

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

Felipe Zortea

**CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE CONCRETOS
PRODUZIDOS COM MATERIAIS CERÂMICOS
RECICLADOS: ESTUDO DA REDUÇÃO DA
VARIABILIDADE USANDO SEPARAÇÃO
DOS AGREGADOS POR DENSIDADE**

Porto Alegre
dezembro 2014

FELIPE ZORTEA

**CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE CONCRETOS
PRODUZIDOS COM MATERIAIS CERÂMICOS
RECICLADOS: ESTUDO DA REDUÇÃO DA
VARIABILIDADE USANDO SEPARAÇÃO
DOS AGREGADOS POR DENSIDADE**

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 Engenheiro Civil

Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Coorientadora: Aguida Gomes de Abreu

Porto Alegre
dezembro 2014

FELIPE ZORTEA

**CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE CONCRETOS
PRODUZIDOS COM MATERIAIS CERÂMICOS
RECICLADOS: ESTUDO DA REDUÇÃO DA
VARIABILIDADE USANDO SEPARAÇÃO
DOS AGREGADOS POR DENSIDADE**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO 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, dezembro de 2014

Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dra. pela USP
Orientadora

Aguida Gomes de Abreu
Dra. pelo PPGEC/UFRGS
Coorientadora

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

BANCA EXAMINADORA

**Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
(UFRGS)**
Dra. pela USP

Prof. Carlos Otávio Petter (UFRGS)
Dr. pela Ecole Des Mines Paris

Marina Martins Mennucci (UFRGS)
Dra. pela USP

Aguida Gomes de Abreu (UFRGS)
Dra. pelo PPGEC/UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, José Carlos e Maria Helena, e ao meu irmão Jeancarlo que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, José Carlos Zortea e Maria Helena Menegotto Zortea, e ao meu irmão Jeancarlo Zortea, pelo apoio que me propuseram em todos os momentos de minha vida, como também por toda a ajuda que necessitei para atingir meus objetivos.

Agradeço à minha amiga, Adriana Borges, pelo incentivo à conclusão deste trabalho, bem como apoio nos momentos mais difíceis.

Agradeço à Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin, orientadora deste trabalho, pelo contínuo acompanhamento ao longo do trabalho, motivação e auxílios que pode me dar a todo momento que necessitei.

Agradeço à minha coorientadora, Aguida Gomes de Abreu, pela sua disposição em consultas e contínuo acompanhamento ao longo do trabalho, bem como os auxílios que pode me dar quando necessitei.

Agradeço à Profa. Carin Maria Schmitt, coordenadora das disciplinas Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil I e II, pela sua dedicação, como também pelas críticas e sugestões que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à empresa R.Correa Engenharia, pelo fornecimento do material utilizado neste trabalho.

Agradeço ao pessoal do Norie e do Laprom, pela assistência no transporte, estoque e disponibilização dos equipamentos para a realização deste trabalho.

Agradeço ao doutorando Wesley Ambrós, pela ajuda e acompanhamento que pode me dar nos ensaios realizados no Laprom, e pelos esclarecimentos de dúvidas quanto aos ensaios realizados com o jigie pneumático utilizado.

O mais importante de tudo é nunca deixar de se perguntar.
A curiosidade tem sua própria razão de existir.

Albert Einstein

RESUMO

A economia brasileira passou por um crescimento marcante nos últimos 20 anos. Um dos setores mais afetados por este crescimento foi a construção civil, que se desenvolveu em quantidade e qualidade. Porém, a grande demanda por matérias-primas não renováveis, as quais são extraídas da natureza, bem como a gestão ineficiente no controle das atividades de construção envolvidas, as quais geram grandes quantidades de resíduos de construção e de demolição de estruturas, em especial resíduos cerâmicos de diversos tipos, fazem da construção civil uma fonte geradora de impactos ambientais. A maior parte do entulho gerado é depositado em aterros. Assim, uma solução para este problema seria a reciclagem dos resíduos cerâmicos, utilizando-os como agregados na fabricação de concretos, garantindo a sustentabilidade do setor. Muitos estudos foram desenvolvidos quanto à sua utilização como agregado no concreto, e o que se observou é uma grande variabilidade dos resultados obtidos. Isso se deve justamente a alterações constantes da composição dos resíduos. Uma alternativa para reduzir esta variabilidade é a segregação dos constituintes do RCD de material cerâmico através de equipamentos separadores, como o jigue pneumático. Esse equipamento utilizado na área da mineração realiza a separação de agregados, por meio de aspersão de ar, visando a separação de materiais pela diferença de densidade, sendo um método diferente de outros que utilizam líquidos como o agente separador. Para avaliar o desempenho deste equipamento, utilizaram-se os agregados cerâmicos resultantes do processo de separação na confecção de corpos de prova de concretos, os quais foram submetidos a ensaios mecânicos, tais como a resistência à compressão, a resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade. A variabilidade dos resultados desses ensaios foi comparada com os resultados dos ensaios mecânicos realizados com os mesmos agregados e nas mesmas proporções, mas separados e pesados manualmente, servindo como dados de referência. Como havia uma pequena diferença de densidade entre os materiais cerâmicos utilizados, não houve uma notável regularização nas propriedades mecânicas dos ensaios. Assim, constatou-se que o jigue pneumático utilizado não conseguiu realizar uma separação satisfatória desses materiais, com a finalidade de utilizá-los como agregados graúdos no concreto.

Palavras-chave: Resíduos Cerâmicos. Redução da Variabilidade do Agregado Cerâmico.
Concreto com Agregados Cerâmicos Reciclados.
Separação por Densidade dos Agregados Cerâmicos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas de pesquisa	19
Figura 2 – Resíduo de construção e demolição	28
Figura 3 – Composição dos resíduos de construção e demolição em Porto Alegre	29
Figura 4 – Fluxograma experimental	41
Figura 5 – Bloco cerâmico estrutural	42
Figura 6 – Tijolo cerâmico maciço	42
Figura 7 – Tijolo cerâmico 6 furos	42
Figura 8 – Britador de mandíbula	44
Figura 9 – Peneira de vibração pneumática	45
Figura 10 – Peneiramento do bloco cerâmico estrutural	46
Figura 11 – Material cerâmico ensacado pelo seu tipo	47
Figura 12 – Taxas de absorção de umidade	50
Figura 13 – Representação esquemática do jigue pneumático	52
Figura 14 – Jigue pneumático	52
Figura 15 – Funcionamento do jigue pneumático	53
Figura 16 – Compartimentos de estratificação	53
Figura 17 – Materiais colocados nos compartimentos antes do ensaio de separação	56
Figura 18 – Ensaio de separação em andamento	57
Figura 19 – Camada inferior a ser coletada após a utilização do jigue pneumático	58
Figura 20 – Efeito de borda	59
Figura 21 – Camada superior	60
Figura 22 – Camada intermediária	61
Figura 23 – Camada inferior	62
Figura 24 – Armazenamento dos materiais coletados	63
Figura 25 – Saturação dos agregados em água	65
Figura 26 – Determinação do teor de argamassa e da quantidade total de agregado	66
Figura 27 – Moldes dos corpos de prova preenchidos com o concreto	68
Figura 28 – Ensaio para a determinação do módulo de elasticidade	70
Figura 29 – Ensaio de tração por compressão diametral	70
Figura 30 – Gráfico com os valores médios de resistência à compressão	73
Figura 31 – Relação entre os valores médios de resistência à compressão das misturas de referência com as jigadas	74

Figura 32 – Relação entre a média dos valores médios de compressão das misturas de referência com as jigadas	75
Figura 33 – Relação entre os valores médios de compressão do BCE com as misturas jigadas	76
Figura 34 – Gráfico com os valores médios de resistência à tração por compressão diametral	78
Figura 35 – Corpo de prova rompido no ensaio de resistência à tração por compressão diametral	79
Figura 36 – Relação entre os valores médios de resistência à tração por compressão diametral das misturas de referência com as jigadas	80
Figura 37 – Relação entre a média dos valores médios de tração por compressão diametral das misturas de referência com as jigadas	81
Figura 38 – Relação entre os valores médios de tração por compressão diametral do BCE com as misturas jigadas	82
Figura 39 – Gráfico com os valores médios de módulo de elasticidade	84
Figura 40 – Relação entre os valores médios de módulo de elasticidade das misturas de referência com as jigadas	85
Figura 41 – Relação entre a média dos valores médios de módulo de elasticidade das misturas de referência com as jigadas	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Interface entre argamassa e o agregado graúdo	79
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de materiais cerâmicos utilizados como agregados graúdos para a confecção de corpos de prova referenciais	43
Tabela 2 – Quantidade de materiais cerâmicos utilizados como agregados graúdos para a realização dos ensaios de separação no jigue	44
Tabela 3 – Massas unitárias dos materiais cerâmicos	48
Tabela 4 – Massas dos materiais cerâmicos pesados	48
Tabela 5 – Massas específicas dos materiais cerâmicos	49
Tabela 6 – Porcentagens de absorção dos materiais cerâmicos	49
Tabela 7 – Quantidade de materiais cerâmicos nos ensaios de separação	55
Tabela 8 – Valores do abatimento e do consumo de aditivo	67
Tabela 9 – Valores de resistência à compressão	72
Tabela 10 – Valores de p nos ensaios de resistência à compressão	74
Tabela 11 – Valores de resistência à tração por compressão diametral	77
Tabela 12 – Valores de p nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral	80
Tabela 13 – Valores de módulo de elasticidade	83
Tabela 14 – Valores de p nos ensaios de módulo de elasticidade	84
Tabela 15 – Valores médios dos ensaios mecânicos	86
Tabela 16 – Diferença dos valores médios em relação aos valores das misturas jigadas	87
Tabela 17 – Variação das propriedades médias entre as misturas de referência e as jigadas	87
Tabela 18 – Valores dos critérios de concentrações	89

LISTA DE SIGLAS

RCD – Resíduo de construção e demolição

BCE – Bloco cerâmico estrutural

TCM – Tijolo cerâmico maciço

TC6F – Tijolo cerâmico 6 furos

ANB – Agregado natural de basalto

REF. – Referência

JIG. – Jigado

LISTA DE SÍMBOLOS

α – teor de argamassa (%)

f_{c14} – resistência à compressão aos 14 dias (MPa)

f_{t14} – resistência à tração por compressão diametral aos 14 dias (MPa)

E_{c14} – módulo de elasticidade aos 14 dias (GPa)

σ_{fc} – desvio padrão dos valores de resistência à compressão (MPa)

σ_{ft} – desvio padrão dos valores de resistência à tração por compressão diametral (MPa)

σ_{Ec} – desvio padrão dos valores de módulo de elasticidade (GPa)

p – grau de significância (%)

Δ – variação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	17
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	17
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	17
2.2.1 Objetivo Principal	17
2.2.2 Objetivos Secundários	17
2.3 HIPÓTESE	18
2.4 PRESSUPOSTO	18
2.5 PREMISA	18
2.6 DELIMITAÇÕES	18
2.7 LIMITAÇÕES	18
2.8 DELINEAMENTO	19
3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	22
3.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO	22
3.2 PANORAMA BRASILEIRO	23
3.3 MOTIVOS DE GERAÇÃO DE RCD	27
3.4 CARACTERÍSTICAS E A VARIABILIDADE DO RCD	29
3.5 TENTATIVAS DE SEPARAÇÃO DE RCD	32
4 UTILIZAÇÃO DO RCD COMO AGREGADO RECICLADO NO CONCRETO	34
5 CATACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS DE MATERIAIS CERÂMICOS E A SUA INFLUÊNCIA NA UTILIZAÇÃO COMO AGREGADO RECICLADO NO CONCRETO	37
6 PESQUISA EXPERIMENTAL	40
6.1 ASPECTOS GERAIS	40
6.2 MATERIAIS CERÂMICOS SELECIONADOS	41
6.3 QUANTIDADE NECESSÁRIA DE MATERIAL CERÂMICO	43
6.4 BRITAGEM E CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA	44
6.5 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CERÂMICOS UTILIZADOS	47

6.5.1 Massa unitária	48
6.5.2 Massa específica	48
6.5.3 Absorção	49
6.6 PROCESSAMENTO E SEPARAÇÃO DOS AGREGADOS CERÂMICOS	50
6.6.1 Ensaio 33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F	56
6.6.2 Ensaio 60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F	57
6.6.3 Ensaio 20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F	57
6.6.4 Efeito de borda	57
6.6.5 Ensaio para análise visual com tingimento dos agregados cerâmicos	59
6.6.6 Armazenamento dos materiais processados	62
6.7 CONFECÇÃO DE CONCRETOS COM OS AGREGADOS CERÂMICOS	63
6.7.1 Cimento	63
6.7.2 Agregado miúdo	63
6.7.3 Agregado graúdo	64
6.7.4 Aditivo	65
6.7.5 Água	66
6.7.6 Confeção dos concretos e moldagem dos cp's	66
6.7.7 Cura e retífica	68
6.8 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS	69
7 RESULTADOS E ANÁLISES	71
7.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	72
7.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	76
7.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE	82
7.4 COMPARAÇÃO ENTRE MÉDIAS DOS ENSAIOS E VARIABILIDADE	86
7.5 EFETIVIDADE DE SEPARAÇÃO	88
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
8.1 CONCLUSÕES	90
8.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	92
REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da economia nacional brasileira é marcante nos últimos 20 anos. Muitos setores da economia vêm desenvolvendo-se e aprimorando-se para oferecer ao mercado produtos diferenciados capazes de suprir e superar as expectativas de uso.

A indústria da construção civil foi um dos setores que se desenvolveu em quantidade e qualidade. Mas apesar de todo esse desenvolvimento, ela ainda é uma grande fonte geradora de impactos ambientais pela extração de matérias-primas não renováveis para a construção, a ponto de modificar o ecossistema local. É também geradora de resíduos de construção e demolição, os quais são normalmente descartados em aterros de maneira imprópria. Tudo isso motiva a busca da prática do desenvolvimento sustentável.

A reciclagem dos resíduos de construção e demolição, RCD, ainda é relativamente recente se comparado ao tempo de atuação da construção civil, e pouco é feito no Brasil, apesar de já existirem políticas de gestão de resíduos, os quais são fortemente incentivados para a preservação ambiental. Para que o RCD seja utilizado no concreto na forma de agregados, deve-se ter o conhecimento das características fundamentais que esses resíduos apresentam, como por exemplo, a granulometria, a massa específica e o módulo de elasticidade. Como os resíduos da construção e demolição não são separados no canteiro de obras quanto ao tipo de material constituinte, eles chegam até o local de deposição na forma de mistura heterogênea, podendo haver contaminantes que podem alterar negativamente as características do concreto, por exemplo, o gesso.

No Brasil, grande parcela do RCD é constituída por materiais cerâmicos. Estes possuem características físicas diferentes entre si por haver heterogeneidade dos componentes, tais como blocos de vedação, blocos estruturais, tijolos maciços, azulejos, telhas cerâmicas. Todos possuem peculiaridades em suas propriedades mecânicas.

Tendo em vista que alguns países da Europa reciclam a maior parte do entulho gerado na construção civil, constata-se que muitas tecnologias da reciclagem provêm desses países, o que fomenta ainda mais o desejo da fabricação de equipamentos nacionais capazes de realizar a reciclagem a um custo menor que o equipamento importado. Alguns equipamentos que

utilizavam líquidos com diferentes densidades foram testados em laboratório obtiveram resultados, mas o produto final da separação foi contaminado, não podendo ser utilizado como agregado no concreto. Outros, que utilizam água como agente separador, obtiveram êxito, mas em escala laboratorial, pois o custo a serem empregados em larga escala seria impróprio para a realidade brasileira, bem como um grande consumo de água. Assim, alguns equipamentos provenientes da mineração, têm grande potencial para serem estudados para esta finalidade, pois se tratam de várias toneladas de RCD a serem recicladas diariamente. Esses equipamentos visam separar tamanho e densidade, através da vibração e injeção de ar sob pressão, ou seja, por processo a seco.

A dificuldade ainda é a variabilidade das composições obtidas pelas técnicas utilizadas por esses equipamentos, as quais não apresentam ainda uma constância na sua eficácia para que torne o material cerâmico reciclado, constituinte do RCD, mais homogêneo e constante em suas características. Portanto, com a experimentação do equipamento de separação por processo a seco, tentar-se-á diminuir a variabilidade das porções obtidas da separação dos materiais cerâmicos descartados na construção civil, tornando-as mais homogêneas e constantes em suas composições.

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: é possível diminuir a variabilidade das características mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de materiais cerâmicos, como agregados reciclados separados por densidade através de equipamento de mineração, a ponto de se obter uma regularidade nas propriedades?

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 verificação da viabilidade de utilização de equipamento de separação por densidade, já adotado na área de mineração, de forma a reduzir a variabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados a partir de diferentes tipos de materiais cerâmicos.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) verificação da capacidade do equipamento de separação em segregar os RCD de material cerâmico perante a diferença de densidade, através de análise visual;
- b) a apresentação dos resultados de concretos moldados usando o material cerâmico reciclado como agregado graúdo.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que, considerando o uso do equipamento de separação por densidade em rochas, da área da mineração, haverá êxito na separação por densidade do RCD de material cerâmico, resultando em agregados de características homogêneas.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que o grande entrave do uso de RCD cerâmico como agregado na produção de concretos é a sua heterogeneidade e variabilidade na sua composição, sendo necessário encontrar um processo de separação que gere fases homogêneas desse material.

2.5 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que com a resolução do problema da variabilidade dos resíduos cerâmicos, é possível utilizá-los como agregados graúdos em concretos, reduzindo o impacto ambiental, proveniente da sua deposição em aterros, como também, da extração de matérias-primas.

2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a utilização de somente:

- a) um equipamento de separação por densidade;
- b) agregados reciclados de material cerâmico.

2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho a avaliação das seguintes propriedades de concretos produzidos com RCD de material cerâmico:

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

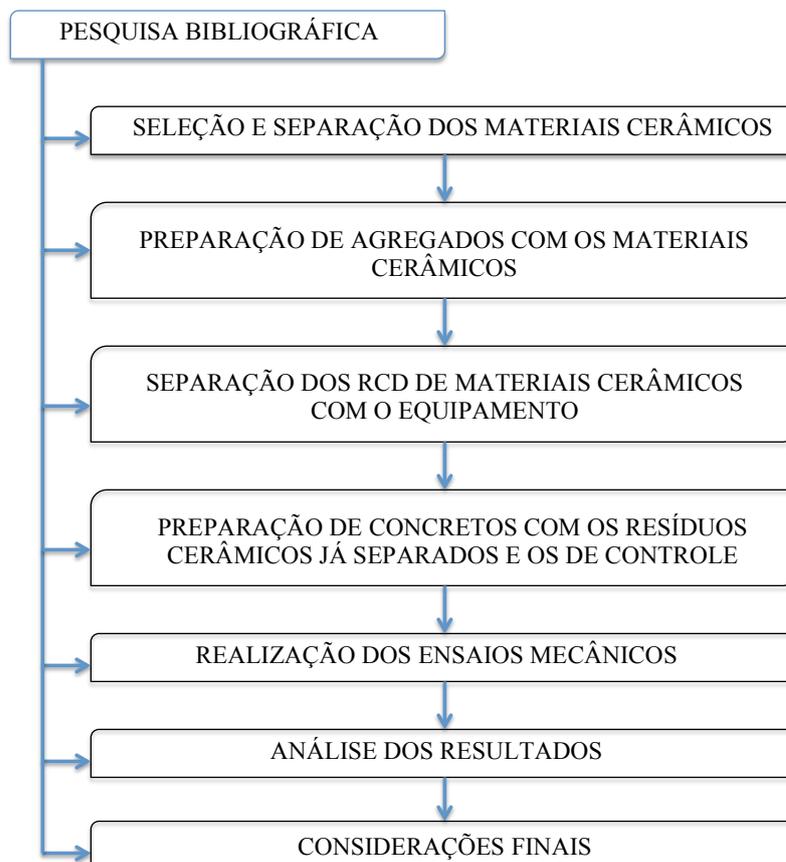
2.8 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) seleção e separação dos materiais cerâmicos;
- c) preparação de agregados com os materiais cerâmicos;
- d) separação dos RCD de material cerâmico com o equipamento;
- e) preparação de concretos com os resíduos cerâmicos já separados e os de controle;
- f) realização dos ensaios mecânicos;
- g) análise dos resultados;
- h) considerações finais.

