

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

**Antônio Aloísio Bruxel Corrêa**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS COM  
AGREGADOS RECICLADOS: ESTUDO DE REDUÇÃO DA  
VARIBILIDADE EM CONCRETOS UTILIZANDO  
AGREGADOS SUBMETIDOS À SEPARAÇÃO POR JIGAGEM  
A SECO**

Porto Alegre  
dezembro 2014

**ANTÔNIO ALOÍSIO BRUXEL CORRÊA**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS COM  
AGREGADOS RECICLADOS: ESTUDO DE REDUÇÃO DA  
VARIBILIDADE EM CONCRETOS UTILIZANDO  
AGREGADOS SUBMETIDOS À SEPARAÇÃO POR  
JIGAGEM A SECO**

Trabalho de Diplomação a ser 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**

Porto Alegre  
dezembro 2014

**ANTÔNIO ALOÍSIO BRUXEL CORRÊA**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COM AGREGADOS  
RECICLADOS: ESTUDO DE REDUÇÃO DA VARIBILIDADE  
EM CONCRETOS EM CONCRETOS UTILIZANDO  
AGREGADOS SUBMETIDOS À SEPARAÇÃO POR JIGAGEM  
A SECO**

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

Profa. Aguida Gomes de Abreu  
Dra. Pela UFRGS  
Coorientadora

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

**BANCA EXAMINADORA**

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

**Marina Martins Mennucci**  
(UFRGS)  
Dra. Pela USP

**Aguida Gomes de Abreu**  
(UFRGS)  
Dr. pela UFRGS

**Denise Carpena Coitinho dal Molin**  
(UFRGS)  
Dr. pela USP

Dedico este trabalho a toda minha família, namorada e amigos, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Profa. Denise Carpena Coitinho dal Molin, orientadora deste trabalho, pela disposição e atenção demandada as questões dessa pesquisa. Também minha sincera gratidão a Profa. Aguida Gomes de Abreu coorientadora deste trabalho pela sua incansável dedicação.

Agradeço a Profa. Ângela Borges Masueiro pelo apoio e incentivo a pesquisa. Agradeço a Profa. Carin Maria Schmitt pela ajuda e paciência nas consultorias dadas sobre na elaboração desse trabalho.

Agradeço aos colegas do NORIE Airton, Demétrius e Gilmar pela colaboração com a pesquisa.

Agradeço a Weslei Ambrós pela importante contribuição para o desenvolvimento da pesquisa e também ao Prof. Carlos Otávio Petter por todo apoio prestado.

Agradeço aos meus pais Rubem Corrêa e Lori Teresinha Bruxel, minhas irmãs Helena Guilhermina Bruxel Corrêa, Ana Laudelina Bruxel Corrêa e Rubmara Teresinha Bruxel Corrêa, minha tia Clarice Maria Bruxel, minha vó Edy Bruxel, minha namorada e amiga Milene Viegas que contribuiu muito para que esse trabalho fosse concluído, e também sua família pelo apoio.

Agradeço a todos meus amigos os incentivos dados para desenvolvimento desse trabalho.

A essas pessoas fica o reconhecimento e gratidão pelas devidas contribuições, inspiração e apoio aos estudos, que foram fundamentais nos períodos mais árduos dessa jornada.

Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.

*Leonardo da Vinci*

## RESUMO

Este trabalho busca analisar alguns aspectos do uso de ARCD (agregado reciclado de construção e demolição) na produção de concreto. Os resíduos de construção e demolição, no cenário atual do Brasil, representam um problema ambiental, legal e econômico para as construtoras e população de uma maneira geral, contudo, essa realidade pode ser diferente através da reciclagem desses. Os estudos de agregados reciclados na confecção de concretos estão evoluindo cada vez mais no ramo da Engenharia, mas a variabilidade das características dos diferentes tipos é um entrave para sua utilização. Esse problema sofre interferência de diversos fatores como modo de separação, modo de descarte e diferentes composições dos materiais. Dessa forma, as propriedades do concreto, como a resistência mecânica e o módulo de deformação, são influenciadas diretamente por essa variabilidade, contribuindo negativamente para o uso desses materiais. Uma das possibilidades de reduzir esta variabilidade é a separação dos constituintes do RCD em larga escala, utilizando, por exemplo, equipamentos de concentração gravimétrica a seco, usados na área de mineração para separação de diversos materiais como carvão, zircão, cromita e entre outros. Nesse contexto, esse trabalho analisa o comportamento das propriedades do concreto produzido com agregados separados pelo processo de jigagem a seco no equipamento *air jig*. Os materiais são separados com base nas diferenças de densidades, e usados como agregados graúdos no concreto, onde suas propriedades de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade são analisadas, quanto à possibilidade de redução da variabilidade dos resultados. Em consequência disso os módulos de elasticidade dos concretos com agregados jigados apresentaram redução na variabilidade em relação aos concretos com agregados não submetidos ao equipamento. Porém, as resistências a compressão axial e tração por compressão diametral dos concretos com agregados jigados não obtiveram resultados relevantes para essa pesquisa.

Palavras-chave: Jigagem a seco. Concretos. Agregados Reciclados.  
Resíduos de Construção e Demolição. *Air jig*.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa.....	21
Figura 2 – Ruptura da aderência por cisalhamento em um corpo de prova de concreto submetido um ensaio de compressão uniaxial .....	28
Figura 3 – Interface pasta-agregado (zona de transição do concreto).....	29
Figura 4 – Fatores que influenciam no módulo de elasticidade.....	32
Figura 5 – Esquema da teoria potencial na jigagem.....	44
Figura 6 – Gabaritos da máquina separadora.....	46
Figura 7 – Britador de mandíbulas.....	47
Figura 8 – Série de peneiras com vibração mecânica.....	50
Figura 9 – Componentes do jigue pneumático.....	52
Figura 10 – Especificações do <i>air jig</i> .....	53
Figura 11 – Esquema de separação.....	54
Figura 12 – Câmara de estratificação com as gavetas abertas.....	55
Figura 13 – Câmara de estratificação antes do ensaio.....	55
Figura 14 – Agregado miúdo natural.....	56
Figura 15 – Agregado graúdo natural.....	56
Figura 16 – ARCD de concreto, cerâmica e argamassa.....	57
Figura 17 – ARCD de concreto, cerâmica e argamassa, combinados.....	57
Figura 18 – Retas de abatimento (10 +3 cm) para ajuste do traço.....	60
Figura 19 – Agregados submersos.....	64
Figura 20 – Agregados em processo de secagem.....	64
Figura 21 – Ensaio de abatimento.....	65
Figura 22 – Moldagem dos corpos de prova.....	65
Figura 23 – Ensaio de resistência à compressão.....	68
Figura 24 – Ensaio de resistência tração por compressão diametral.....	68
Figura 25 – Ensaio de módulo de deformação com extensômetro eletrônico.....	68
Figura 26 – Gráfico da resistência à compressão axial média dos ensaios.....	70
Figura 27 – Corpos de prova rompidos dos concretos.....	71
Figura 28 – Corpos de prova de concreto com ARCD de cerâmica e argamassa rompidos no agregado.....	71
Figura 29 – Influência dos ARCD de argamassa e cerâmicas nos resultados dos concretos jigados.....	73
Figura 30 – Resistência à compressão do concreto com agregados jigados x concretos compostos por agregados reciclados com mistura de referência.....	74

Figura 31 – Resultados dos módulos de elasticidade dos concretos.....	77
Figura 32 – Módulos de elasticidade dos concretos com agregados jigados x concretos com único tipo de agregado.....	79
Figura 33 – Módulo de elasticidade do concreto com agregados jigados x concretos com agregados de mesma proporção de referência.....	80
Figura 34 – Resultados de resistência à tração das amostras.....	83
Figura 35 – Resistência à tração dos concretos com agregados jigados x concretos com agregados de mesma proporção de referência.....	84
Figura 36 – Última camada da amostra A5 – 33%cc/33% ce/33% ar.....	85
Figura 37 – Última camada da amostra A7 – 60%cc/20% ce/20% ar.....	85
Figura 38 – Última camada da amostra A9 – 20%cc/20% ce/60% ar.....	85
Figura 39 – Grãos de argamassa na dimensão 19 mm e 4,75 mm.....	88
Figura 40 – Camada de fundo do ensaio com faixa granulométrica de 12,7 mm a 20mm.....	88
Figura 41 – Camada de fundo do ensaio com faixa granulométrica de 4,75 mm a 19,00mm.....	88
Figura 42 – Camada superior do ensaio com faixa granulométrica de 12,7 mm a 20mm	89
Figura 43 – Camada superior do ensaio com faixa granulométrica de 4,75 mm a 19 mm.....	89
Figura 44 – Início do ensaio com agregados na faixa granulométrica de 12,7 mm a 20 mm.....	89
Figura 45 – Fim do ensaio com agregados na faixa granulométrica de 12,7 mm a 20 mm.....	90
Figura 46 – Início do ensaio com agregados na faixa granulométrica de 4,75 mm a 19 mm.....	92
Figura 47 – Fim do ensaio com agregados na faixa granulométrica de 4,75 mm a 19 mm.....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição média dos resíduos de construção e demolição coletados do aterro de inerte da zona sul de Porto Alegre .....	25
Tabela 2 – Comparação de absorções de agregados.....	34
Tabela 3 – Série normal e intermediária de peneiras.....	37
Tabela 4 – Composição dos agregados e tipo de ensaios.....	50
Tabela 5 – Dados de absorção.....	57
Tabela 6 – Massa específica aparente das amostras.....	58
Tabela 7 – Proporcionamentos e abatimentos dos concretos.....	64
Tabela 8 – Massa específica aparente dos concretos com as amostras de agregados.....	65
Tabela 9 – Resistência à compressão axial média dos ensaios.....	67
Tabela 10– Análise de variabilidade da resistência à compressão.....	70
Tabela 11 – Resistência à compressão do concreto com agregados jigados x concretos compostos por agregados reciclados com mistura de referência.....	73
Tabela 12 – Resultado dos ensaios de módulo de elasticidade dos concretos.....	74
Tabela 13 – Análise de variabilidade dos módulos de elasticidade dos concretos.....	76
Tabela 14 – Módulo de elasticidade do concreto com agregados jigados x concretos com agregados de mesma proporção de referencia.....	79
Tabela 15 – Resultados de resistência à tração dos concretos ensaiados.....	80
Tabela 16 – Densidade aparente dos agregados reciclados.....	84
Tabela 17– Faixas granulométricas de aplicabilidade e critérios de concentração.....	85

## **LISTA DE SIGLAS**

ARCD – Agregados Reciclados de Construção e Demolição

RCD – Resíduos sólidos de Construção e Demolição

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f_{ck}$  – resistência característica do concreto a compressão (MPa)

$a/c$  – relação água/cimento (adimensional)

$R^2$  – coeficiente de determinação (adimensional)

CC – agregado reciclado de concreto

CE – agregado reciclado de cerâmica

AR – agregado reciclado de argamassa

(JIG) – amostras submetidas ao *air jig*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	18
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA.....	18
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA.....	18
2.2.1 Objetivo principal.....	18
2.2.2 Objetivo secundário.....	18
2.3 HIPÓTESE.....	19
2.4 PRESSUPOSTO.....	19
2.5 DELIMITAÇÕES.....	19
2.6 LIMITAÇÕES.....	19
2.7 DELINEAMENTO.....	19
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA</b> .....	23
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	23
3.2 INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	25
<b>3.2.1 Resistência</b> .....	26
<b>3.2.2 Módulo de elasticidade</b> .....	29
3.3 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS.....	31
<b>3.3.1 Massa específica e massa unitária</b> .....	32
<b>3.3.2 Absorção</b> .....	33
<b>3.3.3 Impurezas</b> .....	35
3.3.4 Granulometria.....	36
3.3.5 Forma e Textura.....	37
3.4 JIGAGEM.....	39
<b>3.4.1 Teoria da jigagem</b> .....	40
3.4.1.1 Teoria hidrodinâmica.....	40
3.4.1.1.1 <i>Sedimentação retardada diferencial</i> .....	40
3.4.1.1.2 <i>Aceleração diferencial</i> .....	41
3.4.1.1.3 <i>Consolidação intersticial</i> .....	42
3.4.1.2 Teoria potencial.....	42
<b>3.4.2 Uso do <i>air jig</i> na separação de ARCD</b> .....	43
<b>4 PLANO EXPERIMENTAL</b> .....	46
4.1 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE RESÍDUOS.....	46
4.2 BENEFICIAMENTO DOS RESÍDUOS.....	47

<b>4.2.1 Britagem</b> .....	47
<b>4.2.2 Peneiramento</b> .....	49
<b>4.2.3 Definição das amostras e separação dos agregados</b> .....	49
4.2.3.1 Composição das amostras e separação manual.....	49
4.2.3.2 Características do equipamento.....	51
4.2.3.3 Separação no <i>air jig</i> .....	53
<b>4.3 MATERIAIS UTILIZADOS E SUAS CARACTRÍSTICAS</b> .....	54
<b>4.3.1 Cimento</b> .....	54
<b>4.3.2 Agregados</b> .....	55
4.3.2.1 Agregado miúdo natural.....	55
4.3.2.2 Agregado graúdo natural.....	55
4.3.2.3 Agregado graúdo reciclado.....	55
4.3.2.4 Absorção dos agregados reciclados.....	56
4.3.2.5 Massa específica aparente.....	57
<b>4.3.3 Água</b> .....	59
<b>4.3.4 Aditivo</b> .....	59
<b>4.4 DOSAGEM EXPERIMENTAL</b> .....	59
<b>4.5 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS</b> .....	61
<b>4.6 CARACTERÍSTICAS AVALIADAS E MÉTODOS UTILIZADOS</b> .....	65
<b>4.6.1 Resistência à compressão axial</b> .....	65
<b>4.6.2 Resistência à tração por compressão diametral</b> .....	65
<b>4.6.3 Módulo de deformação</b> .....	65
<b>5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA CONCRETO PRODUZIDOS</b> .....	67
<b>5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO</b> .....	67
<b>5.1.1 Influência na resistência do concreto: agregados submetidos ao <i>air jig</i> x agregados reciclados isolados</b> .....	69
<b>5.1.2 Influência na resistência do concreto: agregados reciclados submetidos ao <i>air jig</i> x agregados reciclados com mistura de referência</b> .....	72
<b>5.2 MÓDULO DE DEFORMÇÃO DO CONCRETO</b> .....	74
<b>5.2.1 Influência no módulo de deformação do concreto: agregados submetidos ao <i>air jig</i> x agregados reciclado isolados</b> .....	76
<b>5.2.2 Influência no módulo de deformação do concreto: agregados submetidos ao <i>air jig</i> x agregados reciclados de referência</b> .....	77
<b>5.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL</b> .....	79
<b>5.3.1 Influência na resistência à tração dos concretos: agregados submetidos ao <i>air jig</i> x agregados reciclado isolados</b> .....	80

<b>5.3.2 Influência na resistência à tração dos concretos: agregados submetidos ao <i>air jig</i> x agregados reciclados com mistura de referência.....</b>	<b>82</b>
<b>5.4 RESULTADOS E INTERFERÊNCIAS DA SEPARAÇÃO DOS AGREGADOS NOS CONCRETOS PRODUZIDOS.....</b>	<b>83</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>90</b>
<b>6.1 CONCLUSÕES.....</b>	<b>90</b>
<b>6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>92</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>97</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Os resíduos gerados pelo mercado da construção civil têm um papel fundamental na poluição do meio ambiente, no esgotamento de aterros sanitários e também nas perdas financeiras por parte das construtoras. Um plano bem elaborado na gestão desses resíduos torna-se fundamental para uma engenharia mais sustentável do ponto de vista de recursos naturais e financeiros.

Com o crescimento da construção civil, sem dúvidas, há geração de mais empregos e movimentação da economia, devido ao maior número de empreendimentos lançados e aumento da escala de produção de materiais. Esse desenvolvimento é positivo, contudo também traz consequências, que são inerentes ao processo. Destacando-se, o maior uso de matérias-primas não renováveis, maiores gastos de energia na produção e transporte e a baixa eficiência na utilização de recursos. Em consequência desses fatores, recursos, de maneira geral, são desperdiçados. O desperdício de material dentre outras consequências está relacionado com a geração de resíduos sólidos de construção e demolição (RCD) (CORDEIRO, 2013, p. 21).

Segundo uma pesquisa realizada em 2012 foram recolhidos mais de 35 milhões de toneladas de RCD no Brasil. Esse dado é referente somente aos resíduos retirados de locais regulares, mas sabe-se que esse número pode ser bem maior, devido a descartes clandestinos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2012, p. 33).

De acordo com Cabral (2007, p 62), os descartes indevidos ocorrem em duas situações. A primeira situação seria do caso de pequenas empresas, que optam por não terceirizar o serviço de disposição final de seus resíduos, e acabam por depositá-los dentro da zona urbana. Com isso, são gerados problemas nos sistemas de drenagem das cidades, de poluição visual, de conturbações no tráfego de veículos e de poluição de corpos de água. Outra situação que pode ocorrer, fica por parte de algumas empresas contratadas por construtoras de maior porte para o transporte e disposição final dos resíduos. Essas empresas, em alguns casos, descartam os

resíduos clandestinamente, em função da grande distância entre as obras e os locais de disposição final.

Com vista nesses problemas, percebe-se que a melhor solução não é simplesmente o descarte em aterros sanitários. Além das falhas que pode haver nos processos os aterros têm vida útil, que pode ser curta dependendo da demanda. Em um futuro próximo, essas limitações tendem a acarretar grandes problemas para as empresas de construção civil, pela dificuldade de retirar legalmente seus resíduos das obras. Dessa maneira, a reciclagem do RCD ganha um importante destaque nesse cenário.

A reciclagem é a melhor alternativa para os resíduos sólidos da construção civil, pois resulta na redução do volume depositado em aterros, diminuindo os problemas atuais da política de gerenciamento de resíduos e também o consumo de bens naturais. Como consequência, há uma redução dos impactos ambientais, com diminuição de descartes clandestinos e aumento da vida útil dos aterros sanitários. Além de ganhos financeiros, por parte do mercado da construção, em função de uma gestão mais eficiente (LEITE, 2001, p. 4).

Com base nesses conceitos, é importante concentrar esforços na evolução da reciclagem de resíduos de construção e demolição, com a finalidade de produção de agregados para o uso em concretos, visto que esses têm potencial de reciclagem bastante amplo. Ainda, as minas de agregados naturais são esgotáveis, podendo ocasionar problemas de falta de suprimentos no mercado da construção civil. Porém, ainda há barreiras para o incentivo dessa prática. A principal seria a variabilidade desses agregados produzidos através da reciclagem de resíduos de construção e demolição.

Em decorrência disso, segundo Cabral (2007, p. 84), o uso de agregados reciclados na produção de concretos ainda é limitado. Em parte pela desconfiança de construtores e clientes em relação as suas características de desempenho, que realmente em alguns casos podem apresentar-se inferiores aos concretos convencionais. Contudo, o uso de agregados reciclados de construção e demolição (ARCD) na fabricação de concretos com propriedades mecânicas e durabilidades satisfatórias é plenamente viável, desde que se conheça e controle as variáveis atuantes, entre essas a variabilidade de seus constituintes.

Entre algumas propriedades dos concretos produzidos com ARCD, a resistência mecânica e o módulo de elasticidade são um importante entrave na sua utilização. Devido à variabilidade

do agregado de RCD, é muito difícil sua produção em larga escala, quesito essencial para o uso em estruturas de concreto armado para fins estruturais. Como efeito, torna-se indispensável o estudo de uma metodologia que possa viabilizar a produção de grandes quantidades, com confiança de que essas propriedades mecânicas requeridas sejam de fato as produzidas.

Dessa forma, esse trabalho dedica-se ao estudo da redução da variabilidade dos concretos produzidos com ARCD através do processo de separação por jigagem a seco. Esse método pode contribuir na melhoria das características dos concretos com diferentes agregados, através da separação por densidade desses materiais. Para verificação desse método foi necessário à montagem de um plano experimental, com etapas clássicas de beneficiamento dos agregados reciclados, como coleta, britagem e peneiramento (descritas no capítulo 4). Na etapa de jigagem foram feitos testes de separação de agregados reciclados no equipamento *air jig*, onde amostras foram retiradas para posterior uso na produção de concretos.

Os concretos confeccionados com agregados jigados tiveram suas propriedades mecânicas de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de deformação avaliadas. Assim, foi possível fazer análises da influência do processo nas características dos concretos com agregados jigados em relação aos concretos que não tiveram seus agregados separados no equipamento.

## **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: feita a separação de agregados reciclados de construção e demolição (ARCD), compostos por concretos, argamassas e cerâmicas, pelo processo de jigagem a seco, este é eficaz para diminuir a variabilidade das características dos concretos produzidos com esses agregados?

### **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 de redução da variabilidade de concretos produzidos com ARCD de concretos, argamassas e cerâmicas, em termos de resistência mecânica e módulo de elasticidade, em função do uso do equipamento *air jig* na separação dos agregados.

#### **2.2.2 Objetivos secundários**

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) analisar o processo de estratificação dos ARCD por jigagem a seco no equipamento *air jig*;
- b) avaliar o impacto nas propriedades mecânicas do uso das diferentes composições de ARCD nos concretos.

## 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é, se o processo de separação por jigagem a seco obtiver eficiência satisfatória, os concretos produzidos com agregados separados no *air jig* têm as propriedades de resistência mecânica e módulo de deformação menos variáveis entre si.

## 2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que em função dos métodos de ensaios e da moldagem dos corpos de prova ensaiados, a resistência mecânica e o módulo de elasticidade dos concretos obtidos não sofrem variações.

## 2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à utilização dos agregados de concretos, cerâmicas e argamassas, para o uso em concreto, separados por máquina específica, que tem por aplicação o processo de separação por jigagem a seco.

## 2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) os agregados utilizados no trabalho foram pré-separados e misturados nas proporções propostas;
- b) as possíveis impurezas contidas nos materiais utilizados não foram avaliadas de forma direta.

