente oriundos de concretos. Para que isso seja possível se faz necessário a demolição seletiva, na qual o concreto é separado dos demais resíduos já na origem. Esse procedimento praticamente inexistente no Brasil, com a exceção de quando a demolição é de construção praticamente toda em concreto, a qual raramente existe em nosso País (JOHN et al., 2006).

Apesar de existir norma que exija a separação dos resíduos conforme sua classificação, a Resolução n. 307 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002) não solicita a separação dos resíduos de Classe A, os quais são compostos de concretos e alvenarias, entre outros. Segundo John et al. (2006), isso torna ainda maior a dificuldade de utilização de resíduos em concretos estruturais ou com resistência acima de 25 MPa.

Outra situação bastante rotineira nas centrais de reciclagem, de acordo com John et al. (2006), é a inspeção puramente visual, sendo que as caçambas aparentemente contaminadas com grande quantidade de impurezas são desprezadas. No entanto, por vezes a caçamba apresenta aspecto de resíduos compostos principalmente por fração mineral, mas quando é analisada por completo percebe-se grande quantidade de materiais que caracterizam impurezas, tais como o gesso e o amianto.

Nesse sentido, Quebaud e Buyle-Bodin³⁰ (1999 apud ANGULO et al., 2001, p. 6) afirmam que “A solução para alguns contaminantes presentes no RCD (plásticos e madeiras) pode ser

³⁰ QUEBAUD, M. R.; BUYLE-BODIN, F. A reciclagem de materiais de demolição: utilização dos agregados reciclados em concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, n. 5, 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s. n], 1999. 14 p. [Páginas consultadas não informadas]

o emprego de tanques de depuração por flotação e separadores magnéticos.”. Por outro lado, Mulder et al.³¹ (2000 apud ANGULO et al., 2001), afirmam que alguns contaminantes como orgânicos voláteis e hidrocarbonetos propiciam uma separação muito mais complicada, em determinados casos.

Outro agente contaminante ao resíduo para reciclagem, que, por vezes, é de difícil separação e que está conquistando maior uso nas construções é o gesso. De acordo com Angulo et al. (2001), “A recente introdução maciça de gesso na forma de revestimentos ou placas no Brasil pode ser um complicador para a reciclagem dos RCD, caso processos de controle não sejam instalados em Centrais de Reciclagem.”.

Os equipamentos utilizados nas usinas de reciclagem no Brasil possuem baixa capacitação de separação de resíduos, principalmente no que diz respeito às impurezas. No País, a grande maioria dessa etapa de separação dos resíduos e das impurezas ocorre visualmente, o que se caracteriza por ser um processo moroso, com alto custo e com falhas, por muitas vezes inviabilizando o processo.

Em países, no qual já se utiliza usinas mais tecnológicas de reciclagem com classificadores mecânicos e outros métodos como concentração gravítica e separação ótica alcançam maiores sucessos na separação dos resíduos e das impurezas incorporadas neles. Além disso, essas tecnologias facilitam ainda mais o aproveitamento de resíduos para agregados, pois reduzem o teor de finos nos agregados e a produção de partículas respiráveis (ANGULO et al., 2001).

4.4 RESÍDUOS DE CONCRETO BRANCO DE ALTO DESEMPENHO COM FIBRAS

Geralmente o RCD é composto por diferentes materiais ou proveniente de uma demolição seletiva, conforme já mencionado anteriormente. O resíduo utilizado no desenvolvimento desta pesquisa é um resíduo bastante específico e aqui identificado como RECOFI.

³¹ A obra consultada informa como autor MULDER, E. et al. e demais dados como segue: Immobilisation of PAH in waste materials. In: WASTE MATERIALS IN CONSTRUCTIONS. 2000, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 2000. p. 953-62.

Além de ser proveniente unicamente da demolição de concreto, torna-se ainda mais exclusivo, por ser um concreto de alta resistência (80 a 90 MPa) e auto adensável, características estas de concreto com alto desempenho. Ainda, possui fibras de polipropileno estruturais em sua composição, as quais substituem o uso de armaduras. Este material foi cedido por uma fábrica de edificações pré-moldadas, a qual o utiliza em grande parte da sua produção.

Percebeu-se que, devido a um severo controle de qualidade, diversas peças estavam sendo descartadas por imperfeições no acabamento, o que acarreta em prejuízo financeiro e desperdício de material. Pensou-se, assim, na possibilidade de aproveitamento deste material e iniciou-se então esta pesquisa.

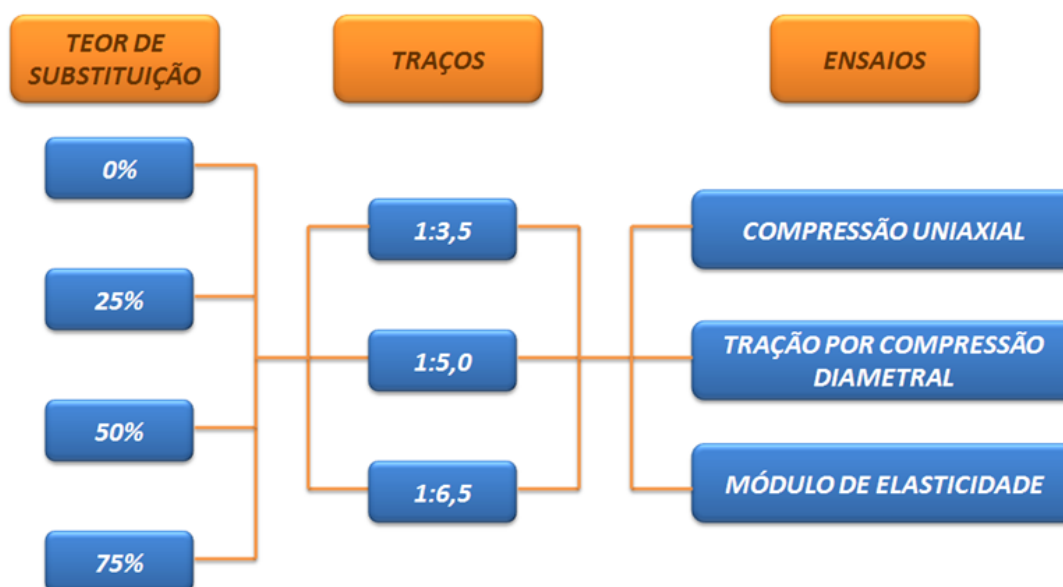
Com base nos resultados obtidos dos ensaios realizados, pode-se sugerir o uso pela própria fábrica em substituição de concretos com resistências inferiores as que normalmente utilizam, como por exemplo, no preenchimento de peças, ou, ainda, em outros locais nos quais as propriedades requeridas em projeto sejam atendidas pelos concretos produzidos nesta pesquisa. O concreto cedido foi entregue pela fábrica ao laboratório já britado e serve de material para este trabalho e posteriormente para outro, no qual estuda-se propriedades de durabilidade.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental é o processo pelo qual se organizam as atividades necessárias a evolução satisfatória das fases da pesquisa experimental, bem como a análise dos dados e conclusões. Torna-se parte imprescindível a toda pesquisa que deseja garantir uma organização em seus procedimentos a fim de alcançar com qualidade os objetivos propostos. A figura 7 demonstra, através de diagrama, o programa adotado.

A fim de qualificar os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, utilizou-se uma metodologia de tratamento de dados de forma a garantir 95% de confiabilidade dos dados, através de análise de desvio padrão e variância. Além disso, utilizou-se o programa Statistica - ANOVA, o qual possibilita a análise estatística das influências das variáveis independentes com cada variável de resposta ou em algumas situações combinadas.

Figura 7 – Diagrama esquemático do programa experimental



(fonte: elaborado pela autora)

5.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

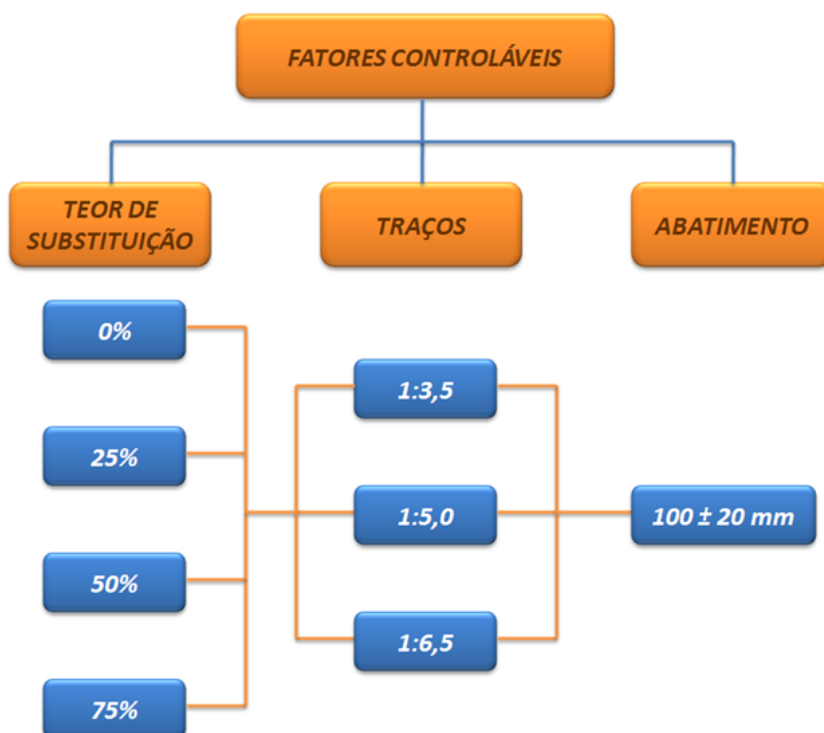
O planejamento experimental realizado de forma otimizada e racionalizada utiliza os recursos disponíveis para a pesquisa, sejam materiais, investimentos financeiros e tempo, com melhor aproveitamento e com isso se torna capaz de proporcionar dados mais confiáveis comparativamente a planejamentos insatisfatórios. Essa é a principal importância de tal fase da pesquisa, além de proporcionar clareza e entendimento daquilo que se propõe na pesquisa.

Os ensaios realizados neste trabalho visam a verificação das propriedades mecânicas de concretos que utilizam agregado reciclado em sua composição, através de três ensaios, resistência à compressão uniaxial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Para isso foram produzidos concretos com três traços diferentes e quatro teores de substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo de concreto reciclado (AGCR).

Primeiramente, definiu-se que seriam moldados 3 corpos de prova (CPs) por ensaio, totalizando 27 CPs por teor de substituição, resultando, assim, em um total de 108 unidades. Todos os corpos de prova foram moldados em formas metálicas cilíndricas com a dimensão de 9,5 cm de diâmetro por 19 cm de altura e tempo de cura para todos os ensaios foi de 28 dias.

Nesta etapa ainda definiu-se as variáveis independentes e as dependentes, bem como a matriz experimental. A figura 8 apresenta o diagrama representativo das variáveis independentes, também chamadas de fatores controláveis, enquanto que na figura 9 estão representadas as variáveis dependentes, também chamadas de variáveis de resposta. Ambas estão detalhadas nos próximos itens.

Figura 8 – Fatores controláveis



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 9 – Variáveis de resposta



(fonte: elaborado pela autora)

5.1.1 Fatores controláveis

Os fatores controláveis, também chamados de variáveis independentes, são aqueles estabelecidos pelo pesquisador e que interferem nas variáveis dependentes. Neste trabalho os fatores controláveis são:

- a) teor de substituição de RECOFI: 0%, 25%, 50% e 75%;
- b) traços: 1:3,5 (rico), 1:5 (intermediário) e 1:6,5 (pobre);
- c) abatimento: 100 ± 20 mm.

Essas variáveis foram determinadas a fim de analisar as interferências que elas causam nas variáveis dependentes estabelecidas. Os teores de substituição do agregado graúdo natural pelo RECOFI foram propostos de forma a possibilitar a análise do comportamento mecânico dos concretos diante dos diferentes níveis percentuais estabelecidos. Os teores nos quais há substituição do agregado graúdo foram determinados a fim de que abrangessem pouca quantidade de RECOFI no concreto até quantidades mais significativas. Permitindo, desta forma, uma análise comportamental mais ampla. Além disso, também estipulou-se o teor de 0%, o qual é o concreto convencional, sem substituição alguma do resíduo como agregado graúdo, para que se analise comparativamente, não só os demais teores entre si, mas também com o referência.

Os traços definidos foram três de forma a abranger um traço rico (1:3,5), ou seja, com maior quantidade de cimento em sua composição, um intermediário (1:5) e um pobre (1:6,5). Desta forma pode-se comparar como este parâmetro influi individualmente e quando associado ao fator de teor de substituição de RECOFI às variáveis de resposta. Esses traços originam resistências diferentes, o que permite, juntamente com os demais dados, a elaboração do diagrama de dosagem desses concretos. Por fim, fixou-se o abatimento em 100 ± 20 cm por ser um intervalo de valores que permitem o bombeamento do concreto através de equipamento específicos. Isso possibilita o uso desses concretos em obras com a necessidade de concretagem de andares mais elevados, o que é usual nas rotinas de construções. Optou-se por fixar uma faixa de abatimento ao invés de fixar relação a/c, pois fixando a relação a/c seria necessário o uso de aditivo para alcançar uma trabalhabilidade adequada do concreto. Desta forma, a fim de evitar mais um fator que influenciasse na análise dos resultados não adotou-se o uso de aditivos e, conseqüentemente obteve-se diferentes relações a/c para os diferentes concretos.