A seqüência das etapas pode ser visualizada pelo diagrama esquematizado na figura 1.

Figura 1 – Etapas de pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

A **pesquisa bibliográfica** foi realizada desde o começo até a conclusão da proposta desse trabalho. Ela serviu para o bom entendimento da importância deste, demonstrando conceitos teóricos e práticos já consagrados por vários autores, como também as normas técnicas para a execução dos ensaios. Nesta etapa, a qual foi redigida ao longo do trabalho, foram transcritas informações sobre os resíduos de construção e demolição, os materiais cerâmicos encontrados nesses resíduos, detalhamento de equipamentos já utilizados para a separação, uma visão geral dos resíduos de construção e demolição como agregado no concreto e a utilização do resíduo cerâmico como agregado no concreto.

Na etapa seguinte, foram realizadas a **seleção e separação dos materiais cerâmicos**, na qual foram selecionados três tipos de materiais cerâmicos com características físicas e massas específicas diferentes entre si para que o equipamento pudesse separar, como também a quantidade necessária de material para o teste de separação e para a utilização como agregado em corpos de prova moldados.

Assim, realizou-se a **preparação de agregados com os materiais cerâmicos**, na qual ocorreu a britagem e peneiramento do material selecionado para uma uniformidade na granulometria requerida. Após, foram selecionadas três amostras com a quantidade percentual de cada tipo de material a ser misturado.

Definidas as proporções, elas foram misturadas e se utilizou o equipamento de separação por densidade, iniciando a etapa de **separação dos RCD de material cerâmico com o equipamento**. Aqui, visou-se à separação dos resíduos cerâmicos por sua densidade, os quais após o processo, formaram três camadas de resíduos por amostra.

Realizadas as separações, coletou-se as amostras e teve início a **preparação de concretos com os resíduos cerâmicos já separados e os de controle**. Nesta etapa, os corpos de prova de controle foram confeccionados com os materiais totalmente puros em sua composição, e também com as mesmas proporções utilizadas no equipamento de separação, pesadas e dosadas com cautela. Todos os corpos de prova foram mantidos em cura úmida, por 13 dias, em câmara úmida. Após a cura, realizou-se a retífica dos corpos de prova e foi iniciada a **realização dos ensaios mecânicos**, obtendo-se a resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade dos corpos de prova.

Terminado essa etapa, fez-se a **análise dos resultados** obtidos nos ensaios já mencionados. E por fim, chegou-se às **considerações finais** da pesquisa, analisando a efetividade de separação do equipamento.

3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Neste capítulo é abordada a caracterização geral dos resíduos de construção e demolição (RCD) e sua classificação, e feita uma análise do panorama brasileiro quanto à geração desses resíduos, aos motivos de geração, à variabilidade da composição e características do RCD, como também as tentativas de separação dos materiais.

3.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

Os resíduos da construção civil são compostos de vários materiais, os quais são gerados em quantidades variáveis por motivos diferentes. Conforme a Resolução nº 307 do Conama (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002, p. [1]), a qual teve a redação alterada em alguns pontos pela Resolução 348, de 2004, pela Resolução 431, de 2011 e pela Resolução 448, de 2012, os resíduos de construção civil são definidos como:

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

Quanto à classificação dos diversos tipos de resíduos gerados, a NBR 15113 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, p. 2-3) especifica as seguintes categorias:

- a) Classe A: a qual é caracterizada por potenciais resíduos reutilizáveis como agregados, tendo como origem as demolições, construções de processos de fabricação de diversos materiais;
- b) Classe B: constituída de resíduos metálicos, vítreos e não minerais;
- c) Classe C: constituída por resíduos sem tecnologia de reciclagem disponível para seu reaproveitamento;
- d) Classe D: constituída por resíduos de alta periculosidade.

3.2 PANORAMA BRASILEIRO

A grande geração de resíduos provenientes da construção e demolição é uma realidade resultante do desenvolvimento econômico brasileiro nos últimos anos, fato que é evidenciado pelo crescimento urbanístico das cidades, em detrimento à maior facilidade de aquisição do imóvel. Tal crescimento tem como causa a construção de novas edificações e reformas.

O gerenciamento na produção e no consumo de materiais tornam-se um problema, pois não há controles rígidos quanto às atividades de trabalho na construção, principalmente na utilização necessária de materiais de construção, para fins de prevenção de desperdícios, minimizando-os. Então, apenas como descarte de tais materiais, as soluções para essa realidade são de caráter emergencial, ou seja, quando necessária, denominada Gestão Corretiva. Essa prática adotada é caracterizada por uma série de atividades repetitivas as quais não foram levadas em conta para fins de prevenção, gerando altos custos, portanto, ineficientes. Assim, ela tem como embasamento a inevitável deposição irregular dos resíduos em áreas para aterros próximas aos centros urbanos, como as várzeas, vales e regiões de baixada que são primordiais para o escoamento de grandes volumes de água concentrados no solo urbano impermeável. O crescente aumento do volume de resíduos deixa para as mal planejadas municipalidades a ineficaz Gestão Corretiva, não podendo contar com um maior suporte de políticas de saneamento que ainda não incorporam adequadamente, nesse país, a questão dos resíduos sólidos urbanos inertes (PINTO, 1999, p. 45-46).

Dessa forma, as gestões adotadas hoje, em grande parte dos municípios, são claramente insustentáveis e, sua ineficiência impõe a necessidade de um traçado específico para as atuais e futuras políticas públicas de saneamento, em especial às específicas para a problemática dos resíduos sólidos urbanos.

Em seu estudo, Pinto (1999, p. 44) salienta que, mesmo com a baixa periculosidade dos resíduos de construção e demolição, a quantidade gerada é muito grande. Assim o problema principal desses resíduos não é a contaminação do tipo de resíduo, mas sim pelo impacto ambiental advindos do volume excessivo desse material, o que é demonstrado em alguns municípios brasileiros de médio e grande porte que se assemelham a zonas urbanas densas da Comunidade Europeia, Japão e América do Norte.

Angulo (2005, p. 15) destaca que em cidades brasileiras de médio e grande porte se pratica a seleção e reciclagem de materiais não minerais provenientes dos resíduos de construção e demolição. Isso é explicado pelo fato que esses materiais não são selecionados e descartados de forma individual na sua origem, misturando-se com os RCD, assim sendo coletada e reciclada com empresas especializadas. O que é pouco praticado com materiais minerais, os quais representam a maior parcela do resíduo de construção e demolição.

Ainda, Angulo (2005, p. 20-21) afirma que a maior parcela dos RCD no Brasil é de origem mineral, como rochas, concretos, argamassas, materiais cerâmicos, e essa mesma parcela é muito variável na sua composição, pois depende da origem da geração do resíduo. Assim, um bom gerenciamento quanto à produção de resíduos de construção de demolição diminuiria o impacto ambiental e econômico que eles trazem. Para o autor, a destinação correta desses resíduos em locais apropriados, que não sejam aterros irregulares com a criação de uma gestão quanto à separação dos resíduos conforme seu tipo, poderiam encorajar a reciclagem e a utilização dos materiais reciclados, para fins comerciais. Ainda, ele destaca que com a reciclagem da maior parcela do RCD, a fração mineral, seria de rápida difusão no mercado de agregados.

Pinto (1999) ressalta que estudos já foram realizados para um entendimento geral na geração de RCD nas cidades brasileiras, porém não demonstraram dados exatos e precisos na produção dos diversos tipos de materiais que são descartados como resíduos, devido à grande heterogeneidade, e, portanto, da variabilidade entre eles. Conforme seu estudo, o autor estimou que os resíduos de construção e demolição, além de outras atividades de manutenção e reparos, gerados nos grandes centros brasileiros, são responsáveis por aproximadamente 50% do quantitativo dos resíduos gerados, enquanto que as atividades de canteiro de obras correspondem pela outra metade da geração desses resíduos.

Quanto à classificação dos resíduos de construção e demolição, há grande tendência em classificá-los como inertes, ou seja, que não reagem quimicamente e por não serem materiais poluentes. Mas, como há grande variabilidade dos tipos de resíduos a serem descartados nas obras, juntamente com uma pobre gestão de resíduos quanto à separação pelo tipo, podem estar contaminados por descarte de materiais poluentes e por respingos de líquidos usados na construção (CABRAL, 2007, p. 52).

Conforme Cabral, é evidente que nas construções não é dada importância à gestão dos resíduos, muito menos à reciclagem dos mesmos, pois dando uma destinação final em aterros resolveria o problema. Assim, organizar um programa de separação dos tipos de resíduos, como também a escolha de um local apropriado no canteiro de obras para a deposição temporária, a ponto de não haver contaminação dos RCD durante as tarefas diárias que utilizam líquidos e substâncias químicas, seriam medidas coerentes para ter-se uma eficácia na separação.

Geralmente, a destinação final desses tipos de resíduos se dá em aterros e, na ausência de regularização dos mesmos, em lugares que são impróprios para seu descarte. Assim, Zordan (1997, p. 23) reforça a ideia de reaproveitamento do resíduo de construção com incentivos de reciclagem aos construtores, profissionais ligados à coleta desses resíduos e proprietários de imóveis em construção, pelo fato da grande totalidade de resíduos gerados no país. Pode-se assim, por intermédio de planejamento e gestão de resíduos, reduzir o depósito indevido em locais urbanos, o que resultaria em menores custos.

É notável a grande geração de resíduos sólidos na construção civil, provenientes de materiais de construção utilizados nos canteiros de obras. Assim, pode-se caracterizar as perdas de materiais, os quais são descartados como entulho, em dados estatísticos para informação. Pinto (1999, p. 34) retrata que algumas informações podem ser retratadas como dados numéricos em função da área construída, como por exemplo, a taxa de geração de resíduos de construção, a qual é estimada na ordem de 150 quilogramas por metro quadrado de área construída. Outros dados podem ser verificados como a perda de materiais durante os processos de construção, que podem ser na cada de 25%.

Pinto (1999, p. 86) afirma que a economia se desenvolveu bastante no século XX, resultando em uma geração elevada de resíduos, seja em países desenvolvidos e em desenvolvimento. O surgimento de resíduos, no caso de RCD, fomenta o desenvolvimento de uma parte da engenharia civil para fins de reciclagem e reutilização, como também estudos na gestão de resíduos em obra e da busca do aperfeiçoamento dos procedimentos de demolição, assim evitando seu despejo na natureza. O autor comenta que a construção civil é grande geradora de resíduos, mas que também reaproveita parte dos resíduos gerados e de outros resíduos de naturezas diversas, como o asfalto e produtos à base de betume, os quais são subprodutos da refinação de petróleo.

Quanto às atividades brasileiras de demolição, Pinto (1999, p. 95-96) afirma que é de pequena intensidade, agindo assim na dimensão máxima dos RCD gerados são pequenas, em torno de 300mm. Com essa dimensão, permite-se a utilização de equipamentos de reciclagem menores, com menores custos, adaptados à quantidade da geração de resíduos em cidades de médio e grande porte. Assim, aliado ao conhecimento dos fabricantes brasileiros, a produção de equipamentos de reciclagem torna-se tecnologicamente viável. Mesmo que a estimativa do custo de operação dessas instalações de reciclagem seja complexa, devido ao fato do controle por autarquias locais e pelo poder público, apontou-se, por via de componentes necessários às suas utilizações, um valor na casa de R\$ 5,00 por tonelada reciclada. Esse valor é um importante dado, pois ele serve de base para a realização da reciclagem dos RCD em uma cidade, visto que não é de grande custo, concorrendo com os preços de agregados naturais.

Conforme Carneiro (2005, p. 17):

Atualmente a indústria da construção civil vem sofrendo forte pressão para adequação de seus processos construtivos de forma a garantir um uso mais racional de seus materiais nos canteiros de obras. Tal pressão se deve principalmente ao fato do setor vir sendo apontado muitas vezes como um grande vilão no que se refere às questões de consumo de recursos naturais e de desperdício e perdas dos materiais por ela utilizados.

Assim, é necessária a formação de uma gestão que oriente uma correta utilização dos materiais de construção, com a finalidade de enxugar a demanda destes, resultando num consumo menor, como também na redução da geração de resíduos. Carneiro (2005, p. 17-18) ressalta que o consumo excessivo de um material gera perdas do tipo perda incorporada, o qual o material utilizado em excesso é componente da estrutura, como também por má utilização do material construtivo, resultando no descarte deste na forma de entulho.

Esta última afirmação do autor se refere justamente à geração de resíduos, sendo os mesmos depositados em aterros licenciados, ocupando espaço, como também em locais impróprios de descarte, contaminando água e solo. Ambos os aspectos geram impactos ambientais, como também sociais.

Os agregados são materiais que ocupam grande parcela da constituição volumétrica do concreto. Assim, conhecer suas características físicas isoladas, bem como a ação delas no concreto, são de extrema importância para a viabilidade de sua utilização.

Muitos materiais provenientes de entulhos podem estar contaminados, inviabilizando a sua utilização como agregado miúdo no concreto. Porém, a utilização como agregado graúdo foi plausível em estudos de laboratório e de campo (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 251-252).

Ainda, Mehta e Monteiro (1994, p. 252) afirmam que:

O principal obstáculo no uso do entulho de construção como agregado para concreto é o custo de britagem, graduação, controle de pó e separação dos constituintes indesejáveis. Concreto reciclado ou concreto de entulho britado pode ser uma fonte economicamente viável de agregados, em locais onde agregados de boa qualidade são escassos e quando o custo de disposição do entulho é incluído na análise econômica.

Dessa forma, a Administração Pública ligada à gestão de resíduos poderia condecorar com benefícios e incentivar os construtores que adotarem a ideia de reciclagem dos resíduos de construção com certificados de qualidade ligadas à preocupação com o meio ambiente.

Assim, para promover um crescimento sustentável da construção, a reciclagem de seus resíduos é de grande incentivo para o processo. Assim, políticas públicas de incentivo poderiam ser criadas para estimular a prática para tal afinidade (ANGULO, 2000, p. 117).

3.3 MOTIVOS DE GERAÇÃO DE RCD

A composição dos resíduos de construção e demolição está diretamente associada às suas fontes geradoras. Segundo Lovato (2007, p. 22), os resíduos de construção e demolição são resíduos oriundos de novas construções, reparos, reformas e demolições de estruturas e estradas.

Conforme Angulo (2000, p. 10), “A composição dos RCD é gerada durante novas construções, reformas/manutenção e demolições.”.

Na figura 2, pode-se observar que nas atividades de construção geram-se resíduos constituídos por diferentes tipos de materiais.

Figura 2 – Resíduo de construção e demolição



(fonte: foto do autor)

Para Zordan (1997, p. 9), a carência de qualidade e a falta de gestão por melhor aproveitamento dos materiais de construção, na indústria da construção, minimizando as perdas, são fatores da grande geração dos resíduos. Para ele, esse desperdício não é relevante, primeiramente, em orçamento de obras, mas no final do processo, sendo notável no custo total da construção.

Zordan ainda enfatiza que a falta de gestão e controle na indústria da construção civil mascaram a realidade dos desperdícios de materiais que acabam sendo descartados como resíduos. Assim, ele salienta que para se ter um real quantitativo dos materiais que entram no canteiro de obras, dos materiais que são realmente utilizados e, principalmente, do quanto deveria ser utilizado, seria necessário um considerável número de profissionais atrelados a esse controle.

Conforme Cabral (2007, p. 50), os motivos da geração de resíduos na construção estão diretamente associados ao processo de construção deficiente adotado, como por exemplo:

- a) a falta de informações e detalhamentos em projetos executivos;
- b) a falta de capacitação da mão-de-obra empregada;
- c) a baixa qualidade de instrumentos e produtos utilizados em obra;
- d) a tecnologia de construção pouco rentável e desatualizada.

Ainda, o autor ressalta que demolições de edificações são outras potenciais fontes geradoras de resíduos, não só pelo fato do esgotamento da vida útil da mesma, mas sim em detrimento às atuais exigências das pessoas, resultando em grandes reformas e demolições.

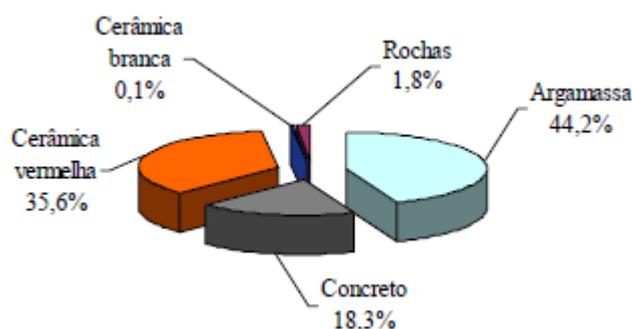
3.4 CARACTERÍSTICAS E A VARIABILIDADE DO RCD

Os diversos componentes e materiais que são demandados pela indústria da construção civil geram resíduos heterogêneos, com grande variabilidade entre seus constituintes em relação ao tipo e quantidade.

Lovato (2007, p. 26) diz que a composição dos resíduos de construção e demolição é muito variável, pelo fato de ser influenciada pelas condições do local de origem desses materiais, do tipo da construção que gera esses resíduos e do tamanho da amostra selecionada para avaliação. Dessa forma, pode-se encontrar materiais como solos, rochas naturais, concreto, argamassas (de assentamento e revestimento), cerâmica vermelha (tijolos e telhas), cerâmicas para revestimento, cimento-amianto, gesso, vidro, aço, chapas de aço galvanizado, madeira, plásticos, materiais betuminosos, tintas, papel de embalagem e restos de vegetais. A composição desses resíduos depende da fonte que o originou, do momento em que a amostra foi coletada e do tipo de obra em construção, ou em demolição.

A figura 3 demonstra o gráfico com o percentual de cada material constituinte dos resíduos de construção e demolição na cidade de Porto Alegre. Observa-se que os maiores percentuais na composição do entulho de construção são constituídos pela argamassa e a cerâmica vermelha.

Figura 3 – Composição dos resíduos de construção e demolição em Porto Alegre



(fonte: LOVATO, 2007, p. 80)

Na composição dos resíduos de construção e demolição, segundo Angulo (2000, p. 117), a solução para a parcela mineral não-orgânica seria a reciclagem desses resíduos, transformando-os em agregados. Mas as outras parcelas dos resíduos, as quais têm como constituintes madeiras, plásticos e gesso, são depositadas em aterros. Portanto, encontrar uma destinação melhor para estes resíduos seria uma solução mais adequada.

Uma solução para o grande descarte em aterros, que são realizadas de forma indevida e em locais impróprios, os quais geram impactos ambientais, seria a reutilização desses resíduos como matéria-prima a ser utilizada nos processos construtivos. Então, Angulo (2000, p. 117) ressalta que muitos procedimentos devem ser tomados para que a reciclagem dos resíduos tenha efetivação no mercado, como a gestão da qualidade dos materiais que são descartados, compreender como o resíduo é gerado e a sua flutuação de oferta para a reciclagem.