## 2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração/execução plano experimental,
  - recolhimento dos agregados utilizados no trabalho;
  - britagem e peneiramento dos agregados;

- seleção dos agregados para misturas propostas com diferentes proporções em massa;
  - separação dos agregados utilizando método de separação pneumática por meio do equipamento *air jig*;
  - produção dos concretos;
- c) ensaio dos corpos de prova,
- resistência à compressão;
  - resistência à tração;
  - módulo de elasticidade;
- d) análise dos resultados;
- e) conclusões do trabalho.

As etapas mencionadas estão representadas na figura 1 e descritas na sequência. Como ponto de partida para elaboração do trabalho foi realizada a etapa de **pesquisa bibliográfica** com o intuito de reunir o máximo de informações possíveis para servir de subsídio para a escolha dos agregados de construção e demolição (ARCD) a serem estudados nesse trabalho.

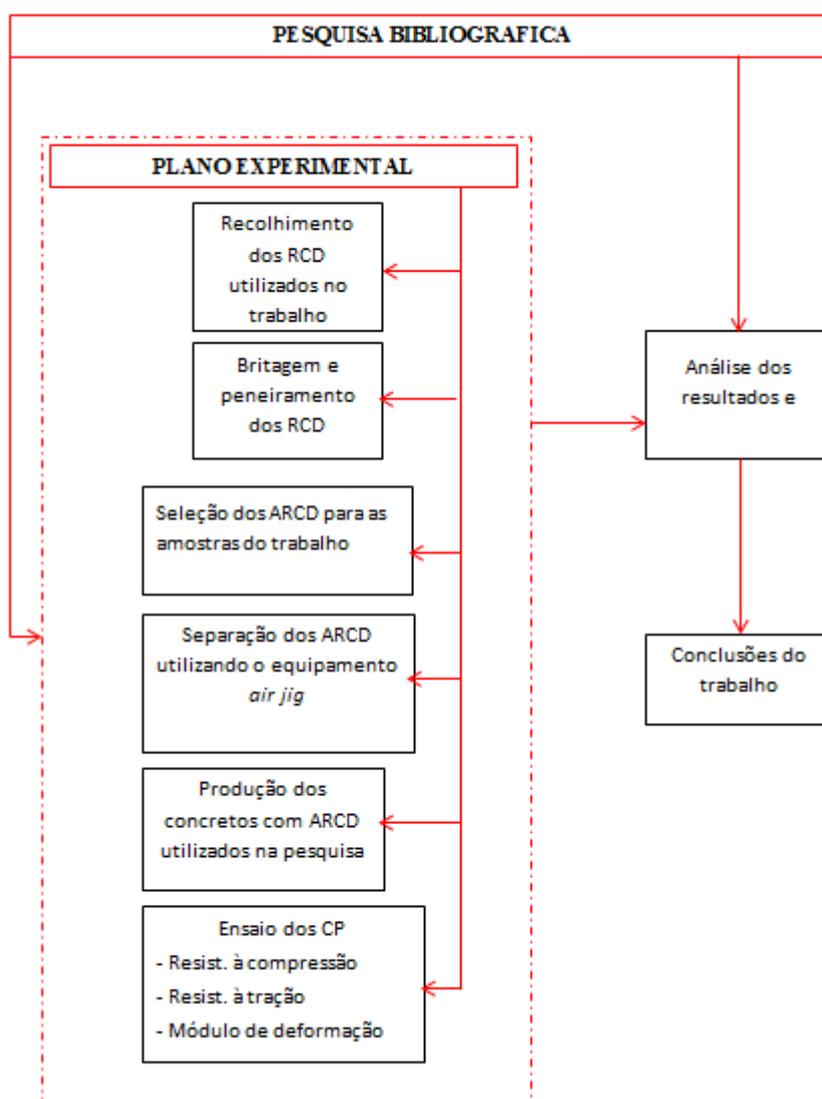
A partir da pesquisa, selecionaram-se para o estudo os ARCD de concretos, cerâmicas e argamassas por serem produtos de resíduos de construção e demolição de maior volume dentro do contexto da construção civil.

Um exemplo é a distribuição da composição média dos resíduos de construção e demolição coletados no aterro de inertes na zona sul de Porto Alegre, na qual concretos, cerâmicas e argamassas têm grande representatividade, apresentando cerca de 70% do volume total (LEITE, 2001, p. 127).

Escolhidos os tipos de ARCD, deu-se início ao plano experimental, com a **etapa de recolhimento dos agregados utilizados no trabalho**. As cerâmicas e os concretos foram doados por empresas que trabalham com esse tipo de material, as argamassas foram recolhidas de demolição.

Depois disso, a etapa seguinte caracterizou-se pela **britagem e o peneiramento dos agregados** nas dimensões típicas de agregados utilizados na dosagem de concretos convencionais.

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

Em sequência foi feita a **seleção dos agregados para as misturas propostas com diferentes proporções em massa**. Terminada a seleção, deu-se início à etapa seguinte, na qual os agregados misturados entre si foram colocados na máquina separadora, e pelo **método de separação pneumática**, houve a separação dos agregados. Os materiais após o procedimento estavam depositados em ordem crescente de densidade com os agregados mais densos na parte inferior da caixa. Com isso, após a separação foram recolhidos os agregados da ultima camada para as três misturas executadas. Em posse dos agregados já separados, a etapa seguinte tratou-se da **produção dos concretos com os ARCD e moldagem dos CP**. O próximo procedimento foi a execução dos **ensaios de resistência à compressão axial**,

**resistência à tração por compressão diametral e módulo de deformação** dos corpos de prova de concreto com idade de 14 dias.

Por fim, foram feitas as etapas de análise dos resultados e as conclusões do trabalho como um todo, com o objetivo de atender a questão da pesquisa do trabalho de diplomação.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

#### 3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A indústria da construção civil nos últimos dez anos sofreu grandes mudanças. Essas, possivelmente, estão relacionadas com o alto déficit habitacional, aliado às obras de infraestrutura, que foram alavancadas por uma melhora na esfera econômica do país. Em consequência disso, o Brasil tornou-se um grande gerador de resíduos.

Muitos fatores incidem na geração de resíduos. Pode-se dizer que a baixa qualidade dos produtos da construção é um desses, pois pode dar origem a desperdícios de materiais, que saem das obras em forma de entulho (LEITE, 2001, p. 1). O volume de resíduos gerados, ainda, é influenciado pela má qualidade da mão de obra e pelo mau gerenciamento de resíduos, por parte das construtoras e dos municípios.

Segundo Zordan (1997, p. 2) os resíduos de construção representam um alto valor dos resíduos sólidos nos municípios. Quanto maior o seu volume mais difícil é o seu gerenciamento em uma grande cidade, a situação ainda piora à medida que os aterros antigos estão sendo lotados e novos não são construídos.

De acordo com esse cenário algumas mudanças se fazem necessárias para o desenvolvimento das atividades da construção. A conscientização ambiental junto com a necessidade de redução de custos é uma corrente que entrou no país e acabou refletindo na construção civil. Com isso, novas práticas estão sendo incentivadas como a da reciclagem dos resíduos de construção. Alguns governos municipais estão optando pela implantação de usinas de reciclagem (LATTERZA, 1998, p. 2), embora ainda sejam poucas as empresas que trabalham com esse tipo de serviço. O maior progresso, que surgiu nos últimos anos, foi em 2002 com a implantação da Resolução 307 do conselho nacional do meio ambiente (Conama), que obriga as empresas públicas e privadas a implantar uma gestão de resíduos, visando políticas sustentáveis de reciclagem e beneficiamento (MIRANDA et al., 2009, p. 58).

Na Resolução 307 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002, p. 1) define-se resíduos de construção como:

[...] os resíduos da construção civil 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, calça ou metralha.

Como visto, os resíduos de construção são compostos por uma variedade de materiais, em função disso foram classificados na Resolução 307 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002, p. 1-2), nas seguintes classes:

- a) classe A: são resíduos reutilizáveis ou utilizados como agregados, tais como,
  - de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
  - de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: materiais cerâmicos (tijolo, azulejos, telhas, blocos, placas de revestimento, etc.) argamassas e concretos;
  - de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas de concreto (blocos, tubos, meio fios, etc.) produzidas nos canteiros de obra;
- b) classe B: são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papéis, papelão, metais, vidro, madeiras e outros;
- c) classe C: são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;
- d) classe D: são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Leite (2001, p. 127) caracterizou a composição média dos resíduos de construção e demolição do aterro de inertes da zona sul de Porto Alegre, e como pode ser visto na tabela 1, concretos, argamassas e cerâmicas, classificados como resíduos classe A, apresentam grandes proporções. Esses dados mostram que aproximadamente 70% desses materiais são classificados como recicláveis, ilustrando a quantidade de matéria-prima que poderia ser reaproveitada, mas é desperdiçada.

Os resíduos simplesmente depositados em aterros significam custos desnecessários e poluição ambiental, visto que as construtoras desembolsaram algum valor para sua aquisição. Por

consequente, quando esses produtos chegam aos aterros na forma de entulho, seu ciclo de vida econômico se encerra, só deixando o impacto ambiental. Se fossem reciclados, haveria novos produtos com valor agregado circulando no mercado.

Tabela 1 – Composição média dos resíduos de construção e demolição coletados do aterro de inerte da zona sul de Porto Alegre

Constituinte	Amostra 1	Amostra 2	Média
Argamassa	25,91	30,62	28,26
Concreto	15,88	14,49	15,18
Material cerâmico	25,89	26,77	26,33
Outros	32,32	28,12	30,23

(fonte: LEITE, 2001, p. 127)

Uma pesquisa mais recente aponta que houve um aumento na quantidade de RCD coletado no Brasil de 2011 para 2012. Em 2011 a taxa de RCD coletado foi de 106,549 t/dia, enquanto em 2012 foram de 112,248 t/dia, aumentando mais de 5% da quantidade coletada (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PUBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2012, p. 83). Assim, fica claro que à medida que a quantidade de resíduos aumenta de um ano a outro, cria-se um problema para os municípios tanto na esfera econômica, quanto na esfera ambiental. Com isso, as atenções aumentam em cima da possibilidade de reciclagem desses resíduos, contudo estudos são necessários para que isso aconteça de forma segura, sem que haja prejuízo para a qualidade dos produtos produzido com esses.

### 3.2 INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Segundo Mehta e Monteiro (1994, p. 21), o agregado tem influência direta e de grande importância nas propriedades do concreto, como massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional. Essas dependem fundamentalmente das características físicas do agregado, como a densidade e a resistência mecânica, que variam de acordo com o volume, tamanho e porosidade dos agregados constituintes do concreto. Outros fatores importantes nos agregados são as suas formas, texturas e granulometria. Neville e Brooks (c2013, p. 41) reforçam a importância do agregado, argumentando que esses não afetam somente a

resistência dos concretos, como também podem influenciar na durabilidade e no comportamento estrutural dos elementos.

### **3.2.1 Resistência**

A resistência de um material é a sua capacidade em resistir a tensões sem entrar no estado de ruptura. No caso do concreto a resistência é medida pela tensão máxima que o elemento suporta sem fraturar (MEHTA; MONTEIRO, 1994 p. 44). Neville e Brooks (c2013, p. 95) afirmam que geralmente a qualidade do concreto pode ser avaliada em virtude de sua resistência, por essa estar associada à estrutura da pasta. Quanto mais porosa a matriz da pasta, menor é a resistência do concreto. Ainda existem outros fatores que podem interferir na resistência, como os agregados, que podem possuir falhas em sua estrutura, e ainda podem causar microfissuras na zona de transição pasta-agregado.

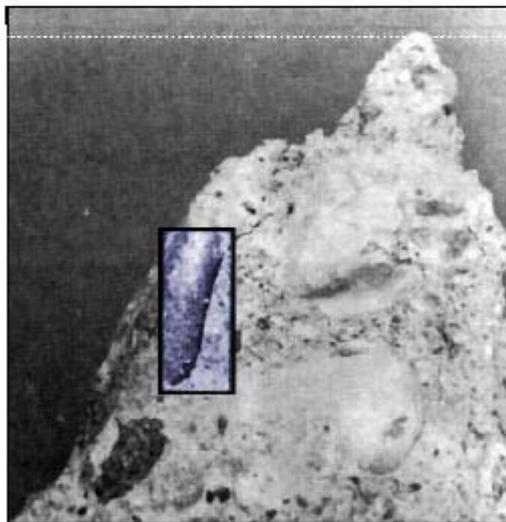
Para resistência do concreto, geralmente a porosidade é a característica de influência mais importante, por estar relacionada com outras propriedades como módulo de elasticidade, estanqueidade, impermeabilidade e resistência a agentes agressivos (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 44).

Como mencionado anteriormente, a resistência mecânica tem uma relação inversa com a porosidade da matriz da pasta. No entanto, como o concreto é um material heterogêneo e complexo, não sendo composto somente pela pasta, mas também pela zona de transição e por agregados, deve-se ter o cuidado de tratar da resistência somente por essa relação. As microfissuras da zona de transição entre o agregado gráudo e a pasta de cimento podem ser um fator limitante. Nos concretos que contenham agregados com baixa porosidade e alta resistência, a resistência mecânica é regida pela combinação das resistências da matriz da pasta de cimento e da zona de transição. Esse entendimento é fundamental, principalmente nas primeiras idades, já que por natureza, a zona de transição geralmente é menos resistente do que a matriz da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 45-46).

Nesse contexto, Mehta e Monteiro (1994, p. 22) explicam que o agregado, por ser geralmente mais resistente que as outras duas fases do concreto, não afeta de forma direta sua resistência mecânica, com exceção do caso de alguns agregados que podem ser muito fracos e porosos. O tamanho e a forma do agregado podem afetar a resistência do concreto de maneira indireta, pois, como mostra a figura 2, quanto maior o tamanho dos grãos e quantidade de partículas

alongadas, maior é a chance de algum filme de água se depositar próximo à superfície do agregado, ocasionando assim, o enfraquecimento da zona de transição, esse fenômeno é conhecido como exsudação interna. Essa situação propicia a fissuração da zona de transição, justificando a diminuição da resistência mecânica do concreto.

Figura 2 – Ruptura da aderência por cisalhamento em um corpo de prova de concreto submetido a um ensaio de compressão uniaxial



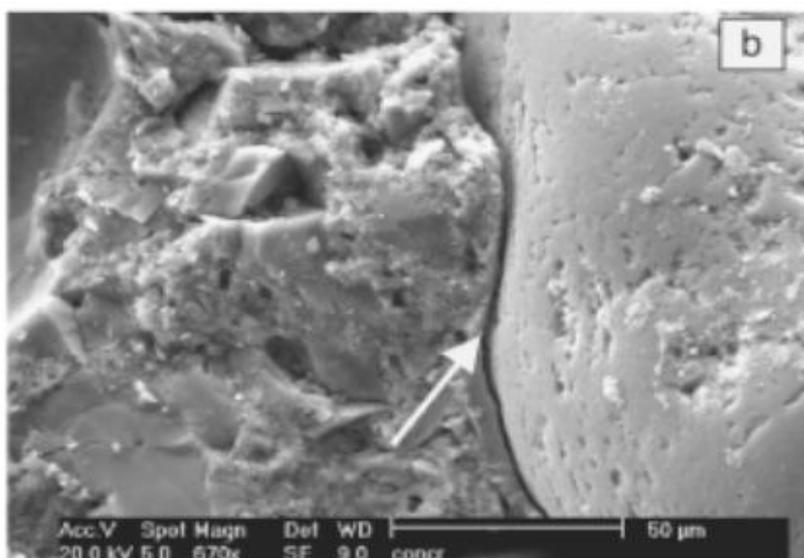
(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 22)

A relação água/cimento ( $a/c$ ) é uma relação das proporções de água e cimento adicionado à mistura. Foi comprovado que a resistência está relacionada diretamente à essa relação. Metha e Monteiro (1994, p. 47) afirmam que, a partir do entendimento das características que afetam a resistência da matriz da pasta de cimento no estado endurecido, e da dependência da relação  $a/c$  com a porosidade, a sua influência na resistência não é de difícil compreensão. Com o aumento da relação  $a/c$ , a matriz da pasta de cimento é enfraquecida, diminuindo a resistência em virtude do aumento da porosidade no seu interior. Essa afirmação também é válida para o caso de concretos de baixa e média resistência com agregados comuns, pois a relação  $a/c$  também interfere da mesma forma na porosidade da zona de transição.

Também devido à forma, textura e granulometria das partículas de agregados pode haver mudanças da relação  $a/c$ . Agregados com diâmetro máximo menor, para um mesmo consumo de cimento, precisam de mais água na sua mistura para ter uma mesma trabalhabilidade, podendo ocasionar redução na resistência do concreto. Por outro lado, conforme visto anteriormente, agregados maiores tendem a diminuir a resistência da zona de transição (figura

3). O efeito resultante na resistência é a sua variação com a relação a/c (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 51-52). De fato, é consenso que o fator a/c é a principal variável que influencia na resistência do concreto, visto que esse fator está relacionado diretamente com a porosidade de maneira geral (HELENE; ANDRADE, 2007, p. 923; MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 47; NEVILLE; BROOKS, c2013, p. 105).

Figura 3 – Interface pasta-agregado (zona de transição do concreto)



(fonte: PORTELLA et al., 2006, p. 733)

Também é importante destacar que ao tratar-se de concretos de alta resistência, os agregados podem afetar diretamente a resistência mecânica do concreto, pois como a argamassa desses concretos alcança altos valores de resistência, se o agregado for menos resistente em comparação à argamassa, esses se tornam o elo fraco da mistura, podendo acontecer o rompimento do agregado.

Em relação a agregados reciclados por serem geralmente menos resistentes podem influenciar diretamente na resistência mecânica do concreto, em alguns casos sendo um fator limitante nessa propriedade. Contudo, Leite (2001, p. 166-167) em seu trabalho obteve valores de resistência semelhantes ou até superiores aos concretos convencionais. Tal feito foi alcançado devido à compensação de água na mistura, pois os concretos com agregados reciclados necessitam de mais água para chegar a valores de abatimento iguais aos convencionais. Conforme a autora, as resistências dos concretos reciclados podem alcançar valores

satisfatórios, e dessa forma, afasta-se a ideia de que uso de agregados reciclados é inviável devido a suas características.

Leite (2001, p. 174-175) defende que os agregados reciclados apresentam maior rugosidade, que pode melhorar a aderência. Também possuem uma quantidade maior de finos e uma granulometria contínua que por sua vez ocasiona redução de vazios, menores chances de segregação e um melhor empacotamento. Em função disso, a matriz da pasta de cimento torna-se mais resistente. Também, devido a sua porosidade, as partículas de agregados podem absorver mais pasta de cimento, fazendo com que cristais de hidratação precipitem no interior dos poros dos agregados, melhorando o preenchimento na zona de transição, em consequência há um aumento na sua resistência. Contudo, deve-se atentar ao agregado graúdo, que dependendo da sua resistência, pode se tornar o elo fraco e acabar rompendo, causando a ruptura do concreto.

Outra característica que merece destaque, é que agregados reciclados muitas vezes apresentam mais de um material em sua composição. Cordeiro (2013, p. 31) afirma que agregados reciclados de concretos apresentam argamassas aderidas em suas partículas, que podem influenciar na resistência, no módulo de elasticidade e massa específica do concreto. De acordo com Cabral (2007, p. 93), essa influência na resistência de concretos é significativa para os casos em que se deseja produzir concretos com resistências mais elevadas, pois quanto maior a resistência do concreto que deu origem ao agregado, maior é a resistência do concreto produzido com esse.

Um dado animador em relação à resistência do concreto feito por agregados reciclados foi visto na pesquisa de Latterza (1998, p. 53), que conseguiu atingir valores superiores de resistência do concreto tanto à compressão quanto à tração, contento 50% em massa de agregados reciclados e 50% em massa de agregados naturais, em comparação com concretos convencionais que possuíam 100% de agregados naturais.

### **3.2.2 Módulo de elasticidade**

O concreto na realidade é um material viscoelástico, e não elástico como muitos pensam. A rigidez de um material é medida em função de suas características elásticas, mas apesar do concreto apresentar um comportamento não linear, o módulo de elasticidade (ou módulo de

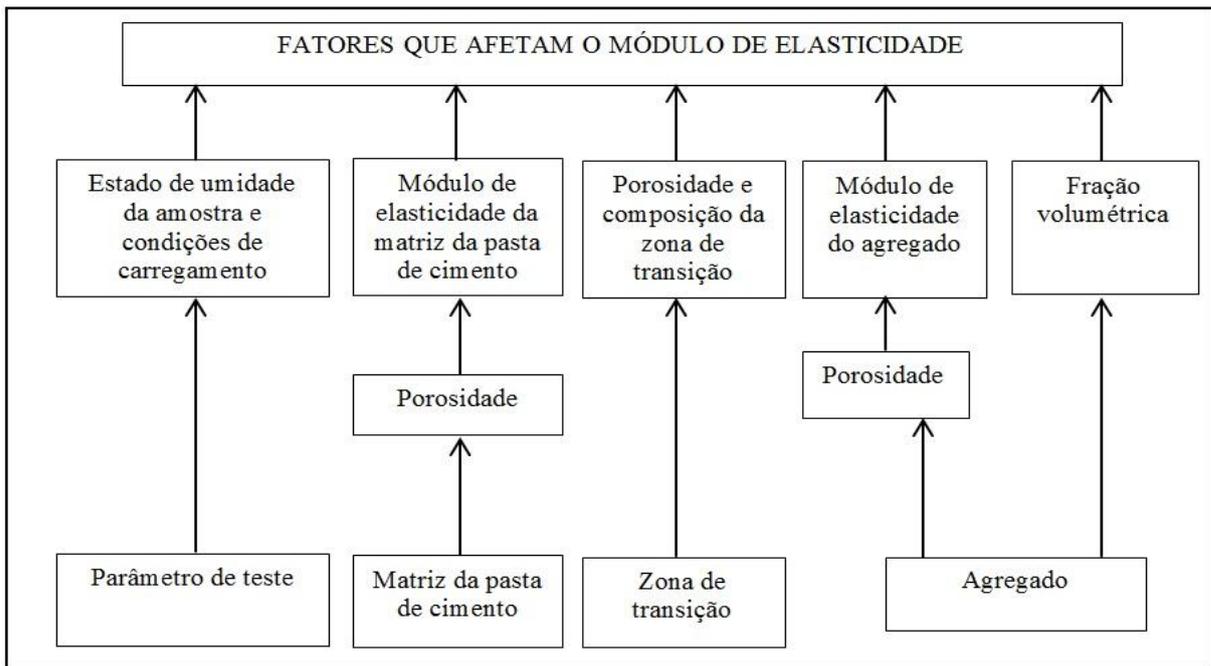
deformação) pode ser estimado. Esse possui uma relação entre a tensão aplicada ao material e deformação instantânea, em um limite proporcional estabelecido. O módulo de elasticidade é uma importante característica do concreto, pois é usado para calcular tensões, momentos e deformações em projetos de estruturas de concreto (MEHTA; MONTEIRO 1994, p. 83). Segundo Neville e Brooks (c2013, p. 211) o módulo de elasticidade é associado à resistência à compressão do concreto, com algumas ressalvas, como por exemplo, a influência das propriedades dos agregados no concreto. O módulo do agregado e sua proporção volumétrica regem o comportamento do módulo de elasticidade global do concreto. Quanto maior o módulo do agregado maior é o do concreto. Decorrente disso, no caso de agregados com valores de módulo de elasticidade maiores que o da pasta, quanto maior o seu volume na mistura maior é o módulo de elasticidade do concreto.