5.2.2 Variáveis de resposta

As variáveis de resposta, também conhecidas por variáveis dependentes, foram estabelecidas por serem as mais significativas a fim de permitir a análise das propriedades mecânicas dos concretos estudados. As variáveis de resposta deste trabalho são:

- a) resistência à compressão uniaxial;
- b) resistência à tração por compressão diametral;
- c) módulo de elasticidade.

Esses parâmetros permitem a análise comportamental dos concretos estudados, pois caracterizam os resultados da pesquisa. Desta maneira, permitem a comparação dos concretos entre si e com o referencial, além da posterior avaliação das características apresentadas por eles.

A resistência em concreto está relacionada com a tensão necessária para rompê-lo. A resistência à compressão axial é a propriedade mais especificada em projetos e reconhecida universalmente como índice geral de resistência quando o ensaio ocorre aos 28 dias. Além disso, juntamente com a resistência à tração por compressão diametral são facilmente identificadas através de ensaios laboratoriais, quando comparada a outros parâmetros. As rupturas nesses ensaios são verificadas de forma diferenciadas, pois na compressão o corpo de prova pode ser considerado rompido, mesmo quando a fratura não aparece, mas se diagnostica que internamente ele não suportará mais nenhuma carga. Por outro lado, a fratura pela tração normalmente indica ruptura (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O módulo de elasticidade, também conhecido por módulo de Young, é a medida da rigidez de um determinado material, ou seja, é a resistência apresentada pelo material à deformação quando aplicada a ele uma determinada carga. O módulo do concreto depende da sua composição e está intimamente ligado ao módulo de elasticidade dos materiais que o compõe, em especial os agregados.

5.2 MATRIZ EXPERIMENTAL

Após a definição dos fatores controláveis e das variáveis de resposta elaborou-se a matriz experimental, apresentada na tabela 3. Definiu-se, também o número de corpos de prova para cada ensaio, apresentado na tabela 4.

Tabela 3 – Matriz experimental

Nome	Fatores controláveis			Variáveis de resposta		
	Teor de substituição (%)	Traço	Abatimento (mm)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
A1	0	1:3,5	100 ± 20	28 dias	28 dias	28 dias
A2	25					
A3	50					
A4	75					
B1	0	1:5,0				
B2	25					
B3	50					
B4	75					
C1	0	1:6,5				
C2	25					
C3	50					
C4	75					

(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 4 – Número de corpos de prova por ensaio

Ensaio	Normas	Idade de ensaio (dias)	Número de CPs
Resistência à compressão uniaxial	NBR 5739/2007	28	3
Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222/2011	28	3
Módulo de elasticidade	NBR 8522/2008	28	3

(fonte: elaborada pela autora)

5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para todos os concretos foram utilizados os mesmos materiais, não alterando nem mesmo o lote. Abaixo segue, com maiores detalhes, a caracterização de cada um.

5.3.1 Cimento

Utilizou-se o cimento CP V – ARI RS, o qual apresenta alta resistência inicial, em todos os concretos produzidos nesta pesquisa. Este cimento é também indicado para situações que haja necessidade de rápida desforma e resistência a agentes agressivos do meio ambiente, principalmente ao ataque por sulfatos. Seu uso é amplo em artefatos de concretos pré-moldados, concreto e concreto de alto desempenho. Foi utilizado neste trabalho somente pelo fato de ser o cimento com quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios e disponível no laboratório. A figura 10 apresenta o aspecto visual do cimento utilizado, enquanto as tabelas 5 e 6 apresentam as características do cimento.

Figura 10 – Aspecto visual do cimento CP-V ARI RS utilizado



(fonte: autora)

Tabela 5 – Caracterização do cimento CP-V ARI RS utilizado

<i>Tipo de cimento Portland</i>	<i>Sigla</i>	<i>Composição em massa (%)</i>	
		<i>Clinker + gesso (sulfato de cálcio)</i>	<i>Material carbonático</i>
Alta resistência inicial	CP V - ARI	100 - 95	0 - 5

(fonte: autora)

Tabela 6 – Caracterização química do cimento CP-V ARI RS utilizado

<i>Determinações químicas</i>	<i>Limites (% da massa)</i>
Resíduo insolúvel	1,0
Perda ao fogo	4,5
Óxido de magnésio	6,5
Trióxido de enxofre C3A do clínquer 8%	3,5
Trióxido de enxofre C3A do clínquer > 8%	4,5
Anidrido carbônico	3,0

(fonte: autora)

5.3.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para a dosagem e produção dos concretos caracteriza-se por uma areia quartzosa natural com distribuição contínua, caracterizada conforme os ensaios de determinação da composição granulométrica, segundo NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), determinação da massa unitária, segundo NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), determinação da massa específica, segundo NBR NM 52 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) e absorção de água, conforme NBR NM 30 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001).

Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de materiais e tecnologia do ambiente construído (Lamtac) / Núcleo orientado para a inovação na edificação (Norie). A figura 11 apresenta o aspecto visual da areia utilizada e a caracterização física está demonstrada na tabela 7 e. Essa areia é comercialmente conhecida como areia média.

Figura 11 – Aspecto visual do agregado miúdo utilizado



(fonte: autora)

Tabela 7 – Caracterização física do agregado miúdo

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2005)			
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa			
			Limites inferiores		Limites Superiores	
			Z. utilizável	Z. ótima	Z. ótima	Z. utilizável
4,75	1	1	0	10	20	25
2,36	4	5	5	20	30	50
1,18	7	12	15	35	55	70
0,6	22	34	50	65	85	95
0,3	36	70	85	90	95	100
0,15	28	98	100	100	100	100
Fundo	2	100	-	-	-	-
Módulo de Finura		2,19	1,55 - 2,20	2,2	2,9	2,90 - 3,50
Dimensão Máxima (mm)		2,40				
Massa Específica (g/cm³)		2,64				
Absorção de Água (%)		1,05				
Massa Unitária (g/cm³)		1,50				

(fonte: elaborada pela autora)

5.3.3 Agregado graúdo natural

O agregado graúdo utilizado nas concretagens trata-se de uma brita basáltica natural, denominada comercialmente como brita 1. Este agregado foi caracterizado quanto as suas propriedades físicas, seguindo os ensaios de determinação da composição granulométrica NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), determinação de massa unitária segundo NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), determinação da massa específica e absorção de água, segundo NBR NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a). A figura 12 demonstra o agregado graúdo natural utilizado. A caracterização física está demonstrada na tabela 8.

Figura 12 – Aspecto visual do agregado graúdo natural



(fonte: autora)

Tabela 8 – Caracterização física do agregado graúdo natural

<i>Agregado Graúdo</i>		
<i>Abertura das peneiras (mm)</i>	<i>Média Retida (%)</i>	<i>Média Retida Acumulada (%)</i>
19	12	12
9,5	79	91
4,75	9	100
2,36	0	100
1,18	0	100
0,6	0	100
0,3	0	100
0,15	0	100
Fundo	0	100
<i>Módulo de finura</i>		7,11
<i>Dimensão máxima característica (mm)</i>		25
<i>Massa unitária (g/cm³)</i>		1,38
<i>Massa específica (g/cm³)</i>		2,98

(fonte: elaborada pela autora)

5.3.4 Agregado graúdo reciclado

Este constitui o RECOFI propriamente dito, o qual, conforme já mencionado anteriormente é bastante específico por ser proveniente da confecção de peças de concreto. O concreto original era um concreto branco, de alta resistência (80 a 90 MPa), auto adensável e com fibras de polipropileno estruturais. As figuras 13 e 14 ilustram o RECOFI. E a tabela 9 demonstra a caracterização realizada neste material. Este agregado foi caracterizado quanto às suas propriedades físicas, seguindo os ensaios de determinação da composição granulométrica segundo NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), determinação de massa unitária, segundo NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), determinação da massa específica e absorção de água, segundo NBR NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a).

Figura 13 – Agregado graúdo reciclado de concreto I



(fonte: autora)

Figura 14 – Agregado graúdo reciclado de concreto II



(fonte: autora)

Tabela 9 – Granulometria do RECOFI

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2005)				
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa				
			Zona Granulométrica - d/D ¹				
			4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
25	8	8	-	0 - 5	5 - 25 ²	87 - 100	-
19	59	67	-	2 - 15 ²	65 ² - 95	95 - 100	-
12,5	32	99	0 - 5	40 ² - 65 ²	92 - 100	-	-
9,5	1	100	2 - 15 ²	80 ² - 100	95 - 100	-	-
6,3	0	100	40 ² - 65 ²	92 - 100	-	-	-
4,75	0	100	80 ² - 100	95 - 100	-	-	-
2,36	0	100	95 - 100	-	-	-	-
1,18	0	100	-	-	-	-	-
0,6	0	100	-	-	-	-	-
0,3	0	100	-	-	-	-	-
0,15	0	100	-	-	-	-	-
Fundo	0	100	-	-	-	-	-
Módulo de Finura		7,67					
Dimensão Máxima (mm)		32					
Massa Específica (g/cm³)		2,63					
Absorção de Água (%)		7,50					
Índice de forma		2,43					
Massa Unitária (g/cm³)		1,72					

¹ - Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo

² - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados

(fonte: elaborada pela autora)

5.3.5 Água

A água utilizada na dosagem dos concretos foi devidamente controlada e é proveniente da rede pública de abastecimento da nossa cidade.

5.4 DOSAGEM EXPERIMENTAL

Para esta pesquisa, adotou-se o método de dosagem IPT/EPUSP proposto por Helene e Terzian (1992). Nesse método é possível a obtenção do teor de argamassa ideal (α), para concretos de mesmo abatimento, o qual para este experimento foi fixo em 100 ± 20 mm.

A determinação do teor de argamassa foi feita exclusivamente para o teor de substituição de 75% e traço 1:5, devido a pouca disponibilidade de RECOFI para o experimento. Para os traços de 1:3,5 e 1:6,5 adotou-se o mesmo teor ideal definido experimentalmente em 56%. A tabela 10 apresenta um resumo de dados dessa dosagem.

Tabela 10 – Dados da dosagem experimental para o teor de 75 % de substituição

<i>DOSAGEM EXPERIMENTAL 75% DE SUBSTITUIÇÃO</i>													
TRAÇO	α	TRAÇO UNITÁRIO			QUANTIDADE DE MATERIAL (kg)					a/c	ABATIMENTO (mm)	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)	H(%)
		c	a	p	c	a	p natural	P RCD	água				
1:5,0	56%	1	2,36	2,64	11,36	26,82	7,5	22,5	5,68	0,5	90	377,60	8,33

(fonte: elaborada pela autora)

5.5 PRODUÇÃO DE CONCRETOS

A produção de concretos, assim como a dosagem experimental, foi realizada no laboratório do Lamtac/Norie. Utilizou-se a betoneira de eixo inclinada por possuir capacidade maior em termos de volume, a fim de que para cada tipo de concreto, ou seja, para cada combinação de traço e teor de substituição de agregado, fosse realizada apenas uma betonada. Dessa forma os corpos de prova produzidos são irmãos e com menor probabilidade de diferenças em suas propriedades.

Antes do início de cada concretagem, teve-se o cuidado de pesar cada material e identificá-lo, conforme quantificação de materiais indicada para cada dosagem, sendo que sempre se utilizou 40 kg de RECOFI, segundo figuras 15 e 16. Além disso, também, passa-se desmoldante nas formas dos corpos de prova, a fim de facilitar a desmoldagem e limpeza dos mesmos, conforme apresentado na figura 17.

Figura 15 – Pesagem de material



(fonte: autora)

Figura 16 – Identificação do material pesado



(fonte: autora)

Conforme Cordeiro (2013), o teor de saturação de agregados de resíduos influencia diretamente a resistência mecânica do concreto produzido com ele. Em seu estudo, a autora testou concretos com agregados com diferentes teores de saturação, abatimentos e resistências à compressão aos 28 dias. O teor de saturação foi testado através de períodos de secagem distintos. Inicialmente, a autora saturou o agregado de resíduo por 24 horas e avaliou a resistência à compressão aos 28 dias dos agregados com diferentes períodos de escoamento da água do resíduo. Dessa forma, Cordeiro (2013) constatou que o período de escoamento de 10 minutos é o que proporciona maiores incrementos de resistências aos concretos.

Com base nesse estudo, adotou-se para este experimento, uma metodologia de saturação do agregado de RECOFI a fim de compensar a grande absorção de água comparativamente ao agregado natural. Emergiu-se o RECOFI em água por uma semana antes de cada concretagem, de forma a saturar totalmente esse material, conforme figura 18. Para cada utilização do RECOFI para o preparo do concreto, deixou-se o material escoando a água por 10 minutos através de peneira a céu aberto e, então, misturou-o com os demais materiais da concretagem, conforme figura 19. Ao final de cada betonada realizou-se o teste de abatimento, também conhecido como teste de *slump*, conforme figura 20.