Assim, entende-se que a variabilidade dos RCD em sua composição é causada pelos tipos de fontes geradoras, ou seja, da tipologia das construções, pois todas têm suas particularidades quanto à utilização de diferentes tipos de materiais, os quais resultam em diferentes tipos de resíduos.

Há muitas dificuldades na reutilização de materiais que foram descartados na forma de resíduo de construção e demolição, principalmente a fração mineral, a qual tem grande potencial de uso como agregados reciclados. Mas, nessa parcela há muita heterogeneidade dos tipos e propriedades de materiais que a formam, entre eles os resíduos de concretos e de alvenaria, produzindo-se concretos com características distintas (CARRIJO; FIGUEIREDO, 2005, p. [1]).

Conforme Angulo (2000, p. 119):

Os métodos convencionais de caracterização física, empregados para agregados naturais, podem e devem ser aplicados em centrais para controle de qualidade desses agregados. Controles de propriedades como granulometria, absorção e massa específica são simples e fornecem padrões de comportamento desta matéria-prima, constituindo bons detectores da heterogeneidade ou variabilidade.

Medindo a taxa de absorção de água, Cabral (2007, p. 129-130) realizou ensaios com a parte graúda e miúda de agregados reciclados de diferentes tipos de RCD e o agregado natural. Ele constatou que os agregados reciclados de cerâmica vermelha obtiveram a maior taxa de absorção de água, 10,69% para o agregado miúdo e 15,62% para o agregado graúdo, seguidos

dos agregados reciclados de argamassa e de concreto, tendo por fim os agregados naturais com baixíssima taxa de absorção, tanto para sua parte graúda quanto miúda. A atenção do autor foi direcionada para os agregados reciclados de concreto, o qual foi possível verificar que a fração miúda obteve uma absorção de 7,55% contra os 5,65% da fração graúda do agregado, ou seja, agregados graúdos reciclados de concreto absorveram menos que os agregados miúdos reciclados de concreto.

Em relação à massa específica, Cabral (2007, p. 131-132) constatou em sua pesquisa que um material transformado parte em agregado graúdo e parte em agregado miúdo podem diferir quanto ao valor da massa específica de cada um. Segundo o autor, isso não deveria ocorrer pelo fato de se tratar da mesma matéria-prima utilizada. Assim, ele retrata que este acontecimento é justificado pelo processo de moagem do material, em que ao se diminuir sua escala granulométrica, a quantidade de poros contidos no material diminui, aumentando-se a massa específica, ou seja, a quantidade de material em massa por volume. Para o mesmo autor, a porosidade tem influência quanto à massa específica, pois os agregados reciclados possuem maior quantidade de poros e menores valores para a massa específica se comparados aos agregados naturais. Isso também é confirmado por Carrijo e Figueiredo (2005, p. [5]).

Conforme seu estudo, Cabral (2007, p. 132) concluiu que:

O agregado reciclado de cerâmica vermelha apresentou as menores massas específicas, sendo aparentemente o agregado com maior quantidade de vazios. Pela maior presença de agregados naturais em sua composição, o agregado graúdo reciclado de concreto apresentou uma massa específica superior aos demais agregados graúdos reciclados.

Cabral (2007, p. 84) afirma que a reciclagem do RCD é bem vista e também possível para se obter agregados reciclados, frente à composição variável dos tipos de materiais que o constituem. Algumas características físicas dos RCD fazem com que eles sejam menosprezados, como uma maior absorção de água, maior quantidade de poros e por serem menos resistentes que agregados naturais. Mas, os agregados reciclados de RCD possuem uma atratividade na sua utilização pelo seu custo de produção ser menor que os agregados naturais e pela questão ambiental, pelo fato de se dar uma destinação final a esses resíduos em aterros, bem como a diminuição da extração de agregados naturais. Assim, há uma grande possibilidade de sua utilização na construção civil.

Mas para garantir a sustentabilidade econômica dessa prática de negócio, é necessário entregar ao mercado um produto com qualidade determinada e controlada, o que não foi possível até então.

3.5 TENTATIVAS DE SEPARAÇÃO DE RCD

Pensando em um processo em escala industrial, Carrijo e Figueiredo (2005, p. [2]) afirmam que a utilização de jigues, equipamentos usados na Europa para o beneficiamento do carvão, poderiam separar os agregados reciclados em meio denso como a água. Conforme os autores: “Estes equipamentos geralmente apresentam alta eficiência de separação e baixo custo de manutenção, entretanto, necessitam de um elevado consumo de água na operação, gerando um alto custo com a recirculação e tratamento desta.”.

Em seu ensaio, Carrijo e Figueiredo (2005, p. [4]) misturaram aos agregados graúdos de RCD uma mistura contendo água e pó de ferro-silício, com o intuito de formar uma polpa para garantir a densidade desejada para a separação, por intermédio de um equipamento de concentração densitária denominado *Sink and Float*. Após a separação, eles eram lavados com água para a retirada dessa polpa para que pudessem ser utilizados no concreto e submetidos aos ensaios para a análise das características.

Submetendo os corpos de prova de concreto moldados com os materiais reciclados separados pelo método proposto, Carrijo e Figueiredo (2005, p. [8]) concluíram que:

Os resultados indicam a possibilidade da implantação de uma tecnologia de controle de qualidade, talvez mais confiável e consensual que os existentes, de caracterização e classificação dos agregados reciclados para a fabricação de concreto, possibilitando o melhor direcionamento destes para aplicações mais compatíveis à sua qualidade e evitando que materiais nobres sejam desperdiçados em aplicações menos exigentes.

Visto que normalmente a separação de materiais com a utilização de jigues é realizada por meio úmido, fez-se estudos quanto à possibilidade de separação a seco. Assim, Sampaio e Tavares (2005, p. 340) retratam a existência de jigues que realizam a separação de materiais com diferença nas massas específicas, utilizando o ar como meio fluido separador. Algo muito importante atualmente, por se tratar em economia de água que esses equipamentos proporcionam em não utilizar água.

Desta forma, o processo a seco foi escolhido para esta pesquisa. As definições do processo de separação e do equipamento estão descritos no item 6.6.

4 UTILIZAÇÃO DO RCD COMO AGREGADO RECICLADO NO CONCRETO

Os agregados são materiais determinantes nas características e propriedades de concretos produzidos. Essa influência é relacionada à sua taxa de ocupação de até 75% do volume total do concreto. Algo vantajoso pelo fato de serem economicamente mais baratos que o cimento, porém deve haver um balanceamento no seu uso, pois propriedades do concreto em estado fresco e endurecido podem ser afetadas (NEVILLE; BROOKS, 2013, p. [41]).

Ainda, o autor esclarece que mesmo conhecendo as propriedades físicas dos agregados, e constatando que uns são melhores e outros são ligeiramente piores, estes, ao serem utilizados, podem gerar concretos de boa qualidade. Mas deve-se analisar as características dos materiais como um todo, mediante ensaios, para a comprovação da possibilidade de utilização.

Em se tratando da textura do agregado utilizado em concretos, Mehta e Monteiro (1994, p. 53) observam que essa característica ajuda na ligação entre o agregado e a pasta do cimento, resultando numa resistência maior nas primeiras idades, principalmente a resistência à tração do concreto, se comparado a concretos utilizando agregado de mesma natureza, porém com superfície lisa. Mas essa vantagem imediata gera um aspecto negativo ao longo do tempo, pois, segundo os autores, para uma dada trabalhabilidade a resistência global pode ser diminuída em função da necessidade de maior quantidade de água de amassamento de concretos produzidos com agregados de textura rugosa.

A utilização do RCD como agregado no concreto é viável, contanto que suas características físicas sejam conhecidas, bem como a sua atuação em meio a outros materiais, como a pasta de cimento do concreto. Segundo Leite (2001, p. 67), uma desvantagem na utilização de agregados reciclados no concreto é a diminuição da trabalhabilidade no estado fresco da mistura, surgindo-se necessidade de uma maior quantidade de pasta de cimento, se comparado a um concreto com agregados naturais. Isso resulta num custo maior na sua produção, já que o cimento é o material mais caro na produção do concreto.

Conforme Cabral (2007, p. 104-108), a retração por secagem é estimulada pela maior quantidade de água contida na massa do concreto, que ao perder sua umidade para o meio

exterior mais seco, criam-se fissuras, podendo comprometer a sua durabilidade. Portanto, o autor conclui que o agregado reciclado demanda uma maior quantidade de pasta de cimento para a mesma trabalhabilidade de concretos com agregados naturais, pelo fato de possuir uma grande quantidade de poros, aumentando a probabilidade da ocorrência da retração por secagem do concreto.

Ainda, a textura superficial do agregado afeta as características do concreto. Isso é constatado por Mehta e Monteiro (1994, p. 266) ao afirmarem que:

Há evidências de que, pelo menos nas primeiras idades, a resistência do concreto, particularmente a resistência à flexão, pode ser afetada pela textura do agregado; uma textura mais áspera parece favorecer a formação de uma aderência mecânica forte entre a pasta de cimento e o agregado. Em idades mais avançadas, com o desenvolvimento de uma forte aderência química entre a pasta e o agregado, esse efeito pode não ser tão importante.

A utilização de agregados reciclados no concreto é plausível e interessante. Porém, há certa desconfiança no desempenho geral do agregado reciclado quanto ao seu uso no concreto. Em contrapartida, conhecendo os tipos de materiais que constituem o agregado reciclado, isto é, controlando a variabilidade dos constituintes, é possível confeccionar concretos com desempenho mecânico e durabilidade admissível (CABRAL, 2007, p. 84).

Porém, ao se utilizar agregados graúdos contendo grande porosidade, os quais absorvem consideráveis quantidades de água, podem haver problemas de durabilidade no concreto. Conforme Mehta e Monteiro (1994, p. 139), esses problemas são devidos aos danos na região transição entre o agregado e a pasta cimentícia, ocasionados pela expulsão de água absorvida pelo agregado.

Visando estudar o comportamento do concreto com RCD em relação ao desgaste por abrasão, Leite (2001, p. 77) afirma que o agregado reciclado possui menor resistência à abrasão se comparado aos agregados naturais, havendo um maior desgaste nos ensaios. Assim, para a autora, ao se utilizar esse tipo de agregado no concreto, com o intuito de se obter melhores resultados de ensaios de desgaste por abrasão, deve-se diminuir a relação água/cimento a ponto de se obter concretos mais resistentes. Cabral (2007, p. 103) também afirma que há diminuição da resistência à abrasão do concreto confeccionado com agregado reciclado.

Porém, há algumas exceções que contrariam essa afirmação. Zordan (1997, p. 109) coletou dados dos ensaios de algumas amostras de concretos com agregados reciclados de construção, bem como o concreto produzido com agregado convencional usando-o como referência de análise dos ensaios de desgaste por abrasão. Pode-se perceber que, segundo o autor, o desgaste dos concretos produzidos com o agregado reciclado de construção submetidos ao ensaio de desgaste por abrasão eram, em média, 26,5% menor que o desgaste do concreto com agregados convencionais.

Assim, devido ao tipo de agregados reciclados utilizados por esse autor, ou por algum motivo de falha na confecção do concreto resultou na diminuição da capacidade de resistência à abrasão dos concretos produzidos com o agregado natural.

Analisando os fatores que afetam a resistência à compressão do concreto, Mehta e Monteiro (1994, p. 47) concluíram que:

Do ponto de vista da resistência, a relação água/cimento-porosidade é indiscutivelmente o fator mais importante porque, independentemente de outros fatores, ela afeta a porosidade tanto da matriz pasta de cimento como da zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo.

Para Leite (2001, p. 67), uma vantagem na utilização do material reciclado como agregado no concreto é a sua grande aderência com a argamassa, devido a sua maior área específica. Isso é constatado pelas características físicas do material, como a maior rugosidade de suas faces e de sua maior angulosidade. Também, outra possível vantagem do seu uso são as melhorias no desempenho final do concreto, pelo fato de sua maior absorção da pasta de cimento do concreto, proporcionando o fechamento dos poros pelos cristais de hidratação, permitindo-se uma melhoria na união com o concreto, formando um bloco heterogêneo mais consolidado.

Como o concreto é constituído de uma mistura heterogênea, seus componentes apresentam resistências diferentes entre si, podendo ser dependente daquele que tiver a menor resistência. Isso é constatado na afirmação de Cabral (2007, p. 93), o qual ressalta que:

Quando a matriz do concreto produzido com agregados reciclados for menos resistente que o próprio agregado reciclado, este último não exercerá grande influência na resistência mecânica do concreto, uma vez que a matriz será o elo mais fraco do mesmo, portanto muito possivelmente o concreto irá romper na matriz.

Entretanto, quando a matriz do concreto for mais resistente que o agregado reciclado, este último passará a ter substancial influência na resistência do concreto, uma vez que possivelmente o concreto romperá no agregado.

5 CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS DE MATERIAIS CERÂMICOS E A SUA INFLUÊNCIA NA UTILIZAÇÃO COMO AGREGADO RECICLADO NO CONCRETO

Nesse capítulo é abordada a influência das características de materiais cerâmicos como agregados no concreto, sendo uma das propostas para a realização deste trabalho.

Como já discutido, grande parcela dos resíduos de construção e demolição é composta de materiais cerâmicos de diversos tipos. Bicca (2000, p. 24) explica que em locais onde o agregado natural é abundante e economicamente viável para a logística de extração, como também para o seu uso, a utilização do rejeito cerâmico na confecção de concretos é nula. Assim, segundo o autor, os rejeitos de cerâmica vermelha como tijolos, blocos, placas e telhas, provenientes das indústrias de fabricação, são despejados em aterros.

O grande motivo da produção de material cerâmico é a abundância de sua matéria natural e de reutilização de outros materiais para sua confecção (GRIGOLETTI, 2001, p. 52).

Uma característica física notável do material cerâmico é a sua porosidade. Em seu estudo, Bicca (2000, p. 29) salienta que:

É sabido que os agregados obtidos a partir de material cerâmico britado são também muito absorventes, dada sua grande porosidade e, quanto maior a porosidade do material que deu origem ao agregado, maior será sua capacidade de absorção.

Algumas pesquisas foram realizadas com a saturação do agregado graúdo antes de uma possível utilização no concreto. Desta forma, utiliza-se o agregado seco e faz-se uma correção na quantidade total de água a ser adicionada, acrescentando juntamente aquela que é absorvida pelo agregado. A plasticidade, ou seja, a trabalhabilidade do concreto aumenta momentaneamente pelo fato de haver uma maior quantidade de água presente, mas ela diminui ao longo do tempo, pois é absorvida pelo agregado não saturado até então (BICCA, 2000, p. 30).

Também, a granulometria do agregado não saturado tem um grande papel na absorção de água. Segundo Bicca (2000, p. 30), “[...] as frações mais finas requerem em particular,

maiores quantidades de água para uma dada trabalhabilidade, devido sua maior área específica.”.

Conforme alguns estudos, os materiais de cerâmica vermelha têm uma resistência à compressão menor que os agregados naturais de origem granítica ou basáltica. Bicca (2000, p. 29) ressalta que a utilização destes materiais como agregados graúdos no concreto, mediante a britagem para a obtenção de regularidade na granulometria, gera concretos com características de resistência à compressão diretamente relacionadas com a resistência do material cerâmico. Assim, segundo o autor, o rompimento do concreto se dá no agregado, e não na matriz cimentícia, a qual é mais resistente.

Conforme o mesmo autor, o surgimento de tensões internas se dá pela falta de hidratação do cimento, alterando as características do concreto, como a sua resistência. Assim, ao se utilizar o material cerâmico como agregado graúdo no concreto, deve-se conhecer a sua taxa de absorção de água. Então, para que haja uma compensação de hidratação faz-se uma nova dosagem da água de amassamento.

A absorção de água do agregado cerâmico é similar a vários tipos de materiais usados no concreto, como também nos não utilizados, a qual se dá pela área de contato. Granulometrias menores possuem também a influência volumétrica de absorção, como é o caso dos materiais miúdos, algo que o volume de materiais com granulometrias maiores não interagem.

O tipo de superfície do agregado pode influenciar na sua aderência com a matriz cimentícia do concreto, podendo criar pontos internos de falha, os quais propiciam uma zona de ruptura preferencial. Também, a quantidade utilizada de material cerâmico como agregado no concreto pode interferir no seu comportamento estrutural, modificando as suas características. Em seu estudo, Zordan (1997, p. 91) constatou que, ao se utilizar materiais cerâmicos polidos juntamente com outros materiais que tem como origem o entulho de construção como agregados no concreto, a superfície de ruptura se formou na zona de transição entre o agregado liso e a matriz do concreto. Conforme o autor, isso foi constatado no rompimento de corpos de prova moldados, nos quais a superfície de ruptura era acompanhada pela superfície lisa do material cerâmico.

Em se tratando de agregados de materiais cerâmicos reciclados, Leite (2001, p. 74) afirma que a absorção de água é diretamente proporcional à sua porosidade. Isso é claro, pois quanto

maior a quantidade superficial de poros, maior é a possibilidade de o material captar a água, tendo em vista a condição no estado não saturado do material.

Zordan (1997, p. 101) testou diferentes amostras de concretos constituídos com diferentes agregados cada um, mediante o traço utilizado, a consistência gerada e a relação água/cimento dosada. Em tal experimento, ele constatou que a relação a/c foi maior para as amostras contendo o entulho de construção em relação ao concreto de referência constituído por agregados convencionais. Isso se deve, segundo o autor, à alta absorção de água dos agregados, principalmente pelos materiais cerâmicos, contendo grandes quantidades de poros.

Visto que o material cerâmico tem alta taxa de absorção de água, a sua utilização como agregado graúdo faz com que sua hidratação seja realizada pela pasta úmida do concreto produzido, resultado na migração interna de água. Com a prévia saturação deste material, a sua utilização como agregado é viável sem que afete a hidratação do cimento e a trabalhabilidade do concreto.

A utilização de agregados miúdos cerâmicos pode aumentar a resistência à compressão do concreto, pelo fato de se comportarem com características semelhantes aos materiais pozolânicos, o qual é evidenciado em experimentos. Isso é salientado por Leite (2001, p. 219-220), o qual ressalta que:

[...] os materiais como as rochas naturais ou os concretos, que têm maior resistência, fragmentem-se menos em partículas menores, diferente do que ocorre com as argamassas e os materiais cerâmicos porosos, que possuem maior tendência a se fragmentar. Isto posto, o agregado miúdo reciclado teria maior probabilidade de possuir ainda mais partículas com potencial pozolânico.

6 PESQUISA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, é abordado toda a parte experimental do trabalho, desde a seleção dos materiais cerâmicos, até o rompimento de corpos de prova de concreto, utilizando os materiais cerâmicos reciclados como agregados graúdos.

