

**LUCIA HIROMI HIGA MOREIRA**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ORIGEM E DO TRATAMENTO  
DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO  
E DEMOLIÇÃO NO DESEMPENHO MECÂNICO DO CONCRETO  
ESTRUTURAL**

**SÃO PAULO  
2010**

LUCIA HIROMI HIGA MOREIRA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ORIGEM E DO TRATAMENTO DOS  
AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO  
NO DESEMPENHO MECÂNICO DO CONCRETO ESTRUTURAL

*Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
da Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção de título de  
Mestre em Engenharia*

*Área de concentração:  
Engenharia de Construção Civil*

*Orientador:  
Prof. Dr. Antonio Domingues de  
Figueiredo*

SÃO PAULO  
2010

**Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.**

**São Paulo, 06 de dezembro de 2010.**

**Assinatura do autor** \_\_\_\_\_

**Assinatura do orientador** \_\_\_\_\_

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Moreira, Lucia Hiromi Higa**

**Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural / L.H.H. Moreira. -- São Paulo, 2010.**

**92p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.**

**1.Entulho reciclado – São Paulo (SP);Macaé (RJ) 2.Resíduos de construção – São Paulo (SP);Macaé (RJ) 3.Agregados I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.**

*Ao meu querido marido pela compreensão e aos meus pais.*

“Buscai primeiro o Reino de Deus e a Sua justiça  
e as demais coisas vos serão acrescentadas”  
(Mateus 6:33).

## AGRADECIMENTOS

Ao Deus, o Todo Poderoso, cuja sabedoria, ciência e a verdade lhes pertence, o meu fiel amigo e o autor da minha fé. Aquele que põe fim às minhas guerras, o Mesmo que estabelece reis e também os fazem cair, que põe limites no mar e faz as estrelas brilharem.

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Domingues de Figueiredo meu agradecimento especial, pela orientação, pela compreensão, pelo exemplo de profissionalismo, pelo apoio, contribuições, conselhos e toda ajuda que tem me dado durante a fase do mestrado.

Ao Prof. Dr. Vanderley Moacyr John, pela oportunidade em participar do projeto e pelas preciosas sugestões e contribuições dadas no exame de qualificação para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Vahan Agopyan pelas valiosas contribuições e críticas dadas no exame de qualificação.

Ao Dr. Sérgio C. Ângulo, pela amizade e inúmeras discussões, contribuições e sugestões.

À Ms. Carina Ulsen pela amizade, parceria, pelos tratamentos dos agregados reciclados e toda ajuda inicial.

Aos professores do Departamento de Construção Civil, pelos ensinamentos.

À CNPq, pela bolsa cedida durante o primeiro ano e a CAPES pelo financiamento da bolsa de estudo desta pesquisa.

À equipe do CETEM (Centro de Tecnologia Mineral) pelo envio dos agregados reciclados para a realização desse trabalho.

À empresa Holcim pela doação de cimentos.

À querida amiga Fádía Lima pelo ombro amigo; obrigada pelos conselhos você é mais que uma grande amiga.

À querida amiga Fabíola Figueroa pela amizade, parceria e muita alegria que você tem transmitido.

Ao amigo Carlos Britez por toda ajuda principalmente nas disciplinas.

À Rosiany, pela sincera amizade, Rui e Bruno pelas discussões e conselhos. Às amigas: Luciana Kataoka e Carolina Marques.

Ao Dr. Valdecir Angelo Quarcioni, responsável pelo Laboratório de Materiais do IPT, por disponibilizar equipamentos e técnicos à realização dos ensaios mecânicos. A todos os funcionários do Laboratório de Materiais, em especial: Givanni, Machado e Edson pela realização dos ensaios. Ao Baretta pela amizade e discussões. Ao Luis Hamassaki. E ao amigo Rafael pela paciência nos meus momentos de desesperos.

Aos técnicos: à doce Talita, Reginaldo, Mário e em especial ao Adilson pela ajuda braçal. Aos técnicos do PEF: Juca e Rui.

À Fátima Domingues, Wandréa e Engrácia pela amizade e por toda ajuda.

Ao pessoal da informática: Edson, Rogério e em especial a Patrícia.

Ao Prof. Dr. Marcel Mendes pela preciosa amizade.

À minha querida prima Olga Zazuco Higa.

Ao Raphael meu querido e amado marido, meu companheiro, amigo e eterno namorado, muito obrigada por ter entrado na minha vida. Não tenho palavras para agradecer pelo seu apoio, compreensão, cumplicidade, carinho, incentivo, enfim por simplesmente tudo que você tem feito por nós. Pelas inúmeras noites sem dormir por discutir e revisar o meu texto tornando-se especialista no meu tema. Obrigada por sonhar os meus sonhos e me ajudar a concretizá-los.

Aos meus queridos pais, os meus primeiros professores. Ao meu irmão pelo carinho e alegria que sempre tem me proporcionado e a minha querida avó que sempre torceu por mim. Descrever o que vocês fizeram por mim seria pouco.

Ao meu sogro e minha sogra pelo carinho e compreensão.

E a todos que colaboraram direta ou indiretamente, na execução deste trabalho.

## Resumo

A cadeia da construção civil é uma grande causadora de impactos ambientais, pois além do alto consumo de recursos naturais gera também grandes quantidades de resíduos. Isto traz elevados custos à sociedade pela necessidade de remoção e destinação dos resíduos, normalmente depositados em aterros. A reciclagem tem sido uma alternativa para redução do volume de resíduos finais. Estudos utilizando agregados reciclados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) para a produção de concreto têm sido realizados por vários pesquisadores indicando viabilidade técnica da sua aplicação. No entanto, há dúvidas que dificultam a implementação do uso de resíduos reciclados dada a grande variabilidade das suas propriedades devido à variação de sua constituição que é muito influenciada pela origem dos mesmos. Assim, alguns tratamentos são propostos com a intenção de otimizar o desempenho do concreto produzido com estes agregados reciclados. A presente dissertação tem como objetivo avaliar a influência dessas variabilidades dos agregados de RCD reciclados nas propriedades do concreto estrutural. Esses agregados foram provenientes das cidades de Macaé e São Paulo, ambos submetidos aos mesmos tipos de tratamento: (a) britagem e (b) britagem e separação densitária (jig), atendendo a mesma faixa granulométrica de  $-19+4,8$  mm. No programa experimental, foi utilizada a metodologia de dosagem convencional para a avaliação do comportamento mecânico do concreto reciclado. Neste estudo, os agregados foram utilizados sem pré-saturação, o que possibilitou o preenchimento de parte dos poros dos agregados pela pasta de cimento. Tal procedimento contribuiu para uma menor diferença relativa de desempenho do concreto convencional em relação ao produzido com agregados reciclados, principalmente para os concretos com maior relação água/cimento. Foram analisados os resultados de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, absorção de água, índice Binder Intensity e ensaio de ultra-som. Comprovou-se que a porosidade dos agregados é o fator principal de influência no comportamento do concreto. Já a origem dos agregados foi um fator secundário dado que os mesmos apresentavam diferentes porosidades em função da cidade onde foram obtidos. A separação densitária possibilitou a aproximação do comportamento dos agregados de diferentes origens por aproximar a porosidade dos mesmos.

**Palavras chaves:** Resíduo de construção e demolição. Separação densitária (jig). Agregados de RCD reciclados sem pré-saturação. Dosagem. Ensaio destrutivo e não destrutivo.



## Abstract

The civil construction industry is a great producer of environment impacts. It also generates great amounts of residues, further the high consumption of natural resources. This fact brings high costs to society due to the need of residues removing and disposal, which typically occurs in landfills. Recycling has been an alternative to reduce the volume of residues. Studies using recycled aggregates from Construction and Demolition Waste (CDW) to produce concrete have been carried out by several researchers, indicating that is technically feasible in terms of application. However, there are questions that turns difficult the implementation of the use of recycled residues, due to the great variability of their properties as a result of the variation of their constitution, which is strongly influenced by their origin. Thus, a few treatments are proposed, aiming at optimizing the performance of these recycled aggregates to produce concrete. The present work aims at assessing the influence of the recycled CDW aggregates on the properties of structural concrete. These aggregates originated from the cities of Macaé and São Paulo, and both were submitted to the same type of treatment: (a) crushing and (b) crushing and density separation (jig), complying with the same granulometric range of -19+4.8 mm. The conventional mix design methodology was used in the experimental program to assess the concrete behavior and the influence of the recycled material. The aggregates were used in this study without being pre-saturated, which allowed filling up part the pores of the aggregates with cement paste. Such procedure contributed for a smaller relative difference on the performance of the conventional concrete and that one produced with recycled aggregates, especially the concrete with a higher water/cement ratio. The compressive strength, split tensile strength, elastic modulus, water absorption, Binder Intensity index and measuring of ultrasonic testing were analyzed. The porosity of the aggregate was proved to be a prevalent factor influencing the behavior of the concrete. The origin of the aggregates was a secondary factor because they had different porosities according to the city where they were obtained. The density separation allowed the reduction of the difference in behavior between the concretes produced with aggregates from different origins by approaching their porosity.

**Key words:** *Construction and demolition residue. Density separation (jig). Recycled CDR aggregates without pre-saturation. Mix-design. Destructive measuring. Non-destructive measuring.*

## SUMÁRIO

<b><u>1. INTRODUÇÃO</u></b> .....	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA .....	1
1.2 OBJETIVO.....	5
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	6
<b><u>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u></b> .....	<b>7</b>
2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A CONSTRUÇÃO CIVIL .....	7
2.2 GERAÇÃO E A RECICLAGEM DE RCD NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	8
<b><u>3. CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RCD.11</u></b>	
3.1 INFLUÊNCIA DA POROSIDADE, ABSORÇÃO DE ÁGUA E MASSA ESPECÍFICA DO AGREGADO DE RCD RECICLADO NO CONCRETO.....	11
3.2 FORMA E TEXTURA DOS AGREGADOS DE RCD RECICLADOS .....	14
3.3 GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS DE RCD RECICLADOS .....	14
3.4 ORIGEM E VARIABILIDADE DOS AGREGADOS DE RCD RECICLADOS .....	15
3.5 BENEFICIAMENTO DOS AGREGADOS .....	16
3.5.1. BRITAGEM .....	16
3.5.2. JIGUE .....	17
3.6 UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS DE RCD RECICLADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	17
3.7 ARGAMASSA PRODUZIDA COM AGREGADOS RECICLADOS .....	18
3.8 CONCRETO PRODUZIDO COM AGREGADOS RECICLADOS .....	19
<b><u>4. METODOLOGIA</u></b> .....	<b>21</b>
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	21
4.2 SÃO PAULO.....	23
4.3 MACAÉ.....	24
4.4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	25
4.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS .....	30

4.6	PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	31
4.7	ESTUDO DE DOSAGEM.....	32
4.8	DEFINIÇÃO DO TRAÇO DE REFERÊNCIA E DOS CONCRETOS RECICLADOS.....	32
4.9	PROCEDIMENTO DE MOLDAGEM, ADENSAMENTO E CURA DOS CORPOS-DE-PROVA .....	38
<b>5.</b>	<b><u>RESULTADOS E ANÁLISE .....</u></b>	<b><u>41</u></b>
5.1	CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	41
5.2	CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO .....	44
5.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	44
5.4	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	55
5.5	ABSORÇÃO DE ÁGUA NO CONCRETO .....	59
5.6	MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	62
5.7	CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS MECÂNICOS DESTRUTIVOS E O ENSAIO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA ULTRA-SÔNICA .....	65
<b>6.</b>	<b><u>AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE SATURAÇÃO PRÉVIA DOS AGREGADOS DE RCD RECICLADOS .....</u></b>	<b><u>71</u></b>
<b>7.</b>	<b><u>CONCLUSÕES .....</u></b>	<b><u>74</u></b>
7.1	PROPOSTAS DE ESTUDOS FUTUROS.....	75
<b>8.</b>	<b><u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u></b>	<b><u>76</u></b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Resíduos da Construção Civil. ....	10
Figura 2 – Resistência à compressão dos concretos em função dos valores de massa específica aparente dos agregados de RCD reciclados separados por densidade. ....	13
Figura 3 – Avaliação da reciclagem. Adaptado: (DOSHO, 2007) .....	18
Figura 4 – Agregados graúdos reciclados: a) SPJ; b) MJ; c) SPB e d) MB.....	21
Figura 5 – Locais de coleta da amostras e suas frequências de ocorrências. ....	23
Figura 6 – Procedimento de redução do tamanho e homogeneização da amostra. ....	25
Figura 7 – Britador de mandíbulas 2015. ....	26
Figura 8 - Resultado visual da separação no jigue por densidade – agregados de RCD com predominância de materiais cerâmicos da cidade de Macaé. ....	27
Figura 9 - Resultado visual da separação no jigue por densidade – agregados RCD com predominância de materiais cerâmicos da cidade de São Paulo. ....	28
Figura 10 – Etapas da produção da pilha: a) produção da pilha alongada; b) corte de uma das extremidades da pilha alongada; c) pilha de homogeneização finalizada. ....	30
Figura 11 – Medida do abatimento do tronco de cone. ....	39
Figura 12 – Correlação entre a massa específica e a massa específica do concreto do traço intermediário. ....	42
Figura 13 – Influência do tratamento dos agregados reciclados na massa específica do concreto. ....	43
Figura 14 – Capeamento dos corpos-de-prova e ensaio mecânico – resistência à compressão. ....	44
Figura 15 – Resistência à compressão dos concretos em função da massa específica dos agregados e do consumo de cimento. ....	47
Figura 16 – Resistência à compressão do concreto em função da massa específica da origem e do tratamento dos agregados. ....	48
Figura 17 - Diagrama de dosagem contendo as correlações entre resistência à compressão e relação água/cimento, relação água/cimento e teor de agregados e teor de agregados e consumo de cimento.....	50
Figura 18 – Gráfico de dosagem associando a resistência à compressão ao consumo de cimento segundo o tratamento dos agregados reciclados. ....	52
Figura 19 - Influência do tratamento e da origem dos agregados reciclados. ....	54
Figura 20 – Ensaio de compressão diametral. ....	56

Figura 21 - Resistência à tração por compressão diametral em função dos valores de m para os diferentes concretos reciclados. ....	56
Figura 22 – Curva de resistência à tração por compressão diametral em função da relação a/c. ....	57
Figura 23 – Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão. ....	59
Figura 24 – Ensaio de absorção de água dos concretos. ....	60
Figura 25 – Comparação entre os resultados de absorção de água do concreto em relação às diferentes famílias de concretos. ....	61
Figura 26 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto para concretos com baixa relação água/cimento. ....	64
Figura 27 – Módulo de elasticidade dos concretos convencionais e reciclados. ....	65
Figura 28 – Ensaio da determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas dos concretos naturais e reciclados. ....	66
Figura 29 - Análise da velocidade de propagação de onda ultra-sônica em função da absorção de água do concreto para os agregados reciclados das cidades de São Paulo e Macaé. ...	68
Figura 30 - Análise da velocidade de propagação de onda ultra-sônica em função da resistência à compressão do concreto para os diferentes tipos de tratamentos e origens dos agregados reciclados. ....	69
Figura 31 – Análise da velocidade de propagação de onda ultra-sônica em função da módulo de elasticidade do concreto para os diferentes tipos de tratamento dos agregados reciclados. ....	70
Figura 32 – Correlação entre o ensaio de resistência à compressão e a relação água/cimento. ....	71
Figura 33 - Correlação entre o ensaio de resistência à compressão e a absorção de água do concreto. ....	73

## TABELA

Tabela 1 – Variabilidade da composição dos RCD.....	15
Tabela 2 – Agregados utilizados na formulação do concreto. ....	22
Tabela 3 – Caracterizações físicas dos agregados. ....	30
Tabela 4 – Traço do compósito rico em consumo de cimento.....	34
Tabela 5 – Traço do compósito de cimento intermediário. ....	35
Tabela 6 – Traço do compósito com baixo consumo de cimento. ....	36
Tabela 7 – Resumo do traço utilizado para a moldagem dos concretos.....	38
Tabela 8 – Resultados dos parâmetros obtidos do concreto no estado fresco. ....	41
Tabela 9 – Valores individuais médios obtidos no ensaio de determinação da resistência à compressão (a) traço rico e intermediário e (b) traço pobre.....	46
Tabela 10 – Valores de consumo de cimento dos concretos produzidos por agregados naturais e agregados reciclados de diferentes origens e tratamentos. ....	53
Tabela 11 – Comparação das resistências médias à tração por compressão diametral (ftD) dos concretos naturais pelos concretos reciclados.....	58
Tabela 12 – Valores médios de absorção de água por imersão dos concretos. ....	60
Tabela 13 – Valores médios do módulo de elasticidade e resistência à compressão dos concretos naturais e reciclados juntamente com a relação água/cimento. ....	63
Tabela 14 - Valores médios dos ensaios produzidos dos concretos com distintos tratamentos e origens.....	67

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 *Justificativa e relevância do tema*

Dentro do contexto do ambiente construído há uma preocupação no que se refere às reservas naturais dos materiais. Tal preocupação se deve à crescente escassez de matérias-primas e pela redução das áreas de deposição, devido à grande quantidade de resíduos descartados, principalmente nos grandes centros urbanos. Sendo assim, a busca por fontes alternativas tem crescido em importância dada a grande demanda de matérias-primas associadas à indústria da construção civil. Por outro lado a aplicação de técnicas de reciclagem para o aproveitamento de resíduos tem sido considerada uma necessidade para o desenvolvimento sustentável. Tendo em vista essa problemática, o emprego de técnicas de reciclagem para o aproveitamento da matéria-prima reutilizada passa a ser muito interessante.