Figura 17 – Formas de corpo de prova com desmoldante



(fonte: autora)

Figura 18 – RECOFI imerso em água



(fonte: autora)

Figura 19 – RECOFI escorrendo água de saturação



(fonte: autora)

Figura 20 – Teste de abatimento



(fonte: autora)

Para o concreto referência, com teor de substituição igual a 0%, adotou-se o teor de argamassa ideal igual a 53%, com base em trabalhos anteriores desenvolvidos no laboratório Lamtac/Norie e em aulas experimentais realizadas no mesmo laboratório e com os mesmos materiais. Para os teores de substituição de agregado de 25% e 50% interpolou-se os valores usados e então, adotou-se os teores de argamassa ideal em 54% e 55%, respectivamente.

A tabela 11 apresenta um resumo dos dados de dosagem para o teor de substituição 0% e a figura 21 apresenta o diagrama de dosagem obtido a partir desses dados. Este é composto por quatro eixos, os quais são a resistência à compressão uniaxial (f_{cj}) aos 28 dias, a relação água/cimento (a/c), o traço unitário (m) e, por fim, o consumo de cimento. Em cada um dos

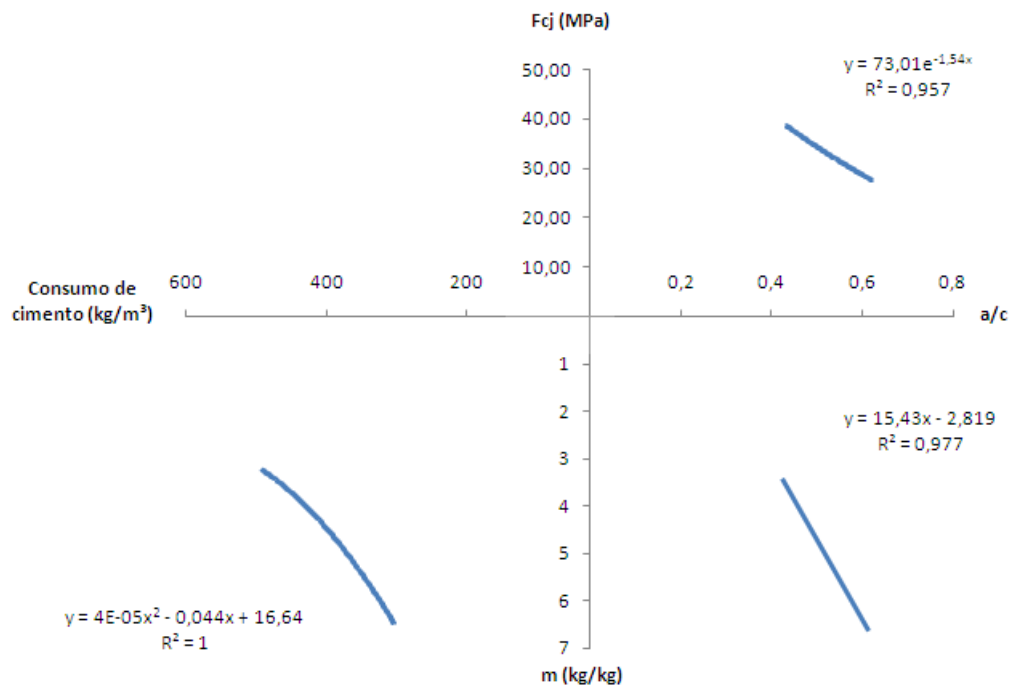
quadrantes, traça-se uma curva correspondente aos dados tabelados. A partir desse diagrama pode-se fixar uma das variáveis e verificar as demais, fixando o mesmo abatimento.

Tabela 11 – Dados da dosagem para concretos com teor de substituição de 0%

CONCRETO 0% DE SUBSTITUIÇÃO									
TRAÇOS	α	TRAÇO UNITÁRIO			a/c	ABATIMENTO (mm)	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)	H (%)	f _{cj} 28 dias (MPa)
		c	a	p					
1:3,5	53%	1,00	1,39	2,12	0,42	120	490,23	9,30	38,97
1:5,0		1,00	2,18	2,82	0,49	100	376,07	8,20	32,97
1:6,5		1,00	2,98	3,53	0,61	90	301,11	8,10	28,76

(fonte: elaborada pela autora)

Figura 21 – Diagrama de dosagem para concretos com teor de substituição de 0%



(fonte: elaborada pela autora)

O mesmo procedimento foi adotado para os teores 25, 50 e 75%. Nas tabelas 12, 13 e 14 são apresentadas o resumo dos dados de dosagem para os teores de substituição de agregado graúdo em 25%, 50% e 75%, respectivamente. Já as figuras 22, 23 e 24 apresentam os diagramas de dosagem respectivos, nos quais estão as curvas de tendência comportamental. Assim, há a possibilidade de que sejam verificadas outras combinações de traço, resistência,

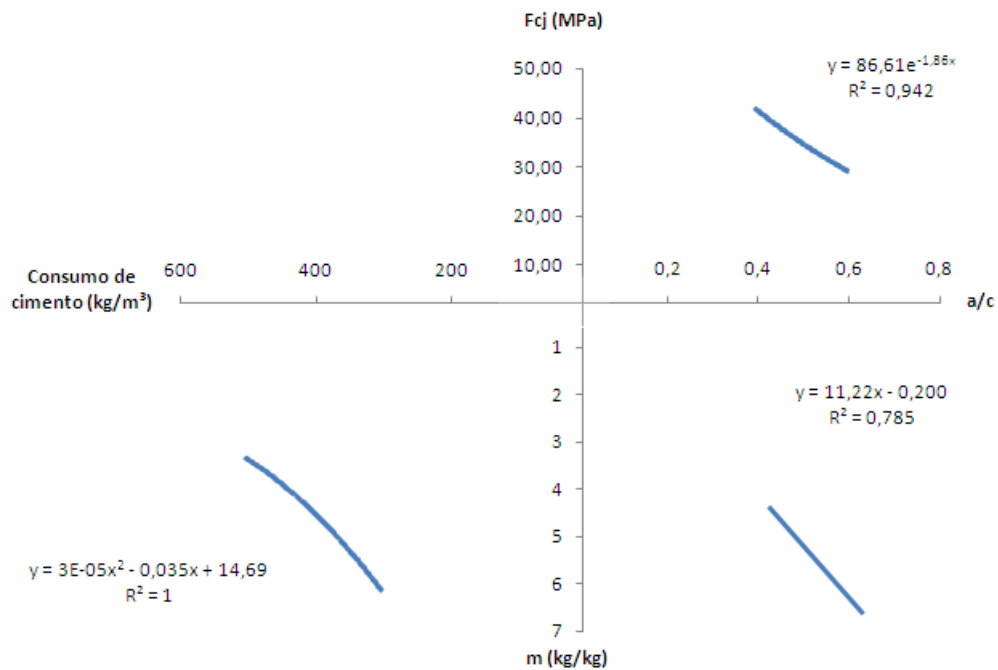
relação água/cimento e consumo de cimento, fixando-se o abatimento e o teor de substituição de agregado.

Tabela 12 – Dados da dosagem para concretos com teor de substituição de 25%

CONCRETO 25% DE SUBSTITUIÇÃO									
TRAÇOS	a	TRAÇO UNITÁRIO			a/c	ABATIMENTO (mm)	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)	H (%)	f _{cj} 28 dias (MPa)
		c	a	p					
1:3,5		1,00	1,43	2,07	0,39	90	496,14	8,70	44,09
1:5,0	54%	1,00	2,24	2,76	0,40	80	376,71	6,70	38,79
1:6,5		1,00	3,05	3,45	0,60	90	293,14	8,00	28,31

(fonte: elaborada pela autora)

Figura 22 – Diagrama de dosagem para concretos com teor de substituição de 25%



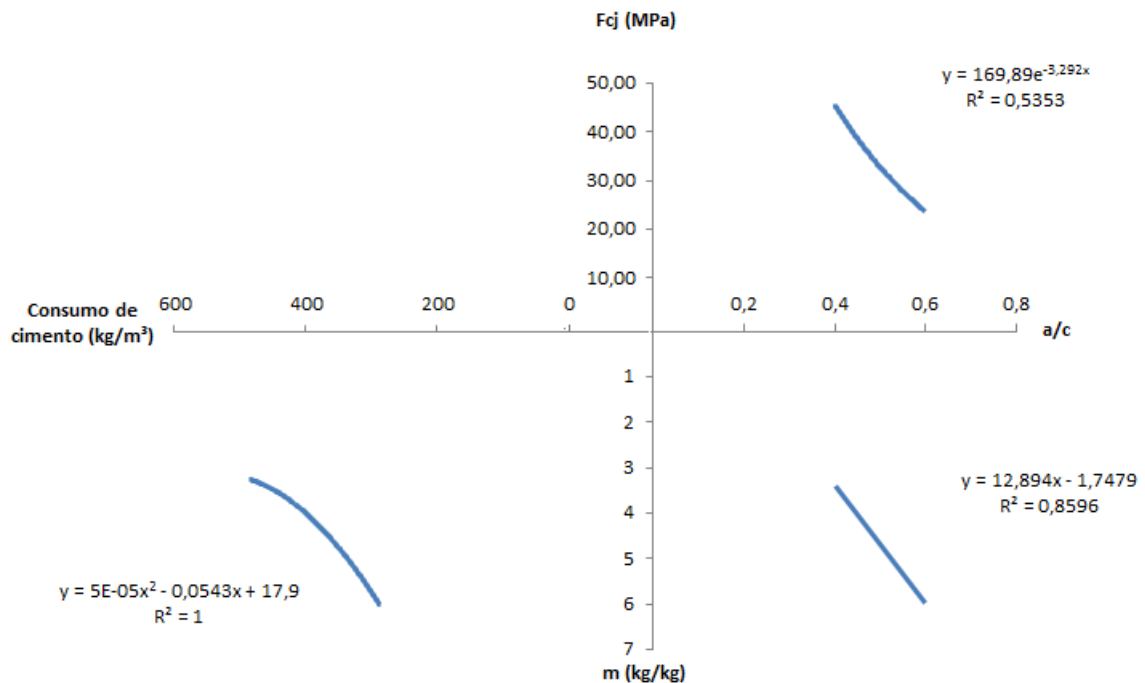
(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 13 – Dados da dosagem para concretos com teor de substituição de 50%

CONCRETO 50% DE SUBSTITUIÇÃO									
TRAÇOS	α	TRAÇO UNITÁRIO			a/c	ABATIMENTO (mm)	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)	H (%)	f _{cj} 28 dias (MPa)
		c	a	p					
1:3,5	55%	1,00	1,48	2,03	0,40	85	484,73	8,90	43,17
1:5,0		1,00	2,30	2,70	0,57	95	356,16	9,50	37,07
1:6,5		1,00	3,13	3,38	0,60	100	286,98	8,00	17,44

(fonte: elaborada pela autora)

Figura 23 – Diagrama de dosagem para concretos com teor de substituição de 50%



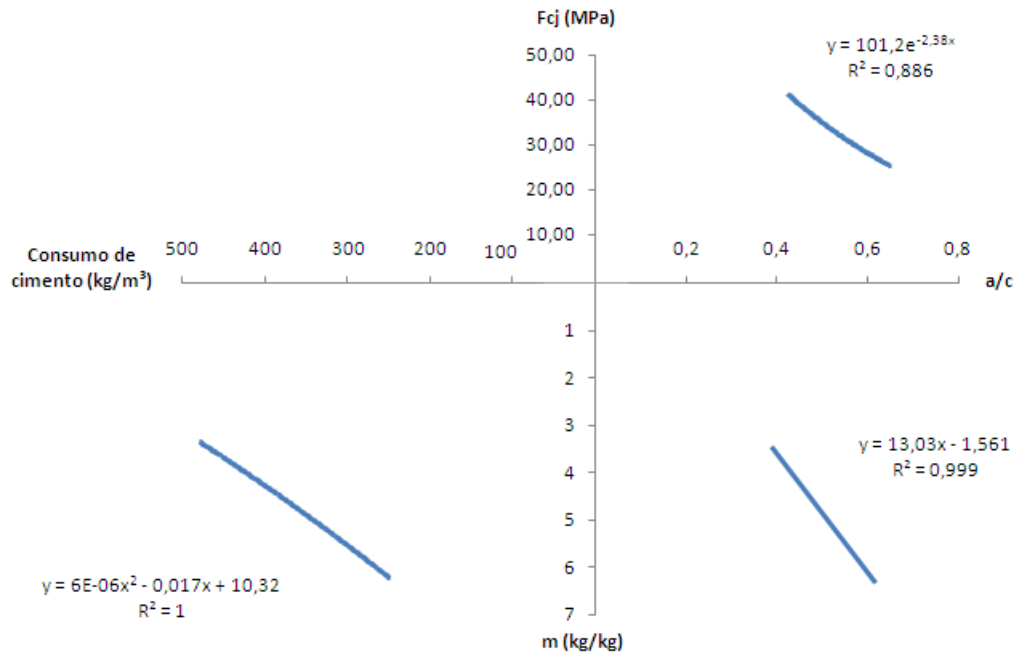
(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 14 – Dados da dosagem para concretos com teor de substituição de 75%

CONCRETO 75% DE SUBSTITUIÇÃO									
TRAÇOS	α	TRAÇO UNITÁRIO			a/c	ABATIMENTO (mm)	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)	H (%)	f _{cj} 28 dias (MPa)
		c	a	p					
1:3,5	56%	1,00	1,52	1,98	0,39	80	473,64	8,70	42,40
1:5,0		1,00	2,36	2,64	0,50	80	352,30	8,30	27,46
1:6,5		1,00	3,20	3,30	0,62	80	242,81	8,30	24,39

(fonte: elaborada pela autora)

Figura 24– Diagrama de dosagem para concretos com teor de substituição de 75%



(fonte: elaborada pela autora)

As concretagens foram realizadas em 13 betonadas ao todo, sendo uma para a dosagem experimental e as demais foram combinações para cada traço e teor de substituição de agregado, sendo que este volume total de concreto foi dividido para realização de dois trabalhos, como já mencionado anteriormente. A moldagem e o adensamento foram realizados, segundo NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a) através de vibrador de imersão, durante aproximadamente o mesmo tempo para todos os CPs.