6.1 ASPECTOS GERAIS

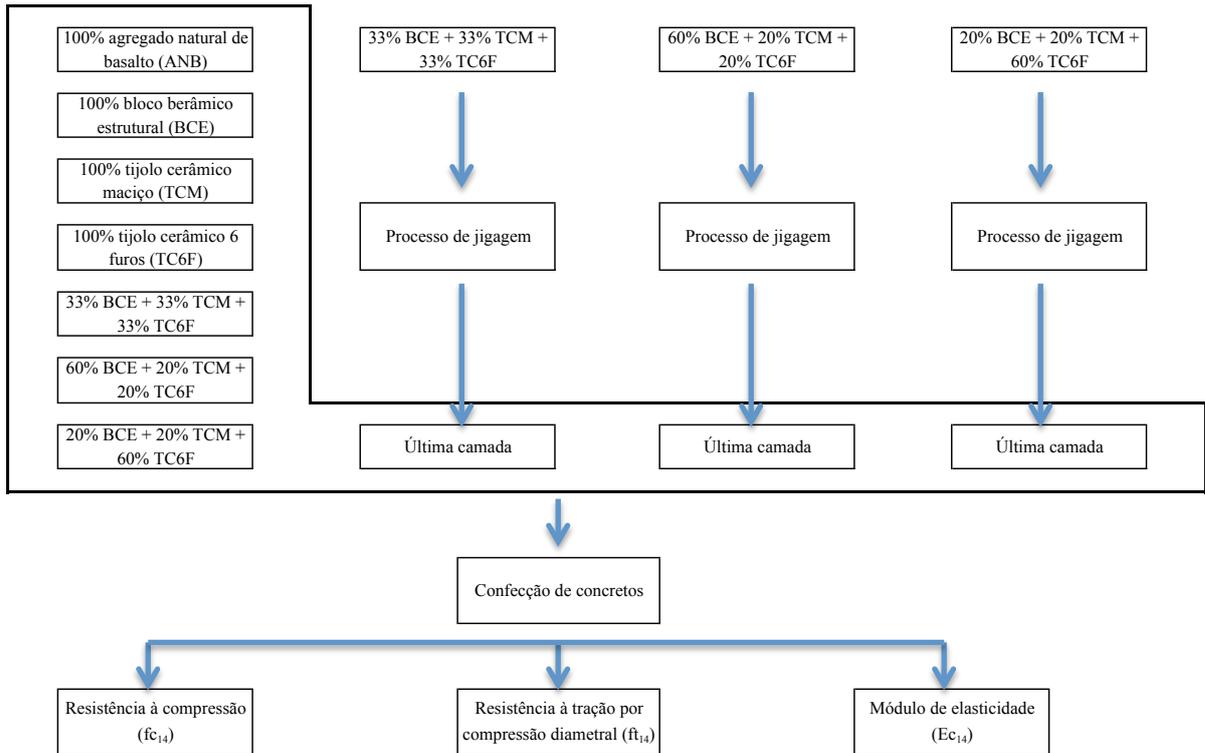
Esta pesquisa tem por finalidade testar um equipamento da área da mineração, denominado jigue pneumático, o qual realiza a separação a seco de materiais mediante a diferença de densidade entre eles, com o intuito de se verificar a sua eficácia quanto à separação de resíduos de materiais cerâmicos reciclados. Os resultados da sua eficácia foram avaliados nos resultados obtidos nos ensaios mecânicos, mediante a utilização desses materiais como agregados graúdos no concreto na condição saturada com superfície seca, através da moldagem de corpos de prova submetidos aos ensaios de:

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

Todas as etapas do trabalho foram planejadas com o intuito de se obter resultados que possibilitassem avaliar a eficiência do jigue pneumático. As medidas de controle e ensaios seguiram os parâmetros das normas brasileiras.

Para um melhor entendimento desse trabalho, o fluxograma da figura 4 demonstra as os procedimentos com os materiais já britados, pesados e separados, bem como as misturas utilizadas no jigue pneumático para os ensaios de separação.

Figura 4 – Fluxograma experimental



(fonte: elaborado pelo autor)

6.2 MATERIAIS CERÂMICOS SELECIONADOS

Foram escolhidos 3 tipos de material cerâmico mais utilizados na construção civil, cujas massas específicas diferem entre si. Assim, utilizaram-se:

- a) bloco cerâmico estrutural (BCE);
- b) tijolo cerâmico maciço (TCM);
- c) tijolo cerâmico 6 furos (TC6F).

As figuras 5 a 7 mostram os tipos de material cerâmico utilizados para este trabalho.

Figura 5 – Bloco cerâmico estrutural



(fonte: foto do autor)

Figura 6 – Tijolo cerâmico maciço



(fonte: foto do autor)

Figura 7 – Tijolo cerâmico 6 furos



(fonte: foto do autor)

Os materiais foram doados pela empresa R.Correa Engenharia Ltda, proprietária da obra Urbano Menino Deus, cuja estrutura executada em blocos estruturais. Os materiais foram ensacados e armazenados em local apropriado para a fácil retirada do canteiro de obras.

Com o intuito de adequar-se à realidade dos canteiros de obras, a estocagem dos materiais selecionados deu-se com o contato direto com as variações climáticas. Todos os materiais foram submetidos à variação de temperatura e condições do tempo, no período de junho de 2014 à agosto de 2014, ou seja, sob as influências do inverno da cidade de Porto Alegre.

6.3 QUANTIDADE NECESSÁRIA DE MATERIAL CERÂMICO

A determinação da quantidade necessária de cada material cerâmico foi baseada nas proporções utilizadas com diferentes porcentagens entre os materiais. As mesmas porcentagens utilizadas no jigüe foram duplicadas e utilizadas como referencial para a comparação, como também as quantidades de cada material cerâmico 100% separado. Para cada composição foram necessários 15 kg de material cerâmico britado, como agregado graúdo, para a confecção dos corpos de prova. A tabela 1 totaliza as quantidades necessárias de cada material para a confecção dos corpos de prova de concreto utilizados como dados referenciais para o experimento.

Tabela 1 – Quantidade de materiais cerâmicos utilizados como agregados graúdos para a confecção de corpos de prova referenciais

Composições dos agregados	Quantidade de BCE	Quantidade de TCM	Quantidade de TC6F
100% BCE	15 kg	-	-
100% TCM	-	15 kg	-
100% TC6F	-	-	15 kg
33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F	5 kg	5 kg	5 kg
60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F	9 kg	3 kg	3 kg
20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F	3 kg	3 kg	9 kg

(fonte: elaborado pelo autor)

Para os ensaios no jigüe pneumático, as quantidades de cada material foram calculadas com base na utilização de 15 kg de BCE em cada mistura. Isso se deve pelo fato de ser o material mais denso e partiu-se da intenção de se retirar a última camada da câmara de estratificação, correspondendo ao material mais denso. Cada camada comportava aproximadamente 12 kg de material cerâmico, sendo a quantidade de 3 kg de material obtida da camada intermediária para a obtenção dos 15 kg de agregados. A tabela 2 demonstra a quantidade de cada material cerâmico para a realização dos ensaios de separação por densidade no jigüe.

Tabela 2 – Quantidade de materiais cerâmicos utilizados como agregados graúdos para a realização dos ensaios de separação no jig

Composições dos agregados	Quantidade de BCE	Quantidade de TCM	Quantidade de TC6F
33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F	15 kg	15 kg	15 kg
60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F	15 kg	5 kg	5 kg
20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F	15 kg	15 kg	45 kg

(fonte: elaborado pelo autor)

Sabendo que existe perda de material na etapa de britagem e peneiramento, a quantidade total necessária para a realização dos ensaios foi de 250kg de cada tipo de material cerâmico, totalizando 750kg de material cerâmico.

6.4 BRITAGEM E CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Os materiais foram transportados até o local de britagem, no Laboratório de Processamento Mineral (Laprom), localizado no Campus do Vale, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O material foi transformado em agregado graúdo com a utilização de um britador de mandíbula, ilustrado na figura 8, o qual é constituído por uma placa fixa e outra placa móvel. Assim, o material foi triturado pelo choque das placas, as quais projetam um formato em V.

Figura 8 – Britador de mandíbula



(fonte: foto do autor)

Esse formato é caracterizado por uma grande abertura superior para a introdução dos materiais a serem britados, e por uma pequena abertura inferior, a qual pode ser ajustada para determinada granulometria de diâmetro máximo. Assim, a abertura do britador foi regulada para se obter agregados com diâmetro máximo de 19mm. Isso se deve ao fato de que a maior parte dos agregados naturais para concretos convencionais utilizados em canteiro de obras, têm essa dimensão máxima para o agregado, obedecendo assim ao intuito de se realizar um experimento com caráter prático.

Em seguida, os materiais passaram pelo processo de classificação granulométrica, ou seja, todo material britado era peneirado através de uma peneira de vibração pneumática, constituída por varias peneiras, demonstrada na figura 9. As aberturas das peneiras utilizadas, em milímetros, foram:

- a) peneira 25mm;
- b) peneira 19mm;
- c) peneira 12,5mm;
- d) peneira 6mm;
- e) peneira 4,75mm.

Figura 9 – Peneira de vibração pneumática



(fonte: foto do autor)

A figura 10 demonstra o peneiramento do bloco cerâmico estrutural britado.

Figura 10 – Peneiramento do bloco cerâmico estrutural



(fonte: foto do autor)

Utilizou-se o material passante na peneira de 19mm e retido na peneira de 4,75mm, por se tratar da granulometria dos agregados grãos utilizados normalmente em concretos estruturais de concreteiras fornecedoras. Esse material era separado em sacos e armazenado para a próxima etapa, da utilização do equipamento de separação por densidade. Todo material retido na peneira de 19mm passava novamente pelo processo de britagem visando aproveitar ao máximo o material.

A peneira de 25mm de abertura foi utilizada apenas com o intuito de diminuir a quantidade de material retido na peneira de 19mm. Isso aconteceu com o peneiramento do tijolo cerâmico 6 furos e o bloco cerâmico estrutural pois, dependendo da forma com que o material era despejado no britador, a mandíbula não conseguia britar, deixando passar uma grande quantidade de material pela sua maior dimensão. Assim, boa parte do material britado era de forma lamelar. Por fim, todo material passante na peneira de abertura 4,75mm era descartado, por não se tratar de agregado grão. Nesse processo, percebeu-se que a perda de material foi grande, em torno de 50%, dado ao fato da limitação das faixas granulométricas selecionadas.

Todo material selecionado para o uso na pesquisa era ensacado e identificado quanto ao tipo de material cerâmico, com uma fita crepe adesiva e caneta permanente, conforme a figura 11.

Figura 11 – Material cerâmico ensacado pelo seu tipo



(fonte: foto do autor)

Na comparação da britagem e peneiramento desses materiais, o tijolo cerâmico maciço foi o material que menos necessitou do processo britagem/peneiramento/britagem/peneiramento, pois os agregados gerados através dele eram de forma mais arredondada, muito similar aos agregados naturais de basalto. Porém, foi o material cerâmico que mais gerou finos, devido a sua maior friabilidade em relação às demais cerâmicas selecionadas. Quanto ao bloco cerâmico estrutural e ao tijolo cerâmico 6 furos, deram origem a agregados com forma mais achatadas e lamelares.

6.5 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CERÂMICOS UTILIZADOS

Os resíduos de construção e demolição geralmente são variáveis na sua composição, sendo constituídos por materiais com propriedades diferentes entre si. Também, os resíduos cerâmicos, oriundos dos canteiros de obras e demolições de estruturas, são constituídos por diferentes tipos de materiais. Assim, para sua utilização como agregado no concreto, identificou-se pelo menos três propriedades dos materiais cerâmicos utilizados, as quais são:

- a) massa unitária;
- b) absorção de umidade;
- c) massa específica.

6.5.1 Massa unitária

Essa propriedade determina o grau de compactação do material em um determinado volume. Para a determinação da massa unitária, seguiu-se os padrões da NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006). Os resultados são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Massas unitárias dos materiais cerâmicos

Material	Massa do material no recipiente (kg)	Massa unitária (kg/m ³)
BCE	9,26	926
TCM	9,33	933
TC6F	9,46	946

(fonte: elaborado pelo autor)

6.5.2 Massa específica

Foi realizado o ensaio para a determinação da massa específica aparente e no estado saturado dos agregados cerâmicos utilizados, atendendo à NBR NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). Assim, foram determinadas as massas dos materiais, nas diferentes situações, conforme a tabela 4.

Tabela 4 – Massas dos materiais cerâmicos pesados

Material	Massa ambiente (g)	Massa saturado (g)	Massa seca em estufa (g)
BCE	3330	3593	3074
TCM	3260	3745	2874
TC6F	3180	3570	2897

(fonte: elaborado pelo autor)

Os materiais foram devidamente pesados nas condições exigidas pela norma e os resultados das massas específicas podem ser vistos na tabela 5.

Tabela 5 – Massas específicas dos materiais cerâmicos

Material	Massa específica agreg. saturado (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)
BCE	2,12	1,81
TCM	1,92	1,47
TC6F	2,09	1,71

(fonte: elaborado pelo autor)

Assim, conforme o valor da massa específica aparente, observa-se que o bloco cerâmico estrutural foi o material mais denso, seguido do tijolo cerâmico 6 furos e do tijolo cerâmico maciço, respectivamente. O valor da massa específica com agregado saturado foi obtido para constatar a densidade dos materiais em meio saturado, no caso a sua utilização no concreto.

6.5.3 Absorção

Com o intuito de identificar a absorção dos agregados, fez-se o ensaio de absorção e o cálculo da porcentagem de absorção dos agregados cerâmicos conforme a NBR NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009).

Foram calculados a umidade de equilíbrio ao ambiente, ou seja, a absorção ao ambiente de cada material, bem como a absorção total dos materiais, ou seja, da condição saturada à condição seca em estufa. A tabela 6 demonstra os valores das porcentagens de absorção nas condições ao ambiente e total, os quais foram calculados com os dados fornecidos da tabela 4.

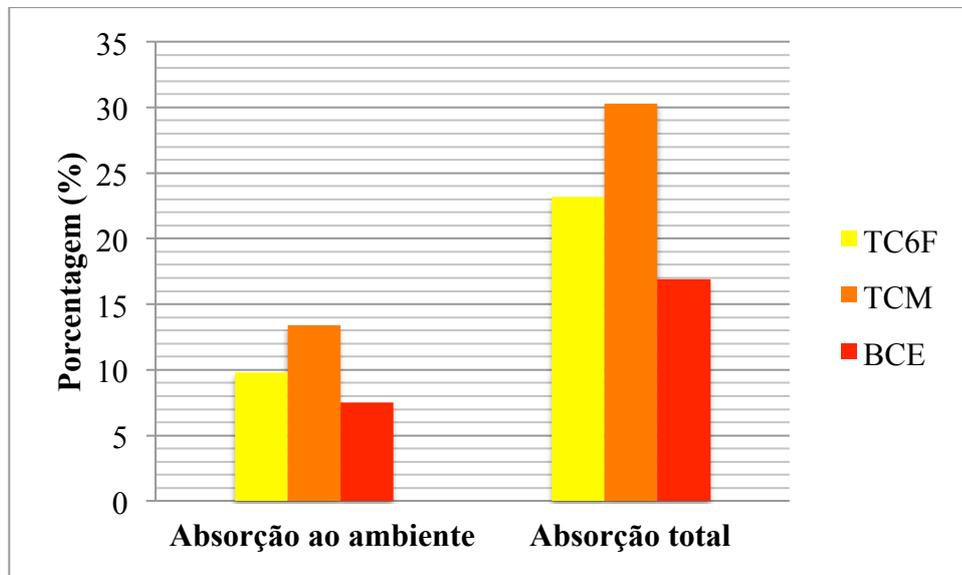
Tabela 6 – Porcentagens de absorção dos materiais cerâmicos

Material	Absorção ao ambiente (%)	Absorção total (%)
BCE	7,5	16,9
TCM	13,4	30,3
TC6F	9,8	23,2

(fonte: elaborado pelo autor)

Partindo desses valores, tem-se uma representação em gráficos para melhor visualização e entendimento dos valores, conforme o gráfico da figura 12.

Figura 12 – Taxas de absorção de umidade



(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando os resultados, constatou-se que o tijolo cerâmico maciço foi o material com maior porcentagem de absorção de umidade, seguidos pelo tijolo cerâmico 6 furos e do bloco cerâmico estrutural como material de menor absorção.

6.6 PROCESSAMENTO E SEPARAÇÃO DOS AGREGADOS CERÂMICOS

Com o intuito de diminuir a variabilidade dos materiais cerâmicos, utilizou-se um equipamento que separa materiais com diferentes densidades. Esse equipamento de escala-piloto, localizado no Laprom, é um jig pneumático usado para a separação por densidade de materiais grosseiros em sua granulometria. Esse equipamento, ao contrário de outros já existentes, os quais utilizam água como fluido separador, realiza a separação por meio de concentração gravimétrica não-úmida, ou seja, por meio seco.

O beneficiamento a seco de materiais é algo muito importante em regiões áridas, nas quais há escassez de água. Esse procedimento a seco pode ser mais econômico que por meio úmido, pois os custos com o consumo de água seriam elevados. Também, a água utilizada no

beneficiamento por meio úmido pode deteriorar certos materiais (SAMPAIO; TAVARES, 2005, p. 340).

Ainda, segundo os autores, o processo de beneficiamento seco têm vantagens sobre o processo úmido, tais como:

- a) a não-geração de efluentes que podem ser descartados na natureza;
- b) a capacidade de separação é maior;
- c) o tempo de sedimentação dos materiais é mais rápida;
- d) os equipamentos têm dimensões menores.

Mas, há algumas desvantagens desse tipo de beneficiamento. Segundo Sampaio e Tavares (2005, p. 341), uma das desvantagens é a baixa eficiência do processo ao se utilizar materiais com baixas granulometrias. Os autores citam como exemplo o carvão, que em granulometrias menores que 0,6 mm, a separação é impraticável. Assim, fica evidente que esse processo a seco depende, não só da diferença de densidade entre os materiais a serem separados, como também do tamanho das partículas, pois granulometrias mais finas comprometem a eficiência do equipamento.

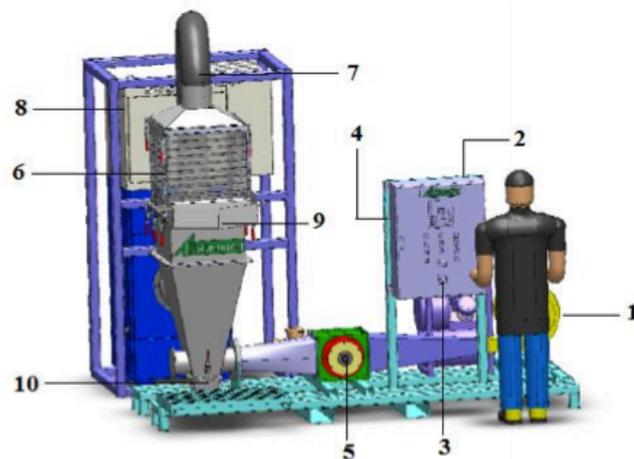
Ainda, Sampaio e Tavares (2005, p. 345) explicam que o processo de separação em meio seco resulta na estratificação dos materiais:

A separação de partículas no jigue pneumático é resultado do fluxo pulsante de ar, que produz a estratificação das partículas alimentadas no aparelho. Enquanto a camada de material denso formado no fundo do leito se movimenta na direção das aberturas, a camada superior, que contém as partículas leves, continua a se mover sobre a camada mais lenta de partículas densas, sendo removida no extremo oposto do aparelho. A poeira gerada pela pulsação de ar é succionada usando um captor de poeira, sendo recuperada por meio de ciclones pneumáticos e filtros de manga.

A seguir, figura 13 demonstra em uma representação esquemática as partes que compõem o jigue pneumático utilizado.

Figura 13 – Representação esquemática do jigue pneumático

Ref	Item	Ref	Item
1	Ventilador centrífugo	6	Câmara de estratificação
2	Quadro de comando	7	Bocal de exaustão
3	Chave geral	8	Filtro de mangas
4	Fieldlogger	9	Coletor da câmara
5	Válvula rotativa	10	Coletor de fundo

(fonte: trabalho não publicado¹)

O que é perceptível em alguns ensaios, em que a influência do tamanho do agregado como também a forma geométrica do agregado, afetam o desempenho do equipamento.

Também, a figura 14 demonstra a câmara de estratificação para a deposição dos materiais, e o quadro de comando para controle de funcionamento do jigue pneumático.