O setor da construção civil é um dos grandes causadores do impacto ambiental. Assim, o incentivo ao reaproveitamento dos resíduos sólidos viabiliza a arte da sustentabilidade. Os resíduos sólidos causam grande preocupação, uma vez que o volume gerado traz como consequência uma série de problemas, incluindo custos elevados para a sua correta destinação pelas administrações municipais. Segundo John (1999, p. 44) “a reciclagem de resíduos apresenta várias vantagens ambientais e é uma parte fundamental do desenvolvimento sustentável de qualquer país. A construção civil é o setor que mais consome materiais naturais e conseqüentemente, é potencialmente um grande reciclador”. Até recentemente, a reciclagem foi vista como sendo apenas uma fórmula de baixar custos. No caso do concreto, a reciclagem é vista como uma ferramenta para melhorar o desempenho do produto (JOHN, 1999).

Atualmente há uma maior necessidade de reutilização de reciclagem do Resíduo de Construção e Demolição (RCD), entretanto, só muito recentemente os estudos para reciclagem começaram a receber maior impulso (SILVA, 2000), por questões políticas, econômicas ou ecológicas.

A reciclagem pode parecer a melhor alternativa encontrada para minimizar o impacto ambiental de resíduos, porém é preferível diminuir ao máximo a geração

dos desperdícios e reduzir a demanda de consumo de materiais, de modo a minimizar também a necessidade de reciclagem dos resíduos. No entanto, não basta somente adotar um sistema de reciclagem é preciso atender às exigências de mercado que possa absorver o novo produto a ser gerado. Pouco adianta uma tecnologia ou uma simples idéia que consiga recuperar um resíduo ou encontrar para ele uma utilização, se ele não for absorvido no mercado e efetivamente utilizado, devendo, por isso, ser posteriormente disposto (ZORDAN, 2003). Adicionalmente para a viabilidade da reciclagem dos agregados de RCD, devem-se levar em conta alguns aspectos, tais como, o desempenho técnico do produto reciclado, impactos ambientais causados tanto pelo processo de reciclagem quanto pelo uso e disposição final do produto reciclado e viabilidade de mercado (PIETRA, 2005).

Estudos desenvolvidos para a utilização desses agregados em concretos foram explorados por vários pesquisadores. Alguns exemplos podem ser citados tais como a avaliação da massa específica dos agregados graúdos de RCD reciclados nas propriedades do concreto (CARRIJO, 2005), a utilização de fibras de aço em concretos produzidos com agregados graúdos de RCD reciclados (PIETRA, 2005; BANTHIA; CHAN, 2000), a aplicação dos agregados de RCD reciclados em base de pavimentação, blocos de concreto, argamassas de assentamento, revestimento (MIRANDA, 2005), avaliação das propriedades dos concretos estruturais confeccionados com agregados graúdos e miúdos de RCD reciclados (TENÓRIO, 2007) e outros.

Apesar desses estudos ainda há um ponto a ser discutido em relação à influência da origem dos agregados de RCD reciclados nas propriedades do concreto estrutural. Nos estudos anteriores os resíduos eram de uma única fonte e não foram avaliadas as possíveis influências que a região de origem deve ter no desempenho do material reciclado.

No presente trabalho será abordada a influência da origem e do tratamento dos agregados de RCD reciclados nas propriedades do concreto. Com a finalidade avaliar a aplicação dos agregados reciclados e a possibilidade da sua utilização em concretos, os agregados foram submetidos a dois tipos de tratamentos: (a) britagem e (b) britagem e separação densitária através da jigagem.

Algumas pesquisas relacionadas ao tema são:



- Frondistou&Yannas (1977): o concreto produzido com agregados reciclados teve redução de 4 a 14% da resistência à compressão e seu módulo de elasticidade foi 40% mais baixo do que o concreto normal (TOPÇU; GUNÇAN, 1995).
- Hansen & Narud (1983): em seu estudo empírico, declaram que o concreto com agregado reciclado teve um resultado similar aos agregados naturais; eles também afirmam que a trabalhabilidade apresenta uma diminuição por perda de fluidez imediata e pela perda de abatimento mais rápida (TOPÇU; GUNÇAN, 1995).
- Hansen (1989): realizou um estudo do concreto produzido com agregados reciclados de concreto com adição de cinza volante sem a utilização do cimento portland. Nesse estudo verificou-se que o concreto com agregado reciclado ganha força lentamente e a provável causa seria a reação pozolânica entre cinza volante e o hidróxido de cálcio da pasta de cimento (HANSEN, 1989);
- Hansen (1992): avaliou o uso dos agregados reciclados em sub-base ou material de base para construção rodoviária; enchimento em projetos de drenagem; agregados para novos concretos estruturais e não-estruturais;

Algumas pesquisas relacionadas ao tema no país são:

- Carrijo e Figueiredo (2005): avaliaram o comportamento mecânico do concreto com agregados reciclados separados por densidade. Neste estudo verificou que o conhecimento da massa específica dos agregados graúdos reciclados é um importante parâmetro para se estimar a faixa de resistência do concreto produzido a partir deste material.
- Pietra e Figueiredo (2006): neste estudo empregou agregados graúdos naturais e de resíduos de construção e demolição; considerou a avaliação do concreto reforçado com diferentes teores de fibras de aço. Com o aumento do teor de fibra, a resistência à compressão não alterou e o comportamento do compósito com agregados reciclados, no que diz respeito à resistência à tração, se aproximou daquele obtido para o compósito com agregados naturais;
- Angulo e John (2005): analisaram as características dos agregados reciclados que influenciam o comportamento mecânico do concreto. A partir de

resultados obtidos concluíram que a porosidade (ou massa específica aparente) dos agregados reciclados controla o comportamento mecânico do concreto produzidos com relação água/cimento constante. A separação por densidade é uma técnica eficiente para separar esses agregados em subgrupos de diferentes porosidades, gerando concretos com comportamento mecânico e absorção de água similar.

- Miranda e Selmo (2005): abordaram uma metodologia de produção de argamassa produzida com entulho reciclado. Os resultados obtidos indicaram que o entulho de construção pode ser utilizado para a produção de revestimentos, em argamassas simples de cimento Portland, obtendo bons resultados de acabamento superficial, porém recomenda-se controlar o teor de finos (material abaixo de 75  $\mu\text{m}$ ), para evitar o excesso de porosidade, principalmente em se tratando de entulhos com elevado teor de argamassa mista.
- Dias e Agopyan (2004): avaliaram os agregados reciclados de telha de cerâmica vermelha através de estudos de laboratório, visando o seu emprego em camadas de pavimentos de baixo custo. Ficou evidenciada a importância da reciclagem para a sustentabilidade do setor produtivo de cerâmica vermelha. Os resultados dos ensaios de laboratório indicaram ser possível a aplicação desse material em pavimento de baixo volume de tráfego.
- Tenório e Gomes (2007): analisou algumas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto produzido com agregados miúdos e graúdos de RCD reciclado, com a finalidade de avaliar a possibilidade do uso do compósito em estruturas. Neste estudo alguns concretos reciclados chegaram a apresentar resistência mecânica maiores que os concretos de referência; os resultados permitiram afirmar que os concretos reciclados podem ser usados em estruturas, mas com restrições.
- Lovato e Dal Molin (2007): desenvolveram um estudo sobre os parâmetros de controle da variabilidade dos agregados reciclados; nesse estudo foi feita a comparação da classificação pela composição e pela separação densitária, para utilização em dosagens de concretos.

No Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP, o tema reciclagem de resíduos na construção civil, é abordado pelos

Professores Doutores: Vahan Agopyan, Maria Alba Cincotto, Paulo Helene, Vanderley M. John, Antonio Domingues de Figueiredo e Silvia M. S. Selmo.

O presente trabalho está vinculado a uma equipe multidisciplinar, envolvendo pesquisadores das áreas da construção civil, mais especificamente em materiais de construção, e mineralogia. O grupo de pesquisa tem estudado o tratamento dos resíduos de construção e demolição e a viabilidade dos produtos à aplicação em concreto, pavimentação e argamassas. Esta equipe da Escola Politécnica é orientada pelos professores Vanderley Moacyr John e Antonio Domingues de Figueiredo; o grupo de pesquisa é composto por duas alunas de pós-graduação uma em nível de mestrado e outra de doutorado, além de outros pesquisadores como: Sérgio Cirelli Angulo (atualmente no IPT), Henrique Kahn, Carina Ulsen (Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo), Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) e a Universidade Federal de Alagoas.

## 1.2 **Objetivo**

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência da origem e do tratamento dos agregados de RCD reciclado nas propriedades do concreto estrutural. Para tal avaliação os agregados reciclados de RCD, das diferentes cidades (São Paulo e Macaé), serão submetidos a dois tipos de tratamentos: (a) britagem e (b) britagem e separação por densidade (jig), atendendo a mesma faixa granulométrica de -19+4,8 mm.

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Provar que a separação densitária beneficia a condição de aplicação dos agregados de RCD reciclados de diferentes origens.
- Verificar a adequação do uso da metodologia de dosagem tradicional para investigação das diferenças do desempenho estrutural do concreto estrutural utilizando agregados de RCD reciclados de origens e tratamentos distintos.
- Verificar se o uso do índice de BI (Binder Intensity, ou seja, relação entre o consumo de cimento e a resistência à compressão do concreto) é eficaz para a comparação de desempenho dos diferentes agregados de RCD reciclados.

- Verificar se a condição de não saturação dos agregados altera o comportamento mecânico do concreto.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

A estrutura dessa dissertação está dividida em seis capítulos:

- Capítulo 1: neste capítulo são apresentadas a introdução, justificativa e relevância do tema e o objetivo do trabalho.
- Capítulo 2: apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre alguns tópicos referentes à gestão de resíduo de construção e demolição e o desenvolvimento sustentável.
- Capítulo 3: abrange algumas características dos agregados de RCD reciclados no desempenho do concreto e algumas tecnologias de reciclagem, ou seja, a aplicação dos agregados reciclados em argamassas e concretos.
- Capítulo 4: é descrita a procedência, o tratamento e a caracterização dos materiais reciclados utilizados para a moldagem de concreto para os ensaios, bem como o procedimento de moldagem estão presentes neste capítulo.
- Capítulo 5: compreende a análise e discussão dos resultados realizados no concreto com agregados reciclados do concreto no estado fresco e endurecido. Neste último envolvem os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água do concreto, módulo de elasticidade e ensaio de ultra-som.
- Capítulo 6: apresentam estudos comparativos com trabalhos anteriores utilizando agregados reciclados de mesma origem e densidades próximas.
- Capítulo 7: compreende as conclusões e algumas sugestões para futuros trabalhos. Após este capítulo se encontram as referências bibliográficas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 *Desenvolvimento sustentável e a construção civil*

O termo desenvolvimento sustentável está associado à necessidade de encontrar recursos para os problemas sócio-ambientais sem comprometer as gerações futuras. Desta maneira, o desenvolvimento sustentável implica num equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a proteção ambiental (Brundland Commission, 1987 apud RACKWITZ; LENTZ; FABER, 2005). Mais especificamente, no âmbito da construção civil, o desenvolvimento sustentável pode ser mais abrangente considerando o crescimento social, econômico tendo em vista a proteção ambiental.

No setor da construção civil o desenvolvimento sustentável tem se apoiado nos objetivos de amortização do impacto ambiental gerado pelo setor e/ou reduzindo os custos através da reciclagem dos resíduos gerados (ANGULO; ZORDAN; JOHN, 2001).

O interesse público quanto ao reuso dos RCD tende a aumentar, pois esta prática diminui o crescente volume de materiais a serem depositados em aterros. Experiências brasileiras mostram que uma política baseada somente na regulação de RCD, abordando transporte e deposição não é totalmente eficiente para controlar o depósito ilegal desses materiais (JOHN et al. 2004). No entanto, esta atividade também pode causar impacto ao meio ambiente, uma vez que necessita de energia para transformar o produto ou tratá-lo, de forma a torná-lo apropriado para ingressar novamente na cadeia produtiva. E, por muitas vezes, a maior demanda de energia não é suficiente para viabilizar a reciclagem do produto. Logo, são necessárias matérias-primas para modificá-los física ou quimicamente (ANGULO; ZORDAN; JOHN, 2001).

A reciclagem de RCD é uma maneira de aproximar o setor da indústria da construção civil contribuir com o meio ambiente, diminuindo os impactos negativos gerados pelos resíduos e pelo consumo de matéria-prima natural, que é não-renovável, a qual pode ser substituída pelo resíduo (ANGULO et. al., 2003).

Gestão de resíduo de construção e demolição A construção civil é uma atividade importante para o desenvolvimento econômico e social de uma região. No

entanto, esta se comporta como grande causadora de impacto ambiental, pois consome grandes quantidades de recursos naturais além de gerar resíduos. Esses resíduos gerados são responsáveis por cerca de 50% do **Resíduo de Construção e Demolição** dos resíduos totais em nível nacional (PINTO, 1999). Os valores internacionais representam aproximadamente, de 20 a 30% do fluxo de RCD gerados, sendo que muitas vezes esse valor chega a mais de 50% do total de resíduos sólidos (CHUNG; LO, 2003). Assim, políticas de destinação destes resíduos se tornam muito atrativas para a implantação de uma indústria da construção com caráter sustentável.

Os primeiros registros de reutilização de resíduos minerais da construção civil na produção de novas obras vieram do Império Romano. De acordo com Angulo, et al. (2001) a reciclagem dos resíduos de Construção Civil foram reutilizadas a partir de 1946 no final da Segunda Guerra Mundial, na reconstrução das cidades européias.