Metha e Monteiro (1994, p. 89) destacam que o módulo de elasticidade do concreto também é influenciado pelas características da zona de transição. A relação do módulo com a resistência à compressão do concreto fica evidente na medida em que os fatores que afetam o módulo são influenciados pela porosidade, que por sua vez afeta a resistência, mesmo sendo em intensidades diferentes. Em se tratando de agregados, sua porosidade é a característica que mais influencia no módulo de elasticidade do concreto, pois o agregado menos poroso apresenta maior rigidez, como efeito disso, acaba limitando as deformações da matriz. Entretanto, a porosidade do agregado não afeta significativamente a resistência do concreto para baixas e médias resistências.

Essa afirmação é reforçada por Ângulo (2005, p. 150-151) que coloca que nos seus testes o módulo de elasticidade sofreu grande interferência da porosidade dos agregados, que está relacionado com a massa específica. Outra observação importante foi que o módulo de elasticidade foi mais influenciado pela porosidade desses do que pela relação a/c da mistura em um intervalo de 0,4 a 0,67. Diferente da resistência à compressão que sofre maior interferência da relação a/c, que influencia na porosidade da matriz da pasta de cimento.

O esquema da figura 4 ilustra os vários fatores que podem afetar o módulo de elasticidade do concreto.

Figura 4 – Fatores que influenciam no módulo de elasticidade



(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 91)

### 3.3 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS

O concreto é um material usado desde a antiguidade pela humanidade no desenvolvimento de suas edificações, por ser um material que apresenta excelentes características de desempenho, entre essas, resistência mecânica, módulo de elasticidade, durabilidade, baixa permeabilidade, e disponibilidade de seus constituintes.

Com relação aos constituintes do concreto de cimento Portland, os agregados representam um papel essencial, tanto no volume como nas características do concreto.

Mehta e Monteiro (1994, p. 8, grifo do autor) definem:

O **agregado** é o material granular, tal como a areia, o pedregulho, a pedra britada ou escória de alto forno, usado como um meio cimentante, para formar um concreto ou uma argamassa de cimento hidráulico. O termo **agregado graúdo** se refere a partículas de agregado maiores do que 4,8 mm (peneira n<sup>o</sup>4) e o termo **agregado miúdo** se refere a partículas de agregado menores do que 4,8 mm, porém maiores que 75 µm (peneira n<sup>o</sup> 200). **Pedregulho** é o agregado graúdo resultante da desintegração natural e abrasão da rocha ou do processamento mecânico (britagem) de conglomerados fracamente cimentados.

Em relação à definição mencionada, as diferenças entre os agregados graúdo e miúdo não se trata somente das dimensões dos materiais, mas também em função de suas propriedades e principalmente do seu comportamento dentro da estrutura do concreto.

Muitas vezes não é dada a devida atenção aos agregados como é dada ao cimento no contexto de constituintes do concreto. Embora os agregados ocupem cerca de 60 a 80 por cento do volume da mistura, esses não são somente um material de enchimento, pois influenciam direta e indiretamente nas propriedades do concreto. Os agregados podem exercer influência na resistência, estabilidade dimensional e durabilidade do concreto, além de estarem diretamente relacionados com a trabalhabilidade das misturas de concreto (METHA; MONTEIRO, 1994, p. 240).

Em função da importância dos agregados nas propriedades do concreto, é fundamental o entendimento das influências e da forma que os diferentes tipos de agregados, entre eles, o ARCD, interferem no comportamento do concreto em sua estrutura como um todo.

### **3.3.1 Massa específica e massa unitária**

Os diferentes tipos de materiais usados como agregados, sejam esses naturais ou reciclados, possuem porosidades diferentes. Para o efeito de dosagem é imprescindível conhecer o volume ocupado pelas partículas de agregados, incluindo os poros internos existentes, além da massa dessas partículas. Com isso, é possível a determinação da massa específica, que é definida como a massa das partículas do agregado por unidade de volume. Outra informação necessária na dosagem de concretos é a massa unitária, que é definida como a massa das partículas do agregado por uma unidade de volume, incluindo os vazios. Essa propriedade está relacionada diretamente com o fenômeno de empacotamento, pois não é possível empacotar todas as partículas dos agregados juntas, sem que ocorram vazios entre elas, muito em função das formas dos agregados. (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 257).

Leite (2001, p. 67) afirma ser consenso que tanto a massa específica quanto a massa unitária dos agregados reciclados possuem valores menores que dos agregados naturais geralmente utilizados no concreto.

Essa diferença ocorre em função das diferentes matérias-primas dos agregados. No caso da massa específica a justificativa é que os agregados graúdos naturais são mais densos que os

agregados reciclados. No caso da massa unitária a alta porosidade dos agregados reciclados e as grandes irregularidades das partículas são fundamentais nessa diferença. (CABRAL, 2007, p. 82). Esta afirmativa fica clara sabendo que, geralmente, os agregados reciclados possuem mais poros que os agregados naturais. Nesse contexto para um mesmo volume de material, o que possuir mais poros tende a ter menor massa específica, ou o que tiver menor massa específica demanda maiores volumes na dosagem, sendo um fator negativo na utilização dos agregados reciclados. Dessa forma, Leite (2001, p. 71) conclui que há uma necessidade de compensação da quantidade utilizada de material reciclado, quando se utiliza traços em massa nas misturas de concretos convencionais feitos com agregados reciclados. Sem isso, para um mesmo traço de concreto produzido, ocorrem divergências entre os volumes do concreto convencional e o reciclado.

Segundo Cordeiro (2013, p. 34) os agregados reciclados de concreto com granulometria mais grossa possuem maior massa específica. Agregados reciclados de concreto com granulometrias mais finas possuem massa específica menor, pois no processo de britagem, quando a argamassa se desprende do agregado natural, devido a sua menor resistência, podem ocorrer quebras da argamassa em porções menores formando novos agregados de menores dimensões.

### **3.3.2 Absorção**

A absorção de água ou da umidade do meio pelas partículas de agregados é diretamente proporcional à porosidade existente no material utilizado. Por conseguinte, algumas propriedades do concreto, como a aderência entre os agregados e a pasta de cimento, resistência do concreto ao gelo-degelo, estabilidade química, resistência à abrasão e massa específica, são influenciadas pela porosidade, permeabilidade e absorção das partículas de agregados, visto que esses representam uma alta proporção no volume total do concreto. Existem poros internos e os poros em contato com a superfície, na qual pode haver a infiltração de água nas partículas. A quantidade e a velocidade da penetração de água no interior das partículas dependem do tamanho, continuidade e volume total de poros (NEVILLE; BROOKS, c2013, p. 53).

As partículas de agregado podem ser encontradas em diversos estados de umidade. Mehta e Monteiro (1994, p. 257, grifo do autor) classificam:

Quando todos os poros permeáveis estão preenchidos e não há nenhum filme de água na superfície, o agregado é dito estar na **condição saturada superfície seca (SSS)**; quando o agregado está saturado e também há umidade livre na superfície, o agregado está na **condição úmida ou saturada**. Na condição seca em estufa, toda a água evaporável do agregado foi removida pelo aquecimento a 100°C. **Capacidade de absorção** é definida como a quantidade total de água requerida para trazer um agregado da condição seca em estufa para condição SSS; **absorção efetiva** é definida como quantidade de água requerida para trazer o agregado da condição seca ao ar para condição SSS.

Neville e Brooks (c2013, p. 54) definem que a absorção de água é medida pelo decréscimo do percentual de massa de uma amostra saturada superfície seca depois da secagem em estufa por 24 horas. Com relação à absorção, Metha e Monteiro (1994, p. 58-59) destacam que as rochas ígneas intrusivas e sedimentares densas possuem baixa absorção, porém rochas sedimentares porosas, agregados leves e areias podem ter altos valores de absorção.

Os agregados graúdos naturais usados no concreto convencional geralmente têm valores de absorção baixos. Porém, quando o agregado utilizado for do tipo reciclado é necessário um cuidado especial na sua quantificação, devido a sua alta porosidade, com o objetivo de minimizar sua absorção (LEITE, 2001 p. 135). Cabral (2007, p. 133) observou que agregados reciclados de cerâmicas vermelhas apresentam maiores valores de absorção que agregados naturais, reciclados de concretos e argamassas. Isso é caracterizado devido ao processo de fabricação das cerâmicas. Já os agregados naturais, por serem mais compactos, apresentaram menores valores de absorção. A tabela 2 ilustra essas diferenças de absorção dos diferentes agregados.

Tabela 2 – Comparação de absorções de agregados

<b>Composição dos agregados</b>	<b>Absorção agregado graúdo</b>
Agregado reciclado de concreto	5,65%
Agregado reciclado de cerâmica vermelha	15,62%
Agregado reciclado de argamassa	9,52%
Agregado natural	0,42%

(fonte: CABRAL, 2007, p. 132)

### 3.3.3 Impurezas

A presença de impurezas no concreto é um problema que ocorre por vezes e é de complicada solução. Os agregados podem ser o agente de entrada para a intrusão dessas substâncias no concreto, que podem prejudicar sua resistência e durabilidade.

Os agregados podem apresentar excelentes propriedades mecânicas e mesmo assim em alguns casos não serem adequados para o uso em concreto, por exemplo, contiverem impurezas do tipo orgânicas, como decomposição da matéria vegetal em forma de humos, ou argilas orgânicas, pois essas substâncias têm efeitos no processo de hidratação (NEVILLE; BROOKS, c2013, p. 58).

A argila pode estar presente na forma de películas na superfície do agregado, prejudicando sua aderência com a pasta de cimento. Materiais finos e siltes podem estar presentes também na forma de material solto, o que é um problema, visto que sua grande área superficial demanda de mais água para molhagem (NEVILLE; BROOKS, c2013, p. 58-59).

Mehta e Monteiro (1994, p. 267-268) citam algumas das substâncias que podem causar efeitos deletérios ao concreto, como torrões de argila, linhito e partículas com massa específica menor que  $2400 \text{ kg/m}^3$ , que afetam a trabalhabilidade, a resistência à abrasão e durabilidade do concreto. Também existem substâncias que, se estiverem presentes nos agregados, podem gerar manifestações patológicas, como sulfeto de ferro, que pode causar uma reação expansiva e se for reativo e estiver presente em meio saturado de cal pode oxidar e formar sulfato ferroso, que causa ataque por sulfatos ao concreto e corrosão das armaduras. Outros tipos de sulfatos presentes nos agregados também podem gerar ataque por sulfatos. Além disso, deve-se ter preocupação com o tipo de agregado, se reativo aos álcalis do cimento podem causar a reação álcali-agregado.

Nesse contexto, como os ARCD encontram-se geralmente misturados com gesso, vidros e outros contaminantes, toda substância que estiver presente no agregado é motivo de alerta, necessitando a aplicação de testes para verificar o efeito dessas impurezas.

### 3.3.4 Granulometria

Composição granulométrica é o termo usado para a distribuição granular dos agregados em várias dimensões. Em virtude disso, “O processo de dividir uma amostra de agregado em frações de partículas de mesma dimensão é denominado análise granulométrica, e seu objetivo é determinar a graduação ou distribuição das dimensões do agregado.” (NEVILLE; BROOKS, c2013, p. 61).

Agregados que possuem uma distribuição granulométrica mais comportada, isto é, sem grandes dispersões de partículas maiores e menores, geram misturas de concretos mais econômicos e trabalháveis (HELENE; ANDRADE, 2007, p. 920; MEHTA; MONTEIRO, 2013, p. 261). Segundo Neville e Brooks (c2013, p. 63). O concreto para atingir uma boa resistência, necessita estar bem adensado, e para isso é necessário que possua trabalhabilidade satisfatória. O autor ainda destaca não existir uma granulometria ideal para atingir a trabalhabilidade perfeita, pois essa sofre influência de outras variáveis que atuam em conjunto com a granulometria, como a área superficial do agregado, que determina a quantidade de água na mistura, o volume ocupado pelos agregados, a tendência à segregação e a quantidade de finos da mistura.

A distribuição granulométrica dos agregados é obtida a partir de amostras ensaiadas em uma série de peneiras submetidas a vibrações e agitações por um tempo determinado. As peneiras são empilhadas de forma decrescente da maior abertura para a menor, com isso, frações do material vão sendo retidas nas diferentes peneiras. Essa quantidade retida representa a fração de material que é maior que a peneira na qual se encontra, mas menor que a peneira acima (NEVILLE; BROOKS, c2013, p. 61).

Segundo a NBR NM248, ficam estabelecidas as aberturas das séries de peneiras utilizadas para a determinação da composição granulométrica dos agregados, como mostra a tabela 3 a seguir (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 2).

Tabela 3 – Série normal e intermediária de peneiras

Serie normal	Série intermediária
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 $\mu\text{m}$	-
300 $\mu\text{m}$	-
150 $\mu\text{m}$	-

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 2)

Os agregados reciclados apresentam alta variabilidade na granulometria, em função das diferentes composições desses e do tipo de britador utilizado no processo de beneficiamento. Com isso, não é possível definir de forma genérica essa característica para os ARCD.

### 3.3.5 forma e textura

A forma e a textura dos agregados são mais importantes no estado fresco do concreto do que no estado endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 264). Mas, segundo Neville e Brooks (c2013, p. 44), a forma e a textura também influenciam no estado endurecido do concreto.

Na tentativa de entender como a forma e textura influenciam no concreto, é importante ter o conhecimento das formas existentes. De acordo com as características geométricas, a forma dos agregados pode ser descrita da seguinte maneira:

- a) **arredondado** – formado por atrito, as partículas tendem a ser arredondadas, também podem ser desgastadas pela ação das águas, ex.: areias de origem eólica, seixo de rios e pedregulhos de zonas marítimas;
- a) **anguloso** – possuem arestas bem definidas, ex.: pedras britadas de rochas intrusivas, talus e escória britada;

- c) **lamelar** – a espessura é menor que as outras dimensões, ex.: pedras britadas de calcário estratificado, de arenito e de folhetos;
- d) **alongado** – o comprimento é consideravelmente maior que as outras dimensões;
- e) **irregular** – formado pelo atrito com partículas arredondadas ou apresentam-se naturalmente irregulares.

Essa classificação é essencial para o entendimento do efeito que as diferentes formas dos agregados podem causar no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 266; NEVILLE; BROOKS, c2013, p. 44).

A NBR 7.809 define as características pelo índice de forma, que é a média da relação entre o comprimento e a espessura das partículas dos agregados, de acordo com limites estabelecidos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 2).

Segundo Neville e Brooks (c2013, p. 45), partículas com elevada relação entre a área superficial e seu volume, que é o caso de agregados com forma alongada e laminar, geram concretos com menor trabalhabilidade. As partículas lamelares também podem acumular água abaixo de sua superfície, prejudicando a durabilidade do concreto. Essa afirmativa é ratificada por Mehta e Monteiro (1994, p. 266), que recomendam que agregados com essa forma devem ser evitados, para partículas alongadas é feita uma recomendação de uso de no máximo 15% do agregado total.

A textura é a característica da superfície das partículas dos agregados. A sua classificação depende de quão áspero ou liso é a superfície (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 266; NEVILLE; BROOKS; c2013, p. 47).

Nas primeiras idades, a resistência do concreto, com destaque para resistência à flexão, pode ser afetada pela textura do agregado, pois a textura mais áspera parece proporcionar mais aderência entre o agregado e a pasta de cimento. Em idades mais avançadas, é menos relevante, devido à forte aderência química entre a pasta e o agregado (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 266). Neville e Brooks (c2013, p. 47) ainda afirmam que a textura é importante na trabalhabilidade, sendo que partículas mais angulares resultam em menor trabalhabilidade do concreto.

Sendo assim, com as informações obtidas, pode-se perceber que a forma e a textura das partículas podem influenciar no concreto de maneira geral, mais no estado fresco, mas deve-

se ter o cuidado para que suas características não gerem problemas no seu estado endurecido, como excesso de vazios abaixo das partículas do agregado, que podem diminuir sua resistência.

### 3.4 JIGAGEM

Segundo Sampaio e Tavares (p. 178, 2005), jigagem é um processo de separação hidráulica por meio de expansão e contração vertical de um leito de partículas pelo movimento pulsante da água, resultando na estratificação do leito por camadas em ordem crescente de densidade do fundo ao topo do jigue.

Embora a jigagem tenha na sua origem a água como meio fluido, esse método está inserido no processo de separação gravimétrica que pode ser realizada a úmido ou a seco, com o ar como meio de separação. Dentre outras situações, o processo a seco é utilizado nos casos em que a molhagem dos materiais interfere no beneficiamento desses (SAMPAIO; TAVARES, p.340, 2005).

O método utilizando o ar como fluido apresenta alguns ganhos em relação ao que utiliza água, como a não necessidade das etapas de filtragem e secagem. Dessa forma, a geração de efluentes líquidos é eliminada. Outra vantagem é a alta capacidade de separação, visto que as partículas no ar sedimentam 100 vezes mais rápido do que na água (SAMPAIO; TAVARES, p.340, 2005). Porém, o procedimento também apresenta limitações. Dentre as desvantagens estão, a baixa precisão e a alta sensibilidade à umidade. A eficiência do processo de concentração pneumática também é menor se comparada ao processo a úmido. Além disso, o sucesso do método sofre influência do tamanho das partículas, tendo redução com a diminuição da granulometria. Também é necessário que os materiais que se deseja separar tenham uma considerável diferença de densidade (ZHENFU; QINGRU<sup>1</sup>, 2001 apud SAMPAIO;TAVARES, 2005, p. 341). A utilização de equipamentos de concentração pneumática iniciou em 1916 nos Estados Unidos para o beneficiamento de carvão mineral (ARNOLD et al.<sup>2</sup>1991 apud SAMPAIO;TAVARES, 2005, p. 340). A partir daí, a separação a

---

<sup>1</sup> ZHENFU, L., QINGRU, C., Dry beneficiation technology of coal with an air dense-medium fluidized bed. **International Journal of Mineral Processing**, Reading, v. 63, n. 3, p. 167-175, Nov. 2001.

<sup>2</sup> ARNOLD, B. J., HERVOL, J. D., LEONARD III, J. W., Dry particle concentration. In: LEONARD III, J.W (Ed.). **Coal Preparation**. 5nd. ed. Littleton: SME, 1991. p. 486-496.

seco na indústria carbonífera ganhou grande importância, sendo o principal processo de beneficiamento, mas posteriormente caiu em desuso, representando menos de 2% do carvão beneficiado nos Estados Unidos (ARNOLD et al.<sup>3</sup>, 1991 apud SAMPAIO; TAVARES, 2005, p. 341). O beneficiamento por meio de separação gravimétrica a seco na indústria possui varias aplicações como, por exemplo, de woframita, cromita, zircão, areias em geral, diamantes, mica, entre outros. Também tem aplicação na reciclagem de metais (VEASEY et al.<sup>4</sup>, 1993 apud SAMPAIO; TAVARES, 2005).

Nesse trabalho a aplicação do jigue pneumático é voltada para separação de ARCD, em função dos diferentes tipos de materiais encontrarem-se misturados entre si no ambiente.

### 3.4.1 Teoria da jigagem

Existem duas teorias que tentam explicar o processo de separação na jigagem. A teoria hidrodinâmica tenta descrever a partir do comportamento de partículas individuais no fluido, já a teoria da energia potencial, descreve o comportamento do leito como um todo (SAMPAIO; TAVARES, 2005, p.180).

#### 3.4.1.1 Teoria hidrodinâmica

Gaudin<sup>5</sup> (1939, apud SAMPAIO; TAVARES, 2005, p.181), usando a teoria hidrodinâmica, sugeriu que a estratificação na jigagem pode ser descrita como resultado da combinação de três efeitos principais: a sedimentação retardada diferencial, a aceleração diferencial no inicio da queda e a consolidação intersticial durante a sucção.

##### 3.4.1.1.1 Sedimentação retardada diferencial

Segundo Sampaio e Tavares (2005, p. 181), uma partícula em sedimentação livre em um fluido é acelerada por certo período de tempo pela ação da força da gravidade, a velocidade aumenta até um valor máximo, chamada de velocidade terminal. Com base nesse conceito,

---

<sup>3</sup> Op. cit.,

<sup>4</sup> VEASEY, T. J., WILSON, R. J., SQUIRES, D. M. **The physical separation and recovery of metals from wastes, series process Engineering for the chemical, metals and minerals industries**. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1993.

<sup>5</sup> GAUDIN, A.M. **Principles of mineral dressing**. New York: McGraw-Hill Book Company Inc, 1939.