Após a moldagem, todos os corpos de prova foram cobertos por material não reativo e não absorvente a fim de evitar a perda de água para o ambiente. Durante as primeiras 48 horas ficaram dispostos em local protegido de intempéries e com a superfície horizontal rígida e plana. Em seguida foram desmoldados (figura 25) e armazenados em câmara úmida, na qual a umidade relativa é igual a 95% e temperatura constante de $23 \pm 2^\circ$ Celsius.

Figura 25 – Desmoldagem de corpo de prova



(fonte: autora)

5.6 REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos realizados durante este trabalho foram o ensaio de abatimento, no estado fresco, e ensaios, de resistência à compressão uniaxial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Esses serão melhores descritos a seguir.

5.6.1 Ensaio de abatimento

O ensaio de abatimento, também conhecido por ensaio de cone ou *slump* foi realizado com o concreto fresco, após cada betonada de concreto, a fim de garantir um dos fatores controláveis fixados neste trabalho. Realizou-se esse ensaio de acordo com a NBR NM 67 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998). A figura 20 apresenta uma foto do ensaio.

5.6.2 Ensaio de resistência à compressão uniaxial

O ensaio de resistência à compressão uniaxial de corpos de prova de concreto foi realizado de acordo com a norma NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS,

2007). Todos os corpos de prova foram retificados em equipamento específico, conforme apresentado na figura 26.

Para cada combinação de traço e teor de substituição foram rompidos 3 corpos de prova, totalizando 36 rupturas. A idade dos CPs para o ensaio foi de 28 dias. A figura 27 apresenta um corpo de prova rompido após término do ensaio, mas ainda no equipamento. Todos os corpos de prova foram retificados por abrasão em equipamento específico, conforme apresentado na figura 26, antes da realização dos ensaios.

Figura 26 – Equipamento de retificação



(fonte: autora)

Figura 27 – Vista do ensaio de compressão uniaxial

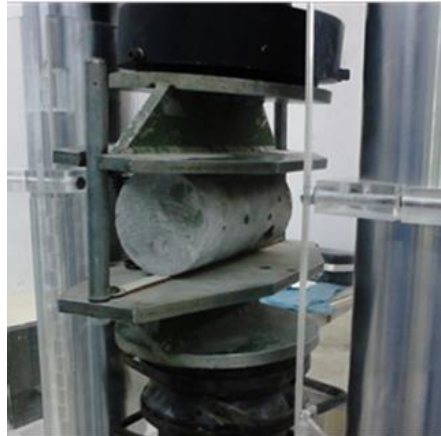


(fonte: autora)

5.6.3 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova de concreto foi realizado de acordo com a norma NBR 7222 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011). Assim como para o ensaio de compressão uniaxial, todos os corpos de prova foram retificados em equipamento específico, conforme apresentado na figura 26. Para cada combinação de traço e teor de substituição foram ensaiados 3 corpos de prova, totalizando 36 rupturas. A idade dos CPs para o ensaio foi de 28 dias. A figura 28 apresenta um corpo de prova sendo ensaiado.

Figura 28 – Vista do ensaio de tração por compressão diametral



(fonte: autora)

5.6.4 Ensaio de módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade de corpos de prova de concreto foi realizado de acordo com a norma NBR 8522 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), através do método B, no qual as tensões são fixas e a deformação do corpo de prova é medida. Assim como para os ensaios de compressão uniaxial e tração por compressão diametral, todos os corpos de prova foram retificados. Para cada combinação de traço e teor de substituição foram avaliados 3 corpos de prova, totalizando 36 ensaios. A idade dos CPs para o ensaio foi de 28 dias. A figura 29 apresenta o ensaio sendo realizado.

Figura 29 – Vista do ensaio de módulo de elasticidade



(fonte: autora)

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão uniaxial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Além disso também serão analisados esses resultados com o intuito atender os objetivos propostos neste trabalho.

6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

A resistência à compressão uniaxial é uma propriedade de elevada importância na avaliação da qualidade do concreto, por ser uma das propriedades mais especificadas em projetos. Ela indica a capacidade de suporte de uma determinada carga pelo concreto sem entrar em colapso, além de permitir correlação com outras características do material.

Na tabela 15 estão apresentados os resultados médios de resistência à compressão uniaxial. Os dados foram tratados de forma a eliminar os valores espúrios, através de desvio padrão e determinação de aceitação de valores para o intervalo compreendido entre a média menos um desvio padrão e a média mais um desvio padrão. A tabela detalhada desses resultados pode ser verificada no APÊNDICE A – Tratamento de dados do ensaio de resistência à compressão uniaxial.

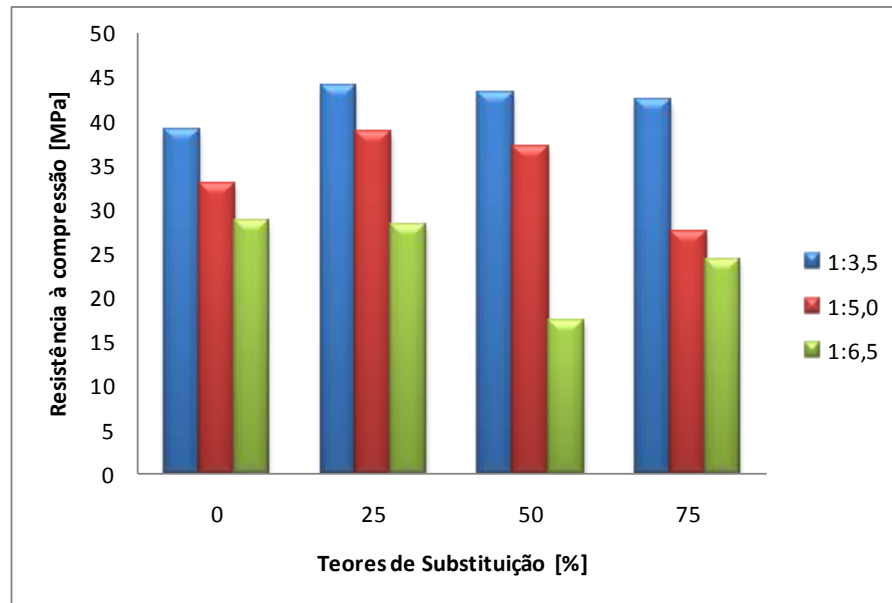
Tabela 15 – Valores médios da resistência à compressão uniaxial dos concretos com diferentes teores de substituição aos 28 dias

<i>Resistência à compressão uniaxial</i>					
<i>Identificação</i>	<i>Traços</i>	<i>Teores de substituição (%)</i>	<i>Compressão Média (MPa)</i>	<i>Coefficiente de Variação (%)</i>	<i>Relação a/c</i>
A1	1:3,5	0	38,97	2,07	0,42
A2	1:3,5	25	44,09	0,06	0,39
A3	1:3,5	50	43,17	3,71	0,40
A4	1:3,5	75	42,40	3,12	0,39
B1	1:5,0	0	32,97	4,01	0,49
B2	1:5,0	25	38,79	0,52	0,40
B3	1:5,0	50	37,07	0,02	0,57
B4	1:5,0	75	27,46	9,06	0,50
C1	1:6,5	0	28,76	1,21	0,61
C2	1:6,5	25	28,31	0,61	0,60
C3	1:6,5	50	17,44	2,77	0,60
C4	1:6,5	75	24,39	3,54	0,62

(fonte: elaborada pela autora)

A figura 30 apresenta o gráfico gerado a partir das médias das resistências apresentadas na tabela 15, relacionando o traço e o teor de substituição de agregado graúdo. É possível verificar que para o traço 1:3,5, todos os concretos com substituição de agregado graúdo, apresentaram resistências superiores a 40 MPa, ultrapassando os concretos de referência.

Figura 30 – Valores médios da resistência à compressão uniaxial de concretos com diferentes teores de substituição para diferentes traços aos 28 dias



(fonte: elaborada pela autora)

Os resultados foram analisados estatisticamente pelo método de análise de variância (ANOVA), o qual possibilita verificar a influência dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta. Além disso o método é capaz de analisar os fatores isoladamente ou combinados entre si e demonstrar a significância nos resultados. O método garante 95% de confiabilidade nos resultados e a análise realizada por ele é apresentada na tabela 16.

Tabela 16 – Análise de variância na resistência à compressão uniaxial

	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Média Quadrática</i>	<i>Valor calculado de F</i>	<i>Nível de Significância</i>	<i>Significativo</i>
<i>Traço</i>	2,00	608,85	2.207,71	0,00000	Sim
<i>Teor de Substituição</i>	3,00	35,63	129,19	0,00000	Sim
<i>Traço x Teor de Substituição</i>	6,00	40,01	145,09	0,00000	Sim
<i>Erro</i>	12,00	0,28			

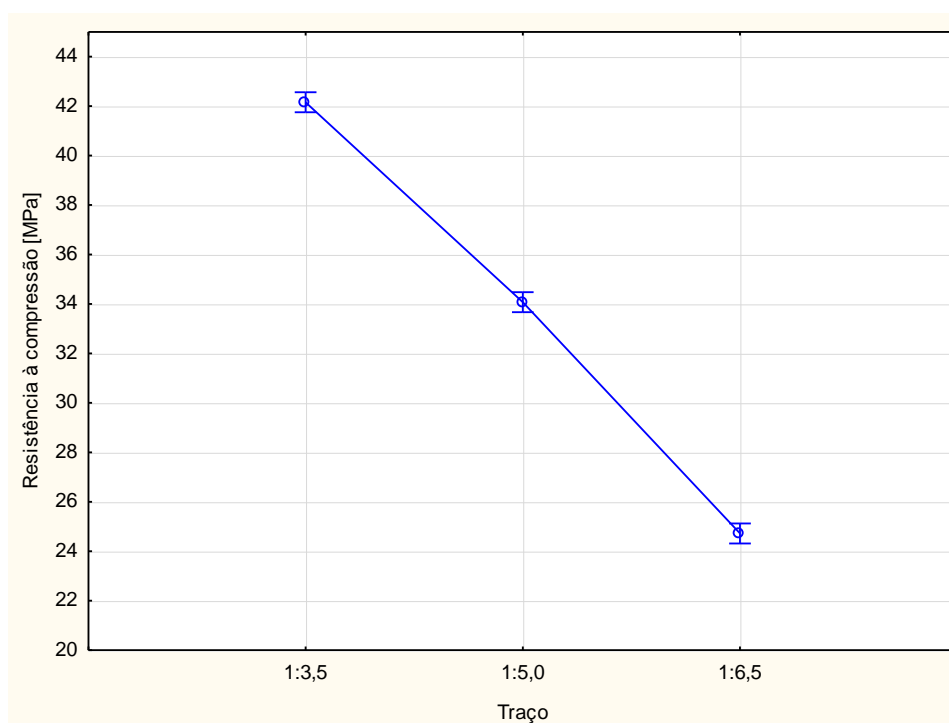
(fonte: elaborada pela autora)

A partir da tabela 16 pode-se perceber que todos os fatores controláveis alteram significativamente os resultados da variável de resposta. Analisando-se o feito de 2ª ordem causada pela interação do traço e teor de substituição percebe-se que também há alteração significativa. A seguir são analisados cada um desses parâmetros.

6.1.1 Efeito isolado do traço

O traço de um concreto é um dos fatores que define a resistência que o concreto apresentará, um traço mais rico permitirá ao concreto desenvolver resistências maiores ao passo que o concreto menos rico, ou mais pobre, terá o efeito contrário. Isso deve-se ao fato de que quanto mais pobre o traço, maior será a relação água/cimento relacionada a ele. A figura 31 mostra o resultado da análise do método de variância e que confirma o resultado.