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são um dos responsáveis pelo esgotamento de áreas de aterros, uma vez que eles correspondem a mais de 50% (massa/massa) dos resíduos sólidos urbanos (ANGULO et al 2003). Além disso, os RCD são acompanhados de materiais indesejáveis, tais como cimento amianto, gesso de construção e alguns resíduos químicos. Esses resíduos, quando depositados clandestinamente em terrenos baldios e taludes de cursos de água, provocam impactos ao meio ambiente possibilitando propagação de vetores de contaminação e quando levados pelas águas superficiais, obstruem as canalizações de drenagem, ocasionando enchentes e prejuízos para a sociedade.

A reciclagem é necessária, no entanto, os processos serão realizados se os novos produtos gerarem empregos, reduzirem o volume de aterros, consumirem resíduos em vez de recursos naturais e evitarem a contaminação do ambiente ou o comprometimento da saúde da população (JOHN; ANGULO, 2003).

## **2.2 Geração e a reciclagem de RCD na construção civil**

A geração de resíduos é um problema atual em todos os países, sendo que em muito deles existem leis ambientais severas, que regulamentam a disposição e o gerenciamento desses rejeitos (GONÇALVES, 2001). A quantificação do volume de

RCD gerados nas cidades brasileiras estima-se uma média de 500 kg/ano.hab., totalizando 68,5 milhões de t/ano para a população brasileira (ANGULO et al., 2002).

Na cidade paulista, a geração dos resíduos de RCD atinge cerca de  $5,5 \times 10^6$  t/ano, sendo que mais de 20% deste resíduo é depositado clandestinamente na malha urbana (PINTO, 1999; SCHNEIDER, 2002).

No âmbito internacional a geração dos RCD representa 70 milhões de toneladas no Reino Unido; na Austrália, cerca de 14 milhões de toneladas de resíduos são colocados em aterros a cada ano e 44% do desperdício é atribuído ao setor da construção (TAM et al., 2008). No Japão aproximadamente 35 milhões de toneladas de concreto demolido são gerados todo ano (SHIMA et al., 2005).

A quantidade deste entulho torna-se cada vez mais elevada com o crescente processo de urbanização, quer pelas novas edificações, quer pelas demolições decorrentes da renovação urbana. Isto requer das administrações públicas medidas no sentido de evitar a deposição clandestina destes resíduos, visto que esta prática, além de ser prejudicial ao meio ambiente, desperdiça materiais passíveis de reutilização (POON, 1997; JOHN; 2000; LIMA; BARBOSA, 2001; OZKAN, 2001; VAZQUEZ, 2001; LEITE, 2001).

Os resíduos de concreto possuem grande potencialidade para serem utilizados como matéria-prima. No entanto, a falta de informação e estudo sobre esses materiais, os leva a ser desperdiçados. Tendo em vista essa problemática, a disponibilidade de locais para instalação de sistemas de recepção, triagem e tratamento dos resíduos da construção civil, se faz necessária, a fim de proporcionar à comunidade benefícios ambientais, econômicos e sociais. A prática destas atividades elimina grande parte dos despejos clandestinos (Figura 1), melhoram a paisagem urbana e possibilitam uma melhor qualidade de vida a seus habitantes.



**Figura 1 – Resíduos da Construção Civil.  
Fonte: Lucia H. Higa (2008).**



### **3. CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RCD**

Como já mencionado em capítulos anteriores, ocorre um grande desperdício de resíduos de construção com considerável potencial para serem reutilizados como materiais para produção de concretos após receberem os tratamentos adequados, ou seja, através da reciclagem. Esta é uma maneira de reduzir o consumo desordenado de matérias-primas em busca de fontes alternativas. Foram realizados vários estudos sobre a reciclagem de RCD para a produção de agregados para concretos (HANSEN; BOECH, 1985; ZORDAN, 1997; PINTO, 1999; LEITE, 2001; VIEIRA, 2003; MASCE, et al., 2003; LIN et al., 2004; BIANCHINI et al. 2005; CARRIJO, 2005; PIETRA; 2005; ANGULO, 2005; HOOD, 2006; CABRAL, 2007; LOVATO, 2007) mostrando sua viabilidade técnica. No entanto, a produção do concreto com agregado reciclado exige uma investigação cuidadosa e controlada, devido à variabilidade das propriedades dos agregados reciclados acarretando na influência na propriedade do concreto. Essas variabilidades são resultantes da composição dos agregados, que por sua vez, se refletem em suas propriedades.

Desta maneira, no presente capítulo, será abordada uma breve revisão bibliográfica dos principais itens de controle de qualidade dos agregados reciclados.

#### ***3.1 Influência da porosidade, absorção de água e massa específica do agregado de RCD reciclado no concreto***

Os agregados reciclados são compostos principalmente por agregados comuns, materiais cerâmicos e argamassa aderida ou não. A argamassa aderida ao agregado e o resíduo de origem cerâmica é um material poroso, sendo assim apresenta maior capacidade de absorção de água em relação ao agregado natural. Devido á alta porosidade e elevada quantidade de fissuras os agregados reciclados são menos resistentes; além disso, pode ocorrer que o agregado de RCD reciclado contenha um alto teor de sulfato e cloreto e outros tipos de impurezas, que, conjuntamente a uma alta quantidade de pasta de cimento impregnada no material podem prejudicar muito o desempenho do concreto.

A absorção de água é uma medida parcial da porosidade do concreto, pois vazios muito pequenos, como os intersticiais, não são passíveis de serem medidos pela absorção. A qualidade do agregado reciclado está diretamente relacionada à sua porosidade (ANGULO, 2005; CARRIJO, 2005; PIETRA, 2005). Essa característica é significativa, pois afeta a durabilidade e o comportamento mecânico do concreto.

Pode-se afirmar que o nível de porosidade é uma das principais características a distinguir o agregado reciclado do agregado natural, pois essa característica pode influenciar tanto nas propriedades do concreto fresco como endurecido. Com o aumento da absorção de água, torna-se mais difícil a homogeneização do concreto no estado fresco, pois há uma absorção de água por parte do agregado que não ocorre de maneira instantânea, forçando a variações na consistência do material. Por outro lado, mais poros irão significar uma diminuição da resistência mecânica do concreto. Desta maneira, influência do agregado reciclado no comportamento do concreto no estado fresco e endurecido irá depender da porosidade e da composição dos resíduos que lhe deram origem (ETXEBERRIA, et al. 2007), pois pode-se considerá-la como uma das fases mais porosas do resíduo.

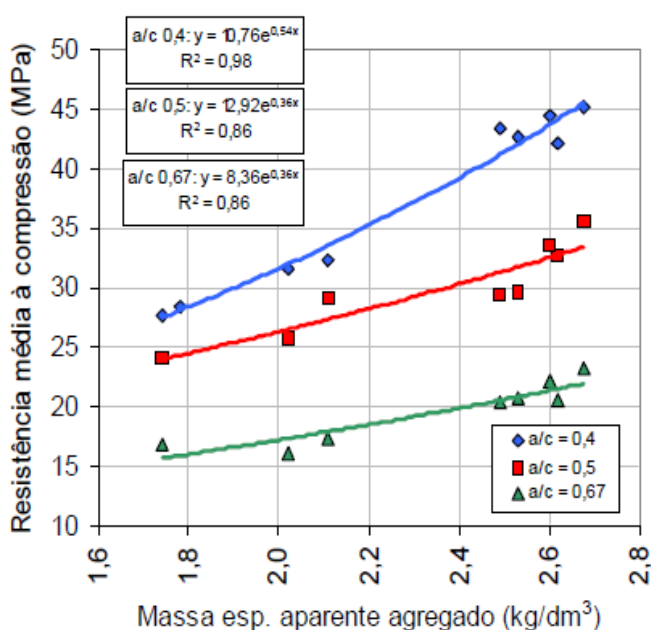
A absorção de água é uma medida tradicional dos agregados ligada diretamente à porosidade, sendo essas diretamente proporcionais, naturalmente. A intensidade de absorção de água dos agregados de RCD reciclados é maior do que a dos agregados naturais. No entanto a condição de saturação pode ser obtida em questões de minutos não importando o volume de poros presente no material, como comprovaram os trabalhos de Carrijo (2005) e Pietra (2005).

Como dito anteriormente, a absorção da água do agregado de RCD reciclado pode comprometer o tempo da mistura do concreto no estado fresco e conseqüentemente sofrer perda de resistência. Segundo Poon et al. (2004) “a perda da trabalhabilidade apresentou-se significativa quando utilizado 100% de agregados reciclados secos ao ar ou seca em estufa”, sendo assim, o uso de agregados nas condições intermediárias pode minimizar o efeito da alta absorção do agregado.

A absorção é umas das características mais importantes do material reciclado, pois a qualidade dos agregados é geralmente classificada de acordo com a sua taxa de absorção (TA; GAO, 2005). Alta absorção dos agregados reciclados

refere-se à maior quantidade da fração constituída de materiais cerâmicos indicando baixa qualidade do material.

A massa específica é uma das características dependente da porosidade. A massa específica é definida como massa do material, incluindo os poros internos por unidade de volume, sendo esta a massa específica aparente. Para efeito de dosagem dos concretos produzidos com agregados de RCD se faz necessário o conhecimento da massa específica desses agregados, pois esta controla o comportamento mecânico dos concretos para uma dada relação água/cimento, conforme visto na Figura 2.



**Figura 2 – Resistência à compressão dos concretos em função dos valores de massa específica aparente dos agregados de RCD reciclados separados por densidade.**  
**Fonte: ANGULO, (2005).**

A separação dos agregados por densidade tem sido propício para a classificação de agregados graúdos de RCD reciclados em grupos de porosidade (CARRIJO, 2005; ANGULO, 2005).

Dessa maneira, especial atenção será dada à caracterização dos agregados de RCD reciclados com relação à sua massa específica e porosidade, dado que estes fatores serão determinantes para o comportamento do material no estado fresco e no estado endurecido.

As características dos agregados de RCD reciclados são conseqüência do material de origem, da composição mineralógica e do tipo de britador escolhido para o beneficiamento do material.

Além da porosidade e absorção de água, a forma e a textura dos agregados reciclados também têm influência na propriedade do concreto.

### **3.2 *Forma e textura dos agregados de RCD reciclados***

De modo geral os agregados de RCD reciclados apresentam uma textura mais áspera e rugosa, sendo assim há necessidade de mais pasta de cimento para proporcionar mistura de concreto trabalháveis; além do mais, esses agregados apresentam alta taxa de absorção em relação aos agregados naturais. Estes agregados também apresentam uma grande quantidade de partículas lamelares, principalmente quando a quantidade de materiais cerâmicos é maior. A forma e a textura dos agregados influenciam mais as propriedades do concreto no estado fresco do que as no estado endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Segundo Leite (2001), essas características influenciam na trabalhabilidade do concreto, reduzindo a fluidez do material. Com a diminuição da trabalhabilidade torna-se necessário o aumento da quantidade de água na mistura, a fim de promover a melhoria nesta propriedade, no entanto pode causar influência nas propriedades do concreto no estado endurecido, reduzindo a sua resistência.

A forma e a textura dos agregados reciclados são características que proporcionam ao concreto um maior travamento durante a mistura, dificultando a movimentação entre as partículas, desta maneira necessitarão de maior quantidade de pasta para promover esta mobilidade (RASHWAN; ABOURIZK, 1997).

Por outro lado, a textura mais rugosa, o tamanho das partículas e a forma dos agregados reciclados promovem uma boa aderência entre o agregado e a pasta da matriz (SAGOE-CRENTSIL; BROWN; TAYLOR, 1998).

As variabilidades das características dos agregados de RCD reciclados dependem da composição do resíduo e do equipamento de cominuição adotado (ETXEBERRIA, et al. 2007; LEITE, 2001).

### **3.3 *Granulometria dos agregados de RCD reciclados***

De acordo com Leite (2001) a granulometria mais contínua, a forma mais irregular e a textura mais áspera dos agregados graúdos também contribuem para

que os concretos apresentem menores valores de abatimento, devido ao maior empacotamento existente entre as partículas de agregados graúdos nas misturas do concreto reciclado, quando comparado com concretos de agregados naturais. Segundo Neville (1997) quando o teor de água e outras proporções da mistura estão fixas a trabalhabilidade depende tão somente da granulometria, textura e forma dos agregados.

A granulometria e a origem do material são a causa da variação dos valores da massa específica sendo esta de 5 a 10 % mais baixos que a dos agregados naturais (BAZUCO, 1999).

### 3.4 Origem e variabilidade dos agregados de RCD reciclados

Os resíduos de construção são provenientes de várias procedências, tais como, demolições de estruturas, incêndios, desabamentos dentre outras. Além da origem supra mencionado, o fator regional, e o período de coleta, também contribuem para maior variabilidade dos resíduos gerados.

A variabilidade da composição do RCD pode ser observada na Tabela 1 conforme a análise de três cidades brasileiras. No entanto, a **Erro! Fonte de eferência não encontrada.** deve ser avaliada pelo ponto de vista qualitativo, pois os resíduos de construção têm uma composição que depende muito da fonte que o originou e do momento em que foi colhida a amostra (LEVY, 1997). Portanto a análise quantitativa, considerando esses valores absolutos, poderia levar a erro.

**Tabela 1 – Variabilidade da composição dos RCD.**

<b>Composição</b>	<b>São Paulo<sup>1</sup></b>	<b>Salvador<sup>2</sup></b>	<b>Porto Alegre<sup>3</sup></b>
Concreto	8%	53%	15,9%
Argamassa	24%		25,9%
Materiais Cerâmicos	33%	15%	25,9%
Solos	30%	21%	-
Materiais orgânicos	1%	4%	-
Rocha	-	-	31,9%
Outros	4%	7%	0,4%

Fonte: <sup>1</sup>BRITO (1999); <sup>2</sup>CARNEIRO et al. (2000) apud ANGULO (2000); <sup>3</sup>LEITE (2001).

A alta heterogeneidade e variabilidade da composição do agregado reciclado interfere no comportamento dos concretos produzidos pelos mesmos. Sendo assim, o controle dessa variabilidade resultaria em um controle da dispersão dos valores das propriedades dos concretos produzidos por estes agregados.

### **3.5 Beneficiamento dos agregados**

O beneficiamento dos agregados de RCD reciclados consiste em práticas envolvendo coleta, transporte, separação de materiais indesejáveis, britagem, peneiramento e estocagem dos materiais até a sua posterior utilização. Segundo Leite (2001) o beneficiamento dos resíduos de construção e demolição não difere muito do tratamento dado à produção de agregados naturais, sendo que muitos dos equipamentos utilizados se adéquam em ambos os casos.

#### **3.5.1. Britagem**

A britagem é um processo de cominuição do agregado, ou seja, reduz o tamanho das partículas dos agregados através de ação mecânica como força de compressão (britagem por mandíbula) ou impacto (britagem por impacto).

O britador de mandíbula fratura o material por esmagamento (força de compressão) das partículas. Os fragmentos presos na abertura da mandíbula sofrem sucessivos processos de quebra por cisalhamento no plano principal de tensões, gerando grande quantidade de finos (CHAVES, 1999); este tipo de britagem é recomendado para materiais de elevada abrasividade (alto teor de sílica).

Segundo Hansen (1992), o britador de mandíbula produz melhor distribuição granulométrica dos agregados reciclados para uso em concretos, quando o resíduo processado é de concreto estrutural.

O britador de impacto possui uma câmara onde o material é britado através do choque de martelos fixados por um rotor e pelo choque com placas fixas (LIMA, 1999). Esse tipo de britagem ocasiona fraturas intergranulares nos agregados reciclados, com grande possibilidade de remover a pasta de cimento porosa dos fragmentos de rocha (CHAVES, 1996).

O britador de impacto promove uma melhor distribuição de tamanho dos grãos dos agregados para o uso em pavimentação (HANSEN, 1992).