Figura 14 – Jigue pneumático

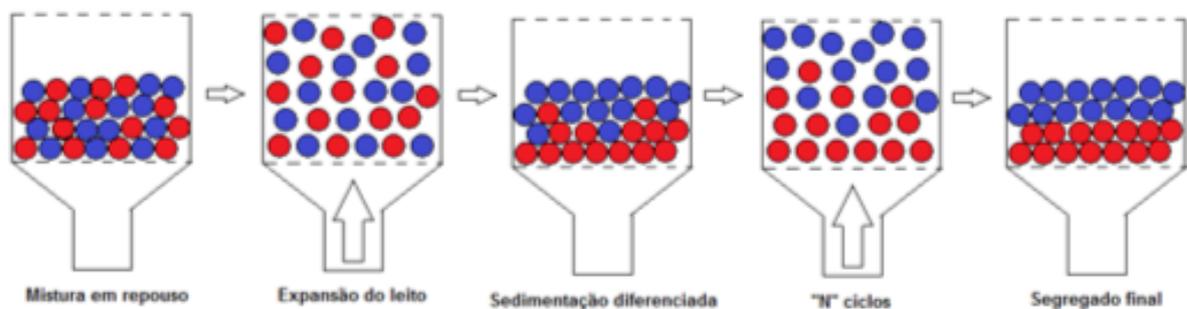


(fonte: foto do autor)

¹ Imagem obtida da página 3 do manual *AllAir S-500 – Modo de Operação*, produzido por Weslei Monteiro Ambrós, em maio de 2014, devido aos seus estudos com o jigue pneumático situado no LAPROM – UFRGS.

O processo de separação dos materiais, que é realizada pelo equipamento, é denominado de jigagem. Ela consiste na pulsação constante de um meio fluido, no caso o ar, o qual promove a expansão e compactação vertical de um leito de partículas. Segundo o autor, o resultado desse processo é a estratificação do leito, ou seja, a formação de camadas distintas entre os materiais, formando sub-leitos com densidades decrescentes, desde a base representada pelos materiais mais densos, até o topo que é representada pelos materiais menos densos (TRABALHO NÃO PUBLICADO²). Esse processo é verificado na figura 15.

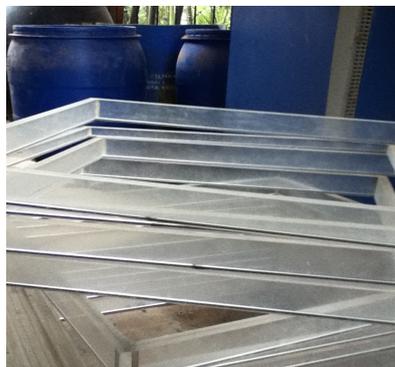
Figura 15 – Funcionamento do jigue pneumático



(fonte: trabalho não publicado³)

A estratificação dos materiais se dá em compartimentos acrílicos introduzidos na câmara de estratificação, os quais possuem as dimensões 532 x 532 mm, com a altura de 50mm para os quadros maiores e 25mm para os quadros menores, conforme a figura 16.

Figura 16 – Compartimentos de estratificação



(fonte: foto do autor)

² Informação obtida da página 5 do manual *AllAir S-500 – Modo de Operação*, produzido por Weslei Monteiro Ambrós, em maio de 2014, devido aos seus estudos com o jigue pneumático situado no LAPROM – UFRGS.

³ Imagem obtida da página 5 do manual *AllAir S-500 – Modo de Operação*, produzido por Weslei Monteiro Ambrós, em maio de 2014, devido aos seus estudos com o jigue pneumático situado no LAPROM – UFRGS.

Para a utilização do jigge, as amostras dos materiais devem estar secas para que aglomerados dos materiais não se formem durante o ensaio de jigagem, pois isso afetaria a eficiência do equipamento, comprometendo os resultados do ensaio. Também, recomenda-se a determinação de volumes semelhantes entre os materiais a serem utilizados na jigagem, podendo ser feito através do preenchimento completo com apenas um material em cada compartimento acrílico. Quanto ao tamanho das partículas dos materiais, elas devem ser de faixas granulométricas definidas e mais próxima possível, pois a grande variação dos tamanhos das partículas em uma amostra afeta a separação. Assim, as dimensões dos materiais não devem ser inferiores a 1 mm, bem como não devem ser maiores que 40 mm (TRABALHO NÃO PUBLICADO⁴).

Para fins do estudo deste trabalho, como foi citado no item 6.4, as faixas granulométricas utilizadas estão conformes às faixas granulométricas usuais dos agregados naturais em concretos convencionais. Assim, tanto os materiais passantes na peneira de abertura de 19 mm até os materiais retidos na peneira de abertura de 4,75 mm foram misturados entre si para cada tipo de material cerâmico. Com isso, pode-se notar que as faixas granulométricas utilizadas se enquadram nos requisitos de dimensões mínimas e máximas das partículas, citados anteriormente em material não publicado, como também por Sampaio e Tavares (2005, p. 341). Todos os materiais cerâmicos utilizados estavam secos ao ambiente, ou seja, com superfície seca e não saturados.

Após a etapa de britagem e peneiramento, deu-se início ao processo de jigagem dos materiais. Para que isso fosse testado, foram utilizados apenas as 3 composições percentuais diferentes entre si, por não haver tempo disponível para a realização de mais ensaios e pela quantidade de materiais cerâmicos limitada, mas principalmente pela quantidade de corpos de prova de concretos que seriam moldados na etapa seguinte, para a realização dos ensaios mecânicos. Assim, as porções foram definidas de forma a caracterizar a influência da quantidade de cada material na porção estudada. São elas:

- a) 33% bloco cerâmico estrutural + 33% tijolo cerâmico maciço + 33% tijolo maciço 6 furos;
- b) 60% bloco cerâmico estrutural + 20% tijolo cerâmico maciço + 20% tijolo maciço 6 furos;

⁴ Informação obtida da página 6 e 7 do manual *AllAir S-500* – Modo de Operação, produzido por Wesley Monteiro Ambrós, em maio de 2014, devido aos seus estudos com o jigge pneumático situado no LAPROM – UFRGS.

- c) 20% bloco cerâmico estrutural + 20% tijolo cerâmico maciço + 20% tijolo maciço 6 furos.

As misturas acima são em relação à quantidade de material utilizada no equipamento, o qual possui capacidade máxima total de 60kg para haver eficiência na separação. Quanto à quantidade total de material necessária para cada ensaio no jig, partiu-se da intenção de se utilizar os 15kg de materiais mais densos, ou seja, da camada inferior, para serem utilizados como agregados graúdos nos concretos a serem moldados posteriormente. Isso foi estabelecido pelo fato de se utilizar os materiais mais densos, para se obter os agregados mais resistentes, sabendo que os agregados cerâmicos têm a resistência à compressão menor que a resistência da matriz cimentícia do concreto, conforme Bicca (2000, p. 29). A tabela 7 demonstra as quantidades necessárias para cada teste.

Tabela 7 – Quantidade de materiais cerâmicos nos ensaios de separação

Composições dos agregados	Quantidade extraída mais densa	Quantidade total para a jigagem
33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F	15 kg	45 kg
60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F	15 kg	25 kg
20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F	15 kg	75 kg

(fonte: elaborado pelo autor)

A quantidade total de cada ensaio foi calculada em função da quantidade de material mais denso utilizado, ou seja, o BCE. Já que a quantidade de material retirada na última camada é de aproximadamente 15 kg, a quantidade de BCE utilizada nos ensaios foi de 15 kg, sendo este o valor de entrada para o cálculo da quantidade dos outros materiais cerâmicos. Visto que o equipamento possui uma capacidade máxima de 60 kg, o terceiro ensaio foi dividido em duas partes iguais, ou seja, duas jigagens com 37,5 kg cada. Assim, as amostras a serem retiradas em cada jigagem do terceiro ensaio foi de 7,5 kg, utilizando-se os compartimentos acrílicos menores.

Para a realização dos ensaios com o equipamento, alguns dados foram ser introduzidos no quadro de comando, os quais foram estipulados mediante alguns ensaios já realizados. São eles:

- a) frequência de 160 rpm, a qual é a taxa de pulsação de ar na câmara de estratificação;
- b) taxa de expansão do leito em 80%, que se dá pela potência do fluxo de ar;
- c) tempo de ensaio de 120 segundos.

6.6.1 Ensaio 33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F

Esse ensaio foi realizado com proporções percentuais iguais, ou seja, cada material representando a terça parte, em peso. Este serviu para observar a eficiência com que o jigue pneumático teve ao separar partes iguais de materiais com diferentes densidades. A figura 17 ilustra a estratificação das camadas com os diferentes tipos de materiais cerâmicos, um em cada camada, antes da realização do ensaio.

Figura 17 – Materiais colocados nos compartimentos antes do ensaio de separação



(fonte: foto do autor)

A figura 18 ilustra o ensaio de separação em andamento.

Figura 18 – Ensaio de separação em andamento



(fonte: foto do autor)

6.6.2 Ensaio 60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F

Nesse ensaio, aumentou-se a quantidade da cerâmica mais densa, utilizando-se a porcentagem de 60% de bloco cerâmico estrutural, 20% de tijolo cerâmico maciço e 20% de tijolo cerâmico 6 furos. Isso serviu para analisar o quanto o jigue pneumático é capaz de separar os materiais com o desequilíbrio da proporção.

6.6.3 Ensaio 20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F

Por fim, nesse ensaio priorizou-se a utilização de uma cerâmica menos densa que o bloco cerâmico estrutural, utilizando-se o percentual de 20% de bloco cerâmico estrutural, 20% de tijolo cerâmico maciço e 60% de tijolo cerâmico 6 furos.

6.6.4 Efeito de borda

Em todos os ensaios realizados com as diferentes proporções entre os materiais, observou-se que na camada inferior a qual foi coletada para estudos como agregados no concreto, as partículas cerâmicas mais grosseiras eram acumuladas no interior da camada. As partículas

mais finas localizaram-se próximas das bordas do compartimento acrílico, conforme a figura 19.

Figura 19 – Camada inferior a ser coletada após a utilização do jigge pneumático



(fonte: foto do autor)

Assim, pode-se visualmente perceber que o equipamento promovia uma separação por granulometria dos materiais. Os materiais com granulometria lamelar eram facilmente separados em relação aos materiais com granulometria arredondada. Tendo em vista que foram utilizados materiais cerâmicos de granulometria maiores que 4,75mm e menores que 19mm, uma parcela dos materiais mais finos era acumulada nos cantos das bandeja, criando-se um efeito de borda.

Esse efeito deve-se ao fato que a aspersão de ar sob pressão não era uniforme em toda superfície inferior de contato com o material, gerando regiões com pouca pressão de sustentação pelo atrito com as bordas da periferia dos compartimentos, fazendo com que os agregados mais finos fossem sedimentados nos cantos. Isso é perceptível na figura 20.

Figura 20 – Efeito de borda



(fonte: foto do autor)

6.6.5 Ensaio para análise visual com tingimento dos agregados cerâmicos

Como os agregados cerâmicos utilizados possuem tonalidades de cores muito similares, fica difícil a verificação da estratificação a olho nú após a jigagem. Apenas pode-se observar a distinção entre os materiais com forma granular lamelar e forma granular arredondada. Assim, optou-se por colorir dois tipos de materiais cerâmicos com pigmento em pó de cores diferentes. As cores escolhidas foram: azul, para o tijolo cerâmico maciço, e amarelo, para o tijolo cerâmico 6 furos. O bloco cerâmico estrutural permaneceu com sua cor alaranjada natural.

Para utilizar no jigue, optou-se pela proporção equivalente entre os materiais, ou seja, a terça parte em massa. Dessa forma, foram separados 7,5 kg de cada material cerâmico para serem ensaiados no jigue, utilizando-se os compartimentos acrílicos menores, pois a quantidade de materiais era limitada. A coloração dos materiais foi realizada por meio úmido, deixando o material em repouso por 24 horas em um recipiente com água contendo o pigmento em pó. Após as 24 horas de repouso, os materiais foram secos em estufa, juntamente com o bloco cerâmico estrutural, ou seja, juntamente com o material não colorido.

Estando os materiais secos, foram despejados no jigue, misturados entre si e realizou-se o ensaio, com os mesmos dados de entrada utilizados anteriormente no quadro de comando. As amostras resultantes não foram coletadas para futuros ensaios, servindo apenas como exemplo

de visualização da estratificação que o aparelho promove com a utilização de materiais cerâmicos de proporções iguais em massa. Assim, a figura 21 demonstra a camada pertencente aos materiais menos densos, ou seja, a camada superior.

Figura 21 – Camada superior



(fonte: foto do autor)

Nessa camada, observa-se que o jigge conseguiu realizar uma breve separação do TCM, em que sua granulometria mais grosseira foi transferida para essa camada. Ainda, observa-se a presença do TC6F na composição, porém em uma quantidade menor.

Logo após, fotografou-se a cama intermediária, conforme na figura 22.

Figura 22 – Camada intermediária



(fonte: foto do autor)

Assim, nessa camada, é visto que o BCE e o TC6F estavam presentes e com granulometria mais grosseira que a camada superior, bem como uma pequena parcela do TCM presente. Ainda, o efeito de borda pôde ser percebido, pois os materiais com granulometria mais fina ficaram alocados nas periferias dessa camada.

Por fim, fotografou-se a camada inferior da câmara de estratificação, ou seja, a camada com o material mais denso. A figura 23 demonstra a situação dessa camada.

Figura 23 – Camada inferior



(fonte foto do autor)

Também, observa-se nessa camada uma grande quantidade de material com uma granulometria mais grosseira, sendo estes representados pelo BCE e TC6F. A presença do TCM é evidente, com granulometria mais fina e forma do agregado mais arredondado, preenchendo os espaços vazios deixados pelos agregados de BCE. Ainda, o efeito de borda é presente nessa camada, sendo constituída principalmente pelo TCM.

6.6.6 Armazenamento dos materiais processados

Após a realização de cada ensaio no equipamento, os materiais coletados eram ensacados e identificados com uma fita crepe, registrando a mistura ensaiada, conforme a figura 24.

Figura 24 – Armazenamento dos materiais coletados



(fonte: foto do autor)

6.7 CONFECÇÃO DE CONCRETOS COM OS AGREGADOS CERÂMICOS

Após a saturação dos agregados cerâmicos em água, teve início a confecção dos concretos com os materiais cerâmicos. Essa etapa foi realizada no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (Lamtac), localizado no Campus Centro, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Todos os materiais utilizados para a confecção dos concretos estão descritos a seguir.

6.7.1 Cimento

Para este trabalho, utilizou-se o cimento Portland CP V ARI – RS, o qual é conhecido pela sua maior capacidade de atingir resistências mais altas que os outros tipos de cimento, nas primeiras idades, bem como é o cimento que vem sendo muito utilizado nas concreteiras na região metropolitana de Porto Alegre. Também, esse cimento é resistente ao ataque por sulfatos, o que é muito interessante para o estudo por se utilizar RCD, pois estes podem conter essas substâncias.

6.7.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado é areia de origem quartzosa, proveniente do Rio Jacuí, Rio Grande do Sul. A sua granulometria foi determinada pelo material passante na peneira de abertura de malha #4,75 mm. Todo material retido nessa peneira era descartado.

A areia foi utilizada em estado seco. Assim, ela foi seca ao ambiente 1 dias antes de cada ensaio de confecção dos concretos.

6.7.3 Agregado graúdo

Os agregados graúdos utilizados foram os materiais cerâmicos retirados da última camada após o processo de separação por densidade no jigue pneumático, como também, os materiais cerâmicos britados e separados anteriormente a estes ensaios, devidamente dosados e pesados. Para a dosagem do concreto e definição do traço a ser utilizado, empregou-se o agregado graúdo natural, de origem basáltica, com dimensão máxima de 19 mm. Este agregado resultou em concretos moldados utilizados na realização dos ensaios mecânicos, os quais serviram como referência para a interpretação dos dados obtidos com os outros agregados.

Os agregados naturais que normalmente são utilizados nas misturas de concretos possuem baixos índices de absorção de água e a sua influência não é considerada para a produção de concretos convencionais. Entretanto, ao se utilizar agregados com porosidade mais elevada e com alto índice de absorção de água, como os agregados cerâmicos reciclados, alguns cuidados devem ser tomados para que o agregado não absorva parte da água de amassamento do concreto.

Assim, para que isso não ocorresse, fez-se a saturação total dos agregados, antes de serem utilizados nas misturas de concreto. Essa alternativa é citada por Bicca (2000, p. 30), que propõe a utilização do material saturado com superfície seca. Para isso, os agregados cerâmicos foram colocados em baldes, conforme a figura 25, com capacidade de confinar os 15 kg de cada amostra de material no estado seco ao ambiente, e preenchidos com água até a imersão total dos agregados. O tempo de imersão mínimo na água foi de 24 horas para a saturação, conforme Cordeiro (2013, p. 103).

Figura 25 – Saturação dos agregados em água



(fonte: foto do autor)

A saturação total dos agregados é benéfico ao concreto a ser realizado pois o agregado não irá absorver a água de amassamento estipulada, não necessitando a sua alteração na quantidade. Além disso, após o início da pega do cimento, a migração da água interna nos poros dos agregados à matriz cimentícia pode promover uma cura interna. Leite (2001, p. 140) verificou uma lenta perda de água do interior do agregado, se comparado com a sua absorção, e comenta que ao iniciar as reações de hidratação do cimento, a temperatura interna aumenta, podendo provocar migração interna da água contida no interior do agregado.

Passadas as 24 horas, a água de imersão era descartada e os agregados postos para a secagem até a obtenção da condição agregado saturado com a superfície seca, com auxílio de um ventilador.

6.7.4 Aditivo

O aditivo tem a função de promover uma melhor trabalhabilidade do concreto em estado fresco, sem a necessidade de se adicionar água, o que resultaria na perda de resistência mecânica. Assim, utilizou-se o aditivo superplastificante a base de éter policarboxílico modificado, livre de cloretos, atendendo aos requisitos da NBR 11768 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011).

6.7.5 Água

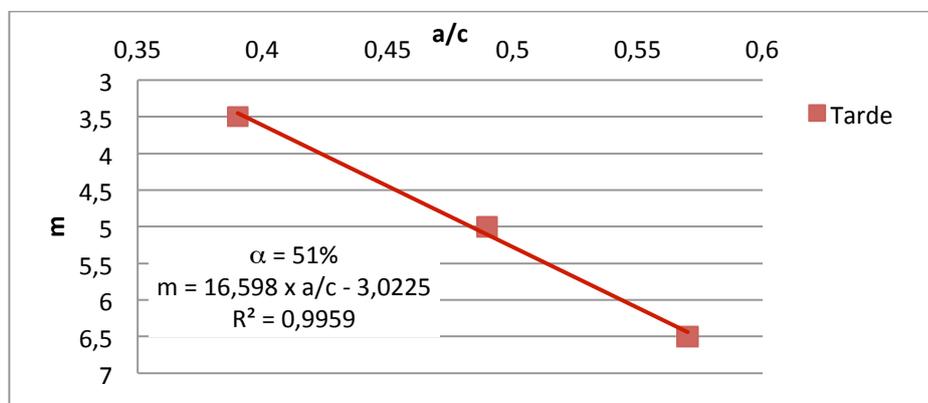
A água utilizada na confecção dos concretos foi a água proveniente da rede de abastecimento da cidade de Porto Alegre.