Figura 31 – Efeito isolado do traço na resistência à compressão uniaxial dos concretos aos 28 dias



(fonte: elaborada pela autora)

Observa-se, através da figura 31 o efeito que o traço exerce sobre a resistência do concreto e apresenta o resultado já esperado e conhecido no meio acadêmico. Como era de se esperar, o traço mais rico 1:3,5 apresenta uma resistência à compressão uniaxial maior que os demais traços, enquanto que o traço 1:6,5 apresenta resistência inferior.

Desta forma, pode-se perceber a confirmação da Lei de Abrahms para concretos com agregados reciclados. A Lei afirma que a resistência à compressão é inversamente proporcional a relação água cimento. Para os concretos utilizando resíduos de construção e

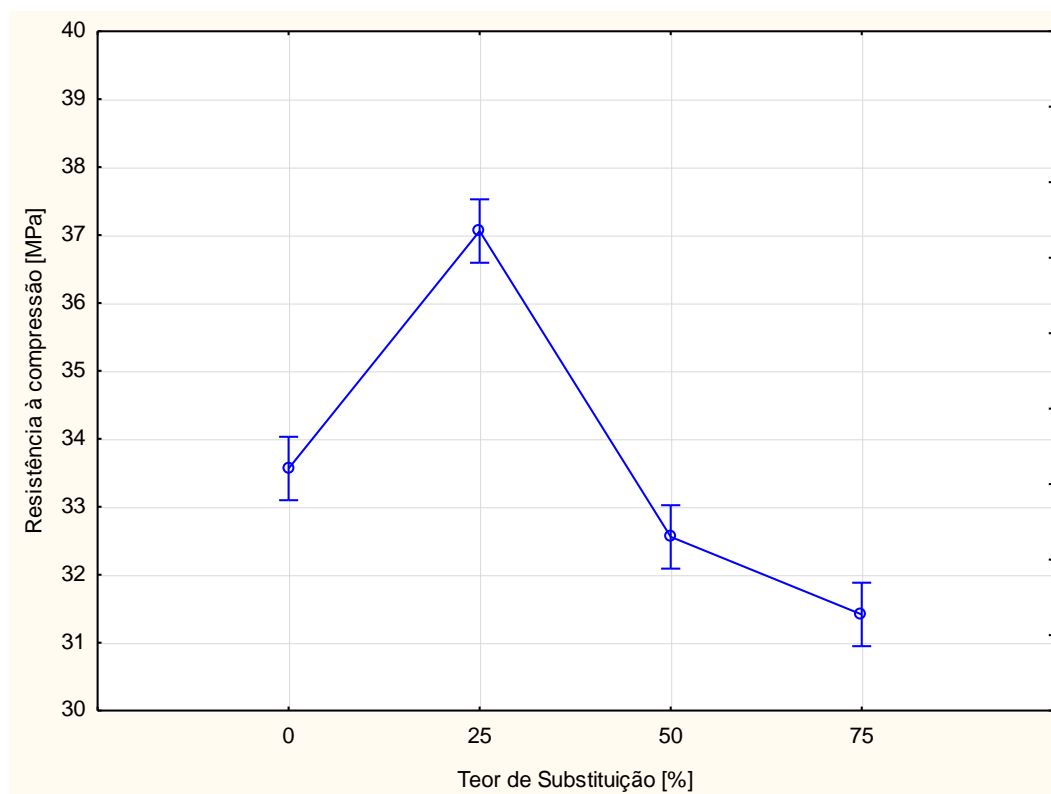
demolição estudados por Leite (2001) e Lovato (2007) pode-se perceber curvas com o mesmo comportamento para esta mesma relação.

6.1.2 Efeito isolado do teor de substituição

Normalmente os agregados graúdos não influenciam na resistência do concreto convencional, uma vez que a ruptura geralmente ocorre na matriz ou na zona de transição entre a argamassa e o agregado. Para concretos com resíduos reciclados de materiais de construção e demolição menos específicos, ou seja, não provenientes de uma demolição seletiva ou de um rigoroso controle de heterogeneidade geralmente apresentam resistências inferiores em $2/3$ da resistência do mesmo concreto contendo apenas agregados naturais.

No entanto, sendo o agregado graúdo em estudo mais específico e com características diferenciadas esta análise se faz interessante. O agregado graúdo ainda pode afetar a resistência do concreto por suas características de granulometria, mineralogia, forma, tamanho e textura. A figura 32 apresenta um gráfico que relaciona a resistência à compressão com os teores de substituição de agregado graúdo.

Figura 32 – Efeito isolado do teor de substituição na resistência à compressão uniaxial dos concretos aos 28 dias



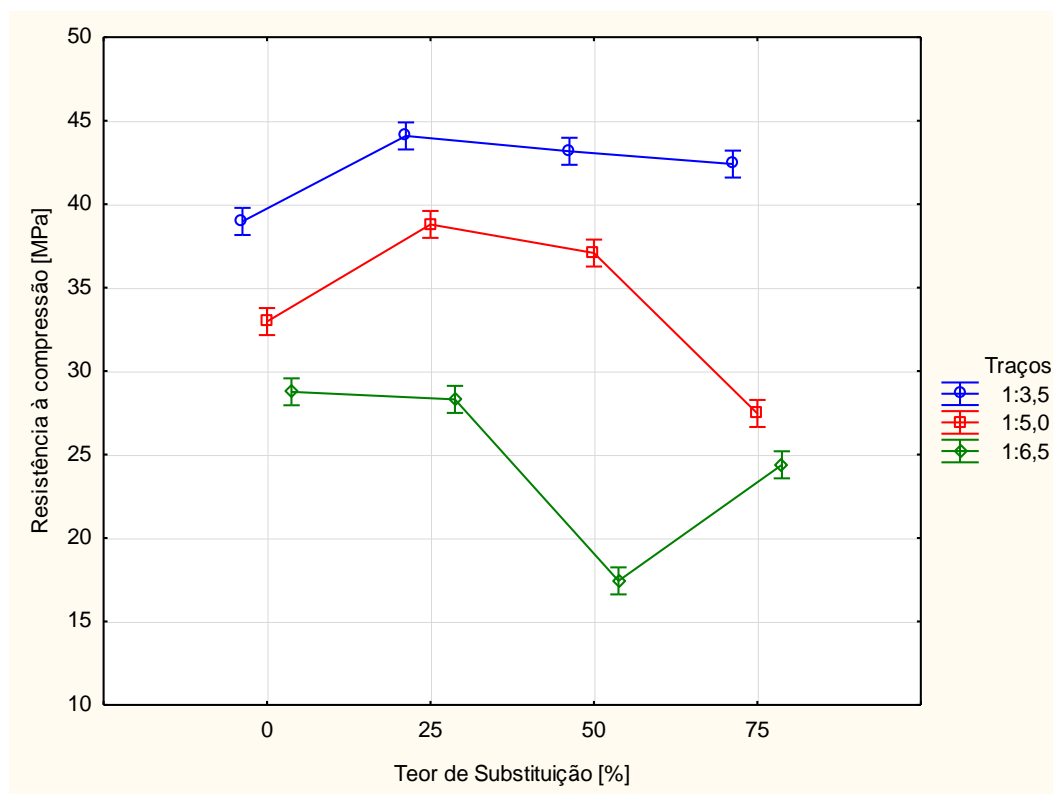
(fonte: elaborada pela autora)

Observa-se na figura 32, a influência do fator controlável teor de substituição em relação a variável resistência à compressão uniaxial. Pode-se perceber um comportamento entre os teores de 25 a 75%, nos quais conforme o teor aumenta há uma redução na resistência. Porém, comparando-se os teores de 0 e 25% nota-se um incremento na resistência, situação não esperada para um concreto com resíduo. Para os concretos utilizando RCD não provenientes unicamente de concretos, estudados por Leite (2001) e Lovato (2007), não há um ganho de resistência à compressão na medida em que se incorpora o menor teor de RCD.

6.1.3 Efeito combinado do traço e teor de substituição

A figura 33 apresenta o efeito combinado entre o traço e o teor de substituição do agregado graúdo em relação à resistência à compressão uniaxial. A mesma foi obtida a partir dos resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial, com idade do concreto igual a 28 dias e através da análise de variância.

Figura 33 – Efeito combinado do traço e teor de substituição na resistência à compressão uniaxial dos concretos aos 28 dias



(fonte: elaborada pela autora)

Para os traços 1:3,5 e 1:5,0 nota-se um comportamento da curva semelhante entre si, confirmando a análise realizada anteriormente referente aos teores de substituição, no qual o teor de 0% apresenta resistência inferior ao teor de 25%. A partir deste ponto a curva decresce gradativamente conforme os teores de substituição vão aumentando.

Já a curva do traço 1:6,5 mostra que uma redução da resistência de acordo com o aumento no teor de substituição de agregado. Este comportamento seria o mais esperado para traços com RECOFI, no entanto esta curva demonstra uma queda acentuada de resistência para o teor de substituição de 50%. Pode-se observar através da figura 33 e também da tabela 15 que os valores seguem uma tendência, na qual o teor de 25% alcança uma resistência de 28,31 MPa e o de 75% uma resistência de 24,39 MPa, logo o valor alcançado pelo teor de 50% de 17,44 MPa está fora da tendência comportamental da curva. Tal fato, pode ter ocorrido devido a variabilidade nos processos de produção dos concretos ou durante o próprio ensaio.

6.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A resistência à tração não é muito identificada em projetos por não ser uma característica satisfatória do concreto. No entanto é de extrema importância o conhecimento dessa propriedade em estruturas armadas a fim de se ter o conhecimento da carga que leva a estrutura ao rompimento e evitar o colapso. Esta propriedade, assim como a resistência à compressão também caracteriza o concreto.

Na tabela 17 estão apresentados os resultados médios após tratamento de dados, através de desvio padrão e determinação de aceitação de resultado para o intervalo compreendido entre a média menos um desvio padrão e a média mais um desvio padrão. A tabela detalhada desses resultados pode ser verificada no APÊNDICE B – Tratamento de dados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Tabela 17 – Valores médios da resistência à tração por compressão diametral

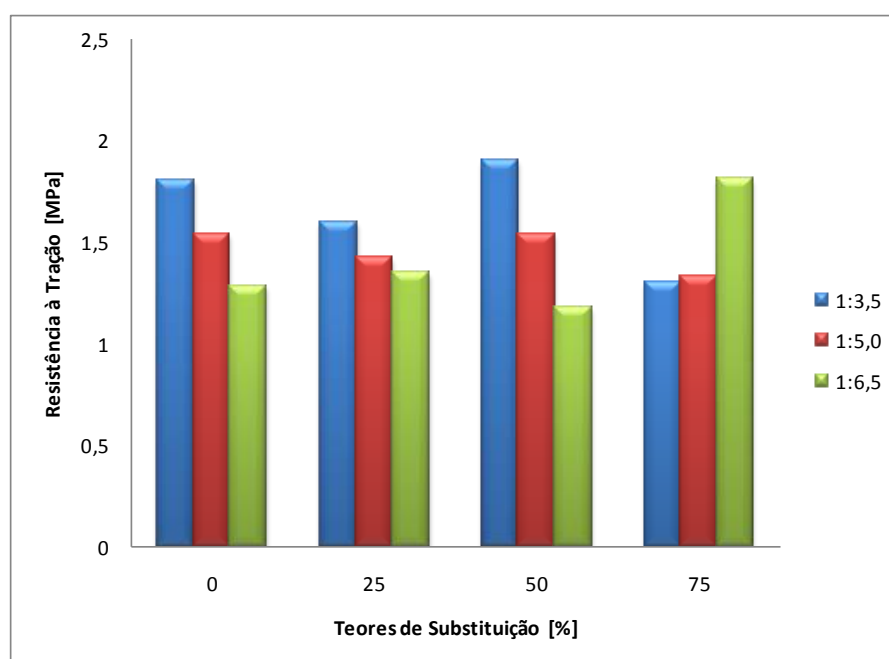
<i>Resistência à tração por compressão diametral</i>					
<i>Identificação</i>	<i>Traços</i>	<i>Teores de substituição (%)</i>	<i>Tração Média (MPa)</i>	<i>Coefficiente de Variação (%)</i>	<i>Relação a/c</i>
A1	1:3,5	0	1,81	0,19	0,42
A2	1:3,5	25	1,60	0,20	0,39
A3	1:3,5	50	1,91	0,04	0,40
A4	1:3,5	75	1,30	0,13	0,39
B1	1:5,0	0	1,54	0,00	0,49
B2	1:5,0	25	1,43	0,00	0,40
B3	1:5,0	50	1,54	0,02	0,57
B4	1:5,0	75	1,33	0,01	0,50
C1	1:6,5	0	1,28	0,02	0,61
C2	1:6,5	25	1,35	0,02	0,60
C3	1:6,5	50	1,18	0,05	0,60
C4	1:6,5	75	1,81	0,16	0,62

(fonte: elaborada pela autora)

A figura 34 apresenta o gráfico gerado a partir das médias das resistências apresentadas na tabela 17, relacionando o traço e o teor de substituição de agregado graúdo. É possível

verificar comparativamente os resultados. De modo geral, percebe-se um comportamento esperado nos teores de 0 a 50%, no qual os traços mais ricos apresentam maiores valores de resistência à tração, no entanto o teor de 75% apresentou para o traço mais pobre, 1:6,5, uma resistência mais elevada.