### 3.5.2. Jigue

O jigue é um equipamento bi-partido, em formato de um tanque ou arca, que estratifica as espécies minerais em camadas de diferentes densidades, através da pulsação intermitente da água no plano vertical, com movimento de dilatação e concentração (SAMPAIO;TAVARES, 2005).

A separação das partículas é promovida pela sua densidade através de um leito pulsante. Desta maneira, estando a água sob pressão as partículas caem com diferentes velocidades, de acordo com a sua massa específica.

As principais vantagens do jigue são (BUNTENBACH et. al., 1997; SAMPAIO; TAVARES, 2005): baixo custo operacional, redução dos teores da fração não-mineral nos agregados de RCD reciclados até 0,05%; separabilidade eficiente em faixas granulométricas entre 250 e 0,1 mm; única concentração densitária de minério grosso (2 mm em diante); capacidade elevada (até 800 t/h).

As principais desvantagens são: elevado consumo de água; e a necessidade de tratamento das lamas geradas pelas partículas finas liberadas pelos agregados (ANGULO,2005).

### 3.6 *Utilização de agregados de RCD reciclados na construção civil*

Segundo Angulo et al. (2003), se todo o RCD fosse utilizado como agregado a participação do mercado total não seria superior a 20%, pois o mercado dos agregados naturais é vasto. No entanto, esse mercado, está dividido em diversas aplicações: pavimentação, argamassa, concretos com diferentes resistências e etc.

Para promover o reuso dos resíduos de construção se faz necessário alcançar três concepções básicas: (1) garantia da segurança do produto; (2) diminuição do impacto ambiental e (3) diminuição do custo da construção (DOSHO, 2007), Figura 3.

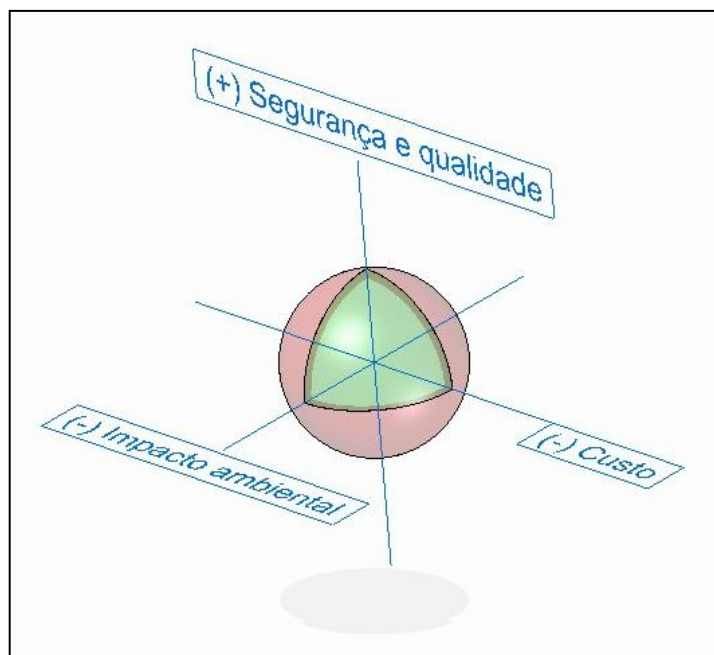


Figura 3 – Avaliação da reciclagem. Adaptado: (DOSHO, 2007)

Na Figura 3, está destacada em verde a “região de interesse”. Nesta região pode ser encontrado um ponto ótimo para uma dada aplicação específica do concreto reciclado.

### 3.7 Argamassa produzida com agregados reciclados

No Brasil o primeiro estudo utilizando resíduo de construção e demolição foi concluída em 1986 pelo arquiteto Tarcísio de Paula Pinto. Em sua pesquisa foi estudado o uso de agregados reciclados para a produção de argamassas (PINTO, 1999).

A utilização dos agregados de RCD reciclados para a produção de argamassa tem atingido propriedades compatíveis e até superiores a aquelas apresentadas pelas argamassas convencionais na maioria dos casos (FARIAS FILHO et al. 2006). Alguns pesquisadores atribuem isso à atividade pozolânica dos materiais cerâmicos finamente moídos, e também o efeito filler dos finos reciclados, com isso o volume de vazio da matriz diminui e resistência mecânica do compósito aumenta. Além de atingir boa resistência mecânica, o uso dos agregados de RCD reciclados pode-se obter boa aderência ao substrato, boa consistência e coesão (LIMA, 1999).



Acredita-se que a fabricação de argamassa com agregados reciclados possa se tornar uma alternativa viável para vários tipos de edificações no Brasil, com custo inferior às das argamassas tradicionais (MIRANDA, 2000).

### **3.8 Concreto produzido com agregados reciclados**

Estudos enfocando os concretos produzidos com agregados reciclados têm recebido atenção em pesquisas. Apesar do potencial e da necessidade de aproveitamento dos agregados reciclados, o mercado necessita ser desenvolvido e isso requer mudanças na gestão e no tratamento do RCD, além de uma metodologia de dosagem. Entre essas referidas mudanças estão a demolição seletiva, a redução de contaminantes, o aprimoramento dos processos de reciclagem, bem como o emprego de novos equipamentos de concentração e britagem (ANGULO et al., 2002).

Os estudos vêm se ampliando em busca de novas informações sobre diferentes aspectos do comportamento de concretos utilizando agregados reciclados.

Tem se confirmado que o comportamento do concreto produzido com agregados de RCD reciclados não pode ser previsto simplesmente através da sua composição ou densidade, pois há influência dessas e outras propriedades dos agregados na qualidade do concreto (LOVATO, 2007). O concreto produzido com agregados reciclados é normalmente considerado como um material mais poroso pelo acréscimo de poros associado aos resíduos que deram origem aos agregados.

Os agregados de RCD reciclados, em geral, possuem propriedades bastante variáveis e o comportamento apresentado pela adição dos mesmos em concretos é muito variado em função da sua procedência e tratamento recebido. Isto ocorre porque, dependendo da origem dos RCD, podem ocorrer contaminações que afetam tanto a qualidade técnica do produto final quanto significar riscos ambientais (JOHN, AGOPYAN, 2000). Além do mais há falta de uma metodologia adequada para garantir avaliação da confiabilidade dos resultados dos concretos produzidos com agregados de RCD reciclados (CARRIJO, 2005; PIETRA, 2005). Os trabalhos de Carrijo (2005) e Pietra (2005) utilizaram a mesma metodologia básica de dosagem, baseada no modelo descrito por Helene e Terzian (1992) com algumas diferenças de procedimentos.

Como exemplo, no trabalho de Carrijo (2005) fixou-se o volume de agregados reciclados nas diversas misturas, enquanto no trabalho de Pietra houve a determinação do teor de argamassa através do procedimento experimental tradicional, conforme o recomendado por Helene e Terzian (1992). Este trabalho segue a mesma metodologia básica, mas também com algumas diferenças em relação aos anteriores, como é o caso da utilização dos agregados de RCD sem pré-saturação, o que contribuiu para a ampliação da análise do material.

## 4. METODOLOGIA

No presente capítulo será apresentado o programa experimental visando alcançar o objetivo proposto. Nesse estudo serão contemplados ensaios laboratoriais dos agregados naturais e de RCD reciclados bem como dos concretos produzidos por estes.

### 4.1 *Materiais utilizados*

Os materiais utilizados nesse programa experimental foram (vide as caracterizações dos materiais em anexo):

- Cimento CP II E 32 doado pela Holcim;
- Areia grossa lavada de rio, disponibilizada pelo laboratório do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Construção Civil (CPqDCC);
- Brita 1 de origem basáltica;
- Britas de RCD recicladas (Figura 4):
  - a. Proveniente da cidade de **São Paulo** submetido à britagem por **mandíbula** com granulometria entre -19+4,8 mm;
  - b. Proveniente da cidade de **São Paulo** submetido à britagem e ao tratamento em **jigue**; agregados com granulometria entre -19+4,8 mm;
  - c. Proveniente da cidade de **Macaé** submetido à britagem por **mandíbula** com granulometria entre -19+4,8 mm;
  - d. Proveniente da cidade de **Macaé** submetido à britagem e ao tratamento em **jigue**; agregados com granulometria entre -19+4,8 mm.

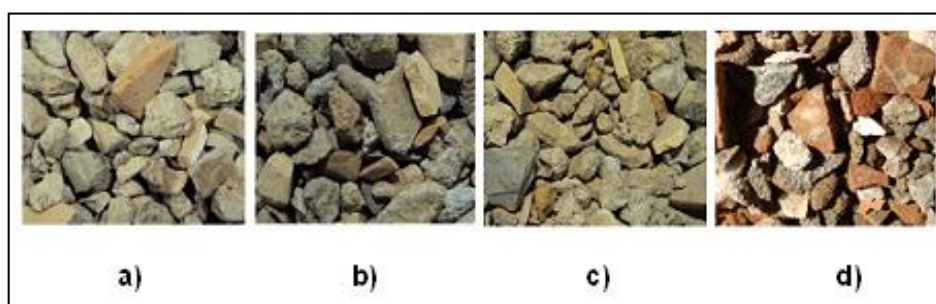


Figura 4 – Agregados graúdos reciclados: a) SPJ; b) MJ; c) SPB e d) MB.

Para simplificar a identificação dos concretos produzidos, a Tabela 2 apresenta a formulação.

**Tabela 2 – Agregados utilizados na formulação do concreto.**

		Agregados				Nomenclatura
		Graúdo		Miúdo		
Origem	Tratamento	Natural	Reciclado	Natural	Reciclado	
Natural	Natural	X		X		<b>Nat</b>
São Paulo	Britagem		X	X		<b>SPB</b>
Macaé	Britagem		X	X		<b>MB</b>
São Paulo	Jigue		X	X		<b>SPJ</b>
Macaé	Jigue		X	X		<b>MJ</b>

Os agregados de RCD reciclados foram provenientes de duas cidades: São Paulo e Macaé. Para a amostragem dos RCD reciclados e agregados produzidos nas usinas em diferentes regiões foram adotadas as seguintes etapas:

- Definição de uma amostra representativa;
- Seleção das principais áreas de descarte e empresas removedoras de RCD;
- Elaboração de um procedimento para a coleta, preparação e redução de amostras;
- Coleta e classificação das amostras das duas cidades.

A coleta da massa mínima da amostra representativa das duas cidades foi realizada segundo a Teoria de Pierre Gy. Nessa teoria o erro de amostragem pode ser minimizado, no qual, diversos parâmetros de heterogeneidade são considerados, tais como, composição mineralógica, liberação entre os minerais presentes, dimensão máxima dos fragmentos, fator de forma, massa específica e outros. Foi definida uma dimensão máxima de 20 cm para a amostra os fragmentos do RCD mineral maiores que essa dimensão foram reduzidos manualmente com o objetivo de manter a massa coletada dentro dos limites estipulados de representatividade. Nesse caso, a amostra mínima representativa é de 150 toneladas ( $115 \text{ m}^3$  ou 23 caçambas de  $5 \text{ m}^3$ ). A seleção, a coleta da amostra representativa e os procedimentos de tratamentos a que foram submetidos esses agregados foram conduzidos por pesquisadores do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) Salvador de Almeida e Francisco Mariano Lima (CETEM) e Sérgio Angulo, Carina Ulsen, Vanderley John, Arthur Pinto Chaves (USP) e Paulo Cesar Correria Gomes (CETEC-

UFAL). Nos itens seguintes será abordada uma breve descrição da produção desses agregados a serem utilizados no plano experimental da presente dissertação.

#### 4.2 São Paulo

Para o estudo da amostragem dos agregados da cidade de São Paulo foi selecionada uma área de triagem situada na rua Alvorada D'Oeste, Jaçanã, cujo proprietário é o Sr. Gentil Ferraz. Nessa área de triagem foram selecionadas aproximadamente três caçambas por dia de diferentes localidades (Figura 5) para a amostragem, no período de 12 a 25 de julho de 2006.

As origens desses lotes amostrados eram de construção ou demolição, de pequeno (construções e reformas residenciais) ou grande porte.

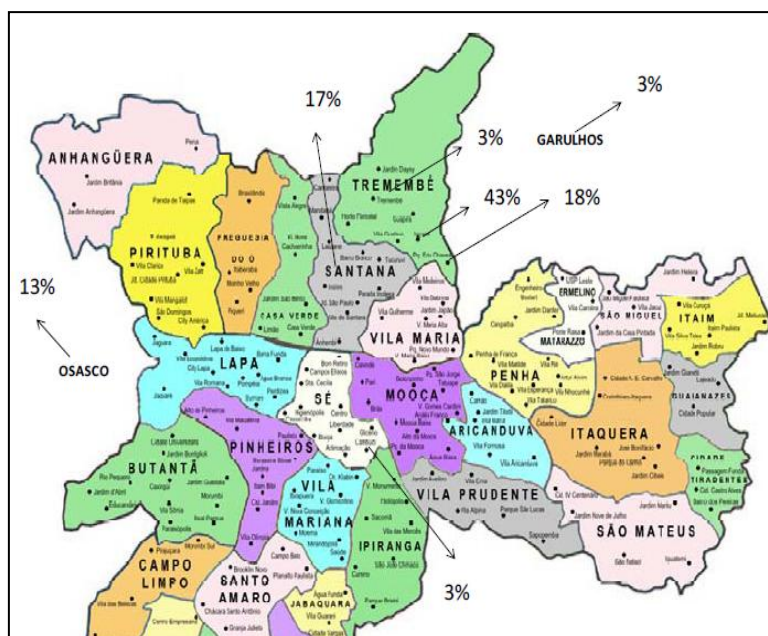


Figura 5 – Locais de coleta da amostras e suas frequências de ocorrências.  
Fonte: ANGULO, S. C. et al., (2008).

A redução e preparação das amostras se procederam da seguinte maneira: o RCD mineral, após despejado da caçamba era espalhado no chão com auxílio da pá carregadeira deixando-o em forma de paralelepípedo. Em seguida, foi feita a divisão em 54 seções, sendo que 1 seção a cada três era removida, equivalendo a coleta de aproximadamente 1/3 do volume da caçamba ( $1,67 \text{ m}^3$ ). Após essa etapa foi feito a pilha de homogeneização.

Os lotes foram classificados de acordo com a sua origem, os principais materiais minerais e de acordo com a presença de outros materiais, como materiais orgânicos ou contaminantes.

Foram armazenadas num total de 20,3 toneladas de amostras e transportadas até o CETEM.

Esse critério de classificação dos lotes, redução e preparação das amostras, foi elaborado por uma equipe técnica composto por pesquisadores da USP (Sérgio Angulo e Leonardo Miranda), executada em parceria com o proprietário do local (Sr. Gentil Ferraz) e auxiliares do Laboratório de Caracterização Tecnológica da USP (ANGULO, et al. 2008).

#### 4.3 *Macaé*

Para a coleta dos agregados dessa cidade, primeiramente foram identificadas as principais áreas de descarte. Foram selecionadas para amostragem a área do Babal e duas empresas transportadoras: Transbal e Transforma.

A amostragem realizada na área de Babal foi através de seleção aleatória de pilha cônica com aproximadamente 5 m<sup>3</sup>, nessa área os RCD gerados estava acumulado há três meses do período de descarte. A segunda amostragem foi realizada através da coleta horária aleatória de RCD de diferentes locais da cidade, no período de fevereiro a junho de 2006, a partir de caçambas de 5 m<sup>3</sup>. Os resíduos dessas empresas transportadoras eram mais recente que o da cidade de Babal.

Na primeira amostragem foram identificados 85 lotes de RCD de aproximadamente 5m<sup>3</sup>, distribuídos em locais distintos. Foram selecionadas aleatoriamente 27 caçambas para a amostragem.