Rittinger<sup>6</sup> (1980, apud SAMPAIO; TAVARES, 2005 p. 181) desenvolveu o conceito de razão de sedimentação, igualando as velocidades de sedimentação de duas partículas diferentes (equação 1).

$$\frac{dl}{dd} = (pd - pl)/(pl - pa) )^q \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

dl = dimensão das partículas leves

dd = dimensão das partículas densas

pl = densidade aparente das partículas leves

pd = densidade aparente das partículas mais densas

pa = densidade aparente da suspensão

q = fator que o valor depende do regime de escoamento, 1 para regime de Newton e 0,5 para o regime de Stokes

A razão de sedimentação corresponde ao quociente dos tamanhos de partículas de dois minerais que apresentam a mesma velocidade terminal de sedimentação: quanto maior a razão de sedimentação, mais fácil é a separação das partículas por densidade (SAMPALIO; TAVAREZ, 2005, p.181).

#### 3.4.1.1.2 Aceleração diferencial

Nos jigues e outros equipamentos de separação gravimétrica as partículas sofrem influência das paredes e de outras partículas. Assim podem mover-se em distâncias curtas e em pequenos espaços de tempo antes de serem desviadas. Em consequência, as partículas sofrem inúmeras acelerações e desacelerações, podendo ter seu período de aceleração ocupando boa parte do período total de deslocamento (LINS, 2004, p. 241). Um aspecto importante é que a aceleração diferencial no início do movimento depende de maneira única da densidade das partículas. Com isso a separação por esse mecanismo não leva em conta o tamanho dos grãos. A granulometria ganha importância com o aumento do tempo de sedimentação,

<sup>6</sup> RITTINGER, P. V. **Lehrbuch der Aufbereitungskunde**. Berlin: Ernst und Korn, 1870.

hipoteticamente para um tempo infinito, a influência do tamanho dos grãos torna-se igual ao caso da sedimentação diferencial em velocidade terminal. Portanto, para que a separação das partículas ocorra mais em função da aceleração diferencial do que da velocidade terminal, é necessário que o tempo de movimento seja pequeno e ocorra em muitos ciclos de deslocamentos (SAMPAIO; TAVARES, 2005, p.182).

#### *3.4.1.1.3 Consolidação intersticial*

As partículas no jigue não percorrem a mesma distância em cada período de queda que são submetidas, e também entram em repouso em diferentes instantes (BARCELOS, 2010, p.16). Os grãos maiores, em função de suas maiores velocidades de sedimentação, irão alcançar posições de repouso, seja sobre o crivo do jigue ou outras sobre partículas previamente depositadas antes das partículas finas. Contudo, a existência de vazios entre as partículas grossas pode fazer com que as partículas finas percolem por essas, continuando a sedimentação. Esse é o mecanismo denominado consolidação (ou percolação) intersticial, a sua quantificação é de alta complexidade (SAMPAIO; TAVARES, 2010, p. 182).

#### 3.4.1.2 Teoria potencial

Mayer<sup>7</sup> (1964, apud BARCELOS, 2010, p.17) indicou que existe uma diferença de energia potencial gravitacional dos estados totalmente misturados e estratificados com relação à densidade, e essa diferença de energia é a responsável pela separação.

A teoria potencial afirma que todo leito de partícula possui uma energia potencial, com a dispersão do leito e redistribuição de partículas de diferentes densidades, essas se movem no sistema em busca de um rearranjo de energia mínima, resultando na estratificação das partículas (BARCELOS, 2010, p.17). Segundo Sampaio e Tavares (2005, p. 186), quanto maior a diferença de densidade dos componentes e mais próximas as suas proporções volumétricas, mais fácil será a separação no jigue.

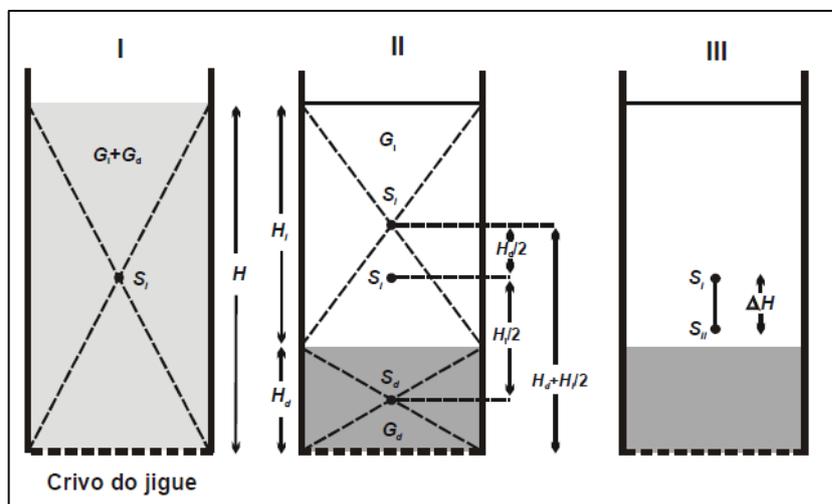
Barcelos (2010, p. 17-18) considera as seguintes situações hipotéticas: a primeira se caracteriza por um leito de altura H com partículas de diferentes densidades. As partículas leves apresentam peso G1 e as mais pesadas G2, distribuídas homoganeamente em relação à proporção, essas apresentam um único centro de gravidade H/2. A segunda situação é com os

---

<sup>7</sup> MAYER, F.W., 1964. Fundamentals of potential theory of the jiggling process. In: INTERNACIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 7th., 1964, New York. *Anais...* New York: Gordon and Breach, 1964. p. 75-86.

leitos estratificados apresentando dois centros de gravidade  $H_1$  e  $H_2$ , correspondentes aos centros dos diferentes componentes (figura 5).

Figura 5 – Esquema da teoria potencial na jigagem



(fonte: MAYER, 1964<sup>8</sup>apud. SAMPAIO; TAVARES, 2005.)

A diferença de energia potencial entre os dois estados fornece a energia disponível para a estratificação de uma mistura binária. Essa variação de energia é positiva e resulta no rebaixamento do centro de gravidade do sistema. Isso mostra que um sistema com mistura homogênea é instável e tende a buscar o estado estável, justificando a estratificação pela redução da energia potencial do sistema (BARCELOS, 2010, p.18).

De maneira geral, é consenso entre os autores que a jigagem é um método complexo que possui muitas variáveis que interferem no processo de separação dos materiais. Entre essas, podem-se citar a densidade, a granulometria e a forma das partículas dos diferentes materiais.

### 3.4.2 Uso do *air jig* na separação de ARCD

O método de separação pneumática com *air jig* na separação dos ARCD, vem sendo testado com o objetivo da diminuição da variabilidade da composição dos agregados reciclados. Segundo Cazacliu et al. (2014, p. 53, tradução nossa) a variabilidade do RCD limita o seu

<sup>8</sup> MAYER, F.W., 1964. Fundamentals of potential theory of the jigging process. In: INTERNACIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 7th., 1964, New York. *Anais...* New York: Gordon and Breach, 1964. p. 75-86.

processo de reciclagem, principalmente quando se deseja produzir concretos de qualidade. As principais dificuldades encontradas seriam a separação de contaminantes, como o gesso, e a separação de materiais menos densos, como certas cerâmicas, que vêm misturadas junto a materiais de melhor qualidade, como resíduos de concretos.

Em uma pesquisa realizada, Cazacliu et al. (2014, p. 53, tradução nossa) conseguiram bons resultados com a utilização do *air jig* na separação de agregados reciclados. A pesquisa tinha como objetivo separar partículas de concreto das partículas de gesso e cerâmica, que continha 22% e 24%, respectivamente de proporção em massa. As partículas possuíam de 4 mm a 20 mm de tamanho, dimensões típicas de agregados usados na Europa. Após a separação verificou-se que a camada do terço inferior apresentava menos de 1% de gesso e mais de 90% em massa de partículas de concreto, na camada do terço superior ocorreu o contrário, apresentava aproximadamente 80% em massa de gesso. A separação parece ser regida pela densidade das partículas dos diferentes materiais.

Segundo Cazacliu et al. (2014, p. 52, tradução nossa) o processo de separação funciona da seguinte forma: a máquina é composta por gabaritos na qual se encontram os materiais, como ilustra a figura 6. Nesses gabaritos são injetados simultaneamente dois fluxos de ar, o primeiro fluxo causa uma expansão nos leitos de materiais e o segundo fluxo serve para vibrar os materiais. Esse mecanismo permite a estratificação das partículas de tal forma que essas se depositam por ordem crescente de densidade da parte superior para a inferior. Tanto as densidades individuais, como a densidade do volume dos três materiais interferem no processo. No ensaio verificou-se que havia gesso nas regiões próximas às paredes. Esse efeito de parede não é muito importante, visto que em escala industrial, devido às grandes dimensões do equipamento, o efeito não apresenta relevância. Os fluxos de ar também podem ser calibrados, de acordo com o operador, para melhor estratificação do material. O método, como mencionado antes, apresentou bons resultados, mas possui certas limitações que podem requerer algumas adaptações. Por exemplo, não foram feitos experimentos com resíduos vindos diretamente de obras, da qual entre esses podem existir materiais farelentos e com densidades medianas, que podem dificultar a separação.

De acordo com Cazacliu et al. (2014, p. 51, tradução nossa), o método de separação pneumática, possui um tempo necessário para estabilização dos fluxos de ar, que ocorre de 30 a 60 segundos. Na separação entre partículas de concretos e tijolos, fez-se necessário a

britagem para que as dimensões das partículas dos materiais não influenciassem nas suas densidades. Também se percebeu que para partículas mais finas que 2/5 mm, deve-se ter uma atenção especial para se alcançar os mesmos resultados das granulometrias maiores. Como limitação do método, pode-se destacar que partículas com densidades muito próximas são de difícil ou impossível separação.

Figura 6 – Gabaritos da máquina separadora



(fonte: CAZACLIU et al., 2014, p. 49)

## 4 PLANO EXPERIMENTAL

Nessa etapa do trabalho buscaram-se identificar quais as principais variáveis a serem estudadas e seus métodos de ensaio. Para isso, partiu-se da análise das características mais importantes do concreto que são de interesse de mercado. Dessa forma, o estudo foi direcionado para analisar o comportamento do concreto produzido com ARCD em relação a sua resistência mecânica e módulo de deformação, pois são uns dos principais parâmetros de projeto em termos técnicos e econômicos. O plano experimental abrange desde a coleta dos resíduos, beneficiamento, separação e seu uso em concretos. Essa fase foi uma das mais importantes do trabalho, pois através dos resultados obtidos em função da prática experimental, dados de pesquisa foram gerados propiciando maior entendimento sobre o tema, fato que pode ser útil também para futuras pesquisas na área.

### 4.1 COLETA DAS AMOSTRAS DE RESÍDUOS

Tendo definido as variáveis de pesquisa, outra etapa importante foi o recolhimento e caracterização do material utilizado para o beneficiamento do RCD. Buscaram-se materiais com uma boa representatividade da quantidade de resíduos sólidos depositados em aterros sanitários, mas, também, com diferentes características. Desde materiais mais frágeis como a argamassa, mais porosos como as cerâmicas e de maior resistência como o concreto, com o objetivo de expor bem a variabilidade desses. Os resíduos foram coletados separadamente, não contendo grandes impurezas ou misturas de outros materiais.

Os resíduos de concreto foram fornecidos em forma de corpos de prova, com fck de 20 MPa a 35 MPa, por uma empresa especializada em controle tecnológico de concreto, localizada em Porto Alegre. Na sua composição continha agregado graúdo de origem granítica e basáltica. Foi recolhida uma quantidade aproximada de 500 kg desse resíduo.

Os resíduos cerâmicos foram recolhidos de obras localizadas na cidade de Porto Alegre, cerca de 200 kg, e tinham por característica uma mistura de tijolo seis furos e bloco cerâmico estrutural.

Por fim, foram recolhidos 300 kg de argamassa dos resíduos gerados da reforma da fachada do prédio novo da engenharia da UFRGS. Ao total, a coleta dos resíduos resultou em torno de 1 tonelada, fator importante de ser mencionado pois não se teve grandes dificuldades na aquisição desses materiais, expondo a grande quantidade de resíduos que são gerados na construção civil.

## 4.2 BENEFICIAMENTO DOS RESÍDUOS

### 4.2.1 Britagem

O processo de cominuição do tamanho das partículas é uma das etapas mais importantes no beneficiamento dos resíduos, e em grandes demandas consome elevada quantidade de energia e peças dos equipamentos, em consequência do desgaste gerado. Em escala industrial possui um alto custo devido a esses fatores (LOVATO, 2007, p. 29).

As etapas de cominuição podem ser compostas por britagem e moagem. Neste trabalho foi feita a britagem dos RCD para atingir uma faixa granulométrica característica de agregados graúdos usados em concreto. O britador utilizado no trabalho foi do tipo mandíbula (figura 7), o qual é composto por duas mandíbulas, uma fixa e a outra móvel, com superfície contendo ranhuras de pouca profundidade. Na parte inferior do britador há um recipiente do qual se retira o material britado. Seu funcionamento consiste no movimento da mandíbula móvel em direção à mandíbula fixa, em função de um mecanismo de roldadas que ao oscilar aciona o movimento, fazendo o tritramento do material depositado entre as mandíbulas. Nesse tipo de britador percebeu-se que o ajuste da distância entre as mandíbulas influenciava significativamente no tamanho das partículas britadas. Como no equipamento disponibilizado não foi possível fazer o ajuste ideal, em alguns momentos, fez-se necessário uma segunda britagem dos materiais para se alcançar o tamanho desejado das partículas antes do peneiramento.

Figura 7 – Britador de mandíbulas



(fonte: foto do autor)

Verificou-se que a britagem de materiais cerâmicos gerou grãos mais lamelares e alongados, enquanto, resíduos de concreto geraram partículas angulares. A argamassa também apresentou como resultado grãos angulares, porém com certa fragilidade, ocasionando a quebra de algumas partículas, tendo como subproduto grãos mais finos e pulverulentos. Nessa etapa, constatou-se também que grandes volumes de rejeitos foram gerados. Parte do material britado não estava dentro dos padrões da pesquisa. Mas essa quantidade variou em relação aos tipos de resíduos. Na britagem as argamassas geraram um grande volume de grãos passante na malha de peneira #4,8 mm, ou seja, dimensões características de agregados miúdos. Os concretos e as cerâmicas, por vezes, tiveram que passar por uma segunda etapa de britagem por motivos diferentes. Os primeiros continham muitas partículas acima da dimensão máxima de 19 mm, e as cerâmicas continhas grãos excessivamente alongados.

#### **4.2.2 Peneiramento**

Após a britagem foi feito o peneiramento mecânico dos materiais com malhas contidas na série normal de peneiras segundo a NBR NM248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), descrita na tabela 3 no item 3.3.5. A faixa granulométrica dos agregados foi de grãos passantes na peneira de malha # 19 mm e retidos na malha # 4,8 mm. Após o peneiramento, os agregados reciclados apresentavam visualmente uma granulometria contínua.

Figura 8 – Série de peneiras com vibração mecânica



(fonte: foto do autor)

### 4.2.3 Definição das amostras e separação dos agregados

#### 4.2.3.1 Composição das amostras e separação manual

Após o peneiramento dos agregados se definiu as diretrizes em termos de composição e proporção das misturas dos agregados. Com isso, o trabalho foi dividido em nove amostras de agregados quantificadas em massa (tabela 4) sendo essas;

- a) amostra 1 – ARCD de concreto;
- b) amostra 2 – ARCD de material cerâmico;
- c) amostra 3 – ARCD de argamassa;
- d) amostra 4 – ARCD com 33% de concreto, 33% de cerâmica e 33% de argamassa;
- e) amostra 5 – ARCD com 33% de concreto, 33% de cerâmica e 33% de argamassa, submetida à separação no equipamento *air jig*;
- f) amostra 6 – ARCD com 60% de concreto, 20% de cerâmica e 20% de argamassa;
- g) amostra 7 – ARCD com 60% de concreto, 20% de cerâmica e 20% de argamassa, submetida à separação no equipamento *air jig*;

- h) amostra 8 – ARCD com 20% de concreto, 20% de cerâmica e 60% de argamassa;
- i) amostra 9 – ARCD com 20% de concreto, 20% de cerâmica e 60% de argamassa, submetida à separação no equipamento *air jig*.

Tabela 4 – Composição dos agregados

Composição dos agregados	Quantidade submetida à separação no jig	Quantidade da última camada utilizada na produção dos concretos	Quantidade separada manualmente utilizada na produção dos concretos
A0 - 100% NATURAL	–		15
A1 - 100% CC	–		15
A2 - 100% CE	–		15
A3 - 100% AR	–		15
A4 - 33%CC/33%CE/33%AR	–		15
A5 - 33%CC/33%CE/33%AR (JIG)	45	15	
A6 - 60%CC/20%CE/20% AR	–		15
A7 - 60%CC/20%CE/20% AR (JIG)	45	15	
A8 - 20%CC/20%CE/60% AR			15
A9 - 20%CC/20%CE/60% AR (JIG)	2x45	15	
<b>CC - agregado reciclado de concreto</b>			
<b>CE - agregado reciclado de material cerâmico</b>			
<b>AR - agregado reciclado de argamassa</b>			
<b>(JIG) - amostras separadas pelo equipamento <i>air jig</i></b>			

(fonte: elaborado pelo autor)

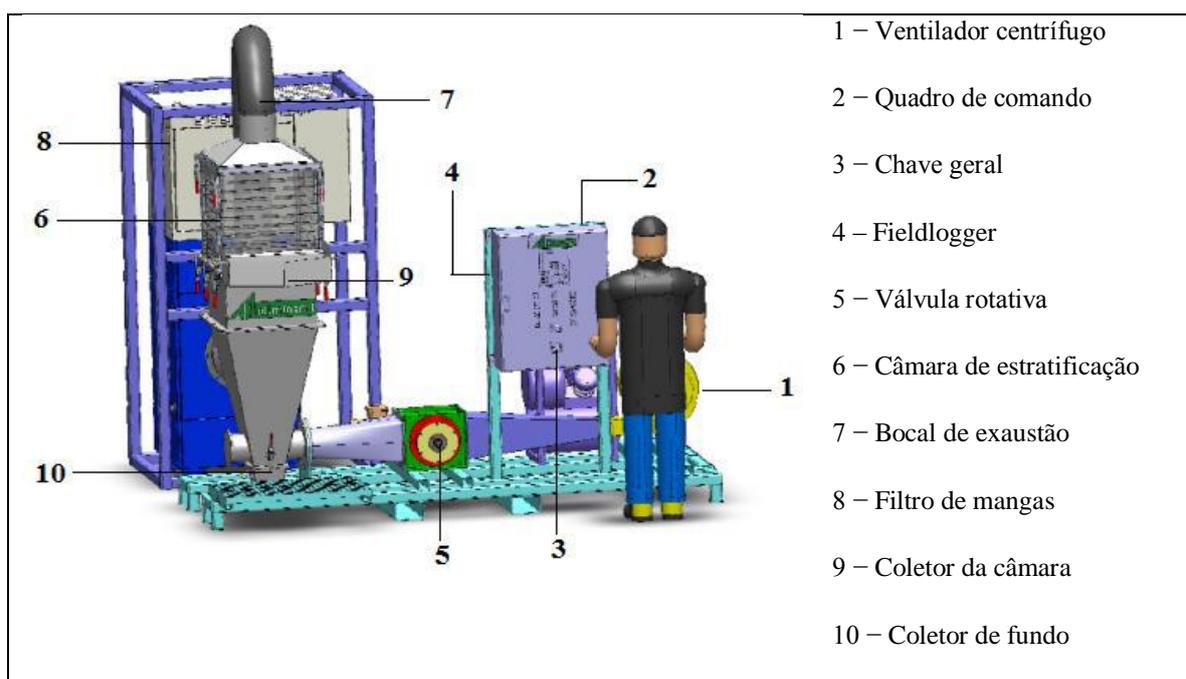
A etapa de separação dos agregados para o posterior uso na confecção dos concretos para fins de ensaio foi feita de duas maneiras, de forma manual e pelo equipamento *air jig*, localizado no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) da UFRGS, situado em Porto Alegre. A quantidade separada foi de 15 kg por amostra, o necessário para compor o traço calculado do concreto e também capaz de produzir o volume para atender à demanda da pesquisa. Nas amostras A1, A2 e A3 foi feita somente a separação manual de 15 kg para posterior produção do concreto, pois essas representam os agregados reciclados na sua forma individual, ou seja, uma referência para a análise em termos de comportamento das características do concreto produzido com os diferentes tipos de agregados. Para as amostras A4, A6 e A8 os agregados foram misturados em diferentes proporções dos materiais e com diferentes enfoques. A amostra A4 é intermediária com uma divisão igualitária dos diferentes tipos de agregados. Já na amostra A6 foi dada prioridade para os ARCD de concreto, em função da sua maior resistência. O contrário foi feito na amostra 8, onde os ARCD de argamassa se apresentavam em maior quantidade, representando o agregado de menor resistência. A principal função das

amostras de referência com diferentes proporções foi servir de base de dados para avaliação da influência do método de separação pneumática nas características do concreto. Visto que, as amostras A5, A7 e A9 submetidas ao equipamento tinham inicialmente a mesma proporção das amostras A4, A6 e A8, que não foram ensaiadas no *air jig*.

#### 4.2 3.2 Características do equipamento

O jigue pneumático ou *air jig* utilizado nessa pesquisa é um equipamento em escala planta piloto utilizado na separação de diversos minerais como, por exemplo, carvão e folheto. A máquina foi utilizada com o objetivo de separar diferentes tipos de ARCD, argamassa, cerâmica e concreto. O equipamento possui 10 componentes básicos para seu funcionamento, ilustrados na figura 9 e descritos na figura 10.

Figura 9 – Componentes do jigue pneumático



(fonte: (trabalho não publicado)<sup>9</sup>)

<sup>9</sup> **All air s-500 – modo de operação** é um material não publicado do ano de 2014 de autoria de **Weslei Ambrós**.