6.7.6 Confecção dos concretos e moldagem dos cp's

O traço dos concretos foi obtido com base em dosagem realizada através do método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), para a confecção dos concretos. A partir desse método chegou-se ao teor de argamassa ideal que, segundo Helene e Terzian (1992, p. 242), é uma fase muito importante para a dosagem do concreto, a qual adequa o concreto quando lançado. Ainda, os autores destacam que a falta de argamassa resulta em maior porosidade no concreto e falhas de concretagem, ao mesmo tempo que o excesso de argamassa proporciona maiores chances de fissuração térmica e por retração de secagem.

O gráfico da figura 26 mostra os dados das dosagens realizadas para a determinação do teor de argamassa (α) com agregados naturais. Assim, esses dados foram utilizados com o intuito de se obter o traço para os concretos com os materiais cerâmicos. Ele representa o quadrante de dosagem da relação água/cimento (a/c) *versus* a quantidade total de agregado (m), do diagrama de dosagem

Figura 26 – Determinação do teor de argamassa e da quantidade total de agregado



(fonte: trabalho não publicado⁵)

⁵ Informações obtidas de dosagens realizadas por Ana Paula Kirchheim, no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (Lamtac) – UFRGS, em setembro de 2014, como aula experimental da disciplina ENG01013 – Edificações I.

Assim, partindo-se do teor de argamassa escolhido, o traço estabelecido foi 1:2,2:3,08, determinado pelo valor da relação a/c igual a 0,5. Mas esta relação foi reduzida para o valor de 0,4 com aditivo superplastificante. Essa redução foi realizada para se obter uma matriz cimentícia mais resistente que o agregado, promovendo o rompimento do corpo de prova no material cerâmico. Como havia a necessidade de sete corpos de prova para cada mistura de concreto, a quantidade de agregado graúdo requerida para cada confecção de concreto foi de 15 kg. Assim, utilizou-se esse valor para a determinação da quantidade dos outros materiais que, conforme o traço utilizado, a quantidade de areia natural foi de 10,71 kg, de cimento foi de 4,87 kg e de água foi de 1,95 kg. O aditivo superplastificante era dosado conforme a necessidade da mistura, ou seja, durante o ato da confecção dos concretos, mediante a obtenção dos valores do abatimento no tronco de cone (*slumptest*), conforme a NBR NM 67 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996), no intervalo 80 ± 20 mm. Assim, devido à redução da relação a/c, utilizou-se o aditivo superplastificante nas misturas para um ajuste na trabalhabilidade. Os valores de abatimento do tronco de cone e consumo de aditivo são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Valores do abatimento e do consumo de aditivo

Composições dos agregados	Abatimento (mm)	Consumo de aditivo (g)
100% Agregado Natural de Basalto (ANB)	85	13,0
100% Bloco Cerâmico Estrutural (BCE)	75	10,0
100% Tijolo Cerâmico 6 Furos (TC6F)	90	22,0
100% Tijolo Cerâmico Maciço (TCM)	68	26,8
33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F (REF.)	65	12,8
60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F (REF.)	75	14,0
20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F (REF.)	65	10,8
33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F (JIG.)	92	22,0
60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F (JIG.)	80	14,8
20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F (JIG.)	85	10,0

(fonte: elaborado pelo autor)

Antes da confecção dos concretos, a betoneira utilizada foi imprimada com uma argamassa de traço 1:3, com a utilização de 1 kg de cimento, o que resulta na utilização de 3 kg de areia. A

quantidade de água utilizada foi de 400 gramas, respeitando a relação a/c de valor 0,4. Esse procedimento foi necessário para que a argamassa da primeira mistura de concreto a ser realizada não fosse perdida pelo efeito das paredes da betoneira. Depois de imprimada, essa argamassa era descartada e iniciou-se a realização das misturas.

Para os ensaios foram moldados 7 cp's cilíndricos, com dimensões 10 x 20 cm. A moldagem dos corpos de prova foi realizada em 2 camadas, ambas com alturas iguais a 10 cm e acomodadas com uma mesa vibratória, durante 15 segundos de vibração. Após a moldagem, a pesagem dos moldes dos corpos de prova era realizada novamente, agora com os moldes preenchidos com o concreto, e etiquetados para a sua identificação. A figura 27 ilustra os moldes dos corpos de prova sobre a mesa vibratória.

Figura 27 – Moldes dos corpos de prova preenchidos com o concreto



(fonte: foto do autor)

6.7.7 Cura e retífica

Passado o tempo de 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e encaminhados à câmara úmida. Antes do término dos 13 dias de cura em câmara úmida, os corpos de prova retificados. Esse processo é necessário para que a superfície superior e inferior estejam planas e paralelas, pois uma superfície não nivelada pode concentrar tensões em uma pequena região, o que compromete os resultados.

6.8 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Passados os 14 dias após a confecção dos concretos, deu-se início à realização dos ensaios mecânicos. Os corpos de prova a serem utilizados no dia eram transportados até o local da prensa e deixados cura submersa com água e cal.

Assim, como já mencionado anteriormente, para cada mistura de concreto foram confeccionados sete corpos de prova, os quais foram utilizados nos três ensaios mecânicos da seguinte forma:

- a) um corpo de prova para o ensaio de resistência à compressão (f_c);
- b) três corpos de prova para o ensaio de módulo de elasticidade (E);
- c) três corpos de prova para o ensaio de resistência à tração na compressão diametral (f_t).

Dessa forma, obteve-se:

- a) quatro resultados de resistência à compressão;
- b) três resultados de módulo de elasticidade;
- c) três resultados de resistência à tração na compressão diametral.

O fato de se utilizar sete corpos de prova e resultar em dez resultados é explicado pelo procedimento dos ensaios. O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme a NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007).

O valor da força obtida no rompimento deste corpo de prova foi utilizado para a determinação da carga de rompimento no ensaio de módulo de elasticidade, o qual segue a NBR 8522 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), dotado de dois extensômetros posicionados na mesma altura, os quais medem a deformação do corpo de prova, conforme a figura 28.

Figura 28 – Ensaio para a determinação do módulo de elasticidade



(fonte: foto do autor)

O ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral, ilustrado na figura 29, seguiu os parâmetros da NBR 7222 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011). A linha de ruptura no corpo de prova se dá ao longo da sua altura, ou seja, da maior dimensão.

Figura 29 – Ensaio de tração por compressão diametral



(fonte: foto do autor)

7 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesse capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios visando atender o objetivo proposto e a análise de separação do jigue pneumático, nas situações decorridas ao longo do plano experimental.

Os valores obtidos nos ensaios mecânicos foram coletados e reagrupados em:

- a) valores individuais dos corpos de prova;
- b) desvio padrão;
- c) coeficiente de variação;
- d) média dos valores após o espúrio de valores individuais dos corpos de prova.

Esses valores foram calculados no *software* computacional Excel, mediante a representação em tabelas. Assim, para um melhor entendimento, os valores médios após a exclusão de valores espúrios⁶ foram representados em gráficos, para cada tipo de ensaio realizado. Para analisar a significância dos fatores em função das misturas e processo (referência ou jigado), fez-se uma análise estatística por variância (Anova) com o auxílio do programa computacional Statística.

Os resultados dos ensaios mecânicos provenientes dos concretos confeccionados com as misturas de referência detêm a base de controle para a análise dos resultados das misturas jigadas. Também, conforme explicado no item 6.6, os materiais utilizados como agregados no concreto, provenientes do jigue pneumático, foram obtidos da última camada desse equipamento. Assim, os resultados dos ensaios mecânicos dessas misturas são comparados com os materiais de maior densidade, no caso, o bloco cerâmico estrutural. Portanto, os valores obtidos dos ensaios do concreto com 100% BCE serviram de comparação para os resultados com os materiais jigados, para assim analisar a efetividade do equipamento e a sua possibilidade de utilização na separação desses tipos de resíduos.

⁶ Para os resultados obtidos de cada ensaio mecânico para cada mistura de concreto, fez-se a média aritmética, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos valores dos corpos de prova. Assim, realizou-se a exclusão de valores individuais dos corpos de prova que não pertenceram ao intervalo representado pelo valor da média aritmética acrescida e subtraída dos valor do desvio padrão.

7.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na tabela 9 são apresentados os resultados de resistência à compressão. Os valores dos desvios-padrão (σ_{fc}) e dos coeficientes de variação (CV) estão demonstrados na terceira e na quarta coluna, respectivamente. Os valores de fc_{14} com o destaque amarelo, são os valores dos corpos de prova que foram considerados espúrios, e assim descartados para a obtenção da média utilizada nos gráficos.

Tabela 9 – Valores de resistência à compressão

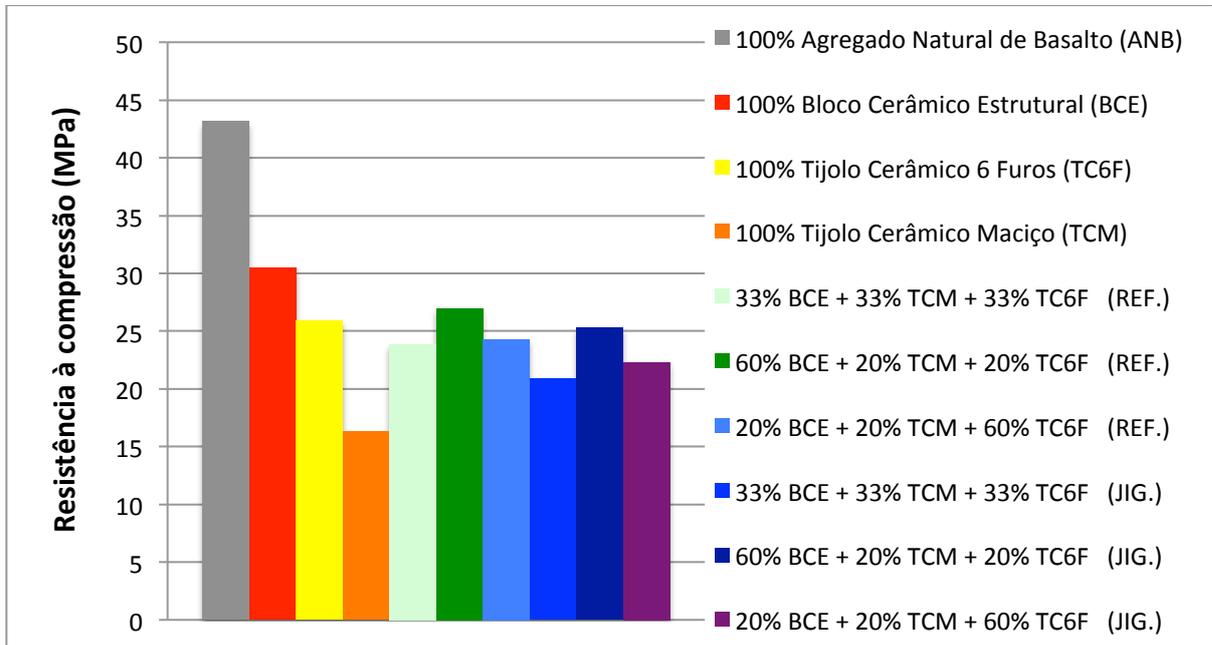
Materiais / Misturas	Resistência à compressão (fc_{14})			
	fc_{14} (MPa)	σ_{fc} (MPa)	CV (%)	fc_{14} (MPa) média (sem espúrios)
100% Agregado Natural de Basalto (ANB)	42,61	1,45	3,41	43,14
	44,19			
	40,65			
100% Bloco Cerâmico Estrutural (BCE)	42,61	2,69	9,14	30,48
	31,27			
	31,99			
	28,19			
	26,22			
100% Tijolo Cerâmico 6 Furos (TC6F)	26,00	0,20	0,77	25,91
	25,53			
	25,84			
	25,88			
100% Tijolo Cerâmico Maciço (TCM)	16,52	0,85	5,09	16,30
	17,95			
	16,00			
	16,38			
	26,82			
33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F (REF.)	22,95	2,34	9,75	23,88
	24,80			
	21,40			
	28,33			
60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F (REF.)	25,95	1,41	5,23	26,98
	28,05			
	25,58			
	24,35			
20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F (REF.)	24,61	0,71	2,88	24,31
	25,63			
	23,96			
	21,07			
33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F (JIG.)	21,02	0,85	4,00	20,85
	20,47			
	22,47			
	24,50			
60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F (JIG.)	25,71	1,37	5,55	25,31
	25,71			
	22,82			
	22,44			
20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F (JIG.)	21,83	0,52	2,35	22,29
	22,60			
	21,49			
	21,49			

(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados do concretos com agregados naturais de basalto serviram apenas como comparação para verificar a influência dos materiais cerâmicos utilizados como agregado graúdo no concreto. Portanto, os resultados obtidos dos ensaios pertencentes a ele não foram contemplados na análise de resultados mecânicos e da separação do jigote pneumático.

Os valores médios de resistência à compressão foram agrupados e demonstrados em gráfico, conforme a figura 30.

Figura 30 –Valores médios de resistência à compressão



(fonte: elaborado pelo autor)

Verificou-se que, nesse ensaio, o concreto confeccionado com 100% de agregado graúdo de bloco cerâmico estrutural apresentou o maior valor entre os concretos confeccionados com materiais cerâmicos. O concreto confeccionado com 100% de tijolo cerâmico maciço apresentou o valor de resistência mais baixo, quase a metade, o que é bem notável conforme o gráfico.

As resistências à compressão dos diferentes materiais cerâmicos estão relacionadas à absorção, em que o bloco cerâmico estrutural demonstrou o menor valor e o tijolo cerâmico maciço o maior valor, conforme a tabela 6. Também, essa correlação está diretamente associada à massa específica dos agregados, em que o bloco cerâmico estrutural é caracterizado pelo maior valor e o tijolo cerâmico maciço pelo menor, demonstrado na tabela 5.

Analisando a relação dos dados na figura 30, observa-se que os resultados obtidos dos corpos de prova confeccionados com os materiais resultantes da jigagem, assemelham-se aos resultados dos concretos com as proporções de referência de composição e ao concreto

confeccionado com 100% tijolo cerâmico 6 furos, do que ao concreto com 100% de bloco cerâmico estrutural.

Assim, comparando-se os valores de resistência à compressão dos concretos produzidos com as misturas de referência e jigadas, fez-se uma análise de variância (Anova) dos fatores processo e mistura. A significância dos valores podem ser analisadas na tabela 10. Os valores de p indicam essa significância, em que valores menores que 5% indicam significância entre eles, ou seja, há representatividade nos valores.

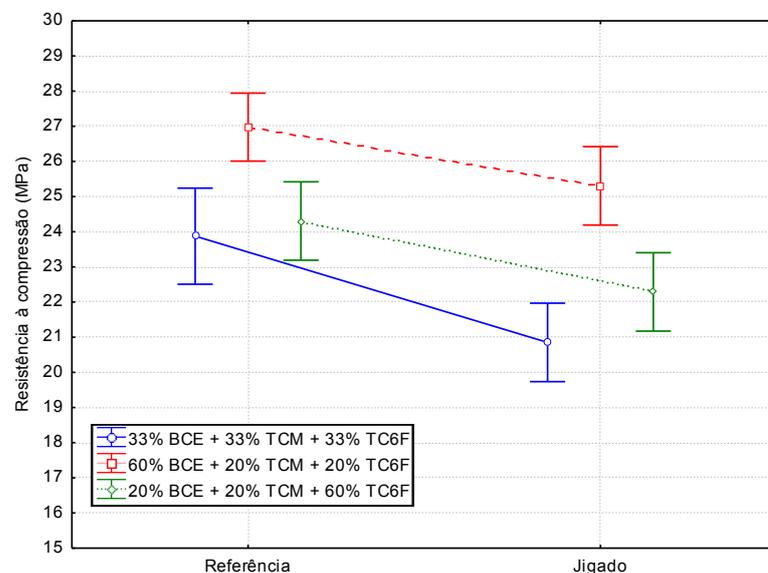
Tabela 10 – Valores de p nos ensaios de resistência à compressão

Efeito	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F	p (%)
Processo	21,61	1	21,61	27,46	0,02
Mistura	46,87	2	23,44	29,79	0,00
Processo *Mistura	1,33	2	0,67	0,85	45,30
Erro	9,44	12	0,79	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

Assim, observa-se que os valores de p são menores que 5%, tanto para as misturas, tanto para o processo de comparação, ambos significativos. Porém o processo*mistura não foi significativo. Dessa forma, a figura 31 ilustra o gráfico com a relação entre as misturas jigadas com as de referência.

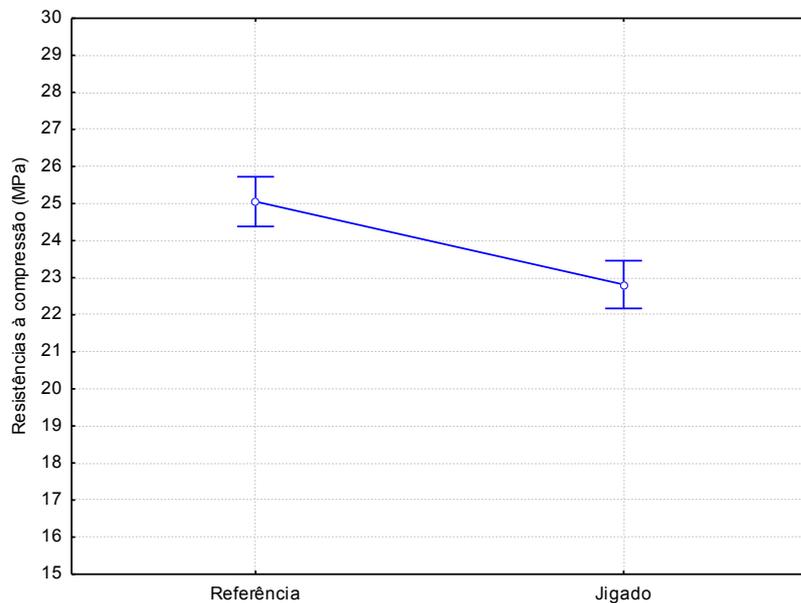
Figura 31 – Relação entre os valores médios de resistência à compressão das misturas de referência com as jigadas



(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se que as misturas jigadas tiveram um decréscimo da resistência em comparação às misturas referenciais, não havendo interação entre os resultados, os quais são significativos pela análise de variância. A figura 32 demonstra o gráfico com a média desses valores.

Figura 32 – Relação entre a média dos valores médios de compressão das misturas de referência com as jigadas

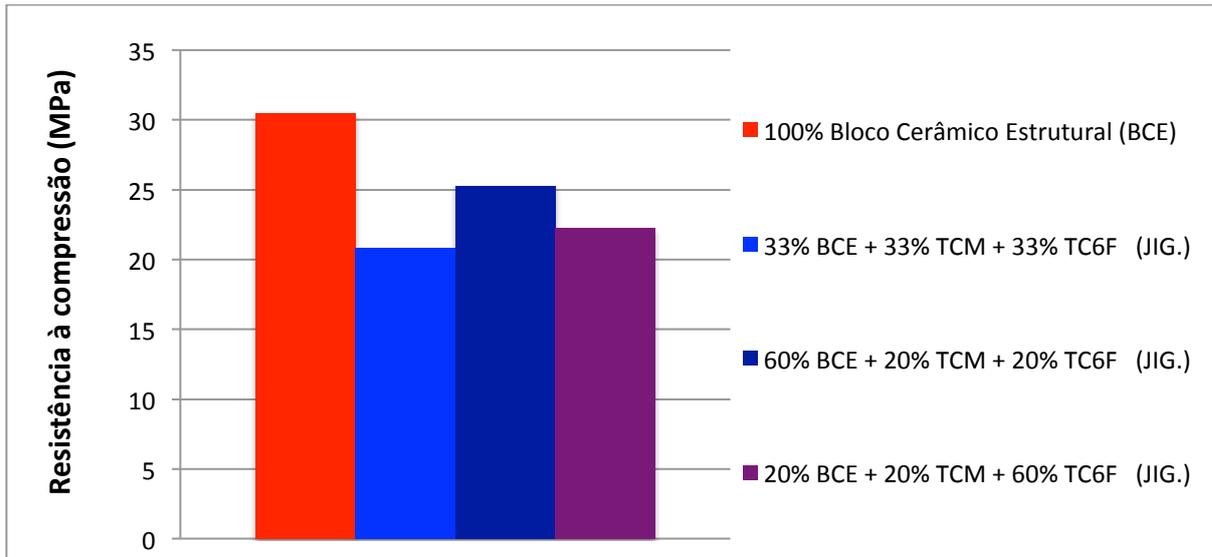


(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se que o processo de jigagem diminui a resistência à compressão das misturas de materiais cerâmicos estudados, de forma significativa.