Figura 34 – Valores médios da resistência à tração por compressão diametral de concretos com diferentes teores de substituição para diferentes traços aos 28 dias



(fonte: elaborada pela autora)

Os resultados já tratados foram analisados estatisticamente pelo método de análise de variância (ANOVA), o qual verifica a influência dos fatores controláveis isolados e combinados significativos sobre a resistência à tração por compressão diametral. O método garante 95% de confiabilidade nos resultados e a análise realizada por ele é apresentada na tabela 18.

Quando compara-se os valores das resistências à tração por compressão diametral com os valores das resistências à compressão uniaxial percebe-se que a resistência à tração representa, aproximadamente, 4,5% dos resultados, enquanto que em concretos convencionais, tal relação apresenta decréscimos na ordem de 10%. Tal fato, pode ter sido ocasionado pela presença de fibras nos agregados graúdos reciclados. De acordo com Bernardi (2003), as propriedades das fibras influenciam nas propriedades dos concretos que as

incorporam. Além disso, o autor afirma que as fibras de polipropileno possuem uma resistência à tração na ordem de 0,5 GPa, a mais baixa entre os tipos de fibras e, conseqüentemente refletindo este mesmo comportamento ao concreto.

Tabela 18 – Análise de variância na resistência à tração por compressão diametral

	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Média Quadrática</i>	<i>Valor calculado de F</i>	<i>Nível de Significância</i>	<i>Significativo</i>
<i>Traço</i>	2	0,14477	12,475	0,000775	Sim
<i>Teor de Substituição</i>	3	0,01229	1,059	0,397826	Não
<i>Traço x Teor de Substituição</i>	6	0,15312	13,194	0,000047	Sim
<i>Erro</i>	14	0,01160			

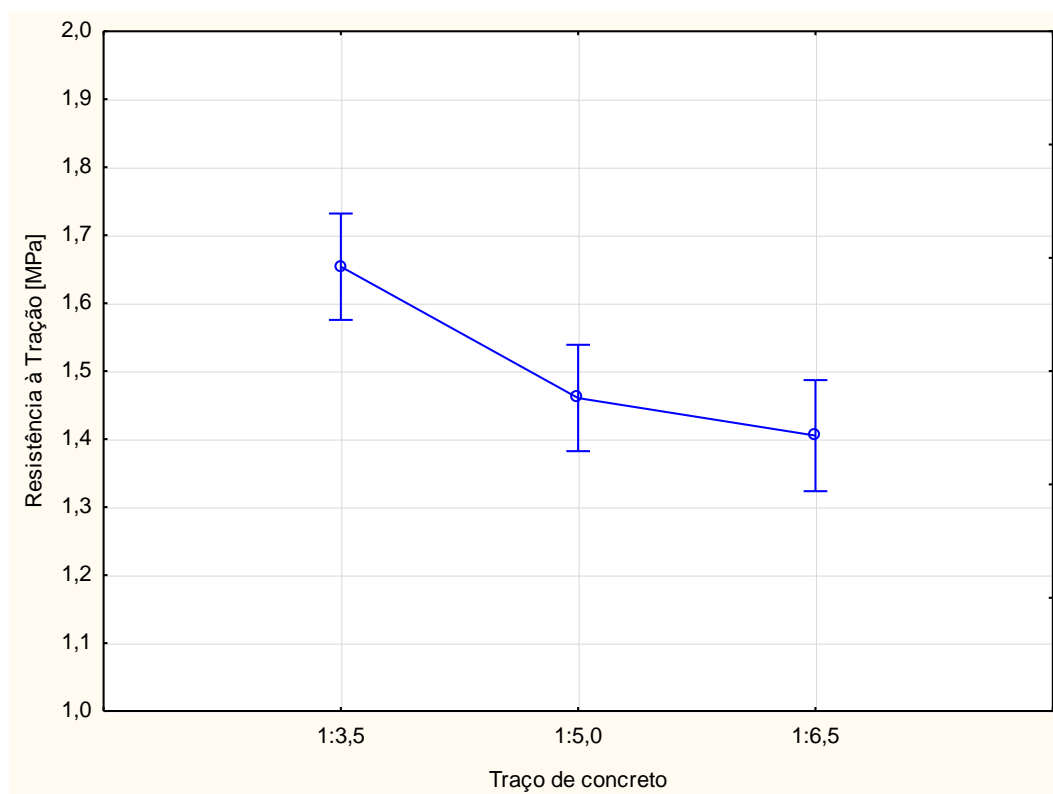
(fonte: elaborada pela autora)

A partir da tabela 18 pode-se perceber que o fator controlável traço altera significativamente os resultados da variável de resposta. Analisando-se o efeito de 2ª ordem causada pela interação do traço e teor de substituição percebe-se que também há influência significativa. O teor de substituição isolado não mostrou-se significativo na avaliação comportamental da resistência à tração por compressão diametral. A seguir são analisados cada um dos parâmetros significativos.

6.2.1 Efeito isolado do traço

A figura 35 é um gráfico emitido pela análise do método de variância. O mesmo apresenta a influência do traço na resistência à compressão diametral.

Figura 35 – Efeito isolado do traço na resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias



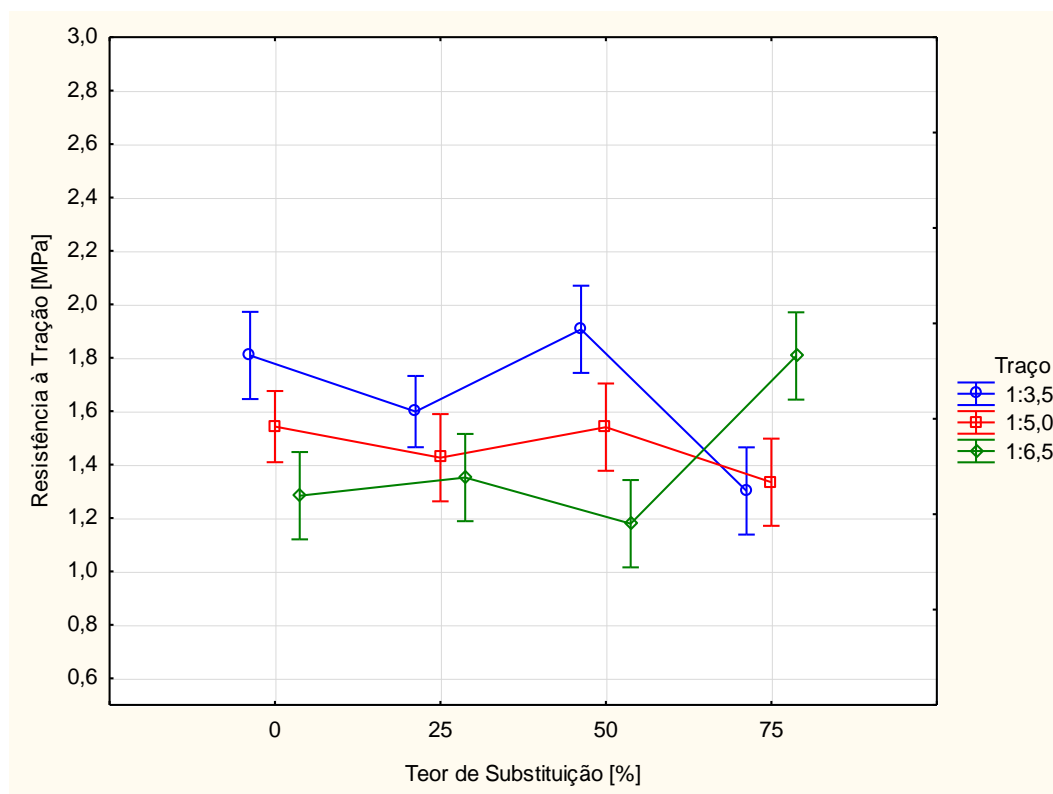
(fonte: elaborada pela autora)

Pode-se observar, através da figura 35 o efeito que o traço exerce sobre a resistência à tração por compressão diametral do concreto. O resultado já era esperado e conhecido no meio acadêmico, assim como para a resistência à compressão uniaxial.

6.2.2 Efeito combinado do traço e teor de substituição

A figura 36 apresenta o efeito combinado entre o traço e o teor de substituição do agregado graúdo em relação à resistência à tração por compressão diametral. A figura foi obtida a partir dos resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, com idade do concreto igual a 28 dias e através da análise de variância.

Figura 36 – Efeito combinado do traço e teor de substituição na resistência à tração por compressão diametral nos concretos aos 28 dias



(fonte: elaborada pela autora)

Analisando-se a figura 36 não pode-se constatar um padrão comportamental para as curvas que relacionam o teor de substituição de agregados, traço e resistência à tração por compressão diametral. O comportamento do teor de substituição e traço combinados, para os traços rico e intermediário mostrou a mesma tendência, no qual até 50% de substituição não se verificou decréscimos na propriedade analisada.

Percebe-se ainda que a maior resistência alcançada é de 1,91 MPa correspondente ao teor de substituição de 50%, traço 1:3,5, seguida pela resistência de 1,81 MPa correspondente ao teor 0%, traço 1:3,5 e ao teor 75%, traço 1:6,5 simultaneamente. A menor resistência à tração identificada foi correspondente ao teor de 50% e ao traço 1:6,5.

6.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Segundo Mehta e Monteiro (1994) o comportamento elástico do concreto depende da fração volumétrica, da massa específica e módulo de deformação dos principais constituintes e as

características da zona de transição. Os autores ainda citam que os fatores que afetam a porosidade do agregado, da matriz da pasta e da zona de transição são bastante relevantes para a elasticidade do concreto, sendo a porosidade a característica do agregado graúdo que mais influencia. A porosidade do agregado determina a rigidez e esta, por sua vez, restringe a deformação da matriz.

Na tabela 19 estão apresentados os resultados médios após tratamento de dados, através de desvio padrão e determinação de aceitação de resultado para o intervalo compreendido entre a média menos um desvio padrão e a média mais um desvio padrão. A tabela detalhada desses resultados pode ser verificada no APÊNDICE C – Tratamento de dados do ensaio de módulo de elasticidade.

Tabela 19 – Valores médios do módulo de elasticidade

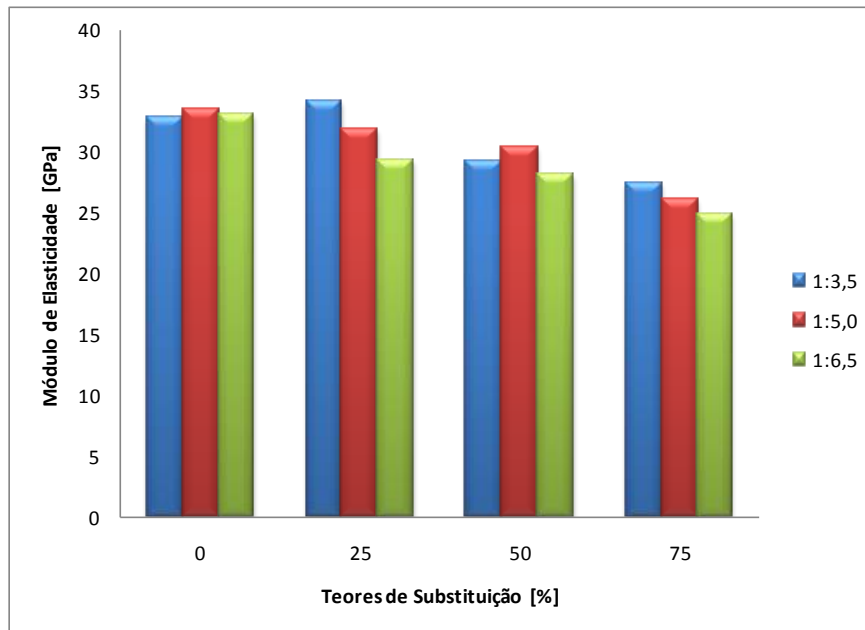
<i>Módulo de elasticidade</i>					
<i>Identificação</i>	<i>Traços</i>	<i>Teores de substituição (%)</i>	<i>Módulo Médio (GPa)</i>	<i>Coefficiente de Variação (%)</i>	<i>Relação a/c</i>
A1	1:3,5	0	32,85	0,19	0,42
A2	1:3,5	25	34,20	0,20	0,39
A3	1:3,5	50	29,20	0,34	0,40
A4	1:3,5	75	27,45	1,45	0,39
B1	1:5,0	0	33,50	1,51	0,49
B2	1:5,0	25	31,95	0,43	0,40
B3	1:5,0	50	30,45	0,61	0,57
B4	1:5,0	75	26,10	9,37	0,50
C1	1:6,5	0	33,10	2,25	0,61
C2	1:6,5	25	29,35	0,67	0,60
C3	1:6,5	50	28,10	3,64	0,60
C4	1:6,5	75	24,90	0,17	0,62

(fonte: elaborada pela autora)

A figura 37 apresenta o gráfico gerado a partir das médias dos módulos de elasticidade apresentados na tabela 19, relacionando o traço e o teor de substituição de agregado graúdo. É possível verificar comparativamente os resultados. Nota-se que o maior valor alcançado de

módulo é 34,20 GPa correspondente ao concreto com teor de substituição de 25% e traço 1:3,5 e o menor valor é de 24,90 GPa, correspondente ao teor de substituição de 75% e traço 1:6,5.