Figura 10 – Especificações do *air jig*

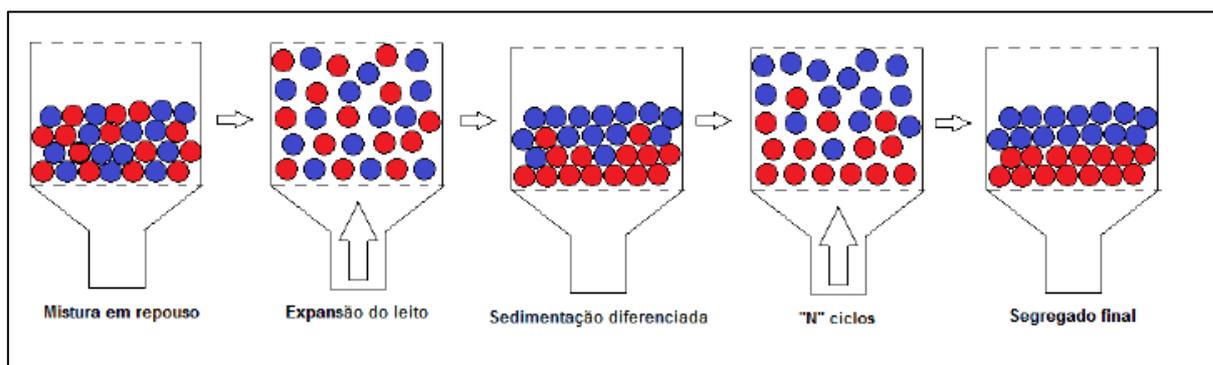
All Air S-500 (Almineral)				
<b>Câmara de estratificação</b>	Comprimento	532mm	Leito com tela perfurada 530 mm x 530mm 6 engastes na base x 4 engastes no topo 11 compartimentos de acrílico Maiores - 5 x 50 mm Menores - 6x 25 mm	
	Largura	532mm		
	Altura	550mm		
	Espessura	15mm		
	Área efetiva de jigagem	0,27m <sup>2</sup>		
<b>Ventilador centrífugo (soprador)</b>	Fabricante	COMBIMAC	massa	200 Kg
	Tipo	49631/B1Y1	Pressão estática	6000 Pa (máx)
	Vazão	73 mm <sup>3</sup> /min	Massa específica	1,22 kg/m <sup>3</sup>
	n	2915 rpm	Potência	15 kW
	n (máx)	3000 rpm		
<b>Motor do ventilador</b>	Fabricante	SIEMENS	Massa	
	Tipo	IEC/EM 60034	n	2955 rpm
	Condições de operação	230 V	Fotor de potência	0,88
		47,5 A	Potência	15 kW
		50 Hz	Rendimento	90,30%
<b>Motor da válvula rotativa</b>	Fabricante	LENZE	Massa	
	Tipo	EN 60034	n	1435 rpm
	Condições de operação	220 V	Fotor de potência	0,76
		3,3 A	Potência	1,5 kW
		50 Hz	Rendimento	82,80%
<b>Coletor de pó</b>	Fabricante	TEKA GmbH	Massa	
	Tipo	Filtercube 2H	Vazão	5000 m <sup>3</sup> /h
	Condições de operação		Pressão estática	3000 Pa (máx)
			Potência	4 kW
<b>Quadro de comando</b>	Fabricante	AllMineral	Chave principal	Vermelho/amarelo
	Tipo	CM 5117.500	liga/desliga/falha	verde/vermelho
	Dimensões	800 mm	2 comandos de ajuste com painel indicador	
		1200 mm	condições de operação	220 V
400 mm	50 Hz			

(fonte: (trabalho não publicado)<sup>10</sup>)

Conforme já descrito no item 3.4, o jigue pneumático se fundamenta em um processo de separação gravimétrica de partículas. A operação consiste na estratificação do leito dos materiais por meio de sucessivas expansões e contrações verticais, ao final do processo o material é estratificado em ordem crescente de densidade do topo ao fundo do jigue. A figura 11 ilustra o funcionamento da separação dos materiais.

<sup>10</sup> All air s-500 – modo de operação é um material não publicado do ano de 2014 de autoria de **Weslei Ambrós**.

Figura 11 – Esquema de separação

(fonte: (Material não publicado)<sup>11</sup>)

Existem algumas recomendações para o bom funcionamento do equipamento, entre essas se destaca que os grãos devem estar com uma baixa umidade para não terem suas densidades aparentes afetadas, além das influências das diferenças de densidades entre os materiais, a granulometria e forma das partículas, mencionadas no item 3.4. A frequência e as condições de operação também podem afetar os resultados de testes realizados na máquina. Não existem parâmetros genéricos de uso, visto que cada material possui um comportamento diferente quando submetido à separação (material não publicado)<sup>12</sup>.

#### 4.2 3.3 Separação no *air jig*

Após as etapas de britagem e peneiramento os agregados se encontravam secos ao ar. Esses foram pesados individualmente e misturados de acordo com as proporções estabelecidas. No total cada amostra colocada no equipamento possuía 45 kg, com exceção da amostra A9 que foi feita em duas frações de 45 kg, visto que a quantidade de massa recomendada para que a eficiência do *air jig* não seja comprometida durante o processo é de 45 kg, dado verificado devido à experiência de testes anteriores. Dessa forma, como se desejava ter como possibilidade de resultado da separação no *air jig* uma a quantidade de agregado reciclado de concreto em torno de 15 kg, para essa proporção de mistura dos materiais foi necessário esse ensaio adicional.

Nos testes das amostras A5, A7 e A9 (submetidas ao *air jig*), a máquina foi ajustada em uma frequência de 160 rpm e com 80% de expansão do leito. Os ensaios de separação tiveram

<sup>11</sup> All air s-500 – modo de operação é um material não publicado do ano de 2014 de autoria de Weslei Ambrós.

<sup>12</sup> Op. cit.,

duração de 120 segundos por amostra. Como a separação no *air jig* é baseada, em parte, pela diferença de densidades das partículas envolvidas e o ar, os grãos mais densos dos diferentes tipos de ARCD de concreto, argamassa e cerâmica ficaram depositadas ao fundo da câmara de estratificação (figuras 12 e 13). No final de cada ensaio, o material de fundo (última gaveta) foi recolhido, através do arraste horizontal do quadro, depositando-o no coletor da câmara. Na gaveta de fundo ficou retido aproximadamente 16 kg de material das amostras, visto isso, em cada ensaio foi retirado somente o material contido nessa. Esse procedimento se baseia na hipótese de que, se somente os agregados graúdos mais densos fossem utilizados para o uso em concreto, esses teriam suas características melhoradas, já que os materiais mais densos apresentam menor porosidade, melhorando a resistência mecânica e principalmente o módulo de deformação.

Figura 12 – Câmara de estratificação com as gavetas abertas



(fonte: CAZACLIU et al., 2014, p. 49)

Figura 13 – Câmara de estratificação antes do ensaio



(fonte: foto do autor)

## 4.3 MATERIAIS UTILIZADOS E SUAS CARACTERÍSTICAS

### 4.3.1 Cimento

O cimento utilizado na produção do concreto foi do tipo CP V-ARI-RS dentro dos padrões da NBR 5737 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 1992).

### 4.3.2 Agregados

Para produção dos concretos nesse trabalho foram utilizados agregados miúdos naturais e agregados graúdos reciclados.

#### 4.3 2.1 Agregado miúdo natural

Foi utilizada areia quartzosa média, seca ao ar, com característica granulométrica de grãos passantes na peneira de malha #4,8 mm (figura 14). Partículas acima dessa faixa foram descartadas.

#### 4.3 2.2 Agregado graúdo natural

Com composição basáltica e granulometria de grãos passantes na peneira de malha #19 mm e retidos na peneira de malha #4,8 (figura 15). O material foi lavado e seco ao ar, assim impurezas ou partículas de menor dimensão não ficaram contidas no seu volume.

Figura 14 – Agregado miúdo natural



(fonte: foto do autor)

Figura 15 – Agregado graúdo natural



(fonte: foto do autor)

#### 4.3 2.3 Agregados reciclados

Foram utilizados resíduos de material cerâmico (tijolo seis furos e bloco cerâmico estrutural), concretos (oriundos de Corpos de prova com  $f_{ck}$  variando de 20 a 35 MPa) e argamassas. O material foi britado e peneirado, com dimensão passante na peneira de malha #19 mm e retido

na peneira de malha# 4,8 mm. O material não foi lavado devido a sua facilidade de desagregação (figuras 16 e 17). Os agregados foram usados como mencionado anteriormente no item 4.2.3 isolados e combinados em determinadas proporções em massa.

Figura 16 – ARCD de concreto, cerâmica e argamassa



(fonte: foto do autor)

Figura 17 – ARCD de concreto, cerâmica e argamassa, combinados.



(fonte: foto do autor)

#### 4.3.2.4 Absorção dos agregados graúdos reciclados

Em concretos convencionais a absorção de água não exerce muita influência nas misturas, pois os agregados naturais absorvem pouca água. Para o caso de concretos produzidos com uso de ARCD isso se torna um problema em virtude da alta taxa de absorção desses. A quantidade de água que os agregados podem absorver depende das condições do meio e do tipo de material utilizado.

Os ensaios para medir a absorção dos agregados foram adaptados da NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). Uma pequena quantidade dos materiais foi separada em recipientes e imersa em água (quantidades apresentadas na tabela 5). O material permaneceu submerso por um período de 48 horas. Após esse tempo, os agregados foram retirados dos recipientes e secos ao ar. Depois de um tempo de 30 minutos as amostras se encontravam saturadas à superfície seca, dessa forma foram pesadas e colocadas em estufa a uma temperatura de 100°C durante 48 horas. Ao final do procedimento, os materiais eram retirados da estufa e pesados novamente. Com isso, foi possível medir a absorção dos agregados conforme a equação 2.

$$\text{Abs} = \frac{\text{Mss} - \text{Mseca}}{\text{Mseca}} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

Abs = absorção (%)

Mss = Massa ao ar da amostra na condição saturada à superfície seca

Mseca = Massa ao ar da amostra seca

Os resultados medidos da absorção das amostras de agregados estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Dados de absorção

AMOSTRAS -AGREGADOS	Massa Saturada superfície Seca (g)	Massa após estufa (g)	Absorção (%)
A0 -100% NATURAL			
A1- 100% CC	310,91	288,00	7,95
A2- 100% CE	247,72	204,65	21,05
A3- 100% AR	276,40	241,29	14,55
A4- 33%CC/33%CE/33%AR	741,06	612,26	21,04
A5- 33%CC/33%CE/33%AR (JIG)	767,26	677,76	13,21
A6 - 60%CC/20%CE/20% AR	552,50	483,96	14,16
A7 - 60%CC/20%CE/20% AR (JIG)	725,50	637,66	13,78
A8 - 20%CC/20%CE/60% AR	607,16	515,94	17,68
A9 - 20%CC/20%CE/60% AR (JIG)	614,35	541,02	13,55

(fonte: elaborado pelo autor)

Nota-se que a absorção dos concretos com amostras de agregados jigadas não apresentou variação em função das diferentes misturas, também se destaca o alto valor de absorção do concreto com agregado de cerâmica e com agregados da amostra A4.

#### 4.3.2.5 Massa específica aparente

Foi medida a massa específica aparente dos agregados reciclados de concreto, material cerâmico e argamassa, segundo a NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMA

TÉCNICAS, 2009). Utilizaram-se para os ensaios amostras de 3 kg dos diferentes materiais. Essas foram submergidas por período de 24 horas após este tempo foi retirado o excesso de água das partículas, fazendo com que o material ficasse saturado à superfície seca, pesando-se, novamente os agregados. Depois os materiais foram colocados em um recipiente específico, em água, e pesados submersos. Logo em seguida as amostras foram levadas à estufa a uma temperatura de 100 °C, permanecendo aproximadamente 3 horas, quando já se encontravam secos.

Pela equação 3, foi possível calcular a massa específica aparente.

$$\rho = \frac{M_{seca}}{M_{ss} - M_a} \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

$\rho$  = Massa específica aparente

$M_{seca}$  = Massa ao ar da amostra seca

$M_{ss}$  = Massa ao ar da amostra na condição saturada à superfície seca

$M_a$  = Massa em água da amostra na condição saturada a superfície seca

A tabela 6 mostra os resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 6 – Massa específica aparente das amostras

AMOSTRAS	Mseca (g)	Mss (g)	Ma (g)	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )
Amostra de concreto	2967	3200	1879	2,25
Amostra de M.cerâmico	2987	3500	1839	1,80
Amostra de argamassa	2888	3340	1717	1,78

(fonte: elaborado pelo autor)

### 4.3.3 Água

A água utilizada na pesquisa tem como características parâmetros de tratamento, em termos de potabilidade e composição, os adotados na rede pública pelo DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgoto).

### 4.3.4 Aditivo

Na produção dos concretos foi utilizado aditivo a base de éter policarboxílico modificado, que atua como dispersante do material cimentício, propiciando super plastificação e redução de água nas misturas, proporcionando maior trabalhabilidade ao concreto, sem alterar o tempo de pega. O aditivo foi incorporado durante a mistura em pequenas quantidades, buscando restabelecer a trabalhabilidade dos concretos com ARCD, não passando de 1% da massa total de cimento.

## 4.4 DOSAGEM EXPERIMENTAL

Para produção do concreto utilizado nesse trabalho adotou-se o método de dosagem IPT/EPUSP proposto por Helene e Terzian (1992), que se fundamenta em ajustar um teor ideal de argamassa para atender a um determinado abatimento, partindo-se de um traço intermediário e depois de um traço mais rico e outro pobre. Posteriormente, corpos de prova devem ser moldados e sua resistência à compressão medida em idade especificada (normalmente 28 dias). Com os dados estabelecidos a partir do abatimento fixado, faz-se a correlação entre a massa dos agregados relação a/c, resistência à compressão e consumo de cimento por m<sup>3</sup>. Dessa forma pode ser gerado o diagrama de dosagem.

Para a constituição do traço foi definido no laboratório, durante a dosagem o teor de argamassa. Para isso foi necessário variar o conteúdo de argamassa seca na mistura, começando com um teor de argamassa baixo (equação 4), e aumentando-o até atingir o ponto ótimo. Esse, determinado a partir de aspectos visuais da mistura combinado com o ensaio de abatimento de tronco de cone. Assim, o teor de argamassa para este trabalho resultou em  $\alpha = 51\%$ .

$$\alpha = \frac{1 + a}{1 + m} \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

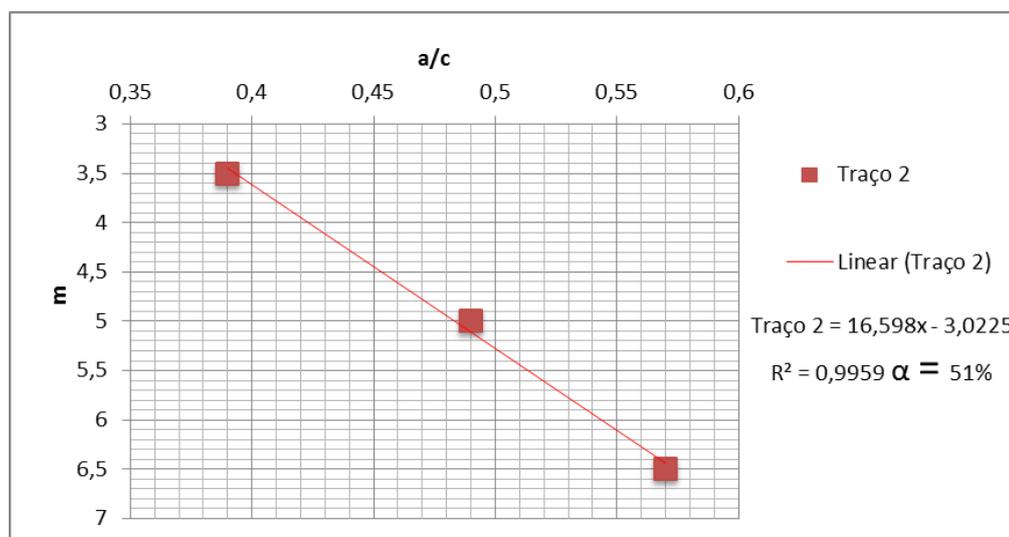
$\alpha$  = teor de argamassa

$a$  = massa de agregado miúdo em relação à massa de cimento

$m$  = massa dos agregados em relação à massa de cimento

O ajuste do traço nessa pesquisa se fundamentou em um experimento de concreto convencional, da qual foi gerada a reta de abatimento com três traços experimentais cada, sendo um traço intermediário, um pobre e um mais rico (figura 18).

Figura 18 – Retas de abatimento (10 +3 cm) para ajuste do traço



(fonte: (material não publicado)<sup>13</sup>)

O ajuste de traços para utilização no experimento, o qual resultou na reta de equação 5, com o coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9959$ .

<sup>13</sup> Traços fornecidos pela Profa. Ana Paula Kirchheim, usados na disciplina, ENG 1013 – EDIFICAÇÕES I, do curso de Engenharia Civil da UFRGS

$$m = 16,598(a/c) - 3,0225 \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

$m$  = massa dos agregados em relação à massa de cimento

$a/c$  = relação água /cimento

Para determinar a massa dos agregados em relação à massa de cimento, adotou-se a relação  $a/c = 0,5$ , resultando em um valor de massa dos agregados igual a 5,28 kg. O próximo passo foi estabelecer quanto deveria ter em massa de agregado graúdo e de agregado miúdo em relação à massa dos agregados. Conhecendo-se o teor de argamassa se determinou a massa de agregado miúdo e graúdo para o traço. Dessa forma o traço unitário em massa para essa pesquisa ficou estabelecido como 1: 2,20: 3,08.

Como os concretos produzidos no trabalho têm em sua composição ARCD, os quais apresentam como características resistências inferiores aos agregados naturais, foi necessário fazer uma adaptação no traço, em virtude do mesmo ter sido calculado com base em concretos com agregados naturais. Essa adaptação trata-se de uma redução da relação  $a/c$ , de 0,5 para 0,4, compensando a trabalhabilidade com aditivo superplastificante. Esse procedimento foi adotado para todos os concretos produzidos no trabalho até mesmo para os que continha agregado natural. O objetivo dessa medida foi ter como motivo para a ruptura do concreto com ARCD a ruptura do agregado e não da pasta de cimento, pois a diminuição da relação água/cimento torna a matriz da pasta de cimento mais resistente que o agregado.

## 4.5 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Primeiramente, antes da mistura dos materiais na betoneira, foi feita a pesagem e separação, colocando-os de acordo com o traço estabelecido em recipientes. Como os agregados recicláveis apresentam alta absorção de água, foi executado um procedimento para atenuar esse inconveniente. Os agregados foram submersos em água pelo período de 48 horas (figura 19), e retirados somente com  $1,5 \pm 0,5$  horas de antecedência da produção do concreto. Após a retirada do material dos recipientes, esses foram postos em malhas de peneiras abaixo de 3 mm, para que a água livre entre as partículas escoasse sem carregar o material fino,

simultaneamente foram secados com o uso de ventilador mecânico (figura 20). O objetivo desse procedimento foi deixar os agregados saturados com superfície seca, ou seja, todos seus poros permeáveis preenchidos sem que houvesse água livre entre as partículas capaz de ser incorporada à água de dosagem (material não publicado)<sup>14</sup>.

Nesse contexto os ARCD não absorvem a água da mistura, resultando na manutenção da trabalhabilidade, conseqüentemente não sendo necessário colocar mais água na dosagem. Com isso, problemas com perda de resistência pelo aumento da relação (a/c) são evitados. Em relação à água que se encontra nos poros dos agregados, essa permanece confinada, podendo sair somente após já estarem em andamento as reações de hidratação do cimento, fazendo a cura úmida interna.

Figura 19 – Agregados submersos



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 20 – Agregados em processo de secagem



(fonte: elaborado pelo autor)

A mistura dos materiais para produção do concreto seguiu a ordem sugerida por Cordeiro (2013), para os casos nos quais se usam agregados de RCD. Após a imprimação da betoneira com argamassa no traço 1:3, foram colocadas as porções de areia e cimento, com a água sendo adicionada durante a mistura. A partir da homogeneização da argamassa foram adicionados os ARCD, conforme os materiais eram misturados. Durante a mistura foi incorporado o aditivo superplastificante para melhorar a trabalhabilidade do concreto

<sup>14</sup> Procedimento baseado em tese de doutorado em andamento de autoria de Juliana Alves de Lima Senisse

produzido, sem que se fizesse necessária a adição de mais água do que a quantidade de dosagem prevista.

Após a mistura foi feito o ensaio de abatimento (figura 21). Como os ARCD diminuem a trabalhabilidade do concreto fresco em função de sua forma e textura, o abatimento inicial de  $10 \pm 3$  cm, proposto para o traço inicial, foi modificado.

Admitiu-se para a pesquisa que o abatimento estaria satisfeito se atingisse o valor de  $8 \pm 2$  cm, dessa maneira, para atingir esse valor, sem que se modificasse a relação (a/c), a quantidade de aditivo se tornou variável para as misturas.

Após o ensaio de abatimento, os concretos produzidos eram moldados em corpos de prova de dimensões 10 cm x 20 cm (figura 22), ao total sete por mistura. Em sequência foram armazenados em câmara úmida por 14 dias até a data de ruptura.

Figura 21 – Ensaio de abatimento



(fonte: foto do autor)

Figura 22 – Moldagem dos corpos de prova



(fonte: foto do autor)

A tabela 7 ilustra os proporcionamentos e abatimentos dos concretos ensaiados em laboratório.