Na figura 33, o gráfico que relaciona os materiais jigados com o bloco cerâmico estrutural, observa-se que o menor resultado é proveniente da mistura de 33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F. Isso deve-se justamente à maior quantidade, em massa, do material menos resistente, no caso o tijolo cerâmico maciço.

Figura 33 – Relação entre os valores médios de compressão do BCE com as misturas jigadas



(fonte: elaborado pelo autor)

A proporção com maior resistência à compressão foi justamente a que continha maior quantidade de bloco cerâmico estrutural na sua composição, no caso a proporção 60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F. Porém, todas as proporções jigadas não alcançaram valores próximos do bloco cerâmico estrutural. Assim, o processo de jigagem resultou na diminuição da resistência à compressão do concreto para todas as misturas. Os resultados não foram comparados com pesquisas anteriormente realizadas por não ter sido encontrado bibliografia.

7.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A tabela 11 demonstra os valores de cada ensaio mecânico de resistência à tração por compressão diametral.

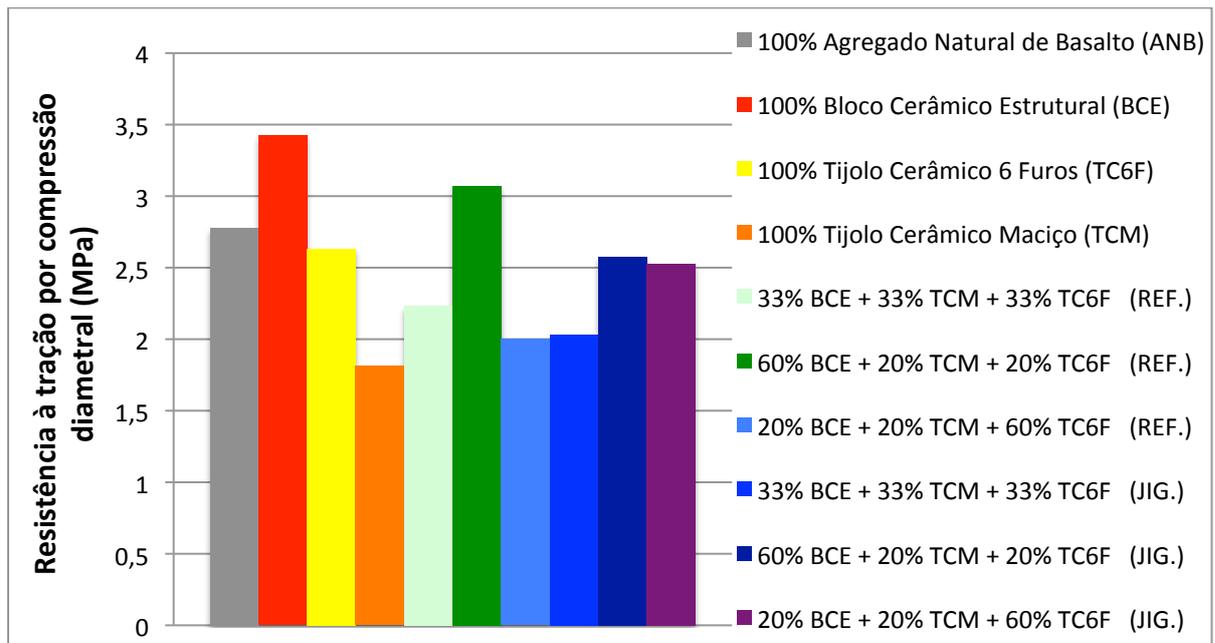
Tabela 11 – Valores de resistência à tração por compressão diametral

Materiais / Misturas	Resistência à tração por compressão diametral ($f_{t,4}$)			
	$f_{t,4}$ (MPa)	$\sigma_{\bar{r}}$ (MPa)	CV (%)	$f_{t,4}$ (MPa) média (sem espúrios)
100% Agregado Natural de Basalto (ANB)	2,79	0,65	23,38	2,78
	2,13			
	3,42			
100% Bloco Cerâmico Estrutural (BCE)	2,40	0,60	19,48	3,43
	3,55			
	3,30			
100% Tijolo Cerâmico 6 Furos (TC6F)	2,60	0,13	4,80	2,64
	2,67			
	2,85			
100% Tijolo Cerâmico Maciço (TCM)	1,83	0,37	23,13	1,82
	1,17			
	1,80			
33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F (REF.)	2,73	0,29	12,08	2,24
	2,19			
	2,28			
60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F (REF.)	2,06	0,59	21,61	3,07
	3,17			
	2,97			
20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F (REF.)	2,85	0,53	23,25	2,00
	2,20			
	1,80			
33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F (JIG.)	2,32	0,18	8,45	2,03
	1,97			
	2,09			
60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F (JIG.)	2,15	0,28	11,52	2,58
	2,70			
	2,45			
20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F (JIG.)	1,54	0,58	26,36	2,53
	2,61			
	2,44			

(fonte: elaborado pelo autor)

Nos resultados de ensaios à tração por compressão diametral, os valores médios obtidos após a retirada dos espúrios mostram que os concretos confeccionados com 100% de bloco cerâmico estrutural e com a mistura de 60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F apresentaram um valor de resistência superior ao do agregado natural. O tijolo cerâmico 6 furos também obteve uma resistência à tração próxima à do basalto. Na figura 34, pode-se visualizar o gráfico que ilustra essa afirmação.

Figura 34 – Gráfico com os valores médios de resistência à tração por compressão diametral



(fonte: elaborado pelo autor)

Nota-se que os resultados obtidos nos concretos confeccionados com os materiais jigados assemelham-se aos resultados das misturas referenciais e ao tijolo cerâmico 6 furos, e não à cerâmica mais densa, no caso o bloco cerâmico estrutural. Também, nesse tipo de ensaio, observou-se que o rompimento do concreto com agregado natural de basalto se deu na interface entre a argamassa e o agregado graúdo, sem a quebra desse agregado. Porém, nas amostras que resultaram em resistências à tração superiores aos agregados naturais de basalto, observou-se que o rompimento do concreto se deu parte na interface entre a argamassa e o agregado graúdo, e parte no agregado graúdo, conforme a figura 35.

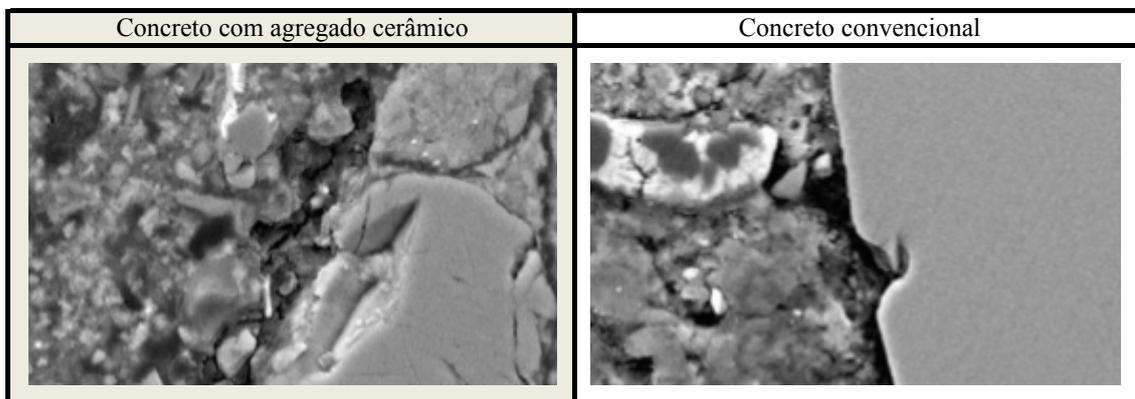
Figura 35 – Corpo de prova rompido no ensaio de resistência à tração por compressão diametral



(fonte: foto do autor)

Isso é possível pela maior porosidade superficial da cerâmica em relação ao basalto, a qual permite a entrada da pasta de cimento numa pequena profundidade no agregado, resultando na formação de cristais quando endurecido, mesmo estando saturado. Este comportamento também foi observado por Leite (2001, p. 214), como ilustra o quadro 1.

Quadro 1 – Interface entre argamassa e o agregado graúdo



(fonte: Leite, 2001, p. 214)

Devido ao mesmo efeito de penetração da pasta de cimento na sua superfície, a resistência à tração por compressão diametral do concreto com tijolo cerâmico maciço resultou num valor inferior ao do concreto com o basalto. Isso pode ser justificado por se tratar de uma cerâmica muito porosa e pulverulenta ao manuseio, com uma resistência à compressão muito baixa.

A tabela 12 apresenta a análise de variância (Anova) dos fatores processo e mistura, comparando-se os valores de resistência à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com as misturas de referência e jigadas.

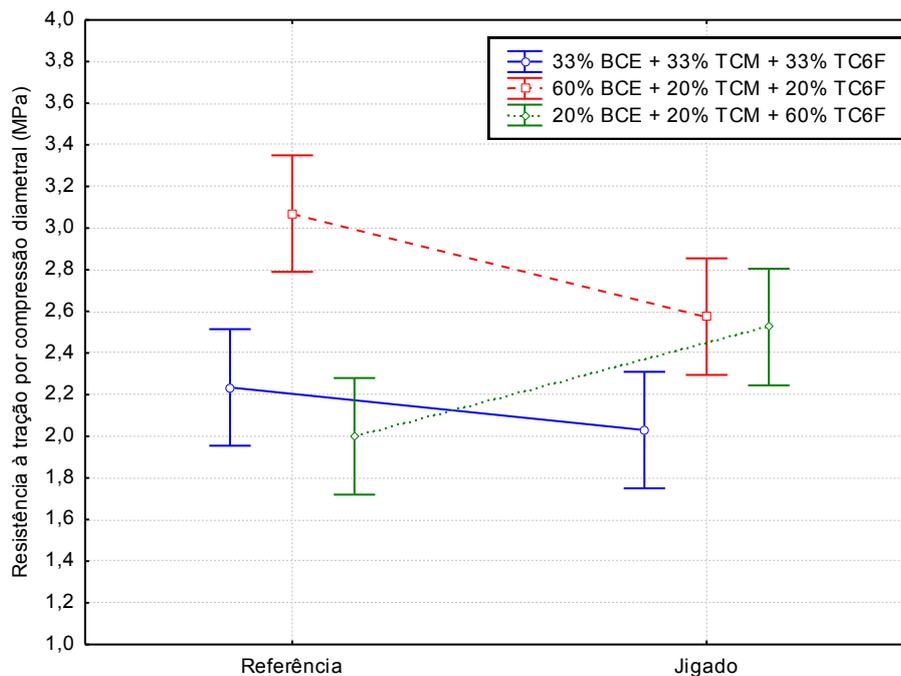
Tabela 12 – Valores de p nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral

Efeito	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F	p (%)
Processo	0,01	1	0,01	0,39	55,52
Mistura	1,08	2	0,54	20,56	0,21
Processo *Mistura	0,55	2	0,28	10,56	1,08
Erro	0,16	6	0,03	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se que os valores de p são menores que 5% para as misturas, as quais são diferentes entre si, mas o processo de comparação não é significativo, demonstrando uma proximidade entre os valores. A figura 36 ilustra o gráfico com a relação da resistência à tração por compressão diametral de cada mistura de referência com a jigada correspondente.

Figura 36 – Relação entre os valores médios de resistência à tração por compressão diametral das misturas de referência com as jigadas

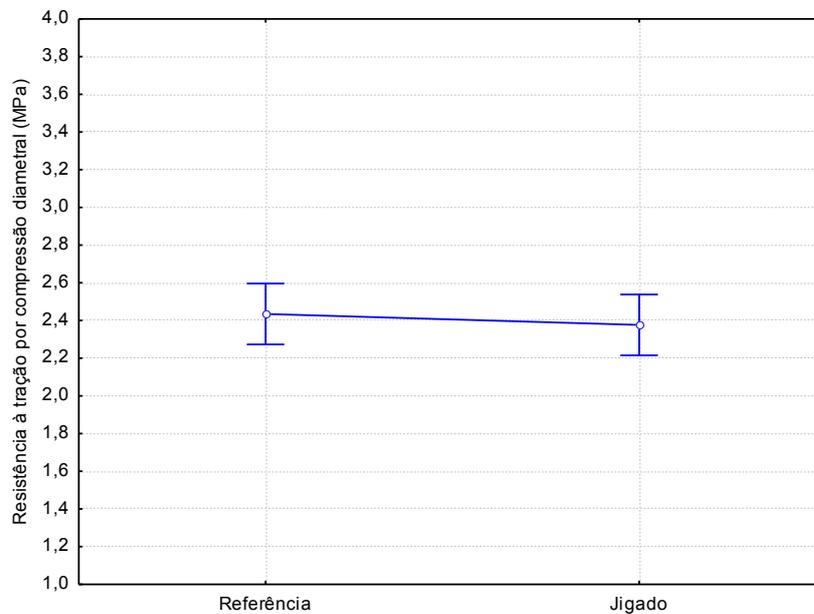


(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se na figura 36 que apenas a mistura 20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F obteve um acréscimo na resistência à tração após a jigagem, muito próximo da mistura 60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F após ser jigada. A mistura 33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F obteve os menores resultados por comportar maior quantidade de material mais fraco, no caso o tijolo cerâmico maciço.

Observando os resultados, percebe-se a interação entre os fatores analisados, embora não seja significativo o efeito do processo de separação para a propriedade analisada (tabela 12), ilustrada no gráfico da figura 37, pela proximidade dos valores.

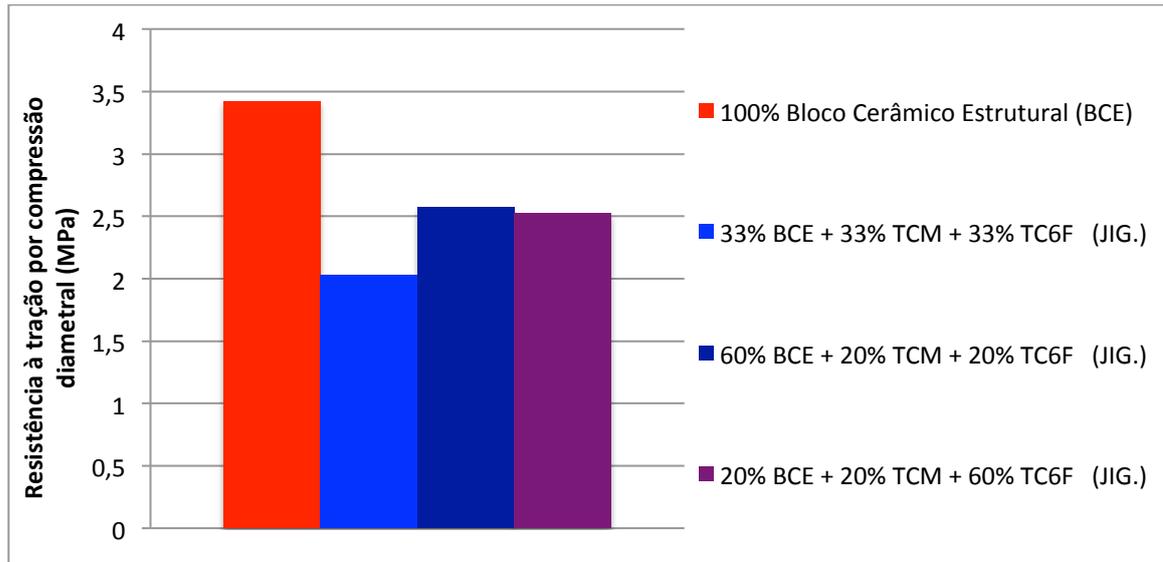
Figura 37 – Relação entre a média dos valores médios de tração por compressão diametral das misturas de referência com as jigadas



(fonte: elaborado pelo autor)

Comparando os valores de resistência à tração dos materiais provenientes da jigagem com os do bloco cerâmico estrutural, ilustra-se o gráfico da figura 38.

Figura 38 – Relação entre os valores médios de tração por compressão diametral do BCE com as misturas jigadas



(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se que a mistura 60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F e a mistura 20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F resultaram em valores muito próximos. Já a mistura 33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F resultou no menor valor de resistência à tração por conter uma maior quantidade de material de baixa resistência à compressão e alta porosidade. Porém, todos os valores dos concretos com as misturas jigadas foram notavelmente inferiores ao do bloco cerâmico estrutural. Os resultados obtidos não foram comparados com pesquisas realizadas anteriormente por não ter sido encontrado bibliografia.

7.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os valores dos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios estão demonstrados na tabela 13. Para a composição 100% ANB, houve um problema na prensa durante o ensaio, o que resultou na obtenção de apenas dois resultados de módulo de elasticidade.

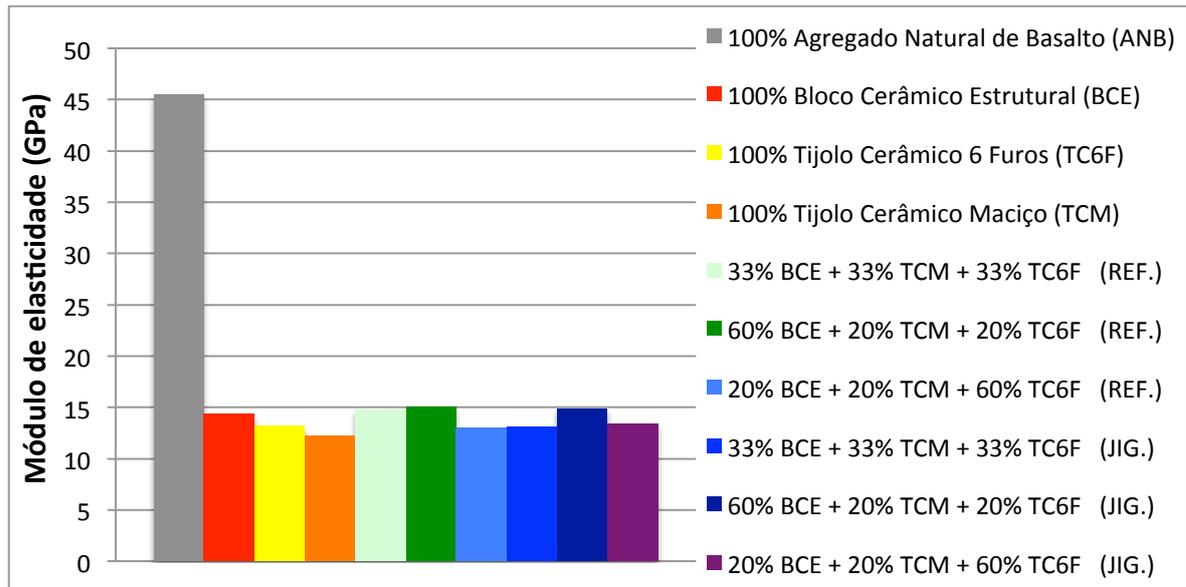
Tabela 13 – Valores de módulo de elasticidade

Materiais / Misturas	Módulo de elasticidade ($E_{c,14}$)			
	$E_{c,14}$ (GPa)	σ_{Ec} (GPa)	CV (%)	$E_{c,14}$ (GPa) média (sem espúrios)
100% Agregado Natural de Basalto (ANB)	50,96	7,69	16,89	45,53
	40,09			
100% Bloco Cerâmico Estrutural (BCE)	erro prensa	1,08	7,25	14,30
	16,10			
100% Tijolo Cerâmico 6 Furos (TC6F)	14,60	0,57	4,23	13,15
	14,00			
100% Tijolo Cerâmico Maciço (TCM)	13,30	2,94	27,81	12,20
	13,00			
33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F (REF.)	14,10	0,78	5,45	14,75
	7,30			
60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F (REF.)	13,00	0,36	2,42	15,10
	11,40			
20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F (REF.)	14,70	1,93	13,69	13,05
	13,40			
33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F (JIG.)	14,80	2,77	24,09	13,10
	15,20			
60% BCE + 20% TCM + 20% TC6F (JIG.)	14,50	0,60	4,05	14,83
	15,00			
20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F (JIG.)	12,40	0,56	4,18	13,40
	13,70			
	16,20			
	13,10			
	13,10			
	8,30			
	14,20			
	14,90			
	15,40			
	13,50			
	13,90			
	12,80			

(fonte: elaborado pelo autor)

Para uma melhor visualização dos resultados, o gráfico da figura 39 ilustra o comportamento do módulo de elasticidade de cada material cerâmico, bem como as misturas referenciais e jigadas.