Na segunda amostragem, a coleta de RCD das empresas transportadoras foi realizada em três períodos distintos, no ano de 2006: a) de 24 a 28 de abril - coleta de 15 caçambas; b) de 8 a 12 de maio – coleta de 8 caçambas; c) de 5 a 9 de junho – coleta de 7 caçambas.

O material com dimensão maior que 20 cm foi reduzido com auxílio de um martelo pneumático. Os materiais indesejáveis foram removidos.

A Figura 6 apresenta o procedimento de redução e coleta de amostras.

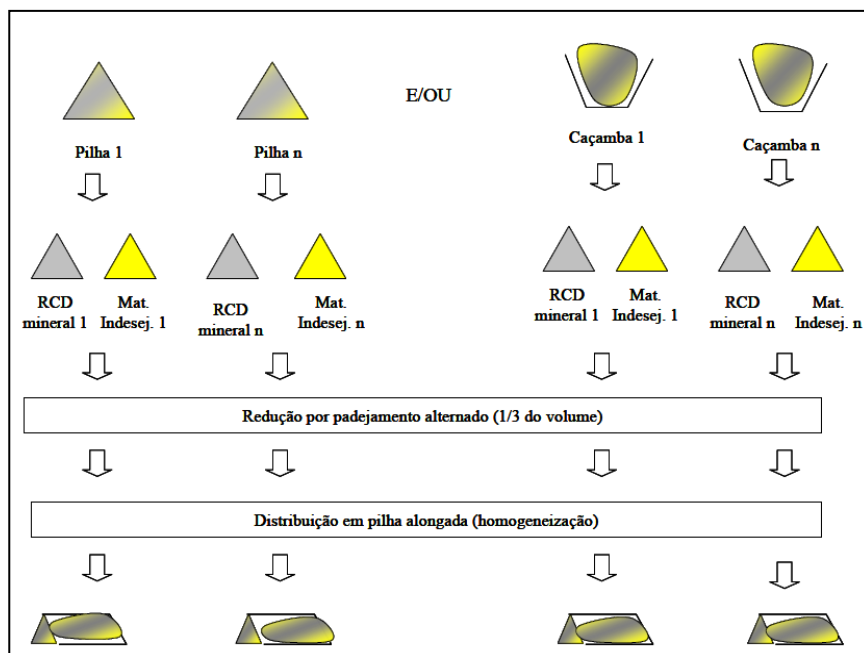


Figura 6 – Procedimento de redução do tamanho e homogeneização da amostra.  
Fonte: ANGULO, S. C. et al., (2008).

#### 4.4 Preparação das amostras

O procedimento de coleta, de redução da amostragem, da classificação dos lotes, da preparação das amostras foi realizado por uma equipe em parceria com pesquisadores da USP e CETEM e funcionários da prefeitura de Macaé, Construcon e CETEM (ANGULO, et al. 2008).

As amostras das cidades de São Paulo e Macaé vieram de um resíduo misto, ou seja, com predominância de cerâmica vermelha. Inicialmente essas amostras foram britados em um britador de mandíbula (modelo 2015 da marca Metso – Figura 7), a escolha do britador foi por critério econômico e sendo este mais recomendado para materiais com alto teor de sílica. Os materiais foram britados até que toda fração granulométrica fosse passante na peneira de 25,4 mm e retida na peneira de 4,8 mm.



**Figura 7 – Britador de mandíbulas 2015.**  
**Fonte: ULSEN, C. et al. (2008).**

Após a britagem, parte dos agregados também foram tratados em jigue com intuito de separar a fração com densidade superior a  $2,2 \text{ g/cm}^3$ , composta praticamente por rochas com um teor limitado de pasta de cimento aderida. A separação por densidade foi realizada em um jigue pneumático, do tipo BAUM, em escala piloto, da empresa All Mineral (<http://www.allmineral.com>). Procurou-se separar em regime contínuo, o agregado na faixa de densidade de  $2,2 \text{ g/cm}^3$ , com base nos estudos preliminares realizados, por bateladas, com o jigue de laboratório.

Foram realizados 3 ensaios de separação densitária por RCD reciclado com predominância de materiais cerâmicos da cidade de São Paulo e Macaé. A Figura 8 mostra o resultado visual da separação por densidade da cidade de Macaé. A 4ª camada é composta principalmente por gesso, e por matéria orgânica. Na 2ª e 3ª camadas há uma concentração maior de cerâmica. Na 1ª camada, a concentração predominante foi de rochas e partículas cimentícias (ANGULO, 2008).







**Figura 8 - Resultado visual da separação no jigue por densidade – agregados de RCD com predominância de materiais cerâmicos da cidade de Macaé.**

A Figura 9 mostra a separação densitária visual da cidade de São Paulo. Podem ser observadas rochas nas três primeiras camadas. A concentração de rochas na 1ª camada é expressiva. Na 4ª e 5ª camada, a concentração de cerâmica vermelha aumenta. A presença de matéria orgânica e de gesso é muito menor no RCD de São Paulo do que no de Macaé (ANGULO, 2008).

Camada

Ensaio IV

Ensaio V

1ª





**Figura 9 - Resultado visual da separação no jigge por densidade – agregados RCD com predominância de materiais cerâmicos da cidade de São Paulo.**

**Fonte: ANGULO, 2008.**

Os ensaios foram realizados na empresa Gauster, na cidade de Contagem, estado de Minas Gerais. O equipamento jigge foi cedido pela Kuettner do Brasil, representante da empresa All Mineral. Esse equipamento permite estratificar camadas com diferentes densidades, no qual foi definida a posição de corte para se obter o produto de densidade acima de  $2,2 \text{ g/cm}^3$ , que é a camada com maior concentração de rochas.

Esse estudo foi conduzido no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) pelo pesquisador Lauro Santos Norbert Costa e colaboração dos pesquisadores Salvador de Almeida e Francisco Mariano Lima (CETEM) e Sérgio Angulo e Carina Ulsen (USP). Após essa etapa as amostras da cidade de São Paulo e Macaé foram encaminhadas para o laboratório do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Construção Civil (CPqDCC) da Escola Politécnica da USP. Preparação dos agregados de RCD reciclados para a caracterização

Os agregados de RCD reciclados foram estocados no laboratório CPqDCC. Notou-se que grande parte dos agregados reciclados apresentaram granulometria maior que a de interesse no trabalho na faixa de dimensão entre 19 e 4,5 mm de diâmetro. Nesse caso foi feito um peneiramento para atender a faixa especificada.

Antes da caracterização dos agregados, estes foram homogeneizados através do procedimento de produção de uma pilha de homogeneização (Figura 10). A referida técnica da pilha de homogeneização consiste na produção de uma pilha alongada, distribuindo o material longitudinalmente, e a coleta do mesmo a partir de fatias transversais. Esta técnica auxilia na redução da variabilidade das propriedades dos agregados, tais como a absorção de água e granulometria.

A seqüência do procedimento de homogeneização pode ser vista pela Figura 10. Inicialmente os agregados reciclados são despejados na lona em uma linha reta, conforme a Figura 10a. Esses agregados são depositados nessa linha reta com a direção de distribuição alternada até o término do lote. A seguir são cortadas as duas extremidades da pilha - Figura 10b corte de uma das extremidades da pilha - e depositada novamente na pilha, com o intuito de garantir a homogeneidade do material.



a)



b)



c)

Figura 10 – Etapas da produção da pilha: a) produção da pilha alongada; b) corte de uma das extremidades da pilha alongada; c) pilha de homogeneização finalizada.

#### 4.5 Caracterização física dos materiais

Os agregados foram caracterizados segundo as normas brasileiras:

- Determinação da granulometria dos agregados: NBR NM 248 (2003);
- Massa específica aparente NBR NM 53 (2009) e também por picnometria de gás Hélio.
- Absorção de água: NBR NM 53 (2009);

A Tabela 3 apresenta os resultados das caracterizações físicas dos agregados, as caracterizações do cimento e as curvas granulométricas dos agregados graúdos e miúdos se encontram no anexo.

Tabela 3 – Caracterizações físicas dos agregados.

Agregados Graúdos	Agregados reciclados				Naturais
	São Paulo Britagem	Macaé Britagem	São Paulo Jigue	Macaé Jigue	
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,06	1,95	2,29	2,2	2,62
Absorção de água (%)	8,41	11,1	5,25	5,84	0,14
Dimensão máxima do agregado (mm)	19	19	19	19	19
Graduação	Brita 1	Brita 1	Brita 1	Brita 1	Brita 1

#### 4.6 *Produção do concreto*

Antes da confecção dos concretos, os materiais (agregados) foram secos em estufa com a finalidade de retirar a umidade em excesso. A umidade do material pode influenciar indiretamente na relação água/cimento e conseqüentemente na resistência mecânica do concreto. Isso porque no concreto endurecido é observada uma maior porosidade devido aos vazios gerados pela água em excesso na pasta de cimento endurecida.

A porosidade é um fator determinante na resistência final do concreto. Os agregados graúdos de RCD possuem um maior número de poros quando comparados aos agregados naturais, principalmente aqueles originados de rochas ígneas. Quando este agregado reciclado é pré-saturado, seus poros são preenchidos com água, como ocorreu com o procedimento utilizado por Carrijo (2005) e Pietra (2005). Quando o concreto endurece, esses poros continuarão existindo, contribuindo com a redução de sua resistência mecânica. Neste trabalho, os agregados graúdos reciclados foram colocados na betoneira sem pré-saturação. A intenção atrelada a esta mudança de procedimento de mistura era verificar a possibilidade de se obter um maior ganho de resistência devido ao fechamento dos poros com a pasta de cimento e outros materiais finamente particulados durante a mistura do material. Parte destas partículas finas é proveniente do próprio processo de esfoliação que os agregados sofrem na betoneira.

Segundo Neville (1997) a absorção de água nos agregados reciclados se torna mais lenta ou cessa completamente devido ao cobrimento das partículas com a pasta de cimento.

Este estudo terá possibilidade de comparação dos procedimentos em relação à metodologia utilizada em estudos anteriores (Carrijo, 2005 e Pietra, 2005) que realizaram a pré-saturação dos agregados nas betoneiras antes da adição do cimento. Neste caso, o preenchimento dos vazios superficiais dos agregados com a pasta de cimento fica muito limitado. O detalhamento do procedimento de mistura utilizado no estudo experimental desta dissertação se encontra descrito no item

#### **4.7 Estudo de dosagem**

O tradicional método de dosagem IPT (HELENE; TERZIAN, 1992) foi selecionado para proceder à análise dos diferentes agregados. Assim, foram produzidos concretos utilizando os agregados naturais e os de RCD de modo a se obter os diagramas de dosagem para cada uma das famílias de materiais. Esse método de dosagem permite formular concretos de consistência plástica, variando-se a resistência mecânica do material e, dessa forma, quantificar o impacto do uso dos diferentes tipos de agregados no comportamento mecânico do concreto. Além disso, permite também quantificar o consumo de cimento necessário para obter um determinado nível de resistência com os diferentes agregados e, assim, avaliar a demanda de cimento originada pelo acréscimo do uso dos agregados de RCD. Em resumo, este método permite comparar as diferentes famílias de concretos produzidos com diferentes agregados e verificar o impacto destes no consumo de cimento exigido para uma determinada resistência (HELENE; TERZIAN, 1992).

#### **4.8 Definição do traço de referência e dos concretos reciclados**

Para a produção dos diagramas de dosagem foram utilizados três traços de concreto dosados em volume, ao contrário do que normalmente se faz neste procedimento. Isto ocorreu devido à variação de massa específica dos agregados reciclados que, se dosados em massa, gerariam variações no consumo de agregados graúdos. Estes traços básicos para a produção do diagrama de dosagem possuíam distintos consumos de cimento, sendo um de maior consumo, outro de consumo intermediário e um terceiro de menor consumo de cimento que foram denominados de maneira simplificada como rico, intermediário e pobre, respectivamente. A definição dos traços teve como referência inicial o traço de concreto convencional que foi dosado em massa, como ocorre na prática usual do mercado. Este traço de referência em massa foi então convertido em volume e o volume de agregados graúdos foi mantido constante nos demais traços que utilizaram agregados reciclados. Esta metodologia foi adotada pelo fato dos agregados reciclados apresentarem variação da massa específica o que provocaria alterações nas proporções de agregados caso fosse utilizado o procedimento em

massa para todas as famílias de concreto. Ou seja, os traços com agregados reciclados teriam uma maior proporção de agregados graúdos o que dificultaria muito a condição de mistura. Essa dificuldade pode ser ocasionada pela perda de coesão, acarretando na ausência de preenchimento dos vazios dos agregados graúdos pela deficiência do teor de argamassa. A Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6 mostram os valores de volume e massa das porções de materiais utilizadas na produção dos traços utilizados no estudo experimental desta dissertação.

Tabela 4 – Traço do composto rico em consumo de cimento.

	Nomenclatura	Agregados Graúdos					Cimento CII E 32	Areia
		Nat	SPJ	MJ	SPB	MB		
Materiais utilizados	Origem	Natural	São Paulo	Macaé	São Paulo	Macaé		
	Tratamento	Natural	Jigue	Jigue	Britagem	Britagem		
	Teor de argamassa	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5		
	Consumo de materiais (kg)	<b>18,7</b>	<b>16</b>	<b>15,3</b>	<b>14,3</b>	<b>13,6</b>	<b>8,3</b>	<b>10,4</b>
	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,68	2,29	2,2	2,06	1,95	3,01	2,62
	<b>Volume dos materiais (dm<sup>3</sup>)</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
	Traço unitário em massa	Cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>Traço Rico</b>
Areia		1,25	1,25	1,25	1,25	1,25		
Brita		2,25	1,92	1,85	1,73	1,64		
Traço em volume	Cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
	Areia	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33		
	Brita	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33		
	m (kg/kg)	3,5	3,17	3,1	2,98	2,89		
	água/cimento	0,51	0,59	0,6	0,66	0,72		
	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	462,89	451,16	453,28	444,6	432,56		



Tabela 5 – Traço do composto de cimento intermediário.

	Nomenclatura	Agregados Graúdos					Cimento CII E 32	Areia		
		Nat	SPJ	MJ	SPB	MB				
Materiais utilizados	Origem	Natural	São Paulo	Macaé	São Paulo	Macaé	Cimento CII E 32	Areia		
	Tratamento	Natural	Jigue	Jigue	Britagem	Britagem				
	Teor de argamassa	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5				
	Consumo de materiais (kg)	<b>18,7</b>	<b>16</b>	<b>15,3</b>	<b>14,3</b>	<b>13,6</b>			<b>5,7</b>	<b>13</b>
	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,68	2,29	2,2	2,06	1,95			3,01	2,62
	<b>Volume dos materiais (dm<sup>3</sup>)</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>			<b>2</b>	<b>5</b>
	Traço unitário em massa	Cimento	1,00	1,00	1,00	1,00			1,00	<b>Traço Intermediário</b>
Areia		2,25	2,25	2,25	2,25	2,25				
Brita		3,25	2,78	2,67	2,5	2,36				
Traço em volume	Cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00				
	Areia	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50				
	Brita	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50				
	m (kg/kg)	5,5	5,03	4,92	4,75	4,61				
	água/cimento	0,51	0,59	0,6	0,66	0,72				
	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	462,89	451,16	453,28	444,6	432,56				

Tabela 6 – Traço do compósito com baixo consumo de cimento.