Tabela 7 – Proporcionamentos e abatimentos dos concretos

CONCRETOS - AGREGADOS	Massa da amostra seca (Kg)	Massa da amostra Saturada com superfície seca (Kg)	Saturação (%)	Materiais				a/c	Abat. (cm)
				cim (kg)	Areia (kg)	água (Kg)	aditivo (g)		
A0- 100% NATURAL	15	–	–	4,87	10,71	1,95	13	0,403	8,5
A1- 100% CC	15	15,72	4,80	4,87	10,71	1,95	7	0,402	6,5
A2- 100% CE	15	16,88	12,53	4,87	10,71	1,95	17	0,404	4
A3- 100% AR	15	16,67	11,11	4,87	10,71	1,95	5	0,401	6,5
A4- 33%CC/33%CE/33%AR	15	16,60	10,67	4,87	10,71	1,95	7	0,402	8
A5- 33%CC/33%CE/33%AR (JIG)	15	16,26	8,40	4,87	10,71	1,95	10	0,402	7,5
A6- 60%CC/20%CE/20% AR	15	16,26	8,40	4,87	10,71	1,95	6	0,402	8,5
A7- 60%CC/20%CE/20% AR (JIG)	15	16,16	7,73	4,87	10,71	1,95	7	0,402	7,5
A8- 20%CC/20%CE/60% AR	15	16,86	12,40	4,87	10,71	1,95	13	0,403	6,5
A9- 20%CC/20%CE/60% AR (JIG)	15	16,50	10,00	4,87	10,71	1,95	11	0,403	6,5

(fonte: elaborado pelo autor)

Nota-se que a quantidade de aditivo superplastificante adicionado à mistura foi irrelevante em termos de variação da relação (a/c), pois só houve modificação do seu valor na terceira casa decimal.

Após a desforma dos corpos de prova, escolheram-se aleatoriamente dois corpos de prova por amostra para determinar a massa específica dos concretos. O resultado adotado foi a média desses. Com o uso da equação 6, foi possível obter a massa específica das amostras de concreto.

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

$\gamma$  = massa específica (kg//m<sup>3</sup>)

M = Massa do material (kg)

V = Volume do corpo de prova (m<sup>3</sup>)

A tabela 8 mostra os valores de massas específicas encontrados para os diferentes concretos.

Tabela 8 – Massa específica aparente dos concretos com as amostras de agregados

CONCRETOS - AGREGADOS	Massa (kg)		Peso médio	Volume (dm <sup>3</sup> )	mas espec. (kg/dm <sup>3</sup> )
	Cp1	Cp2			
A0 - 100% NATURAL	3,86	3,86	3,86	1,57	2,46
A1- 100% CC	3,64	3,64	3,64	1,57	2,32
A2- 100% CE	3,36	3,36	3,36	1,57	2,14
A3- 100% AR	3,32	3,28	3,30	1,57	2,10
A4- 33%CC/33%CE/33%AR	3,46	3,46	3,46	1,57	2,20
A5- 33%CC/33%CE/33%AR (JIG)	3,57	3,52	3,55	1,57	2,26
A6 - 60%CC/20%CE/20% AR	3,54	3,56	3,55	1,57	2,26
A7 - 60%CC/20%CE/20% AR (JIG)	3,62	3,62	3,62	1,57	2,30
A8 - 20%CC/20%CE/60% AR	3,40	3,40	3,40	1,57	2,16
A9 - 20%CC/20%CE/60% AR (JIG)	3,42	3,42	3,42	1,57	2,18

(fonte: elaborado pelo autor)

## 4.6 CARACTERÍSTICAS AVALIADAS E MÉTODOS UTILIZADOS

Nesse trabalho foram avaliadas as características de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de deformação. Essa avaliação foi possível por meio de ensaios de compressão axial, de compressão diametral e de módulo de deformação, todos realizados no laboratório de ensino e pesquisa do NORIE, LAMTAC.

### 4.6.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial seguiram as recomendações da NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007). Para cada amostra foi feita a ruptura de um corpo de prova cilíndrico, medindo somente a resistência à compressão axial. Outros três resultados foram obtidos com as determinações do módulo de deformação. As rupturas foram feitas com o concreto aos 14 dias de idade, em virtude do curto tempo para elaboração do trabalho (figura 23).

### 4.6.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios para avaliar a resistência à tração do concreto foram realizados aos 14 dias de idade, em virtude do curto tempo de elaboração do trabalho. Sendo três rupturas de corpos de

prova à tração por compressão diametral (figura 24), por amostra, seguindo as instruções da NBR 7222 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011).

#### 4.6.3 Módulo de deformação

Os ensaios de módulo de deformação (figura 25) foram realizados com o concreto na mesma idade dos demais ensaios. Os procedimentos foram executados segundo a NBR 8522 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008). Como parâmetro inicial usou-se o dado de resistência à compressão de um corpo de prova para previsão da carga de ruptura imposta pela prensa. Foram feitos três determinações para o módulo de deformação, extraindo desses também a resistência à compressão. Além do equipamento da prensa foi utilizado extensômetro elétrico para medição das deformações.

Figura 23 – Ensaio de resistência à compressão



(fonte: foto do autor)

Figura 24 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



(fonte: foto do autor)

Figura 25 – Ensaio de módulo de elasticidade



(fonte: foto do autor)

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS CONCRETOS PRODUZIDOS

Nesse capítulo foram analisados os resultados dos ensaios dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados, em relação ao comportamento da resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação. Essa análise das propriedades mecânicas foi feita com base nos resultados obtidos das rupturas dos corpos de prova de concretos com as nove amostras de agregados propostas mais a amostra com agregados naturais de basalto. Para avaliação das variáveis envolvidas no processo, foi feita uma análise estatística da variabilidade, por meio do cálculo do desvio padrão, e coeficiente de variação. Também, analisaram-se as possíveis interferências da separação dos agregados reciclados nas características avaliadas.

### 5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

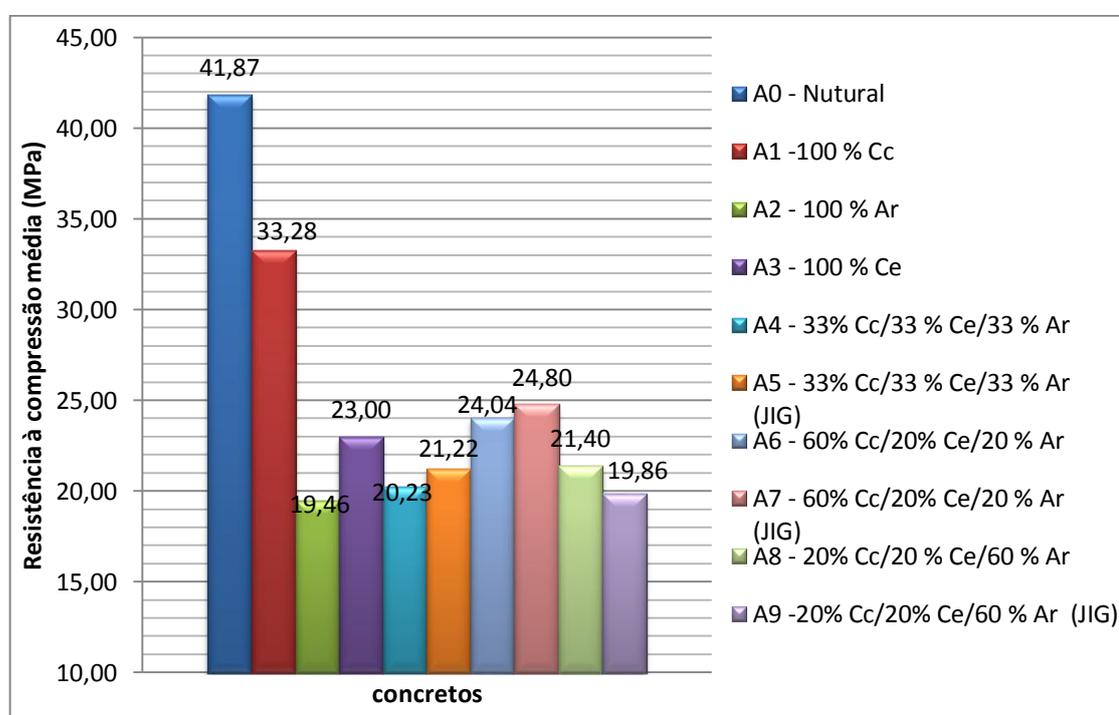
A resistência à compressão é uma das propriedades mais importantes do concreto, além de ser a característica mais relevante para os projetistas, onde parâmetros de projeto são obtidos através do seu valor. Com base nesses dados, para cada concreto com diferente composição de agregado foi calculada a resistência média à compressão axial e a variabilidade dos resultados dos ensaios, por meio do desvio padrão e coeficiente de variação dos valores obtidos da ruptura dos corpos de prova ensaiados. A tabela 9 e a figura 26 expõem os valores obtidos nos ensaios.

Tabela 9 – Resistência à compressão axial média dos ensaios

CONCRETOS	fc14 (MPa)				fc14 médio (MPa)	desvio Padrão (MPa)	coeficiente de variação (%)
	AMOSTRAS- AGREGADOS	CP1	CP2	CP3			
A0 - Natural	42,59	40,09	44,17	40,63	41,87	1,87	4,47
A1 -100 % Cc	33,74	33,64	34,17	31,56	33,28	1,17	3,51
A2 - 100 % Ar	21,00	19,93	16,60	20,30	19,46	1,96	10,05
A3 - 100 % Ce	22,47	22,23	23,94	23,37	23,00	0,79	3,45
A4 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar	19,68	20,42	19,58	21,25	20,23	0,77	3,83
A5 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar (JIG)	21,39	22,60	20,02	20,87	21,22	1,08	5,09
A6 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar	23,34	23,45	26,07	23,29	24,04	1,36	5,64
A7 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar (JIG)	25,04	25,81	23,27	25,07	24,80	1,08	4,35
A8 - 20% Cc/20 % Ce/60 % Ar	20,59	21,42	20,74	22,86	21,40	1,04	4,84
A9 -20% Cc/20% Ce/60 % Ar (JIG)	19,62	19,60	21,85	18,35	19,86	1,46	7,34

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 26 – Resistência à compressão axial média dos ensaios



(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme os resultados apresentados na tabela 9, os coeficientes de variação dos concretos resultaram em torno de 5 %, com exceção dos produzidos com ARCD de argamassa, cujos valores foram até 10,05 %. A figura 26 ilustra a importância do tipo de ARCD no comportamento da resistência à compressão axial do concreto. Concretos produzidos com ARCD de concreto obtiveram valores de resistência mais próximos dos produzidos com agregados naturais, mas com redução média de 20,51%. Os concretos feitos com agregados reciclados de argamassa e cerâmica, na forma isolada, obtiveram uma redução na resistência ainda maior, com valores de 53,52% e 45,06%, respectivamente. Os resultados foram coerentes com os obtidos por Cabral (2007), que atingiu o maior valor de resistência nos

concretos com ARCD de concretos e o menor para os que continham agregados reciclados de cerâmica vermelha, com reduções respectivas de 24% e 34% em comparação ao concreto com agregado natural.

Como os ensaios foram feitos com uma relação a/c igual para todas as misturas de concreto, sempre com os mesmos traços e os mesmos tipos de materiais, variando somente o agregado graúdo, essa foi a única variável direta analisada na pesquisa. Nesse contexto, os concretos produzidos com agregado natural, de origem basáltica, serviram como uma referência para comparação com os concretos confeccionados com agregados reciclados. Em função disso, a resistência à compressão desses concretos reduziu bastante para casos de ARCD, variando de acordo com o tipo de ARCD e proporção na mistura. A constatação de que os concretos com ARCD possuem uma resistência à compressão inferior aos que contém em sua composição agregados de rochas naturais como, por exemplo, o basalto, já havia sido verificado na bibliografia. A ruptura desses concretos foi causada pela ruptura do agregado, como pode ser visto nas figuras 27 e 28. Segundo Leite (2001, p. 185) o agregado reciclado para baixas relações a/c passa a ser o elo fraco da mistura. Os agregados de RCD, por serem menos resistentes que a zona de transição e matriz da pasta de cimento, não conseguem segurar a propagação das fissuras geradas quando o concreto é exigido a altas tensões, causando a ruptura.

Figura 27 – Corpos de prova rompidos dos concretos



(fonte: foto do autor)

Figura 28 – Corpos de prova de concreto com ARCD de cerâmica e argamassa rompidos no agregado



(fonte: foto do autor)

### **5.1.1 Influência na resistência do concreto: agregados submetidos ao *air jig* x agregados reciclados isolados**

Os agregados utilizados para preparo do concreto foram sempre os retirados da última gaveta do *air jig*, onde se encontravam cerca de 16 kg de material. Esperava-se que a separação ocorrendo predominantemente por densidade, apresentasse na última camada os ARCD mais densos, que para o trabalho seriam os agregados de concreto. Contudo, observou-se que a granulometria e a forma dos agregados também interferiram na separação. Com isso houve uma mistura de materiais na última camada, que variou em função da proporção dos constituintes das amostras. Salienta-se que o valor em massa de agregados de concretos usados nas amostras sempre foi superior à capacidade de armazenamento da camada de fundo. Sendo assim, era possível ter como produto da separação, na grande maioria, grãos de concreto.

Para análise, os resultados foram agrupados em conjuntos, conforme a tabela 10. Para estes conjuntos, calculou-se a variação dos resultados de resistência à compressão dos corpos de prova de concretos produzidos com ARCD de concreto, argamassa e cerâmica (Cj-4), em relação à variação dos resultados dos concretos executados com os agregados das amostras A5, A7 e A 9 (Cj-6) que foram submetidas à jigagem (Tabela 10).

Tabela 10– Análise de variabilidade da resistência à compressão

CONJUNTO	CONCRETOS	fc <sub>14</sub> médio (MPa)	desvio Padrão (MPa)	coeficiente de variação (%)
	AMOSTRAS- AGREGADOS			
Cj-1	A1 -100% Cc A2 - 100% Ar	26,37	7,54	28,58
Cj-2	A1 -100% Cc A3 - 100% Ce	25,50	5,86	22,96
CJ-3	A2 - 100% Ar A3 -100% Ce	21,23	2,23	10,51
CJ-4	A1 - 100% Cc A2 -100% Ar A3- 100% Ce	25,25	6,17	24,43
CJ-5	A4 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar A6 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar A8 - 20% Cc/20 % Ce/60 % Ar	21,89	1,86	8,51
CJ-6	A5 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar (JIG) A7 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar (JIG) A9 -20% Cc/20% Ce/60 % Ar (JIG)	21,96	2,44	11,11

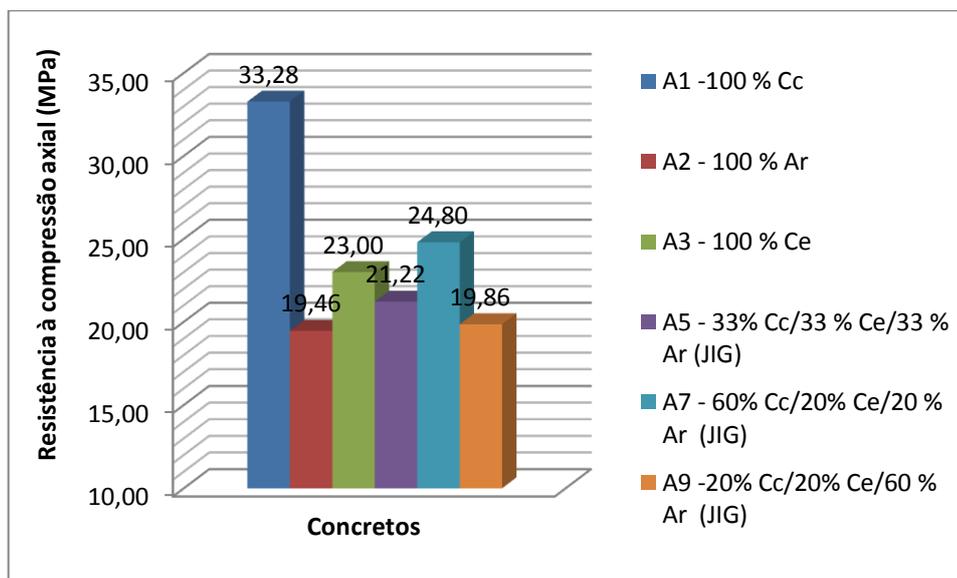
(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme resultados apresentadas na tabela 10, a resistência à compressão dos concretos produzidos com agregados obtidos a partir da separação no *air jig* apresentaram redução no coeficiente de variação de 24,43 % (CJ-4) para 11,11 % (CJ-6), em comparação aos concretos feitos com agregados isolados.

De acordo com os resultados (tabela 10), as resistências à compressão do conjunto de concretos feitos com agregados cerâmicos e de argamassa apresentaram menor variabilidade em comparação aos conjuntos de concretos feitos com os demais materiais. A influência do processo de jigagem desses agregados analisando os resultados de resistência a compressão, neste caso, é reduzida. Como se pode ver a média das resistências à compressão dos concretos com agregados submetidos ao *air jig* ficaram em torno dos 21,00 MPa próximo da média CJ-3, com os desvios padrão e coeficientes de variação também próximos. Em consequência disso o ARCD de concreto nas misturas jigadas não teve, como esperado, o efeito de aumentar a resistência à compressão de uma forma mais expressiva.

Essa afirmativa pode ser reforçada analisando a resistência à compressão média dos concretos com as amostras de agregados A2, A3, A5, A7 e A9, na figura 29.

Figura 29 – Influência dos ARCD de argamassa e cerâmicas nos resultados dos concretos jigados



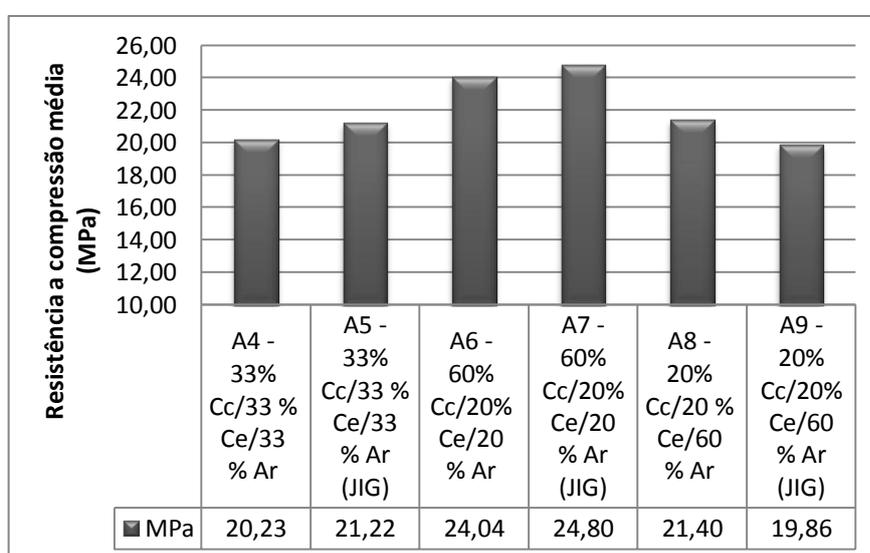
(fonte: elaborado pelo autor)

Nesse caso a resistência mínima de 19,46 MPa foi alcançada no ensaio com a amostra A2 contendo somente argamassa. A resistência máxima dos concretos com agregados jigados ocorreu no ensaio com a amostra que continha 60% de concreto, 20% de cerâmica e 20% de argamassa, atingindo o valor de 24,80 MPa, porém menor que a do concreto com a amostra de agregado A1 composto somente por ARCD de concreto que atingiu uma resistência à compressão de 33,28 MPa. Dessa forma, a maior resistência dos concretos feitos com agregados submetidos à jigagem ficou mais próxima da resistência média de concretos com agregado de argamassa e cerâmica do que de concreto. Isso pode ser explicado pela baixa eficiência do *air jig* na separação dos ARCD para os parâmetros utilizados na pesquisa. Como consequência na gaveta inferior do equipamento continham material cerâmico e argamassas, agregados de menores resistências. Também, segundo Ângulo (2005, p.144), agregados reciclados porosos como argamassas e cerâmicas vermelhas interferem no plano de ruptura dos concretos e conseqüentemente na redução da resistência do concreto. De acordo com Lovato (2007, p. 102), também se verificou maiores reduções de resistência nos concretos com ARCD quando suas amostras de agregados tinham em sua composição maiores quantidades de cerâmicas e argamassas. A autora verificou que as reduções foram da ordem de 24% quando comparada a outras amostras com menores teores desses materiais.

### 5.1.2 Influência na resistência do concreto: agregados reciclados submetidos ao *air jig* x agregados reciclados com mistura de referência

Com o objetivo de fazer uma avaliação de maior amplitude sobre o efeito do método de separação de agregados na propriedade de resistência à compressão, foi feita uma comparação dos resultados dos concretos com agregados jigados em relação aos concretos de referência, produzidos com agregados de mesma proporção na mistura (figura 30).

Figura 30 – Resistência à compressão do concreto com agregados jigados x concretos compostos por agregados reciclados com mistura de referência



(fonte: elaborado pelo autor)

Como mencionado, o concreto com a amostra de agregado A7 apresentou a maior resistência média, porém ficou distante do valor do concreto produzido com agregados reciclados de concreto que atingiu a resistência de 33,28 MPa . O ganho de resistência em relação à amostra A6, de mesma proporção, com 60% de agregados de concreto, 20% de agregados cerâmicos e 20% de agregados de argamassa não foi relevante. Dessa forma, pode-se dizer que a separação não teve a eficiência desejada, visto que, mesmo com a predominância em massa de agregados reciclados de concreto na mistura, os outros materiais conseguiram interferir significativamente na resistência à compressão do concreto produzido.

Os resultados de resistência à compressão dos concretos com as amostras A5 em comparação com a A4, e a A9 em relação a A8, obtiveram praticamente o mesmo comportamento. Destaca-se uma leve redução na resistência média dos concretos produzidos com a amostra

A9, a qual possuíam 20% de agregado de concreto, 20% de agregado cerâmico e 60% de agregado de argamassa de proporção inicial. De acordo com esses resultados, o ARCD de argamassa foi prejudicial à resistência à compressão, visto que o concreto com esse material apresentou o menor valor médio. Observa-se, também, a influência direta do agregado de argamassa nos resultados dos concretos com as amostras A8 e A9.

A Tabela 11 mostra a relação da variabilidade das resistências à compressão dos concretos com as amostras de referência e as amostras separadas pelo *air jig*, isolados e em conjunto.