Figura 37 – Valores médios do módulo de elasticidade de concretos com diferentes teores de substituição para diferentes traços aos 28 dias



(fonte: elaborada pela autora)

Os resultados já tratados foram analisados estatisticamente pelo método de análise de variância (ANOVA), o qual verifica a influência dos fatores controláveis isolados e combinados significativos sobre o módulo de elasticidade. O método garante 95% de confiabilidade nos resultados e a análise realizada por ele é apresentada na tabela 20.

Tabela 20 – Análise de variância no módulo de elasticidade

	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Média Quadrática</i>	<i>Valor calculado de F</i>	<i>Nível de Significância</i>	<i>Significativo</i>
<i>Traço</i>	2	10,02	11,17	0,001502	Sim
<i>Teor de Substituição</i>	3	59,53	66,34	0,000000	Sim
<i>Traço x Teor de Substituição</i>	6	3,03	3,38	0,031226	Sim
<i>Erro</i>	13	0,90			

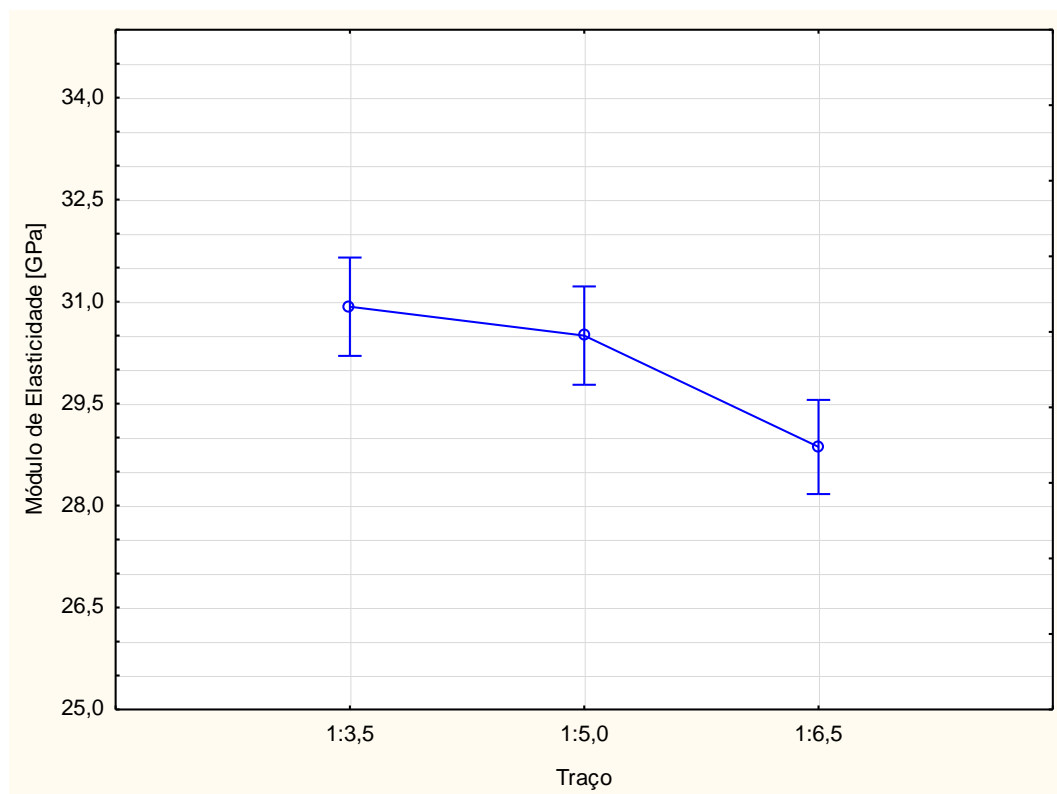
(fonte: elaborada pela autora)

A partir da tabela 20 pode-se perceber que todos os fatores controláveis alteram significativamente os resultados da variável de resposta. Analisando-se o efeito de 2ª ordem causada pela interação do traço e teor de substituição percebe-se que também há alteração significativa. A seguir são analisados cada um desses parâmetros.

6.3.1 Efeito isolado do traço

A figura 38 apresenta o efeito isolado do traço sobre o módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias de idade. Pode-se observar que os valores de módulo são coerentes com as resistências à compressão e à tração, os quais diminuem de acordo com que o traço se torna mais pobre.

Figura 38 – Efeito isolado do traço no módulo de elasticidade nos concretos aos 28 dias



(fonte: elaborada pela autora)

Nota-se, através da figura 38, que o módulo de elasticidade tende a diminuir conforme o traço vai se tornando mais pobre. Isso se deve pelo fato de que os traços mais pobres possuem

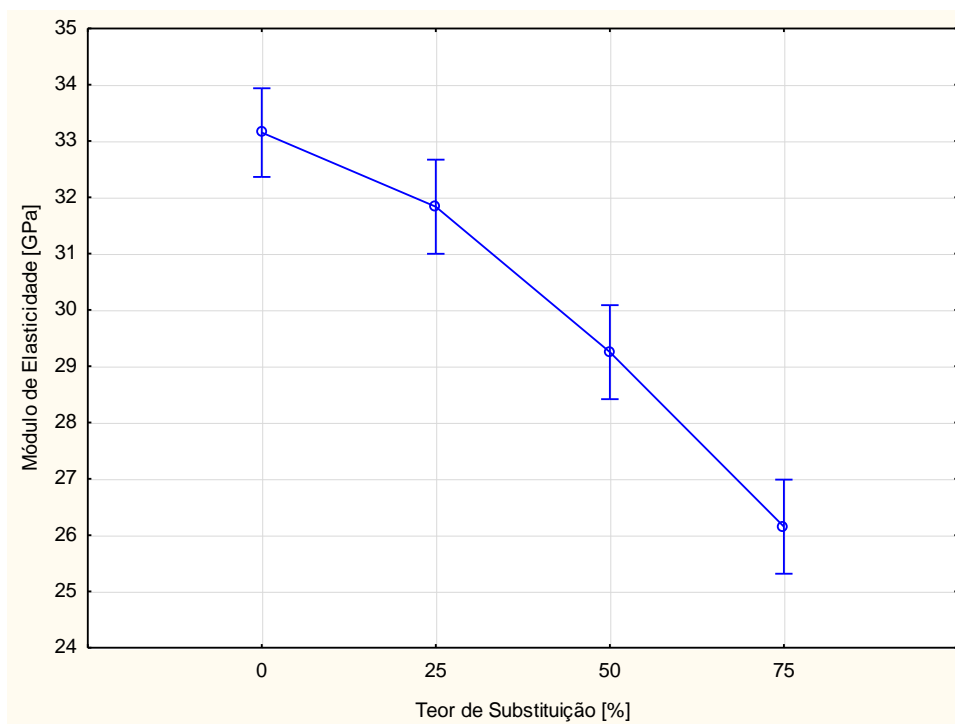
relação de água/cimento maiores. Quanto maior a relação água/cimento, maior a porosidade da pasta de cimento, menor a massa específica e, portanto, menor será o módulo de elasticidade.

Segundo Leite (2001), ainda pode-se justificar este comportamento pelo fato de que grandes relações água/cimento proporcionam uma maior dispersão entre os grãos de cimento e consequente alinhamento dos cristais de hidróxido de cálcio e etringita favorecendo a fragilidade das ligações na estrutura do concreto. Este mesmo comportamento do módulo em relação ao traço pode ser verificado nos estudos de RCD em concretos, de Leite (2001) e Lovato (2007).

6.3.2 Efeito isolado do teor de substituição

A figura 39 apresenta o efeito isolado do teor de substituição sobre o módulo de elasticidade. A figura foi obtida a partir dos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade, com idade do concreto igual a 28 dias e através da análise de variância.

Figura 39 – Efeito isolado do teor de substituição no módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias



(fonte: elaborada pela autora)

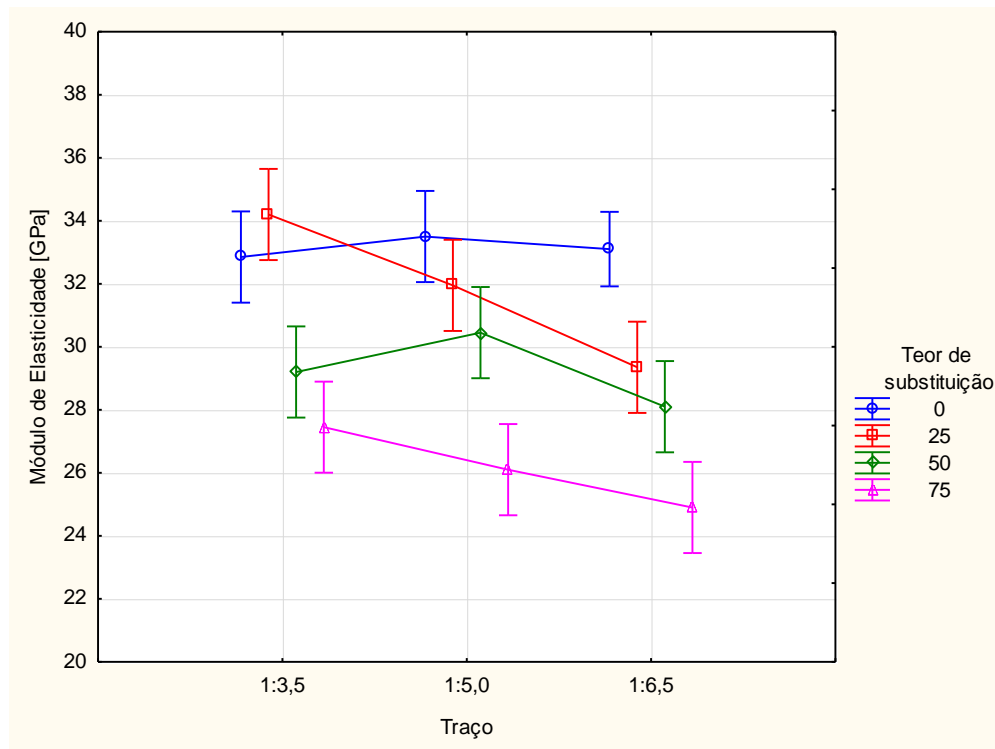
Percebe-se que a medida que o teor de substituição do agregado graúdo aumenta, diminui o módulo de elasticidade e este mesmo comportamento pode ser verificado nos estudos de Leite (2001) e Lovato (2007). Conforme Mehta e Monteiro (1994), quanto maior a quantidade de agregados densos, maiores são os valores de módulo de elasticidade do concreto. De acordo com a caracterização dos agregados graúdos naturais e reciclados utilizados nesta pesquisa, verifica-se que a massa específica do agregado reciclado é menor que a do agregado natural, o que vai de acordo com a afirmação de Mehta e Monteiro (1994).

Além disso, a presença das fibras nos agregados reciclados pode ter causado alguma influência nos resultados, uma vez que as propriedades das fibras se refletem nas propriedades dos concretos. Segundo Bernardi (2003) o módulo de elasticidade da fibra é da ordem de 5,0 GPa, uns dos mais baixos entre os tipos de fibras. Facilmente, nota-se quanto o aumento de teor de resíduo influencia na queda do módulo através do gráfico apresentado na figura 39.

6.3.3 Efeito combinado do traço e teor de substituição

A figura 40 apresenta o efeito combinado entre o traço e o teor de substituição do agregado graúdo em relação ao módulo de elasticidade. A figura foi obtida a partir dos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade, aos 28 dias através da análise de variância.

Figura 40 – Efeito combinado entre traço e teor de substituição no módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias



(fonte: elaborada pela autora)

Analisando-se a figura 40 não pode-se constatar um padrão comportamental para as curvas que relacionam o teor de substituição de agregados, traço e módulo de elasticidade. No entanto, algumas considerações podem ser realizadas. Os teores de substituição entre 25 e 75% conservaram entre si uma relação em que quanto maior o teor de substituição menor o módulo de elasticidade.