	Nomenclatura	Agregados Graúdos					Cimento CII E 32	Areia		
		Nat	SPJ	MJ	SPB	MB				
Materiais utilizados	Origem	Natural	São Paulo	Macaé	São Paulo	Macaé	5	13,7		
	Tratamento	Natural	Jigue	Jigue	Britagem	Britagem				
	Teor de argamassa	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5				
	Consumo de materiais (kg)	<b>18,7</b>	<b>16</b>	<b>15,3</b>	<b>14,3</b>	<b>13,6</b>				
	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,68	2,29	2,2	2,06	1,95			3,01	2,62
	<b>Volume dos materiais (dm<sup>3</sup>)</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>			<b>1,6</b>	<b>5,2</b>
	Traço unitário em massa	Cimento	1,00	1,00	1,00	1,00			1,00	<b>Traço Pobre</b>
Areia		2,75	2,75	2,75	2,75	2,75				
Brita		3,75	3,2	3,06	2,86	2,72				
Traço em volume	Cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00				
	Areia	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25				
	Brita	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38				
	m (kg/kg)	6,5	5,95	5,81	5,61	5,47				
	água/cimento	0,84	1,00	0,97	1,13	1,21				
	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	275,46	271,56	266,67	262,41	257,24				

Para definição de cada um dos traços foi adotada a seguinte metodologia:

1. O concreto convencional, produzido com a brita natural foi dosada em massa, conforme o procedimento convencionalmente adotado (HELENE; TERZIAN, 1992);
2. Foi determinado o volume da brita natural ( $v_{ref}$ ), que foi adotado como referência para a definição do consumo dos outros agregados graúdos originados de RCD;
3. Esse volume de referência ( $v_{ref}$ ) foi fixado para todos os agregados graúdos de RCD durante a produção das demais famílias de concreto, ou seja, foi mantido o mesmo traço em volume para cada família de traços (rico, intermediário e pobre).

No procedimento de dosagem utilizado neste estudo experimental o ajuste do abatimento foi feito exclusivamente pela correção da quantidade de água necessária para atingir o abatimento definido, ou seja, este estudo também serviu para avaliar o efeito dos agregados na demanda de água para a manutenção da consistência do concreto. Assim, a consistência do concreto produzido com agregados reciclados não foi compensada pelo uso de aditivos superplastificantes, somente com o ajuste da quantidade de água. Essa variação foi estabelecida até proporcionar à mistura uma boa coesão e consistência adequada para a obtenção do abatimento especificado de  $80 \pm 10$  mm.

A Tabela 7 mostra o resumo do traço utilizado para a dosagem dos concretos.

Tabela 7 – Resumo do traço utilizado para a moldagem dos concretos.

Tipo de agregado			Traços ricos			
Sigla	Origem	Tratamento	cimento	areia	britas	a/c
Nat	Natural	Natural	1	1,25	2,25	0,51
SPB	São Paulo	Britagem	1	1,25	1,73	0,66
MB	Macaé	Britagem	1	1,25	1,64	0,72
SPJ	São Paulo	Jigue	1	1,25	1,92	0,59
MJ	Macaé	Jigue	1	1,25	1,85	0,6
Tipo de agregado			Traços médios			
Sigla	Origem	Tratamento	cimento	areia	britas	a/c
Nat	Natural	Natural	1	2,25	3,25	0,73
SPB	São Paulo	Britagem	1	2,25	2,5	1
MB	Macaé	Britagem	1	2,25	2,36	1,08
SPJ	São Paulo	Jigue	1	2,25	2,78	0,87
MJ	Macaé	Jigue	1	2,25	2,67	0,87
Tipo de agregado			Traços pobres			
Sigla	Origem	Tratamento	cimento	areia	britas	a/c
Nat	Natural	Natural	1	2,75	3,75	0,84
SPB	São Paulo	Britagem	1	2,75	2,88	1,13
MB	Macaé	Britagem	1	2,75	2,73	1,21
SPJ	São Paulo	Jigue	1	2,75	3,2	1
MJ	Macaé	Jigue	1	2,75	3,08	0,97

#### 4.9 Procedimento de moldagem, adensamento e cura dos corpos-de-prova

A ordem de colocação dos materiais na betoneira tem influência no resultado final do concreto endurecido. Por esse motivo é ainda mais necessário garantir a homogeneidade da mistura do concreto no estado fresco. Após a colocação dos materiais (agregado graúdo, areia, cimento e parte da água) na betoneira, a água foi complementada progressivamente até que a consistência exigida para o concreto fosse atingida. O ensaio para a determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone (NBR 7223, 1992) foi feito logo após a mistura dos materiais para cada adição de água. Caso o abatimento não atingisse a faixa determinada de trabalho de  $80 \pm 10$  mm, uma quantidade maior de água era adicionada até que essa exigência fosse atendida.

O ensaio de abatimento do tronco de cone (Figura 11) pode indicar indiretamente a trabalhabilidade dos concretos convencionais de consistência plástica. Esse ensaio é considerado como uma medida prática da consistência do concreto, permitindo que se controle a uniformidade do material. No entanto, como o

mesmo tem a gravidade como única força atuante sobre o material, a variação da massa específica dos agregados faz com que sua medida seja alterada. Assim, optou-se por utilizar este ensaio pela facilidade com que é realizado e pela abrangência de sua aplicação, ou seja, é sem dúvida o método mais largamente empregado para a recepção do concreto em obra e verificação de sua uniformidade podendo até, como foi dito, representar bem a trabalhabilidade do material. No entanto, possui limitações e estudos reológicos deverão ser realizados para um melhor entendimento do papel do agregado reciclado na trabalhabilidade do concreto.



**Figura 11 – Medida do abatimento do tronco de cone.**

Para cada mistura foram determinados os parâmetros básicos de dosagem, tais como abatimento, teores de argamassa e massa específica (Tabela 8). Uma vez atingida a consistência de dosagem foram moldados os corpos-de-prova cilíndricos 10x20 cm. Os corpos-de-prova foram adensados numa mesa vibratória por cerca de oito segundos, a fim de manter a uniformidade no processo. Após o adensamento foi feito o acabamento na superfície dos corpos-de-prova com a colher de pedreiro.

Finalizada a etapa de moldagem todos os corpos-de-prova foram cobertos com saco plástico para evitar a perda de água; após 24 horas foi realizada a desforma e os corpos-de-prova foram armazenados em câmara úmida ( $T=25^{\circ}\text{C}$ , umidade  $90\pm 10\%$ ). Foram moldados três corpos-de-prova para a realização dos ensaios de compressão axial e outros três para o ensaio de módulo de elasticidade.

Após 28 dias em câmara úmida os corpos-de-prova foram retirados e capeados para ensaio de resistência à compressão (NBR 5739, 2007) e módulo de elasticidade (NBR 8522, 2008). A avaliação da resistência à compressão é um procedimento essencial para o estudo de dosagem do concreto. Além disso, como estudos realizado por Mansur et al. (1999) apresentaram módulo de deformação tangente inicial de concretos com agregado reciclado de blocos cerâmicos de alta resistência resultando em 23 % inferior ao módulo de deformação do concreto de referência, julgou-se necessário realizar também a determinação dessa propriedade. Espera-se determinar uma correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência do concreto, dado que, como apontam Mehta e Monteiro (1994), o módulo de deformação do agregado está ligado principalmente à sua porosidade.

## 5. RESULTADOS E ANÁLISE

### 5.1 Concreto no estado fresco

O teor de argamassa foi determinado para o traço intermediário e a partir desse traço foi feito o desdobramento para os demais traços (rico e pobre) com o mesmo teor de argamassa correspondente a 50% em massa para o agregado natural.

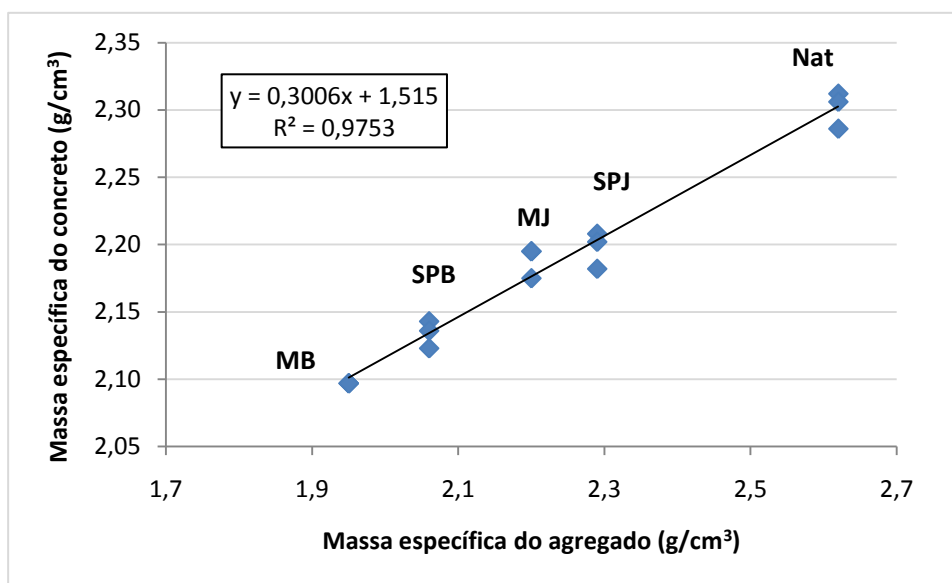
Os parâmetros de dosagem, tais como abatimento e massa específica são apresentados na Tabela 8. Nota-se que foi possível produzir concretos coesos e trabalháveis com o teor de argamassa em volume constante tanto para concretos com agregados naturais como para reciclados. Tal fato corrobora o procedimento da dosagem em volume e possibilita a comparação entre os resultados.

**Tabela 8 – Resultados dos parâmetros obtidos do concreto no estado fresco.**

Traço (em volume)	Sigla	Origem	Tratamento	Abatimento (mm)	a/c	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de ar incorporado (%)
<b>Rico</b>	Nat	Natural	Natural	87	0,51	2312	1,5
	SPB	São Paulo	Britagem	85	0,66	2143	2,8
	MB	Macaé	Britagem	87	0,72	2097	3,4
	SPJ	São Paulo	Jigue	78	0,59	2208	2,5
	MJ	Macaé	Jigue	87	0,6	2195	2,6
<b>Intermediário</b>	Nat	Natural	Natural	95	0,73	2306	1,3
	SPB	São Paulo	Britagem	87	1	2136	2,8
	MB	Macaé	Britagem	82	1,08	2097	3
	SPJ	São Paulo	Jigue	90	0,87	2202	2,2
	MJ	Macaé	Jigue	70	0,87	2195	2,5
<b>Pobre</b>	Nat	Natural	Natural	85	0,84	2286	1,6
	SPB	São Paulo	Britagem	75	1,13	2123	2,8
	MB	Macaé	Britagem	70	1,21	2097	2,8
	SPJ	São Paulo	Jigue	75	1	2182	2,4
	MJ	Macaé	Jigue	80	0,97	2175	2,5

A massa específica do concreto reciclado é menor que a do concreto convencional, isso ocorre devido à menor faixa densitária dos agregados reciclados, como se pode observar na Figura 12.

Os valores obtidos estão de acordo com resultados obtidos em pesquisas anteriores (Carrijo, 2005), onde houve uma boa correlação entre a massa específica do agregado com a massa específica do concreto. Assim, como era natural de se esperar, a utilização de agregados mais leves proporcionará a produção de concretos mais leves.



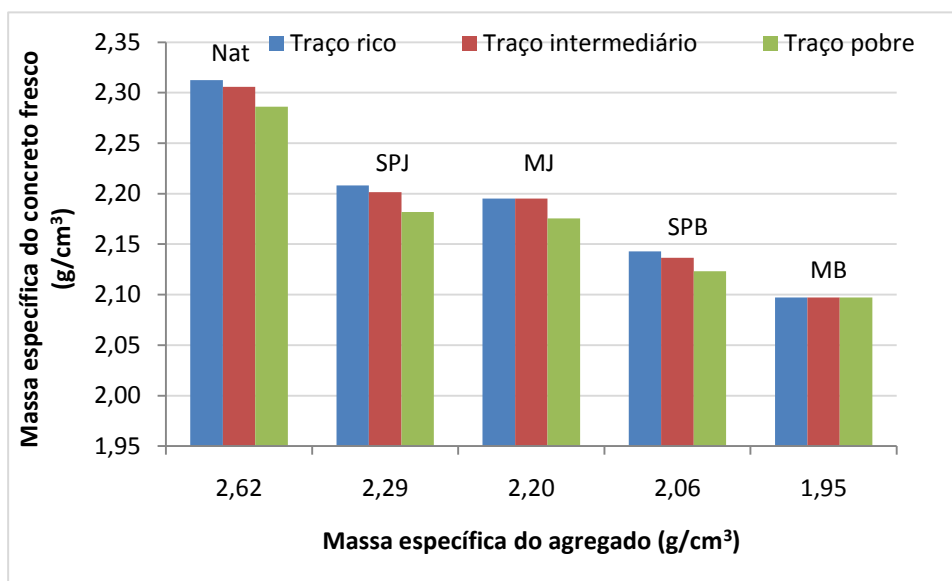
**Figura 12 – Correlação entre a massa específica e a massa específica do concreto do traço intermediário.**

A partir dos resultados apresentados foi possível observar a influência da origem juntamente com o tratamento dos agregados. Tendo como referência o concreto com agregados naturais, os concretos reciclados confeccionados com os agregados de RCD apresentaram menor massa específica. No entanto, os concretos produzidos com agregados oriundos da cidade de São Paulo obtiveram maior massa específica em relação aos da cidade de Macaé, o que ficou mais pronunciado quando esses foram simplesmente britados. Os concretos com agregados tratados em jigue apresentaram valores mais próximos para as diferentes cidades de origem em relação ao concreto de referência.

O tratamento em jigue separa as partículas pela sua massa específica aparente através de um leito pulsante, promove a redução dos materiais particulados no processamento, ou seja, reduz o teor de finos, aumenta a massa específica aparente dos agregados além de outras vantagens (ANGULO, 2005).



Como a massa específica aparente dos agregados reciclados está relacionada principalmente com os teores de argamassa e de cerâmica vermelha presente nos resíduos, os quais são os materiais responsáveis pela porosidade no agregado de RCD reciclado, as propriedades do concreto podem ser otimizadas a partir do tratamento dos agregados pelo controle da separação densitária – tratamento em jigue.



**Figura 13 – Influência do tratamento dos agregados reciclados na massa específica do concreto.**

Na Figura 13 pode-se observar diferenças sensíveis na massa específica do concreto em função dos tratamentos recebidos pelos agregados. O maior valor de massa específica está associado ao concreto de referência, como era esperado, e, em seguida, o concreto com agregados reciclados tratados em jigue e, finalmente, os simplesmente britados.

Pode-se concluir que a separação densitária aproxima o comportamento do concreto produzido com agregado de RCD reciclado do agregado convencional. Esta aproximação é maior para agregados que, originalmente, já possuíam massa específica superior, como ocorreu com os agregados originados de São Paulo. Por outro lado, o uso de jigues diminuiu a diferença de massa relativa entre os diferentes agregados de RCD.

## 5.2 **Concreto no estado endurecido**

Para a avaliação da influência do agregado de RCD reciclado no comportamento do concreto endurecido foram realizados ensaios de determinação de resistência à compressão.

O capeamento dos corpos-de-prova (Figura 14) bem como a realização dos ensaios mecânicos - compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade - foram realizados no IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas). A prensa universal utilizada foi da marca MOHR & FEDERHAFF AG com capacidade de 200 toneladas. Foi realizado também no IPT os ensaio de absorção de água do concreto por imersão e determinação do módulo de elasticidade, após a cura de 28 dias (Figura 14).



Figura 14 – Capeamento dos corpos-de-prova e ensaio mecânico – resistência à compressão.

## 5.3 **Resistência à compressão**

A resistência à compressão é a propriedade do concreto mais estudada, sendo esta capaz de indicar com precisão as variações da qualidade de um concreto. A determinação da resistência dos diferentes traços foi feita através da ruptura de três corpos-de-prova, sendo considerada a média dos valores como o valor de referência para a resistência do material. Tal procedimento já havia sido adotado em estudos anteriores (Carrijo, 2005 e Pietra, 2005). A escolha deste critério específico ocorre em função da variabilidade intrínseca dos agregados de RCD, o que pode alterar a resistência do concreto tanto para cima como para baixo. Com isto, considera-se o valor médio como mais representativo da resistência neste

caso, ao contrário do concreto convencional onde normalmente se rompem dois corpos-de-prova e se utiliza o maior valor obtido como resistência do exemplar.