Tabela 11 – Resistência à compressão do concreto com agregados jigados x concretos compostos por agregados reciclados com mistura de referência

CONJUNTO	CONCRETOS	fc <sub>14</sub> médio (MPa)	desvio Padrão (MPa)	coeficiente de variação (%)
	AMOSTRAS- AGREGADOS			
-	A4 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar	20,23	0,77	3,83
-	A5 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar (JIG)	21,22	1,08	5,09
-	A6 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar	24,04	1,36	5,64
-	A7 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar (JIG)	24,80	1,08	4,35
-	A8 - 20% Cc/20 % Ce/60 % Ar	21,40	1,04	4,84
-	A9 -20% Cc/20% Ce/60 % Ar (JIG)	19,86	1,46	7,34
CJ-5	A4 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar A6 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar A8 - 20% Cc/20 % Ce/60 % Ar	21,89	1,86	8,51
CJ-6	A5 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar (JIG) A7 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar (JIG) A9 -20% Cc/20% Ce/60 % Ar (JIG)	21,96	2,44	11,11

(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando os resultados, os concretos feitos a partir dos agregados submetidos à separação no *air jig* não apresentaram redução do coeficiente de variação, exceto o concreto com a amostra A7 em comparação com a A6, (como pode ser visto na tabela 11). Esse resultado pode ser explicado pelo fato que a resistência à compressão sofre interferência de diversos fatores, como, a constituição do agregado utilizado no concreto. Essa justificativa é reforçada por Lovato (2007, p.108) a qual menciona que a resistência à compressão dos concretos não é influenciada exclusivamente pela densidade, mas também pela composição, granulometria e forma dos agregados.

## 5.2 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DO CONCRETO

A tensão aplicada em um material gera uma deformação. Essa relação entre tensões e deformações é muito importante para projetos de estruturas de concreto. O concreto é um material multifásico e heterogêneo, no qual suas propriedades elásticas são influenciadas pela fração volumétrica, massa específica e módulo de deformação de seus constituintes e também pelas características da zona de transição. Como se sabe, os agregados reciclados apresentam alta porosidade, reduzindo o módulo de elasticidade do concreto, porém melhoram as propriedades da zona de transição. Com isso, os agregados reciclados tem alta influência no módulo de deformação do concreto (LOVATO, 2010, p.120).

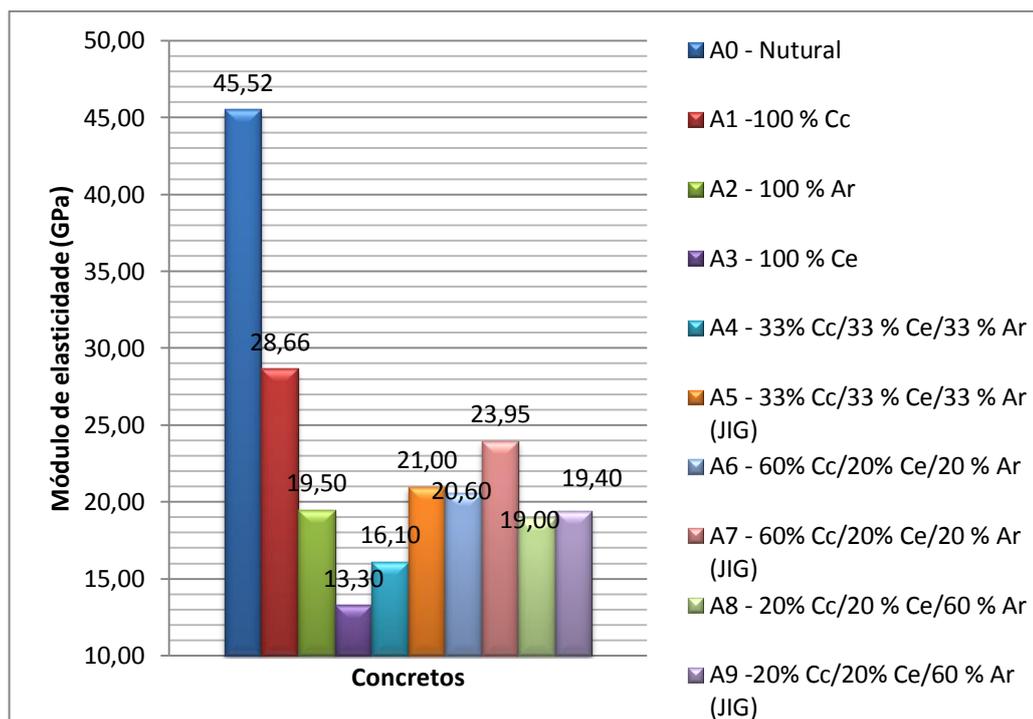
A tabela 12 e a figura 31 apresentam os resultados obtidos para os módulos de elasticidade dos concretos com as diferentes amostras de agregados.

Tabela 12 – Resultado dos ensaios de módulo de elasticidade dos concretos

CONCRETOS	E14 (MPa)			E14 médio (GPa)	desvio Padrão (GPa)	coeficiente de variação (%)
	CP1	CP2	CP3			
AMOSTRAS- AGREGADOS						
A0 - Nutural	50,96	40,09	*	45,53	7,69	16,88
A1 -100 % Cc	27,50	28,40	30,09	28,66	1,31	4,59
A2 - 100 % Ar	20,20	19,60	18,70	19,50	0,75	3,87
A3 - 100 % Ce	*	13,70	12,90	13,30	0,57	4,25
A4 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar	17,10	18,80	12,40	16,10	3,32	20,59
A5 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar (JIG)	23,50	20,30	19,20	21,00	2,23	10,64
A6 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar	21,70	20,70	19,40	20,60	1,15	5,60
A7 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar (JIG)	24,60	23,30	*	23,95	0,92	3,84
A8 - 20% Cc/20 % Ce/60 % Ar	18,60	19,40	19,00	19,00	0,40	2,11
A9 -20% Cc/20% Ce/60 % Ar (JIG)	19,80	20,40	18,00	19,40	1,25	6,44
* dado descartado por erro de leitura na prensa						

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 31 – Resultados dos módulos de elasticidade dos concretos



(fonte: elaborado pelo autor)

Como já era esperado, o concreto produzido com agregados reciclados de concreto, por apresentar maior massa específica, atingiu o maior módulo de elasticidade entre os concretos feitos com ARCD, com o valor de 28,66 GPa, mas teve uma redução de 37,04 % se comparado ao concreto com agregado natural. Já o concreto feito com agregado cerâmico atingiu o menor módulo de elasticidade médio, com 13,30 GPa. Em comparação com os que continham agregado natural obteve uma redução de 70,79 %. Os resultados também se mostraram coerentes com os de Cabral (2007), que obteve maiores módulos em concretos com agregados de concreto e pior para os que continham cerâmica vermelha. O autor explica que pela cerâmica ter menor massa específica e ser mais porosa, conseqüentemente é mais deformável, com isso o módulo do concreto é reduzido, e o contrário acontece com agregados de concretos.

Os concretos com agregados jigados obtiveram, na maioria dos resultados, uma melhora no módulo de elasticidade em relação aos concretos compostos pelas demais amostras de agregados e com baixos coeficientes de variação, como visto na tabela 12.

### 5.2.1 Influência no módulo de deformação do concreto: agregados submetidos ao *air jig* x agregados reciclado isolados

Para análise, os resultados foram agrupados em conjuntos, conforme a tabela 13. Calculou-se a variação dos resultados de módulo de elasticidade dos corpos de prova dos concretos produzidos com ARCD de concreto, argamassa e cerâmica (Cj-4), em relação à variação dos resultados dos concretos executados com os agregados das amostras A5, A7 e A9 (Cj-6) que foram submetidas a jigagem (tabela 13).

Tabela 13 – Análise de variabilidade dos módulos de elasticidade dos concretos

CONJUNTO	CONCRETOS	E <sub>14</sub> médio (GPa)	desvio Padrão (GPa)	coeficiente de variação (%)
	AMOSTRAS- AGREGADOS			
Cj-1	A1 -100% Cc A2 - 100% Ar	24,08	5,11	21,22
Cj-2	A1 -100% Cc A3 - 100% Ce	22,52	8,47	37,62
Cj-3	A2 - 100% Ar A3 -100% Ce	17,02	3,45	20,27
Cj-4	A1 - 100% Cc A2 -100% Ar A3- 100% Ce	21,39	6,60	30,88
Cj-5	A4 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar A6 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar A8 - 20% Cc/20 % Ce/60 % Ar	18,57	2,65	14,27
Cj-6	A5 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar (JIG) A7 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar (JIG) A9 -20% Cc/20% Ce/60 % Ar (JIG)	21,14	2,36	11,15

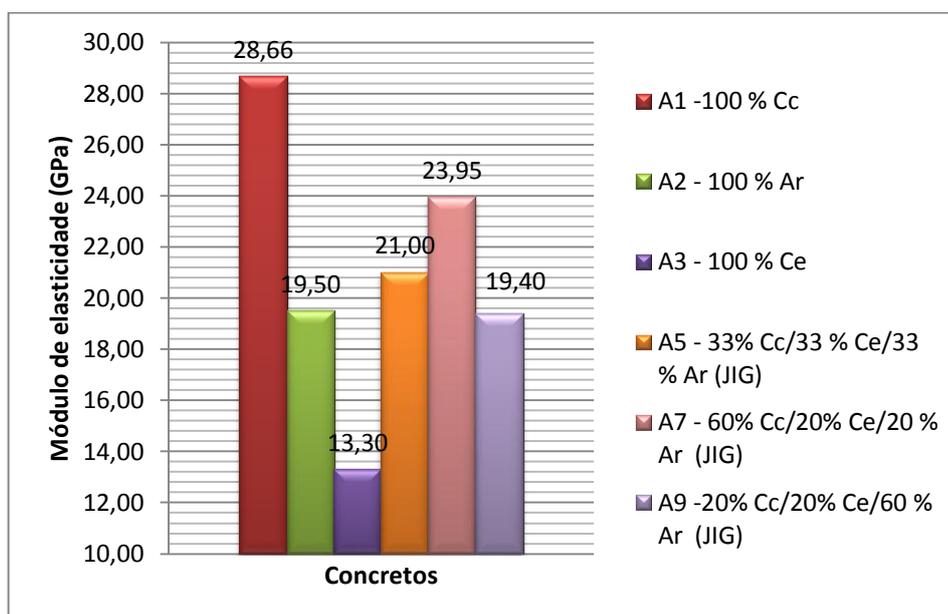
(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme os resultados apresentados, os valores de módulo de elasticidade dos concretos com agregados separados no *air jig* foram inferiores aos dos concretos produzidos com agregado natural e de concreto. Contudo, houve uma redução da variabilidade nos valores dos módulos dos concretos com agregados jigados, se analisados em conjunto, em comparação ao conjunto de concretos com agregados reciclados isolados de concreto, cerâmicas e argamassas. Com isso, o coeficiente de variação reduziu de 30,88 % no conjunto de amostras de concretos com agregados reciclados não jigados para 11,15% no conjunto de concreto com amostras de agregados submetidos ao *air jig* (tabela 13).

A alta variabilidade dos conjuntos de concretos com agregados reciclados não misturados na tabela 13 (Cj-1, 2 3 e 4) se deve ao fato de que as diferentes propriedades dos tipos de

agregados interferem no módulo de maneiras bem distintas. Porém, quando os materiais são misturados há uma superposição de efeitos, fazendo com que a combinação dos agregados influencie de maneira positiva no módulo de deformação do concreto produzido. Isso fica evidenciado na figura 32, onde os valores dos módulos de elasticidade dos concretos para as diferentes amostras de agregados jigados apresentaram menores dispersões entre si em comparação aos concretos com um único tipo de ARCD.

Figura 32 – Módulos de elasticidade dos concretos com agregados jigados x concretos com único tipo de agregado

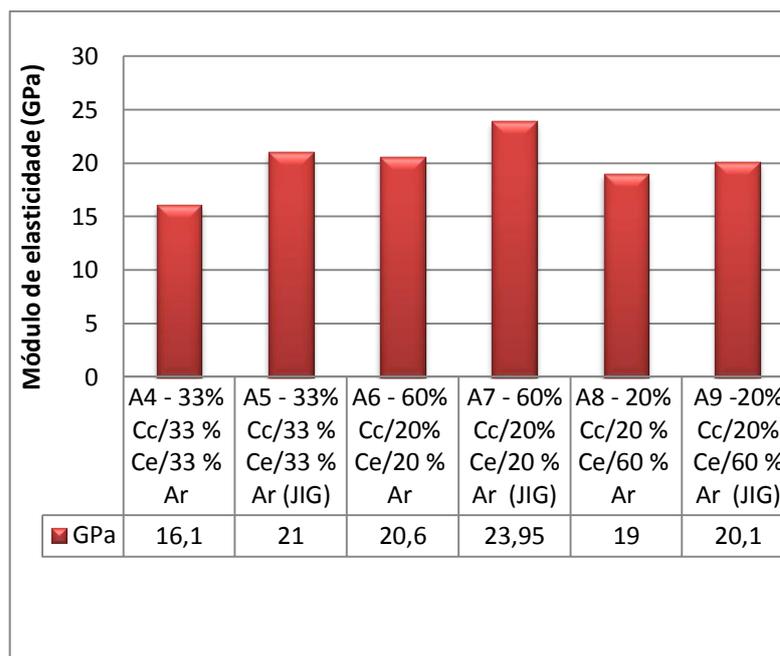


(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.2.2 Influência no módulo de deformação do concreto: agregados submetidos ao *air jig* x agregados reciclados de referência

O uso do *air jig* exerceu um efeito importante nas amostras de concretos que tiveram seus agregados separados no equipamento, em comparação com as amostras de concreto de mesma proporção, mas que seus agregados não foram submetidos à separação. Houve um aumento dos valores de módulo de elasticidade dos concretos com agregados separados pelo *air jig*, como pode ser visto na figura 33.

Figura 33 – Módulo de elasticidade do concreto com agregados jigados x concretos com agregados de mesma proporção de referência



(fonte: elaborado pelo autor)

Para os concretos com as amostras de agregados A4 e A5 houve o maior efeito do processo de jigagem no módulo de elasticidade, onde ambas apresentavam a proporção de agregados reciclados de 33% de concreto, 33% de cerâmicos e 33% de argamassas. Os resultados de módulo de elasticidade dos concretos produzidos com a amostra A5, submetida ao *air jig*, foram em média 21 GPa, enquanto os dos concretos obtidos com a amostra A4 foram 16,1 GPa. Isso representa um aumento de 30,43%, que é atribuído ao processo de jigagem.

Nos concretos com as amostras de agregados A6 e A7, com as proporções de agregados reciclados de 60% de concreto, 20% de cerâmica e 20% de argamassa, também se observa um aumento do módulo de elasticidade médio para os concretos com agregados jigados. O concreto com a amostra A7, de agregados reciclados submetidos ao *air jig*, alcançou 23,95 GPa de módulo de elasticidade médio, já a amostra A6 de referência atingiu o valor de 20,6 GPa, caracterizando um ganho de 16,26 % .

Na comparação das amostras de concreto A8 e A9, os concretos produzidos com material jigado tiveram um aumento pequeno no módulo médio. No concreto com a amostra A9 o módulo médio atingiu 20,1 GPa, enquanto o concreto com a amostra A8 chegou a 19 GPa, esse aumento representa 5,79%. De acordo com isso, houve um acréscimo bem menor, se comparado aos ganhos obtidos com os concretos das outras amostras de agregados submetidos ao *air jig*. Nesse contexto, pode-se afirmar que concretos com maior proporção de

agregados de argamassa na mistura possuem uma tendência de redução no módulo de elasticidade. Um detalhe importante de ressaltar, é que esse efeito dos agregados reciclados de argamassa na propriedade de resistência à compressão foi similar. Esses resultados evidenciam que os agregados de argamassa interferem negativamente nos resultados das propriedades mecânicas, pesquisadas.

Para análise da variação dos módulos de elasticidade dos concretos com agregados obtidos a partir do *air jig*, em relação aos que contém agregados com a mesma proporção de mistura, esses foram avaliados agrupados em conjuntos e isoladamente (tabela 14).

Tabela 14 – Módulo de elasticidade do concreto com agregados jigados x concretos com agregados de mesma proporção de referência

CONJUNTO	CONCRETOS	E <sub>14</sub> médio (GPa)	desvio Padrão (GPa)	coeficiente de variação (%)
	AMOSTRAS- AGREGADOS			
–	A4 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar	16,10	3,32	20,59
–	A5 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar (JIG)	21,00	2,23	10,64
–	A6 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar	20,60	1,15	5,60
–	A7 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar (JIG)	23,95	0,92	3,84
–	A8 - 20% Cc/20 % Ce/60 % Ar	19,00	0,40	2,11
–	A9 -20% Cc/20% Ce/60 % Ar (JIG)	19,40	1,25	6,44
Cj-5	A4 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar A6 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar A8 - 20% Cc/20 % Ce/60 % Ar	18,57	2,65	14,27
Cj-6	A5 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar (JIG) A7 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar (JIG) A9 -20% Cc/20% Ce/60 % Ar (JIG)	21,14	2,36	11,15

(fonte: elaborado pelo autor)

Com base nos dados apresentados, a variabilidade dos módulos de elasticidade dos concretos com amostras de agregados submetidos à separação no *air jig*, se analisada isoladamente e em conjunto, é menor que dos concretos com as amostras de agregados de referência não jigados. O coeficiente de variação do conjunto de resultados dos concretos com amostras de agregados não jigados atingiu um valor de 14, 27%, esse valor foi reduzido para 11,15%, quando o conjunto era formado por concretos com amostras de agregados separado no *air jig*. Ainda, o módulo de elasticidade médio do concreto com agregados jigados aumentou de 18,57 GPa para 21,14 GPa em relação ao conjunto de concreto de referência com agregados na mesma proporção.

### 5.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A resistência à tração é uma característica importante para o uso do concreto, principalmente para aplicação em pavimentos. Para o uso em estruturas, normalmente o concreto deve ser armado, pois sua resistência à tração, comparada à compressão, é muito baixa. Contudo, a resistência à tração deve atender valores satisfatórios de projeto para o uso em estruturas de concreto armado.

#### 5.3.1 Influência na resistência à tração dos concretos: agregados submetidos ao *air jig* x agregados reciclado isolados

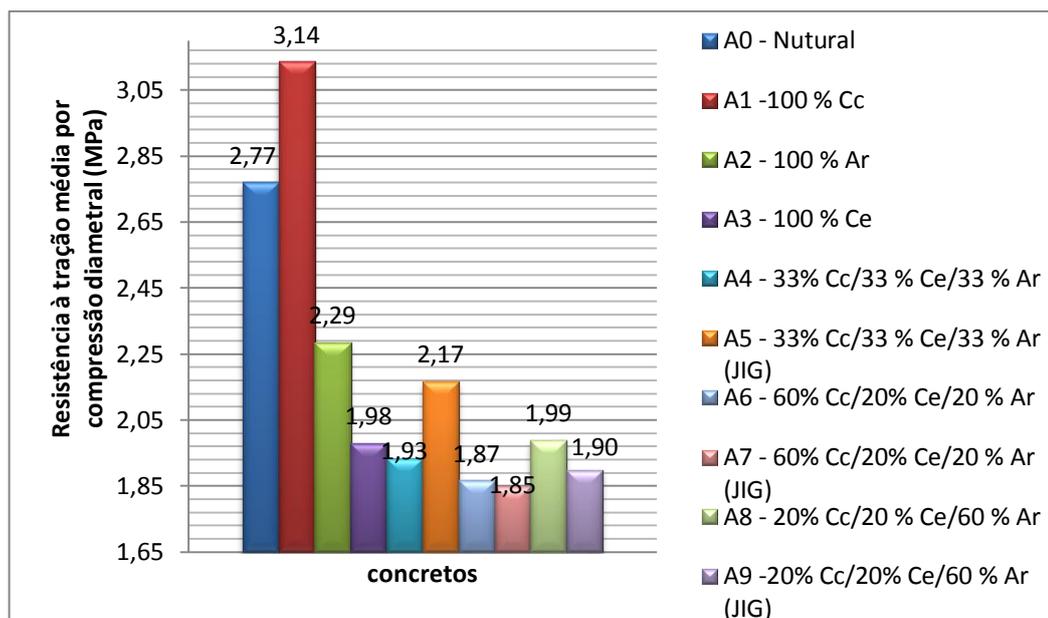
A resistência à tração do concreto variou conforme o tipo de agregado e a proporção utilizada como podem ser vistos os resultados apresentados na tabela 15 e na figura 34.