Figura 39 – Gráfico com os valores médios de módulo de elasticidade



(fonte: elaborado pelo autor)

Nota-se a influência dos resíduos cerâmicos como agregados graúdos. O concreto confeccionado com o agregado natural de basalto possui o valor de módulo de elasticidade cerca de 3 vezes maior em relação a cada tipo de material cerâmico e cada mistura referencial e jigada.

Os valores dos materiais cerâmicos são muito próximos entre si, com uma pequena diferença entre eles. O concreto que obteve menor valor, ou seja, o concreto mais deformável foi o confeccionado com 100% de tijolo cerâmico maciço, devido a sua maior absorção e menor massa específica, sendo assim mais deformável que as outras cerâmicas estudadas nesta pesquisa. Em geral, observa-se que os resultados para os materiais jigados são muito semelhantes aos de seus referenciais, bem como ao bloco cerâmico estrutural.

Assim, a significância dos valores de módulo de elasticidade pode ser analisada pela análise de variância (Anova) conforme a tabela 14.

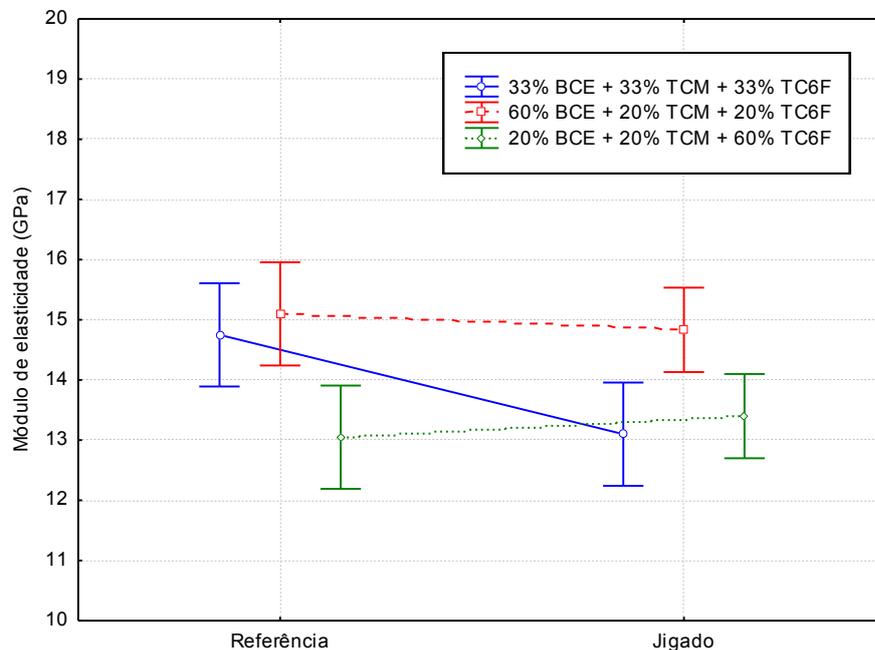
Tabela 14 – Valores de p nos ensaios de módulo de elasticidade

Efeito	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F	p (%)
Processo	0,92	1	0,92	3,32	10,58
Mistura	7,36	2	3,68	13,29	0,29
Processo *Mistura	2,25	2	1,12	4,06	6,08
Erro	2,22	8	0,28	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se que apenas o efeito mistura foi significativo. Assim, com a análise de variância, temos o gráfico da figura 40.

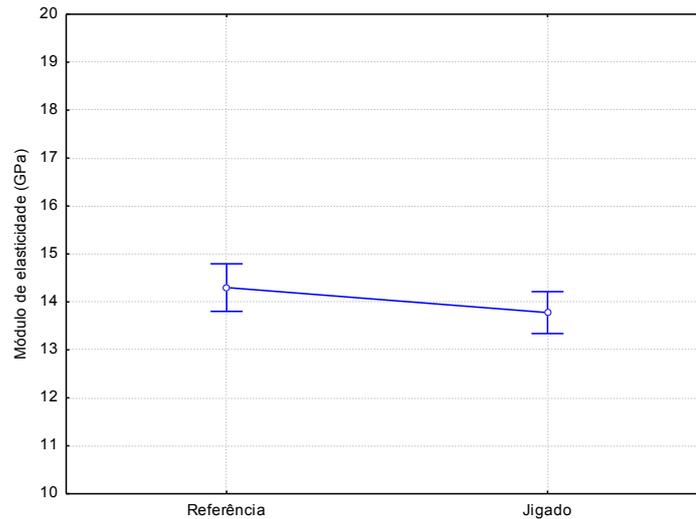
Figura 40 – Relação entre os valores médios de módulo de elasticidade das misturas de referência com as jigadas



(fonte: elaborado pelo autor)

Novamente, observa-se que a mistura 20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F obteve um pequeno acréscimo do valor de módulo de elasticidade, demonstrando a interação dos valores. Porém ao associar a média dos resultados jigados com os não jigados, observa-se uma proximidade dos valores, conforme o gráfico da figura 41, o qual demonstra que esses valores não são significativos.

Figura 41 – Relação entre a média dos valores médios de módulo de elasticidade das misturas de referência com as jigadas



(fonte: elaborado pelo autor)

Isso evidencia que o processo de comparação entre as misturas de referência e as jigadas não verifica valores diferentes. Assim, os valores de módulo de elasticidade são muito próximos entre si, demonstrando que o ato de jigar essas misturas não afeta os valores de módulo de elasticidade para as proporções. Mesmo assim, as misturas jigadas apresentam valores menores em relação às de referência.

7.4 COMPARAÇÃO ENTRE MÉDIAS DOS ENSAIOS E VARIABILIDADE

Os valores médios dos ensaios mecânicos foram resumidos na tabela 15.

Tabela 15 – Valores médios dos ensaios mecânicos

Materiais / Misturas	Valores médios após o espúrio		
	$f_{c_{14}}$ (MPa)	$f_{t_{14}}$ (MPa)	$E_{c_{14}}$ (GPa)
100% BCE	30,48	3,43	14,30
100% TC6F	25,91	2,64	13,15
100% TCM	16,30	1,82	12,20
MISTURAS REF.	25,06	2,44	14,30
MISTURAS JIG.	22,82	2,38	13,78

(fonte: elaborado pelo autor)

Com os valores, fez-se uma comparação entre os resultados médio das misturas jigadas, marcadas com a cor azul, com as restantes médias de misturas de referência e de materiais

puros na composição. Assim, foram obtidas as variações desses resultados em comparação aos dos materiais jigados, conforme a tabela 16.

Tabela 16 – Diferença dos valores médios em relação aos valores das misturas jigadas

Materiais / Misturas	Variação dos valores médios após o espúrio		
	$\Delta f_{c_{14}}$ (MPa)	$\Delta f_{t_{14}}$ (MPa)	$\Delta E_{c_{14}}$ (GPa)
100% BCE	7,66	1,05	0,52
100% TC6F	3,09	0,26	0,63
100% TCM	6,52	0,56	1,58
MISTURAS REF.	2,24	0,06	0,52

(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se que as menores diferenças dos resultados são provenientes das misturas de referência e do tijolo cerâmico 6 furos. Apenas nos resultados de módulo de elasticidade é observado que os materiais jigados assemelharam-se ao bloco cerâmico estrutural, porém com uma pequena diferença em relação aos outros materiais e composições. Assim, para este caso, os valores de módulo de elasticidade não possuem diferenças relevantes entre si.

Para a análise da variação dos valores médios das misturas de referência em relação aos valores médios das misturas jigadas, fez-se a tabela 17.

Tabela 17 – Variação das propriedades médias entre as misturas de referência e as jigadas

Propriedades		MISTURAS REF.	MISTURAS JIG.
$f_{c_{14}}$	Média (MPa)	25,40	22,82
	σ (MPa)	1,81	2,02
	CV (%)	7,11	8,84
$f_{t_{14}}$	Média (MPa)	2,44	2,38
	σ (MPa)	0,52	0,29
	CV (%)	21,49	12,14
$E_{c_{14}}$	Média (GPa)	14,30	13,86
	σ (GPa)	1,07	0,92
	CV (%)	7,45	6,67

(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se um pequeno aumento do CV das resistências à compressão após o processo de jigagem. Também, teve-se uma pequena diminuição do CV para o módulo de elasticidade, após a jigagem. As variações entre os CV das MISTURAS REF e das MISTURAS JIG são muito próximas, não demonstrando diferença.

Porém, no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, os valores de CV após a jigagem diminuíram com uma diferença de 9%, aproximadamente. Mas isso não indica propriamente que o jigue pneumático diminuiu a variação dos valores, pois essa variação é do próprio ensaio. Isso pode ser observado na tabela 11, em que os agregados no estado puro possuem valores de CV altos, na ordem de 20%, bem como o próprio agregado natural de basalto com 23,38%, com a exceção do tijolo cerâmico 6 furos com um CV de 4,80%.

7.5 EFETIVIDADE DE SEPARAÇÃO

Para que o jigue pneumático tenha uma efetividade de separação por densidade, as massas específicas dos materiais não devem ser muito próximas. Assim, a condição de uma separação efetiva é avaliada conforme a fórmula 1⁷.

$$cc = (\rho_d - \rho_f) / (\rho_l - \rho_f) \quad (\text{fórmula 1})$$

Sendo:

cc = critério de concentração;

ρ_d = densidade do material mais denso (g/cm^3);

ρ_l = densidade do material menos denso (g/cm^3);

ρ_f = densidade do fluido separador (g/cm^3).

Como o fluido separador é o ar, o valor de ρ_f é $0,001225 \text{ g/cm}^3$. Assim, utilizando os valores das massas específicas aparentes, demonstradas na tabela 5, e a fórmula 1, os critérios de concentração (cc) foram calculados para cada relação entre os materiais cerâmicos. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 18.

⁷ Obtida na página 5 do manual *AllAir S-500* – Modo de Operação, produzido por Wesley Monteiro Ambrós, em maio de 2014, devido aos seus estudos com o jigue pneumático situado no LAPROM – UFRGS.

Tabela 18 – Valores dos critérios de concentrações

Relações dos materiais	cc
BCE - TC6F	1,06
BCE - TCM	1,23
TC6F - TCM	1,16

(fonte: elaborado pelo autor)

A separação realizada por jigagem é relativamente fácil, quando o critério de concentração (cc) for maior que 2,5⁸. Com isso, observa-se que a separação entre os materiais é relativamente difícil, pois os valores dos critério de concentração para cada relação é menor que 2,5 justificando-se, assim, os resultados obtios nesta pesquisa.

⁸ Informação obtida da página 5 do manual *AllAir S-500 – Modo de Operação*, produzido por Wesley Monteiro Ambrós, em maio de 2014, devido aos seus estudos com o jigge pneumático situado no LAPROM – UFRGS.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir, são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

8.1 CONCLUSÕES

As conclusões apresentadas a seguir, apesar de estarem em consonância com a maior parte da bibliografia existente, não devem ser tomadas de forma absoluta, pois se referem somente aos dados obtidos de concretos que utilizaram tipos, quantidades e qualidades específicas de materiais e técnicas de execução. Sua representatividade deve ser firmada através da execução de novas pesquisas que apresentem resultados que possam complementar e confirmar os obtidos neste estudo.

Observando a tabela 17, verifica-se que não foi possível comprovar a diminuição da variabilidade de concretos produzidos com agregados cerâmicos, provenientes da separação no jigue pneumático. A considerável variação entre os valores de CV da resistência à tração por compressão diametral das misturas de referência e das jigadas não indica uma regularização das propriedades. Isso se deve justamente ao fato de que esse ensaio produz resultados variáveis, o que pode ser visto na tabela 11, em que o valor do CV para o concreto com 100% TC6F foi de 4,80%, enquanto que o concreto com 100% BCE e 100% TCM atingiram valores de 19,48% e 23,13%, respectivamente. Ainda, o concreto com 100% ANB atingiu um CV com o valor de 23,38%, entre seus corpos de prova. Dessa forma, os agregados de mesmo material produzem concretos com altos valores para CV. Também, essa variabilidade nesse ensaio deve-se ao número limitado de corpos de prova. Assim, esse ensaio não justifica a diminuição da variabilidade. Portanto, o equipamento não estratificou os agregados de forma consistente, não obtendo uma regularização nas propriedades mecânicas dos concretos.

Realizando uma análise visual do ensaio 33% BCE + 33% TCM + 33% TC6F, o qual teve o tingimento do TCM com pigmento em pó azul e do TC6F com pigmento em pó amarelo, observa-se que:

- a) na camada superior, o jigue pneumático conseguiu realizar uma breve separação do TCM, o qual foi tingido com pó xadrez azul. Uma grande parcela da sua massa e de granulometria mais grosseira foi transferida para essa camada. Nela, também é visto os materiais mais densos, como o TC6F, numa quantidade menor;
- b) na camada intermediária, observa-se uma grande quantidade de BCE e TC6F com granulometria mais grosseira que os obtidos na camada superior, e uma pequena parcela do TCM. Também, observa-se que o efeito de borda nessa camada é evidente, pois os materiais com granulometria mais fina ficaram alocados nas periferias;
- c) na camada inferior, a qual foi separada para a confecção dos concretos, observa-se uma grande quantidade de material grosseiro representado pelo BCE e o TC6F. Porém, nessa camada, o efeito de borda também esteve presente, principalmente pelo TCM com granulometria mais fina e arredondada, o qual preencheu os vazios entre agregados de BCE de granulometria mais grosseira.

Assim, para as condições dos materiais estudados e suas proporções, evidencia que o processo de jigagem não separou-os totalmente pela sua densidade, mas pela granulometria e forma geométrica do agregado. Essas observações serviram de base para as considerações dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos realizados. O efeito de borda pode ser o principal motivo da diminuição dos valores obtidos nos ensaios mecânicos, pois os materiais menos densos com granulometrias mais finas eram alocadas na periferia da última camada.

Nos resultados obtidos nos ensaios mecânicos, observou-se que os concretos confeccionados com o materiais cerâmicos jigados apresentaram todas as características mecânicas avaliadas menores que o concreto confeccionado com cerâmica mais densa, ou seja, a mistura 100% BCE. Também, relacionando as misturas jigadas com as misturas de referência, percebe-se que apenas a mistura 20% BCE + 20% TCM + 60% TC6F apresentou melhorias na resistência à tração por compressão diametral e no módulo, quando jigadas.

Visto que as massas específicas do BCE e TC6F são muito próximas, com uma pequena variação da massa específica desses agregados com a do TCM, o jigue não conseguiu promover a separação de forma satisfatória. Isso reflete nas propriedades avaliadas, as quais evidenciam um declínio dos valores das misturas jigadas em comparação às misturas de referência, bem como em relação ao material cerâmico mais denso.

Assim, é evidente que na última camada do jigue, com a qual se confeccionou os concretos, há a influência do TCM, o qual demonstrou menores valores. Também, isso pode ser

explicado pela maior massa unitária do TC6F, com granulometria lamelar, e do TCM, com granulometria mais arredondada, ambas com maior quantidade de agregados com dimensões próximas de 4,75 mm. Assim, esses materiais preenchem os espaços vazios deixados pelo BCE, principalmente na periferia dos compartimentos, interferindo nos resultados mecânicos de forma significativamente negativa.

De forma geral, o jigge pneumático não conseguiu diminuir a variabilidade das características mecânicas estudadas. Também, não foi possível realizar a separação em relação à diferença de densidade entre os materiais cerâmicos de forma significativa, conforme o procedimento de amostragem adotado nesse trabalho

8.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Levando-se em consideração os tipos de materiais cerâmicos utilizados, bem como as misturas proporcionais, a granulometria e os comandos introduzidos no jigge, sugestões podem ser sugeridas para possíveis melhorias no processo de separação de materiais cerâmicos por densidade. Assim, com base nas considerações finais desse trabalho, sugere-se:

- a) utilizar os mesmos tipos de materiais cerâmicos e as mesmas misturas no jigge pneumático, determinando a frequência e taxa de expansão ideal para uma melhor separação;
- b) utilizar os mesmos tipos de materiais cerâmicos e as mesmas misturas no jigge pneumático, bem como a mesma frequência e taxa de expansão utilizadas, só que delimitando-se à retirada do volume central dos agregados da última camada, minimizando o efeito de borda;
- c) utilizar os mesmos tipos de materiais cerâmicos e as mesmas misturas, bem como a mesma frequência e taxa de expansão, com os agregados caracterizados por faixas granulométricas iguais;
- d) utilizar os mesmos materiais cerâmicos, com a mesma frequência e taxa de expansão utilizadas nesse trabalho, porém com diferentes misturas e maior quantidade de material para confeccionar um maior número de corpos de prova de concretos.

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. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: hormigón – determinación de la consistencia mediante el asentamiento del tronco de cono = concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Montevideo, 1996.

_____. **NBR 15113: resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – aterros – diretrizes para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 45: agregados – determinación de la densidad a granel y de los espacios vacios = agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Montevideo, 2006.

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

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

_____. **NBR NM 53: agregado grueso – determinación de la densidad, de la densidad aparente y de la absorción de agua = agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Montevideo, 2009.

_____. **NBR 7222: concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 11768: aditivos químicos para concreto de cimento Portland – requisitos**. Rio de Janeiro, 2011.

BICCA, I. da S. **Estudo da viabilidade de utilização do rejeito cerâmico, como agregado graúdo, na produção de concreto com características estruturais**. 2000. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 254 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CARNEIRO, F. P. **Diagnóstico e ações da atual situação dos resíduos de construção e demolição na cidade do Recife**. 2005. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

CARRIJO, P. M.; FIGUEIREDO, A. D. de. **Análise do desempenho mecânico de concretos com agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição reciclados separados por densidade**. São Paulo: EPUSP, 2005. Boletim Técnico PCC n. 410.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 307**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, DF, 2002.

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, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

GRIGOLETTI, G. de C. **Caracterização de impactos ambientais de indústrias de cerâmica vermelha do estado do Rio Grande do Sul**. 2001. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

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

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.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. 2007. 180 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.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PINTO, T. de P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. M. **Beneficiamento gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** 1997. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.