As formas de ruptura dos concretos reciclados foram muito variadas. No entanto, através da observação dos corpos-de-prova rompidos foi possível constatar que a ruptura ocorria preferencialmente pelos agregados reciclados, especialmente os grãos em cerâmica, cuja parte interna aparecia claramente na superfície de fratura dos corpos-de-prova.

A Tabela 9 apresenta os valores obtidos de resistência à compressão. A seguir será apresentado o gráfico da resistência à compressão do concreto em função da massa específica dos agregados (Figura 15 e Figura 16), o diagrama de dosagem (Figura 17), segundo a metodologia de dosagem tradicional para concretos plásticos e o diagrama de BI (Binder intensity – Figura 19). A partir do diagrama de dosagem é possível obter os diagramas BI (Binder intensity), ou seja, relação entre o consumo de cimento e resistência à compressão do concreto. Estes gráficos irão permitir realizar a avaliação comparativa de desempenho entre as diferentes famílias de agregados.

**Tabela 9 – Valores individuais médios obtidos no ensaio de determinação da resistência à compressão (a) traço rico e intermediário e (b) traço pobre.  
(a)**

<b>Traço</b>	<b>Origem</b>	<b>Tratamento</b>	<b>fc (MPa)</b>	<b>Fcm (MPa)</b>
<b>Rico</b>	Natural	Natural	32,2	30,5
			28,7	
			30,7	
	São Paulo	Britado	24	23,7
			23,5	
			23,7	
	Macaé	Britado	21,7	22,4
			23,2	
			22,2	
	São Paulo	Jigue	28,7	27,3
			25,7	
			27,5	
	Macaé	Jigue	28,2	26,1
			26	
			24,2	
<b>Intermediário</b>	Natural	Natural	21,7	20,8
			20,5	
			20,2	
	São Paulo	Britado	16,2	15,6
			15,7	
			15	
	Macaé	Britado	14,7	14,7
			14,2	
			15,2	
	São Paulo	Jigue	18,2	18,1
			18	
			18	
	Macaé	Jigue	17,2	16,6
			16,2	
			16,5	

Continuação

(b)

Traço	Origem	Tratamento	fc (MPa)	Fcm (MPa)
Pobre	Natural	Natural	17,2	17,2
			17	
			17,5	
	São Paulo	Britado	14,2	14,8
			14,7	
			15,5	
	Macaé	Britado	13,5	13,4
			13,2	
			13,5	
	São Paulo	Jigue	16,2	16,2
			16,7	
			15,7	
	Macaé	Jigue	14,7	14,7
			15	
			14,5	

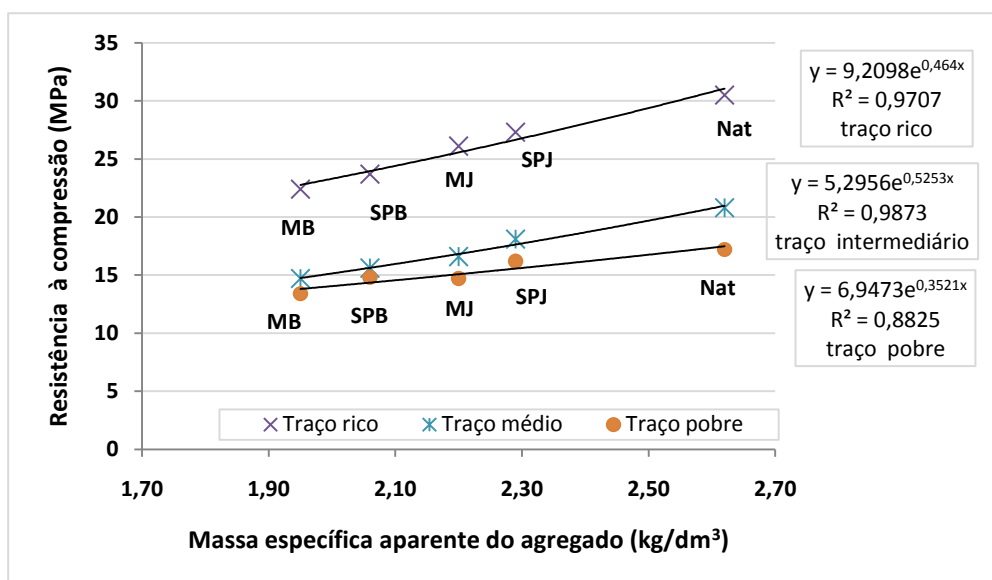


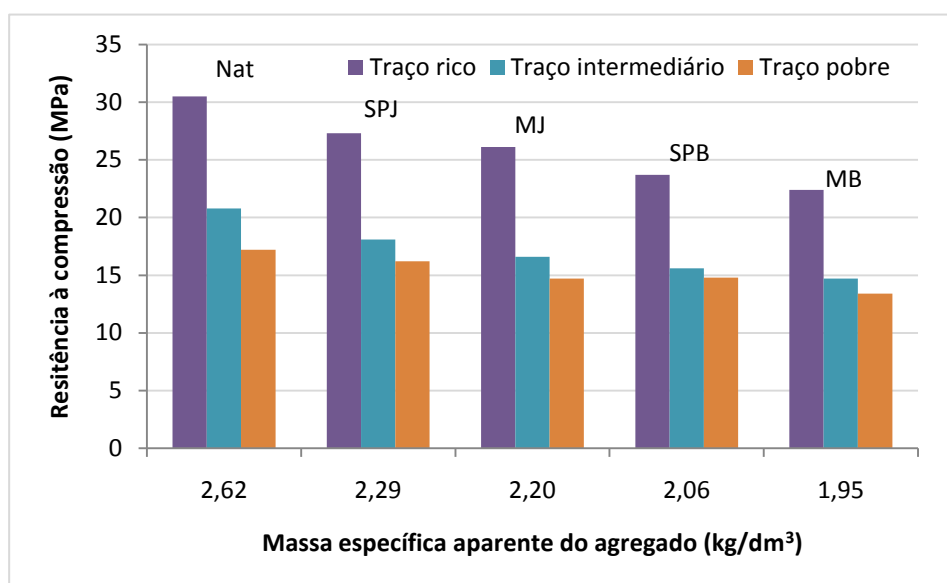
Figura 15 – Resistência à compressão dos concretos em função da massa específica dos agregados e do consumo de cimento.

Nota-se que o decréscimo de resistência dos concretos reciclados foi menos intenso para a família correspondente aos traços pobres, conforme pode-se observar na Figura 15, onde a inclinação desta curva específica é menor que a das

outras famílias de concreto. Para os concretos com traço rico e intermediário, o decréscimo máximo de resistência foi em torno de 27 e 29% respectivamente, quando a densidade do agregado passou de 2,62 para 1,95 (g/cm<sup>3</sup>). Isto pode ser explicado pelo fato do agregado de RCD reciclados, mais porosos, impactarem de maneira mais intensa os concretos constituídos por uma pasta de cimento mais resistente.

Quando a pasta de cimento é mais porosa, como é o caso dos concretos pobres que utilizam uma maior relação água/cimento, os poros dos agregados de RCD deixam de ser o efeito de maior impacto no comportamento mecânico.

Comportamento similar foi encontrado em trabalhos anteriores como o de Carrijo (2005). Nota-se também que o traço intermediário apresentou valores mais próximos do traço pobre do que para o traço rico. Isto ocorre em função da relação não linear de resistência e relação água/cimento, como apresentado na lei de Abrams, onde o maior efeito na variação de resistência ocorre com alterações nos valores mais baixos de relação água/cimento.



**Figura 16 – Resistência à compressão do concreto em função da massa específica da origem e do tratamento dos agregados.**

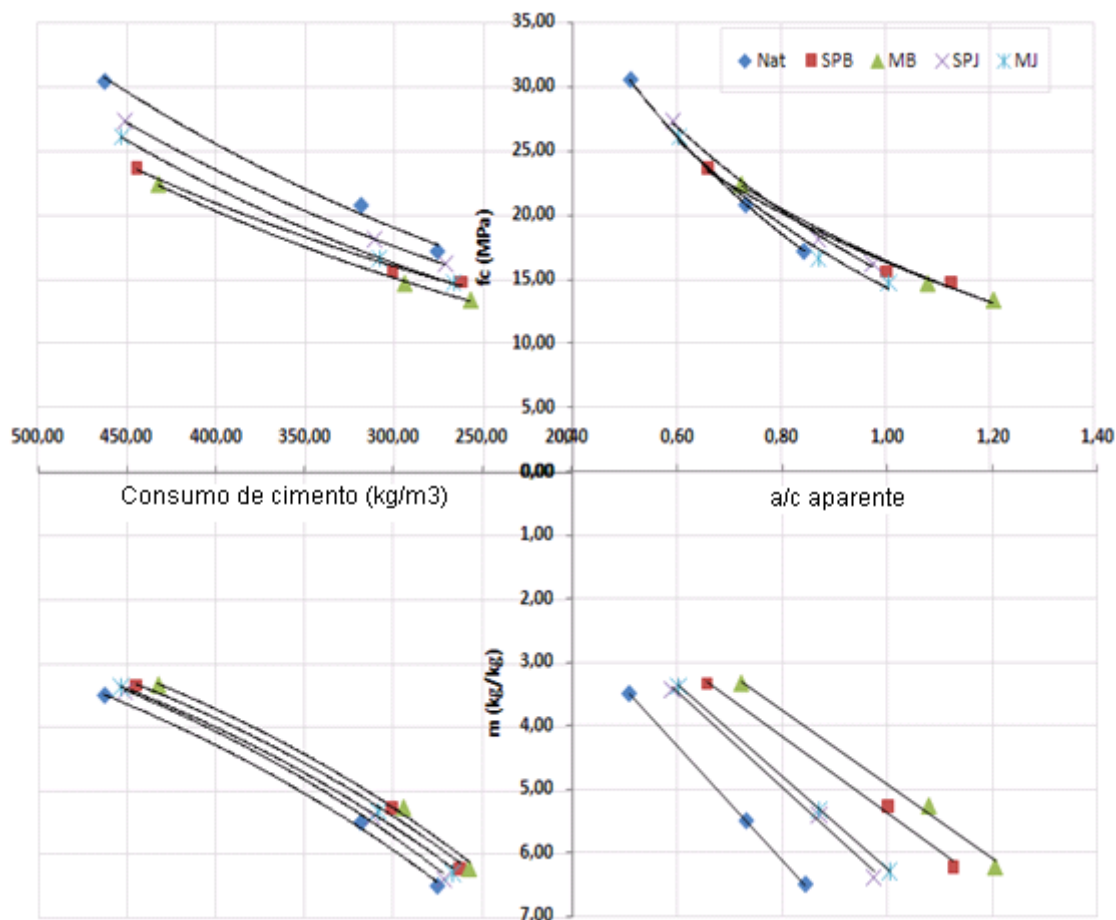
Na Figura 16 notam-se resultados ligeiramente melhores para a cidade de São Paulo em relação à cidade de Macaé. A origem dos agregados se mostrou também um fator influente no comportamento do concreto, da mesma forma como foi verificado para a influência dos tratamentos dos agregados. Isto ocorreu pelo simples fato de a origem ter proporcionado diferentes níveis de porosidade para o

material. Ou seja, a origem acaba sendo um fator secundário no comportamento do concreto, dado que o tratamento por jigüe acabou por aproximar o desempenho dos materiais por uniformizar a porosidade dos agregados. O decréscimo máximo da resistência à compressão foi atribuída à cidade de Macaé, cerca de 29% para concretos confeccionados com agregados reciclados simplesmente britados, no traço intermediário, seguido de 27% no traço rico, tendo como referência o concreto natural.

Os concretos confeccionados com agregados da cidade de São Paulo, simplesmente britados, apresentaram valores menores de decréscimo, equivalentes a 25 e 22% para o traço intermediário e o rico, respectivamente.

Como pode ser observado, o decréscimo de resistência foi mais pronunciado principalmente para os concretos que utilizaram agregados reciclados tratados simplesmente por britagem. A redução mínima de resistência foi atrelada ao concreto produzido com agregados reciclados tratados com jigüe, o que comprova a capacidade do sistema de uniformizar o material reciclado. Assim, o tratamento, neste caso específico, foi mais relevante para o desempenho dos concretos que a origem dos agregados.

A continuidade da discussão da influência da origem e tratamento dos agregados de RCD reciclados será abordada em seqüência. A seguir será exposto o diagrama de dosagem (Figura 17). Esse diagrama permite estabelecer traços para cada faixa de resistência de dosagem desejada e determinar o seu respectivo consumo de cimento.



**Figura 17 - Diagrama de dosagem contendo as correlações entre resistência à compressão e relação água/cimento, relação água/cimento e teor de agregados e teor de agregados e consumo de cimento.**

Na Figura 17 nota-se certo deslocamento à direita das curvas no primeiro quadrante, principalmente na parte inferior, para os concretos reciclados. Ou seja, para o traço mais pobre em cimento e conseqüentemente, mais ricos em agregados graúdos, houve um aumento proporcional da demanda de água para se garantir a consistência, o que acabou por aumentar muito a relação água/cimento. Isto era esperado pelo fato de haver mais poros de agregados a consumir água na mistura. No entanto, este aumento na relação água/cimento acabou por alterar de maneira suave a resistência à compressão, pois se pode observar que as curvas de dosagem mais à esquerda, com menor relação água/cimento, apresentam decréscimo de resistência também menor. Por outro lado, houve um deslocamento relativo maior das curvas de dosagem na região de maior relação água/cimento. Nesta área, apesar do aumento significativo na relação água/cimento, não houve uma perda de resistência à compressão na mesma proporção. Pode-se dizer que este comportamento endossa a idéia de que a maior quantidade de água esteja

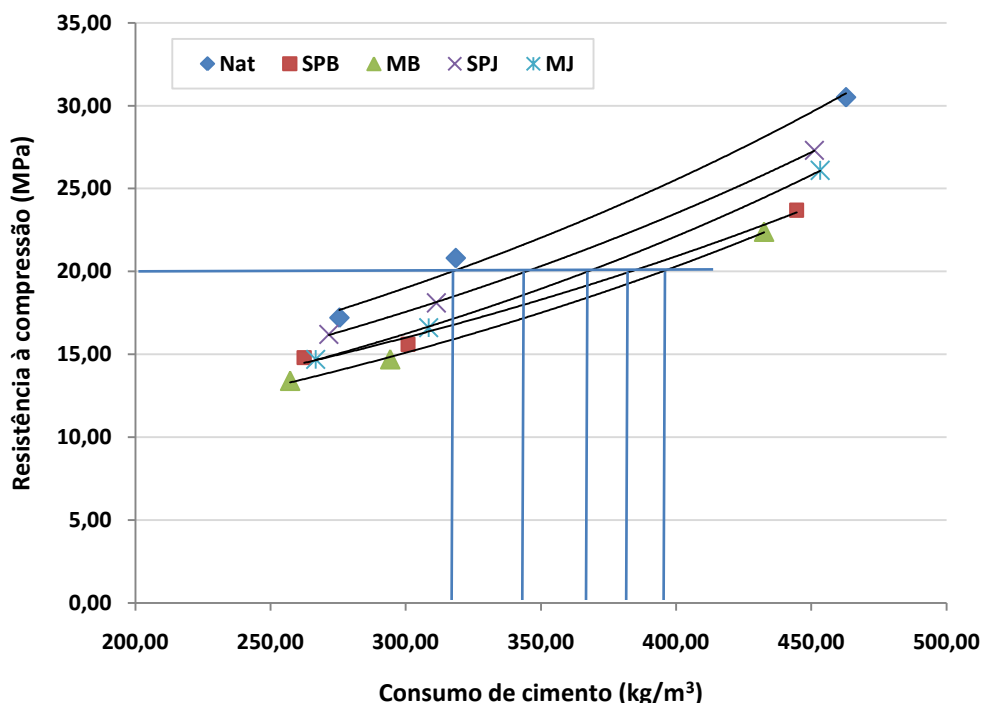


sendo consumida em parte na pasta que preencheu os poros superficiais dos agregados graúdos de RCD. Porém, este preenchimento se deu com um material de menor qualidade, devido à maior relação água/cimento da pasta. Isto porque este deslocamento foi mais intenso na parte inferior dos gráficos, associados à região com maior teor de agregados graúdos e, conseqüentemente, de poros superficiais a serem preenchidos. Vale ressaltar que a diferença relativa de resistência ocorreu de maneira mais intensa também para concretos de maior relação água/cimento, ao contrário do que apontaram os resultados de pesquisa anterior (CARRIJO, 2005; PIETRA, 2005) onde os deslocamentos dos gráficos de dosagem foram mais significativos para menores relações água/cimento.