Tabela 15 – Resultados de resistência à tração dos concretos ensaiados

CONCRETOS	ft <sub>14</sub> (MPa)			ft <sub>14</sub> médio (MPa)	desvio Padrão (MPa)	coeficiente de variação (%)
	CP1	CP2	CP3			
A0 - Nutural	2,79	2,13	3,42	2,78	0,64	23,22
A1 - 100 % Cc	3,31	2,93	3,17	3,14	0,19	6,20
A2 - 100 % Ar	2,21	2,02	2,63	2,29	0,31	13,57
A3 - 100 % Ce	1,87	2,00	2,07	1,98	0,10	5,07
A4 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar	1,61	2,36	1,83	1,93	0,38	19,81
A5 - 33% Cc/33 % Ce/33 % Ar (JIG)	2,39	2,44	1,66	2,17	0,44	20,10
A6 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar	2,10	1,72	1,79	1,87	0,20	10,86
A7 - 60% Cc/20% Ce/20 % Ar (JIG)	2,16	1,59	1,80	1,85	0,29	15,70
A8 - 20% Cc/20 % Ce/60 % Ar	1,92	1,89	2,16	1,99	0,14	7,23
A9 - 20% Cc/20% Ce/60 % Ar (JIG)	1,52	1,95	2,23	1,90	0,36	18,74

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 34 – Resultados de resistência à tração das amostras



(fonte: elaborado pelo autor)

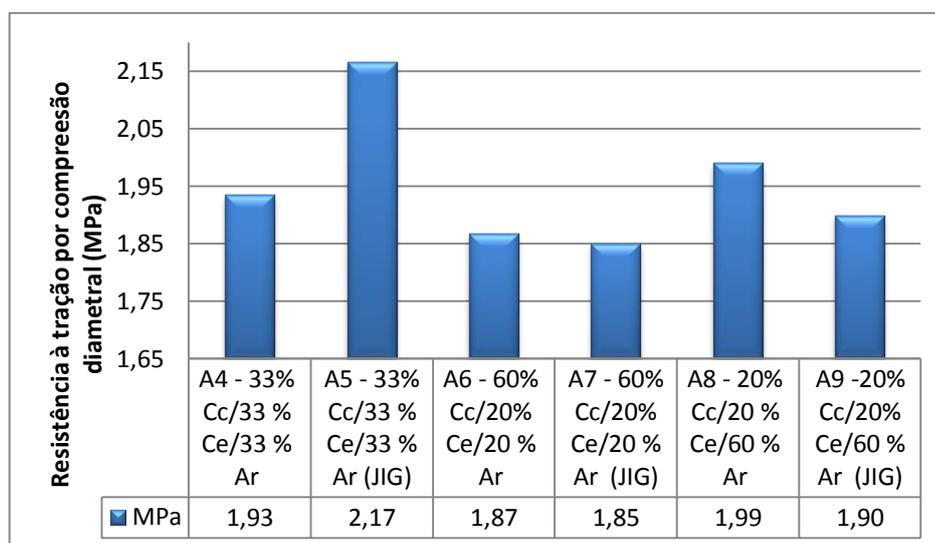
No caso de concretos com somente um tipo de agregado reciclado, o valor máximo atingido foi de 3,14 MPa com agregados reciclados de concreto, e o mínimo 1,98 MPa com agregados reciclados cerâmicos. A relação entre a resistência à tração e resistência à compressão variou de 8,71% a 11,75% entre os concretos ensaiados. Essa relação tem a tendência de diminuir com o aumento da resistência à compressão do concreto. Um fator prejudicial foi a alta variabilidade das resistências à tração dos concretos, que foi de 23,22% para os concretos com agregados naturais e de 13,57 % para concretos com agregados reciclados de argamassa.

Sabendo que os concretos com agregados reciclados cerâmicos apresentaram a menor resistência à tração média entre todos os concretos com somente um tipo de agregado, o uso do processo de jigagem na separação, para o caso de resistência à tração, não teve uma eficiência expressiva. Observando na tabela 15, os concretos com as amostras A7 e A9, de agregados jigados, os valores médios de resistência à tração foram menores do que o da amostra A3 de concreto com agregado cerâmico. Além do que, as amostras de concretos com agregados submetidos ao *air jig* apresentaram valores altos de coeficiente de variação, em comparação aos concretos com somente um tipo de agregado reciclado.

### 5.3.2 Influência na resistência à tração dos concretos: agregados submetidos ao *air jig* x agregados reciclados com mistura de referência

A figura 35 ilustra os resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos executados a partir de amostras de agregados separadas no *air jig* em comparação aos concretos com agregados com mesma mistura de referência.

Figura 35 – Resistência à tração dos concretos com agregados jigados x concretos com agregados de mesma proporção de referência



(fonte: elaborado pelo autor)

Ao analisar a resistência à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com agregados separados no *air jig*, em comparação aos concretos com as mesmas proporções de referência, pode-se dizer que o método utilizado não teve efetividade na melhora das resistências à tração. Visto que, somente o concreto com a amostra A5 em relação a A4 teve um aumento de 1,93 MPa para 2,17 MPa, representando 12,44%. Para as outras amostras, ao invés de aumentar, houve uma leve diminuição da resistência à tração (figura 35).

## 5.4 RESULTADOS E INTERFERÊNCIAS DA SEPARAÇÃO DOS AGREGADOS NOS CONCRETOS PRODUZIDOS

As análises das amostras de agregados reciclados separados no *air jig* são de fundamental importância nos resultados das propriedades mecânicas dos concretos. Nesse contexto as figuras 36, 37 e 38 ilustram o produto final do processo para as amostras A5, A7 e A9.

Figura 36 – Última camada da amostra  
A5 – 33%cc/33% ce/33% ar



(fonte: Foto do autor)

Figura 37 – Última camada da amostra  
A7 – 60%cc/20% ce/20% ar



(fonte: Foto do autor)

Figura 38 – Última camada da amostra A9 – 20%cc/20% ce/60% ar



(fonte: Foto do autor)

Analisando as características dos agregados em associação com a teoria da jigagem, pode-se calcular o critério de concentração ( $C_c$ ), que fornece uma resposta inicial da facilidade de se

obter uma separação entre minerais por meio de processos gravimétricos, excluindo a influência do fator de forma das partículas minerais (LINS, 2004, p.245). Com a equação 7, sugerida por Taggart<sup>15</sup> (1945, apud LINS, 2004, p.245), pode ser calculado o valor do critério de concentração:

$$C_c = \left| \frac{pd - pf}{pl - pf} \right| \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

$C_c$  = critério de concentração

$pd$  = densidade aparente do material pesado

$pf$  = densidade aparente do fluido

$pl$  = densidade aparente do material leve

Dessa forma, foi necessário calcular as densidades aparentes dos diferentes agregados reciclados (tabela 16), para se ter uma noção da eficiência que se espera do equipamento.

Tabela 16 – Densidade aparente dos agregados reciclados

Agregado	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
Agregados reciclados de concreto	2,25
Agregados reciclados de material cerâmico	1,78
Agregados reciclados de argamassa	1,80

(fonte: elaborado pelo autor)

Considerando a densidade do ar de 0,0121 g/cm<sup>3</sup> e as densidades dos agregados reciclados que constam na tabela 16, de acordo com a equação 7 foram calculados os critérios de concentração dos diferentes materiais separados no *air jig*. Os resultados obtidos variaram conforme a combinação dos tipos de agregados reciclados. Entre o concreto e o material cerâmico seu valor foi de 1,25, entre concreto e argamassa 1,26 e entre cerâmica e argamassa 1,01. Conforme a tabela 17 os critérios de concentração dos agregados estão no limite entre

<sup>15</sup> TAGGART, A. F. **Handbook of Mineral Dressing**. 2nd ed. New York: John Wiley and sons, 1945.

separação difícil e extremamente difícil e a aplicabilidade para a granulometria mínima até 6,3 mm.

Tabela 17– Faixas granulométricas de aplicabilidade e critérios de concentração

Critério de concentração	Aplicabilidade
> 2,5	separação fácil até 0,074 mm
2,75 a 1,75	separação efetiva até 0,150 mm
1,75 a 1,50	separação possível até 1,64 mm, porém difícil
1,50 a 1,25	separação possível até 6,3 mm, porém difícil
< 1,25	separação extremamente difícil

(fonte: PERES et al<sup>16</sup>.,2000 apud BARCELOS, 2010, p.11)

A granulometria é outro fator que interferiu no processo de jigagem. No trabalho adotou-se uma faixa ampla. Desde a dimensão máxima dos agregados que foi de 19 mm ao limite inferior de 4,75 mm (figura 39).

Figura 39 – Grãos de argamassa na dimensão 19 mm e 4,75 mm.



(fonte: foto do autor)

Segundo Sampaio e Tavares (2005, p. 345), para separar as partículas grosseiras é necessário uma velocidade de ar maior, porém entre as partículas finas isso gera uma turbulência excessiva, prejudicando o processo de estratificação. Essa é uma das grandes limitações de materiais não classificados da separação pneumática.

<sup>16</sup> PERES, A. E. C.; CHAVES, A. P.; LINS, F. A. F. The effect of starch, amylose and amylopectin on the depression of ox - minerals. **Minerals Engineering**, Grã-Betanha, v. 5, n. 3-5, p. 467- 478, 2000.

Comparando um ensaio *air jig* com a granulometria entre 12,7 mm a 20 mm, com outro ensaio com a faixa granulométrica usada no trabalho de 4,75 mm a 19 mm, nota-se visualmente uma melhor eficiência para o ensaio com dimensões dos grãos mais próximas. O ensaio feito com faixa granulométrica entre 12,7 mm e 20 mm é composto por material cerâmico e concreto, enquanto o com faixa granulométrica entre 4,75 mm e 19mm é composto por concreto, argamassa e cerâmica. Fazendo a análise dos agregados nas camadas inferiores dos ensaios, pode-se visualizar que para tamanho de partículas maiores e mais próximas, o material depositado na gaveta de fundo é o mais denso, composto basicamente por concreto (figura 40 e 41). Observa-se, também, que a separação sofreu influência das paredes do equipamento. No ensaio com grãos de 4,75 mm a 19 mm a argamassa foi colorida, com corante amarelo, na tentativa de diferenciação das partículas de concreto.

Figura 40 – Camada de fundo do ensaio com material na faixa granulométrica de 12,7 mm a 20 mm



(fonte:(material não publicado)<sup>17</sup>)

Figura 41 – Camada de fundo do ensaio com material na faixa granulométrica de 4,75 mm a 19 mm



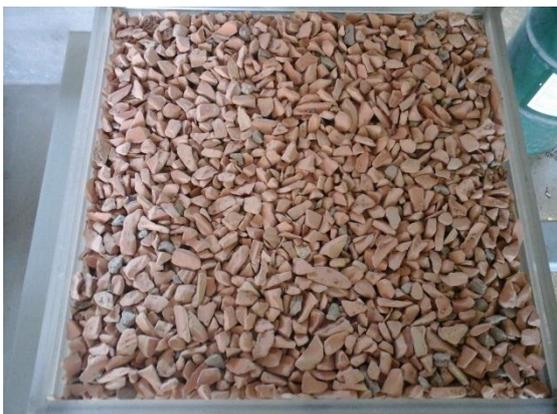
(fonte: foto do autor)

Mesmo o segundo ensaio tendo um tipo de material a mais que o primeiro, isso não prejudicaria de forma determinante na separação das partículas de concreto, se essa fosse regida somente pela densidade. Visto que, a cerâmica e a argamassa possuíam praticamente as mesmas densidades aparentes e o concreto uma densidade aparente superior. Nas camadas superiores dos ensaios, viu-se que, para os ensaios com granulometria de 12,7 mm a 20 mm o material depositado era praticamente cerâmico. Para o ensaio com granulometria 19 mm a

<sup>17</sup> Foto cedida Weslei Ambrós doutorando do LAPROM e integrante do projeto em desenvolvimento **Beneficiamento Gravimétrico de Entulhos da Construção Civil.**

4,75 mm a maioria do material era cerâmica e argamassas, com pouca quantidade de concreto misturado (figura 42 e 43).

Figura 42 – Camada superior do ensaio com material na faixa granulométrica de 12,7 mm a 20 mm



(fonte: (material não publicado)<sup>18</sup>)

Figura 43 – Camada superior do ensaio com material na faixa granulométrica de 4,75 mm a 19 mm



(fonte: foto do autor)

Analisando o início e fim dos ensaios, pode-se perceber que para os agregados com granulometria de 12,7 mm a 20 mm, ao final do ensaio tem-se nitidamente uma estratificação dos materiais. Basicamente, quase não se visualiza o material de concreto que se encontra armazenado ao fundo do equipamento, enquanto o material cerâmico está depositado nas gavetas superiores, logo acima desse, como pode ser visto nas figuras 44 e 45.

---

<sup>18</sup> Foto cedida Weslei Ambrós doutorando do LAPROM e integrante do projeto em desenvolvimento **Beneficiamento Gravimétrico de Entulhos da Construção Civil.**

Figura 44 – Início do ensaio com faixa granulométrica de 12,7 mm a 20 mm



(fonte: (material não publicado)<sup>19</sup>)

Figura 45 – Fim do ensaio com faixa granulométrica de 12,75 mm a 20 mm



(fonte: material não publicado<sup>20</sup>)

Com a faixa granulométrica de 4,75 mm a 19 mm não foi possível notar estratificação dos materiais, contudo percebeu-se que a maior parte do material de concreto estava na gaveta de fundo. Por outro lado, há uma mistura de partículas finas e grosseiras dos diferentes tipos de materiais em todas as gavetas do *air jig* (figuras 47 e 48).

Figura 46 – Início do ensaio com faixa granulométrica de 4,75 mm a 19 mm



(fonte: foto do autor)

Figura 47 – Fim do ensaio com faixa granulométrica de 4,75 mm a 19 mm



(fonte: foto do autor)

O efeito da forma das partículas também influenciou no resultado da separação. Segundo Sampaio e Tavares (2005, p.343), a forma dos grãos influencia significativamente na jigeagem

<sup>19</sup> Foto cedida Weslei Ambrós doutorando do LAPROM e integrante do projeto em desenvolvimento **Beneficiamento Gravimétrico de Entulhos da Construção Civil.**

<sup>20</sup> op. cit.,

a seco. Partículas com formato lamelar, como as do material cerâmico, tendem a reportar ao produto leve independente da densidade. Partículas menos angulares, apresentando formas isométricas, em mistura com grãos irregulares como os de concreto, podem reportar ao produto mais denso. Essa situação ocorre quando a quantidade de ar introduzida é insuficiente para fluidizar a mistura.

A eficiência do método de separação interferiu diretamente nos resultados da pesquisa, pois os tipos de agregados utilizados possuem diferentes características com comportamentos distintos no concreto. Se tivesse ocorrido a estratificação em camadas por densidade, a gaveta de fundo do *air jig* seria composta na sua maioria por agregados reciclados de concreto. Porém as densidades próximas dos materiais, a granulometria adotada e a forma das partículas influenciaram significativamente na eficiência do método.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de verificar, se haveria ou não a redução da variabilidade de concretos feitos com agregados reciclados, foi utilizado o processo de separação por jigagem a seco em misturas com proporções dos diferentes tipos de agregados utilizados no trabalho. Com a retirada das diferentes amostras de agregados do *air jig*, foram produzidos concretos e suas propriedades de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação foram ensaiadas. Os resultados dos ensaios foram comparados com outros resultados de concretos que não tiveram agregados submetidos à separação.

### 6.1 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos do programa experimental realizado e analisado nos capítulos anteriores, pode-se fazer as seguintes conclusões para os métodos realizados na pesquisa:

**a) Quanto ao método de separação dos agregados reciclados,**

- a jigagem a seco por meio do equipamento *air jig* não se mostrou eficiente na separação dos ARCD para os parâmetros usados nessa pesquisa, encontrando-se materiais de diferentes densidades em todas as camadas de estratificação do equipamento;
- materiais com densidades próximas e de menor granulometria torna o processo de separação muito difícil, como no caso a argamassa e cerâmica;
- a separação dos materiais é influenciada, além da densidade, pela granulometria e forma das partículas;
- as partículas de concreto em todas as amostras de agregados jigados encontravam-se na sua maioria na camada de fundo, mas em diferentes quantidades, variando conforme as proporções das amostras;
- as paredes do equipamento também interferiram em parte no resultado da separação, havendo uma área de influência na qual as partículas de diferentes densidades se depositam próximas às paredes da câmara de estratificação na camada de fundo, onde deveria ficar o material mais denso;

**b) Quanto à resistência à compressão axial,**

- a separação por densidade dos agregados reciclados não é um parâmetro que possa controlar a resistência à compressão dos concretos de forma isolada, a não ser que se consiga uma excelente estratificação dos materiais. Uma vez que a resistência é influenciada significativamente por diversos fatores como composição, granulometria e forma dos agregados;

- as concretos com agregados jigados alcançaram resistências bem abaixo dos concretos com agregados de concretos, sofrendo influência dos agregados de cerâmica e argamassa;
- concretos feitos com agregados reciclados de concreto apresentaram melhores resultados dentre todos os concretos com ARCD, enquanto os que possuíam agregados de argamassa obtiveram o pior. O concreto com agregado cerâmico apresentou valores intermediários, provavelmente por o agregado utilizado ter na sua composição bloco cerâmico estrutural;
- os concretos com agregados jigados apresentaram resistências muito próximas dos que continham as mesmas proporções de referência inicial dos diferentes agregados, em função da baixa eficiência do processo de separação para os métodos usados na pesquisa;
- a resistência à compressão dos concretos com agregados misturados apresentou redução da variabilidade dos concretos com diferentes agregados usados isolados e aleatoriamente. Os concretos com agregados misturados e jigados obtiveram resultados semelhantes aos somente misturados, porém apresentaram maior variabilidade comparando aos que não foram submetidos ao *air jig*, provavelmente em função da baixa eficiência do processo de separação para os métodos usados na pesquisa;

#### **c) Quanto ao módulo de deformação,**

- os módulos de elasticidade dos concretos com agregados reciclados reduziram comparado ao concreto com agregado natural, atingindo reduções de 37,04 % a 70, 79%. Isso se deve a alta porosidade dos ARCD, que são mais deformáveis;
- o módulo de elasticidade do concreto com agregados de concreto foi o maior valor dentre todos que continham ARCD, em função de ter menores valores de absorção, porosidade e maior massa específica. O concreto com material cerâmico apresentou o menor módulo por motivos contrários;
- os concretos com agregados jigados obtiveram valores mais altos no módulo de elasticidade em comparação aos concretos com as mesmas proporções iniciais dos diferentes agregados, e também aos concretos com agregados puramente cerâmicos e com argamassa. Isso se deve ao fato que o processo de jigagem separa os materiais mais densos dos menos densos, assim concretos com agregados de maior densidade têm suas deformações reduzidas;
- o processo de jigagem na separação dos agregados influenciou positivamente no módulo de deformação do concreto, visto que todos concretos feitos com agregados submetidos ao *air jig* tiveram um aumento no valor em relação aos que continham agregados nas mesmas proporções, mas que não foram submetidas ao equipamento. Também o processo de separação conseguiu reduzir a variabilidade dos concretos em relação à propriedade analisada de maneira geral;

#### **d) Quanto à resistência à tração por compressão diametral,**

- as resistências à tração dos concretos da pesquisa, independente do tipo de agregado e proporção de mistura, apresentaram altos coeficientes de variação indicando alta a variabilidade dos resultados;
- o processo de separação dos agregados não apresentou sucesso em relação a melhora na propriedade de resistência a tração dos concretos com agregados reciclados, tampouco, na redução da variabilidade desses;
- os concretos com agregados naturais e reciclados de concreto tiveram valores mais altos de resistência à tração, enquanto as composições de agregados cerâmicos e argamassas apresentaram resultados menores, indicando que essa característica é sensível à porosidade e forma dos agregados no concreto. Dessa forma, os agregados, quanto mais porosos e de forma lamelar, resultaram em menor resistência à tração do concreto produzido.

Portanto, com base nessa pesquisa conclui-se que o comportamento dos concretos com agregados reciclados é muito sensível ao tipo de agregado e suas características próprias. Porém, o método de jigagem a seco não foi eficiente em separar os diferentes agregados, não reduzindo a variabilidade dos resultados finais de resistência à compressão e tração. Contudo, o processo de jigagem a seco foi influenciado significativamente pelas densidades próximas dos materiais, granulometria e forma dos agregados. Com relação aos resultados de módulo de elasticidade dos concretos reciclados com agregados jigados, esses obtiveram aumentos relevantes e variabilidades reduzidas, visto que essa propriedade é afetada diretamente pela densidade dos materiais.

Por fim, é importante salientar que nesse novo universo do qual a pesquisa faz parte é necessário realizações de mais pesquisas para verificar a possibilidade de redução da variabilidade de concretos com agregados reciclados, ajustando melhor os parâmetros de utilização do equipamento air jig.

## 6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os resultados encontradas durante a realização do trabalho e como não foi possível contemplar todas, sugere-se:

- a) usar faixas granulométricas mais reduzidas no processo de separação por jigagem a seco, que as utilizadas neste trabalho;
- b) limitar uma zona de coleta na camada de maior densidade dos materiais retirados do *air jig*, excluindo a área de influência das paredes;

- c) fazer uma análise gravimétrica dos materiais retirados do *air jig* utilizados como agregado;
- d) utilizar os materiais das camadas superiores e intermediárias do *air jig* como agregados para a produção de concretos, e posteriormente realizar ensaios mecânicos para verificar a variação dos resultados.

## REFERÊNCIAS

ÂNGULO, S. C. **Caracterização de resíduos de construção e demolição reciclados e a influencia de suas características no comportamento do concreto**. 2005. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo: 2012. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panoramaanexos2012.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737** Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 5739** Concretos – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522** Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade a compressão. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 7809** Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método de paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53** Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222** Agregado e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos - de - prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

BARCELLOS, H. O. **Jigagem de minérios itabiríticos**. 2010. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1998.

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 f. Tese (Doutorado em Ciência da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CAZACLIU, B.; SAMPAIO, C. H.; MILTZAREK, G.; PETTER, C.; LE GUEN, L.; PARANHOS, R.; HUCHET, F.; KIRCHHEIM, A. P. The potential of using air jiggling to sort recycled aggregates. **Journal of Cleaner Production**, Reading, v. 66, p. 46-53, Mar. 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução n. 307**, de 05 de julho de 2002 Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção

civil. Brasília, DF, 2002. Disponível em: <  
<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 05 jun. 2014.

CORDEIRO, L. de N. P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade dos concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC)**. 2013. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

HELENE, P. R. L.; ANDRADE, T. Materiais da Construção Civil: concreto de cimento portland. In: \_\_\_\_\_. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 905-944.

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

LATTERZA, L. de M. **Concreto com Agregado Graúdo Proveniente da Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição. Um Novo Material para Fabricação de Painéis Leves de Vedação**. 1998. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

LEITE, M. B. **Avaliação das 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.

LINS, F. A. F. Concentração gravítica. In: \_\_\_\_\_. (Ed.). **Tratamento de minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. p. 241-268.

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.

MIRANDA, L. F. R.; ÂNGULO, S. C.; CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 57-71, jan./mar. 2009. publicação. Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/7183/4909>>. Acesso em: 10 jul. 2014.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, c2013.

PORTELLA, K. F.; GARCIA, C. M.; VERGÉS, G. R.; JOUKOSKI, A.; FREIRE, K. R. R. Desempenho físico-químico de metais e estruturas de concreto de rede de distribuição de energia: estudo de caso. **Química Nova**, São Paulo, v. 29, n. 4, p. 724-734, abr. 2006. Disponível em: <<http://submission.quimicanova.sbq.org.br/qn/qnol/2006/vol29n4/17-AR05251.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2014.

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

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