As curvas de 25 e 75% de substituição de agregado graúdo apresentam comportamento semelhante uma vez que o módulo diminui para os traços intermediário e pobre. Por outro lado, as curvas de 0 e 50% apresentam comportamento semelhante entre si na medida em que ambas apresentam valores de módulo de elasticidade maiores para o traço intermediário 1:5. Pode-se perceber ainda que o maior valor de módulo de elasticidade, 33,50 GPa, ocorreu para o teor de substituição de 25% combinado com o traço 1:3,5 e o menor valor, 24,90 GPa para o teor de substituição de 75% conjuntamente ao traço mais pobre 1:6,5.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo principal a avaliação das propriedades mecânicas dos concretos que utilizaram como agregado graúdo resíduos provenientes de concreto branco de alto desempenho com fibras. A fim de realizar esta verificação realizou-se os ensaios de compressão uniaxial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Fixou-se o abatimento dos concretos em 100 ± 20 mm, os teores de substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado em 0, 25, 50 e 75%, além de combinar cada teor de substituição com três traços fixados em um rico (1:3,5), um intermediário (1:5,0) e um pobre (1:6,5). A avaliação da influência dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta realizou-se mediante a análise estatística dos dados, no qual manteve-se um intervalo confiança de 95%.

Desta forma foi possível concluir que todos os teores de substituição de agregado graúdo, para o traço 1:3,5 apresentaram resistência à compressão uniaxial maiores que a resistência apresentada pelo concreto referência. Sendo o maior valor apresentado pelo teor 25% com 44,09 MPa e o menor valor 42,40 MPa para o teor de 75%, enquanto que o concreto com teor 0% apresentou resistência de 38,97 MPa para este mesmo traço. Estas análises indicam que houve um acréscimo de até 11,61% nos valores de resistência à compressão.

Ainda em relação a resistência à compressão uniaxial para o traço 1:5, o teor de 75% de substituição apresentou um valor de 27,46 MPa, um pouco abaixo da média geral. Sendo que, para os demais teores, as resistências ficaram muito próximas à resistência do concreto referência.

Já para o traço 1:6,5 houve uma discrepância no valor obtido para o teor de substituição de 50%, o qual apresentou resistência igual a 17,44 MPa. Tal resultado deve representar alguma falha no adensamento dos corpos de prova ou durante a própria moldagem, visto que, para este mesmo traço, o teor de 25% apresentou resistência igual a 28,31 MPa e o teor de 75% apresentou resistência igual a 24,39 MPa. Sendo assim, o valor esperado para o teor de 25% ficou fora da tendência observada. De qualquer forma, a exceção deste único resultado, todos

os demais apresentaram excelentes resistências à compressão uniaxial, sendo o menor valor verificado de 24,39 MPa.

Em relação à resistência à tração por compressão diametral todos os valores obtidos se mantiveram na faixa de resultados entre 1,18 MPa (teor de 50% e traço 1:6,5) e 1,91 MPa, (teor de 50%, traço 1:3,5). Embora a resistência à tração não tenha apresentado um padrão comportamental geral, foi possível observar para a maioria dos concretos, um decréscimo nessa resistência em comparação aos concretos de referência, chegando a diferença máxima de 28,17%. Notou-se, ainda, para os teores de substituição de 0 a 50%, comportamento e valores semelhantes, sendo que tal parâmetro aumenta a medida que o traço se torna mais puro.

Por fim, o módulo de elasticidade apresentou valores para os teores de substituição 25, 50 e 75% inferiores ao referência, a exceção do teor 25%, traço 1:3,5, cujo resultado demonstrou acréscimo de 3,95%. Os valores de módulo ficaram entre 24,90 GPa, correspondente ao teor 75% e traço 1:6,5, e 33,50 GPa, correspondente ao teor 0% e traço 1:5,0. No entanto, quando os fatores controláveis foram analisados combinados, o módulo não apresentou um padrão comportamental geral, mas ressalta-se uma semelhança entre os teores de substituição de 0 e 50%, com o maior valor de módulo para o traço 1:5,0. Para os teores de 25 e 75% também notou-se uma tendência comportamental, apresentando valores que aumentam na medida que o traço se torna mais rico. A diferença entre o menor e o maior valor de módulo caracteriza uma redução aproximada de 25%.

Sendo assim, conclui-se que apesar de alguns comportamentos não terem sido esperados, todos os resultados levam à conclusão de que o concreto com resíduo proveniente de concreto branco de alto desempenho com fibras levam a resultados satisfatórios. Desta forma, viabiliza seu uso em situações em que suas características atendam à necessidade de projeto.

Destaca-se, ainda, que as conclusões aqui apresentadas referem-se especificamente a condições estudadas neste trabalho e, portanto, não devem ser consideradas de forma absoluta. Indica-se ainda, a realização de novas pesquisas e ensaios complementares para confirmar sua representatividade.

Outrossim, considera-se importante salientar que a motivação deste trabalho foi a de incentivar o uso de agregados reciclados em concretos, de forma a diminuir

consideravelmente o impacto ambiental causado pelo uso de recursos naturais e pelo grande volume de aterros e incinerações. Esta é apenas uma pequena contribuição, visto que o mais importante é que haja a conscientização da população em geral de que é possível reutilizar este material ao mesmo tempo em que haja qualidade do produto produzido, além de diversos outros benefícios gerados.

REFERÊNCIAS

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

_____. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 167 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M.; ULSEN, C.; KAHN, H.; MUELLER, A. Separação óptica do material cerâmico dos agregados mistos de resíduos de construção e demolição. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 61-73, 2013.

ANGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO, 4. 2001, [Anais...]. São Paulo: IBRACON CT-206/IPT/ IPEN/PCC, 2001. Não paginado.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 30**: agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003a.

_____. **NBR 10004**: resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 45**: agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 5739**: concreto – ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 8522**: concreto – determinação do modo elástico de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR NM 52**: agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53**: agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR 7211**: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: concreto e argamassa – determinação resistência à tração por compressão em corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

BERNARDI, S. T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes reforçadas com fibra de aramida kevlar**. 2003. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução n. 307**, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em 17 set. 2013.

CORDEIRO, L de N. P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto**. 2013. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle de concretos**. São Paulo: Pini, 1992.

HOOD, R. da S. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2006. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 102 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de Resíduos da Construção. In: SEMINÁRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES, 2000, São Paulo: CETESB, 2000.

JOHN, V. M.; ANGULO, S., C.; KAHN, H. Controle da qualidade dos agregados de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos a partir de uma ferramenta de caracterização. In: SATTLER, M. A.; PEREIRA, F. O. R. (Ed.). **Construção Civil e Meio Ambiente**. Porto Alegre: ANTAC, 2006, v. 7, p. 168-207.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. 1997. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** 1999. 246 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto.** 2007. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

PALIARI, J. C. **Metodologia para a coleta e análise de informações sobre consumos e perdas de materiais e componentes nos canteiros de obras de edifícios.** 1999. 473 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

PINTO, T. P. De volta à questão do desperdício. **Construção.** São Paulo, n. 271, p. 34-35, dez. 1995.

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

_____. (Coord.). **Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do SINDUSCON-SP.** São Paulo: Obra Limpa/I&T/SINDUSCON-SP, 2005.

SANTOS, A. Lei tende a reduzir resíduos sólidos na construção civil. **Portal Itambé,** Curitiba, 7 jun. 2011. Não paginado. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/lei-tende-a-reduzir-residuos-solidos-na-construcao-civil/>>. Acesso em: 16 set. 2013.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ZORDAN, S. E. A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto. 1997. 139 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

**APÊNDICE A - Tratamento de dados do ensaio de
resistência à compressão uniaxial**

Tabela APA – Tratamento de dados do ensaio de resistência à compressão uniaxial

<i>Nome</i>	<i>R (MPa)</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Variância</i>	<i>Dados tratados</i>	<i>Nova Média</i>
A1	36,51			39,59		0,00	
A1	38,72	38,15	1,44		2,07	38,72	38,97
A1	39,21			36,71		39,21	
A2	44,19			44,20		44,19	
A2	43,71	43,96	0,24		0,06	0,00	44,09
A2	43,98			43,72		43,98	
A3	39,85			43,99		0,00	
A3	43,39	42,06	1,93		3,71	43,39	43,17
A3	42,94			40,13		42,94	
A4	43,10			43,23		43,10	
A4	41,70	41,46	1,77		3,12	41,70	42,40
A4	39,59			39,70		0,00	
B1	36,42			36,12		0,00	
B1	32,80	34,12	2,00		4,01	32,80	32,97
B1	33,13			32,12		33,13	
B2	37,66			39,13		0,00	
B2	39,10	38,41	0,72		0,52	39,10	38,79
B2	38,47			37,69		38,47	
B3	37,13			37,13		37,13	
B3	36,88	37,01	0,13		0,02	0,00	37,07
B3	37,01			36,88		37,01	
B4	27,89			32,19		27,89	
B4	27,03	29,18	3,01		9,06	27,03	27,46
B4	32,62			26,17		0,00	
C1	30,49			30,44		0,00	
C1	28,30	29,34	1,10		1,21	28,30	28,76
C1	29,22			28,24		29,22	
C2	28,02			29,50		28,02	
C2	29,56	28,72	0,78		0,61	0,00	28,31
C2	28,59			27,94		28,59	
C3	17,13			20,04		17,13	
C3	17,74	18,38	1,66		2,77	17,74	17,44
C3	20,27			16,72		0,00	
C4	23,80			27,30		23,80	
C4	27,48	25,42	1,88		3,54	0,00	24,39
C4	24,97			23,54		24,97	

(fonte: elaborada pela autora)

**APÊNDICE B - Tratamento de dados do ensaio de resistência à
tração por compressão diametral**

Tabela APB – Tratamento de dados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

<i>Nome</i>	<i>R (MPa)</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Variância</i>	<i>Dados tratados</i>	<i>Nova Média</i>
A1	1,71			2,03		1,71	
A1	1,15	1,59	0,44		0,19	0,00	1,81
A1	1,91			1,15		1,91	
A2	1,74			2,05		1,74	
A2	1,65	1,60	0,45		0,20	1,65	1,60
A2	1,40			1,15		1,40	
A3	1,91			1,99		1,91	
A3	1,57	1,80	0,19		0,04	0,00	1,91
A3	1,91			1,60		1,91	
A4	1,42			1,47		1,42	
A4	1,19	1,10	0,37		0,13	1,19	1,30
A4	0,70			0,73		0,00	
B1	1,54			1,55		1,54	
B1	1,55	1,54	0,01		0,00	1,55	1,54
B1	1,54			1,54		1,54	
B2	1,44			1,44		1,44	
B2	1,38	1,41	0,03		0,00	0,00	1,43
B2	1,42			1,38		1,42	
B3	1,76			1,74		0,00	
B3	1,55	1,61	0,13		0,02	1,55	1,54
B3	1,53			1,49		1,53	
B4	1,37			1,38		1,37	
B4	1,15	1,27	0,11		0,01	0,00	1,33
B4	1,30			1,16		1,30	
C1	1,33			1,35		1,33	
C1	1,04	1,20	0,15		0,02	0,00	1,28
C1	1,24			1,05		1,24	
C2	1,33			1,41		1,33	
C2	1,12	1,27	0,14		0,02	0,00	1,35
C2	1,37			1,14		1,37	
C3	1,20			1,27		1,20	
C3	0,80	1,05	0,22		0,05	0,00	1,18
C3	1,16			0,83		1,16	
C4	1,96			1,99		1,96	
C4	1,18	1,60	0,40		0,16	0,00	1,81
C4	1,65			1,20		1,65	

(fonte: elaborada pela autora)

**APÊNDICE C - Tratamento de dados do ensaio de
módulo de elasticidade**

Tabela APC – Tratamento de dados do ensaio de módulo de elasticidade

<i>Nome</i>	<i>R (GPa)</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Variância</i>	<i>Dados tratados</i>	<i>Nova Média</i>
A1	32,90			33,04		32,90	
A1	32,10	32,60	0,44		0,19	0,00	32,85
A1	32,80			32,16		32,80	
A2	34,90			34,88		0,00	
A2	34,40	34,43	0,45		0,20	34,40	34,20
A2	34,00			33,98		34,00	
A3	29,30			29,45		29,30	
A3	29,10	28,87	0,59		0,34	29,10	29,20
A3	28,20			28,28		0,00	
A4	28,30			28,65		28,30	
A4	excluído	27,45	1,20		1,44	0,00	27,45
A4	26,60			26,25		26,60	
B1	33,30			34,03		33,30	
B1	31,40	32,80	1,23		1,51	0,00	33,50
B1	33,70			31,57		33,70	
B2	30,90			32,26		0,00	
B2	31,70	31,60	0,66		0,43	31,70	31,95
B2	32,20			30,94		32,20	
B3	29,90			31,23		29,90	
B3	31,00	30,45	0,78		0,60	31,00	30,45
B3	excluído			29,67		0,00	
B4	27,40			30,76		27,40	
B4	30,90	27,70	3,06		9,37	0,00	26,10
B4	24,80			24,64		24,80	
C1	34,60			34,60		34,60	
C1	33,10	33,10	1,50		2,25	33,10	33,10
C1	31,60			31,60		31,60	
C2	29,60			30,62		29,60	
C2	30,70	29,80	0,82		0,67	0,00	29,35
C2	29,10			28,98		29,10	
C3	28,90			29,01		28,90	
C3	25,10	27,10	1,91		3,64	0,00	28,10
C3	27,30			25,19		27,30	
C4	24,80			25,08		24,80	
C4	24,20	24,67	0,42		0,17	0,00	24,90
C4	25,00			24,25		25,00	

(fonte: elaborada pela autora)