Esta diferença pode ser atribuída a dois principais fatores. O primeiro é o fato de não ter havido saturação prévia dos agregados, o que possibilitou o preenchimento, ao menos em parte, dos poros dos agregados pela pasta de cimento. Desta forma, pode-se dizer que o preenchimento pode ter sido mais eficiente para os traços ricos, onde o volume de pasta era maior e a sua qualidade também. No caso dos concretos pobres, havia uma maior proporção de agregados totais (miúdos e graúdos) e um menor volume de pasta, o que pode ter prejudicado este preenchimento. Além disso, neste procedimento de dosagem foi considerada a água total adicionada ao material, com maior demanda para os traços pobres devido ao maior volume de poros do concreto associado aos agregados o que demandou uma maior quantidade de água para fluidificar o material. Além do mais, a massa específica dos concretos também foi reduzida, o que gerou uma redução no abatimento e, por essa razão, induziu a um aumento ainda maior na quantidade de água para se garantir a mesma consistência medida pelo abatimento de tronco de cone. Com isto, estas curvas foram deslocadas para a direita devido ao maior valor da relação água/cimento.

Para melhor análise dos resultados, o quarto quadrante da Figura 17 foi isolado na Figura 18. Essa figura permite a análise conjunta das diferentes famílias de concreto, o que possibilita concluir sobre a influência da origem dos agregados, bem como da influência do tratamento. Para uma dada resistência de dosagem de referência, no caso 20 MPa, constatou-se claramente que o consumo de cimento foi menor para concretos produzidos com agregados naturais seguido dos concretos confeccionados com agregados reciclados tratados em jigüe e que os concretos

produzidos com agregado reciclados simplesmente britados demandaram o maior consumo de cimento.



**Figura 18 – Gráfico de dosagem associando a resistência à compressão ao consumo de cimento segundo o tratamento dos agregados reciclados.**

Quanto às origens dos agregados reciclados podem-se observar diferenças nos resultados medidos absolutamente coerentes com os resultados anteriores; os agregados reciclados da cidade de São Paulo demandaram valores de consumo de cimento menor que os da cidade de Macaé, para a resistência fixa de 20 MPa. Isto está relacionado com a maior massa específica obtida com os concretos produzidos com agregados de RCD originados em São Paulo. Ou seja, concretos produzidos com agregados mais densos conseguem obter resultados de resistência com menores consumos de cimento, pois são menos porosos globalmente.

Para facilitar a visualização, e não saturar a Figura 18, a Tabela 10 – Valores de consumo de cimento dos concretos produzidos por agregados naturais e agregados reciclados de diferentes origens e tratamentos.

apresenta valores de consumo de cimento ( $\text{kg/m}^3$ ) para duas faixas de resistências 20 e 18 MPa.

Pela Tabela 10 é notório que há influência nas demandas de consumo de cimento relacionada ao tratamento e às origens dos agregados reciclados.

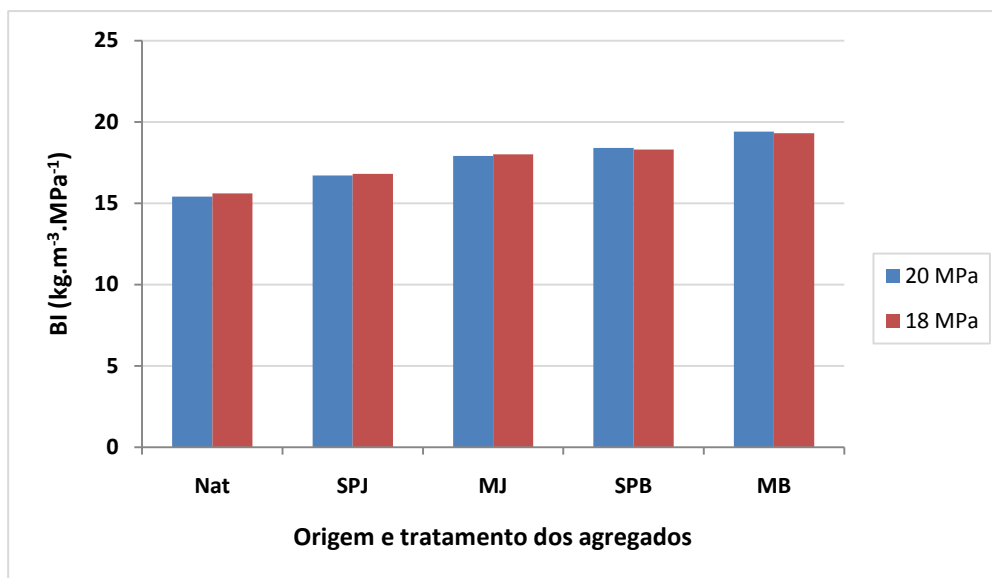
**Tabela 10 – Valores de consumo de cimento dos concretos produzidos por agregados naturais e agregados reciclados de diferentes origens e tratamentos.**

Origem	fc (MPa)	(kg/m <sup>3</sup> )		
		Tratamento		
		Natural	Britagem	Jigue
Natural	18	280,15	-	-
	20	308,11	-	-
São Paulo	18	-	329,09	302,39
	20	-	368,64	333,94
Macaé	18	-	348,15	324,52
	20	-	387,21	357,03

Nota-se que a maior demanda de cimento está atrelada aos concretos com adição de agregados reciclados simplesmente britados, seguidos dos jigados tendo como referência os concretos naturais.

Para a faixa de resistência fixa de 20 MPa, os concretos confeccionados com agregados reciclados jigados e britados da cidade de Macaé apresentaram aumento de consumo de cimento de aproximadamente 16% e 26% respectivamente em relação ao concretos de referência. Para a mesma faixa de resistência, os concretos produzidos com agregados da cidade de São Paulo demandaram o aumento de consumo de cimento, cerca de 8 e 20% para os confeccionados com os agregados tratados em jigue e os agregados simplesmente britados.

Para explorar melhor esta discussão será dada a continuidade á análise através dos gráficos correlacionando o consumo de cimento por resistência de dosagem do concreto (BI). O índice Binder Intensity (BI) estima a quantidade do consumo de cimento para 1 MPa da resistência mecânica do concreto (DAMINELLI, et al. 2010). O resultado desta análise pode ser observado na Figura 19, onde será adotado valores fixos de resistência mecânica de dosagem do concreto para a construção dos gráficos.



**Figura 19 - Influência do tratamento e da origem dos agregados reciclados.**

No que diz respeito à origem dos agregados, houve diferença de desempenho, visto que os concretos produzidos com agregados da cidade de São Paulo apresentam desempenho ligeiramente superior principalmente para os concretos produzidos com agregados simplesmente britados.

A origem dos agregados alterou substancialmente o resultado final de desempenho. Com isso se pode afirmar que a origem dos agregados é um fator determinante para os resultados em termos de demanda de cimento.

Na Figura 19 nota-se a eficiência do tratamento jigue em relação aos concretos produzido com agregados reciclados simplesmente britados. A diminuição do BI ocorreu quando os concretos produzidos com agregados reciclados britados foram tratados em jigue, tanto para o caso daqueles oriundos de São Paulo como para os de Macaé. Ou seja, os concretos produzidos com agregados que passaram por tratamento em jigue exigiram um menor consumo de cimento para a mesma faixa de resistência. Os resultados apresentados na Figura 19 endossam os aspectos observados anteriormente, onde, agregados mais porosos, demandam maior consumo de cimento para se atingir a mesma faixa de resistência de dosagem.

O aumento no valor do BI em função do uso de agregados reciclados britados da cidade de Macaé foi de 26% para uma resistência de 20MPa e de 24% para uma resistência de 18MPa. Já para a cidade de São Paulo, o aumento do valor de BI foi de 20% para a resistência de 20MPa e de 17% para 18MPa.

Em relação aos tratamentos em jigues o aumento dos valores de BI da cidade de Macaé, para a faixa de resistência do concreto de 20 MPa, foi cerca de 16% e 15% para a resistência do concreto de 18 MPa. A cidade de São Paulo apresentou valores de BI com aumento de 8 e 7% para as resistências do concreto de 20 e 18 MPa respectivamente. O aumento dos valores de BI para os concretos produzidos com agregados tratados em jigues apresentaram comportamento bem aproximado.

A análise de dosagem por resistência fixa corrobora os resultados obtidos pelas diferentes famílias de concretos, evidenciando que existe uma influência do tratamento dos agregados e da origem no comportamento dos concretos com eles produzidos.

Finalmente, pode-se concluir que, pela análise dos resultados obtidos com o concreto endurecido, a separação densitária aproxima o comportamento do concreto produzido com agregado de RCD do concreto convencional. Da mesma forma como ocorreu para a massa específica, esta aproximação é tão maior quanto maior for a massa específica dos agregados britados de RCD. Assim, os agregados originados de São Paulo, que já eram mais densos, tiveram uma aproximação maior em relação ao concreto de referência do que aqueles produzidos em Macaé. No entanto, o uso de jigues não foi capaz de eliminar a diferença relativa de desempenho mecânico entre os diferentes agregados de RCD, da mesma forma como ocorreu para a massa específica, demonstrando que a origem dos agregados é um fator determinante no comportamento dos concretos, mesmo que tenha passado pelo tratamento de jigagem. Com isto, pode-se concluir que a jigagem dos agregados tem sua eficiência afetada pelo insumo de RCD.

#### **5.4 Resistência à tração por compressão diametral**

Após os 28 dias de idade dos corpos-de-prova foram realizados os ensaio de compressão diametral segundo a especificação da NBR 7222 (1994) – vide Figura 20.

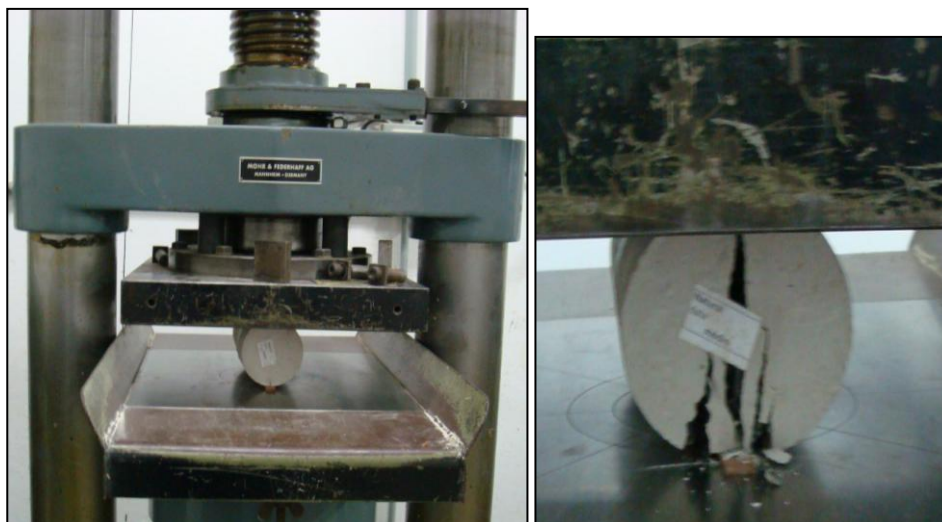


Figura 20 – Ensaio de compressão diametral.

Na Figura 21 estão apresentados os valores de resistência à tração por compressão diametral em função do consumo de agregados ( $m$ ) que é a relação entre a massa total dos agregados secos e a massa de cimento (kg/kg).

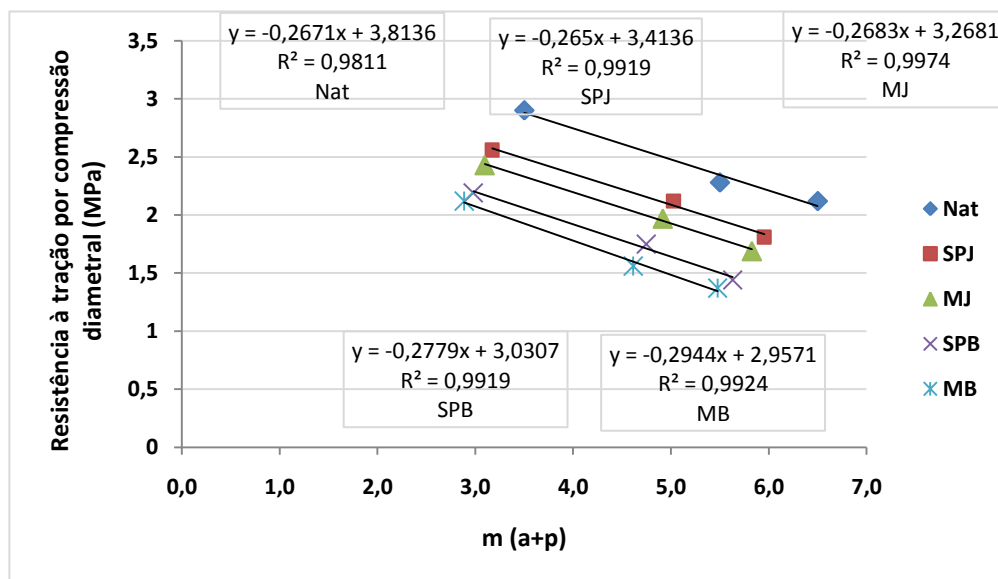


Figura 21 - Resistência à tração por compressão diametral em função dos valores de  $m$  para os diferentes concretos reciclados.

É possível observar que os concretos produzidos com agregados reciclados apresentam menores valores de resistência à tração em relação aos concretos naturais. Em relação aos tratamentos e as origens dos agregados reciclados, a análise do apresentado na Figura 21 corrobora o observado nas figuras anteriores referentes à resistência à compressão. Os concretos com agregados reciclados

simplesmente britados apresentaram baixos valores de resistência à tração em relação aos agregados reciclados jigados. A menor resistência foi obtida para os concretos com agregados reciclados da cidade de Macaé tanto nos concretos produzidos com agregados tratados em jigue como nos simplesmente britados. Fato que também evidencia a influência da origem dos agregados.

Para uma baixa relação água/cimento menor será o valor de  $m$ , sendo assim, maior será a influência do agregado graúdo reciclado sobre a resistência à tração. Tal afirmação se deve à fase zona de transição do concreto, ou seja, região compreendida pela interface entre a superfície do agregado e a pasta. No caso do concreto reciclado, a parte mais fraca passa a ser os próprios agregados graúdos.

A Figura 22 apresenta resultados de resistência à tração por compressão diametral em relação à relação água/cimento.

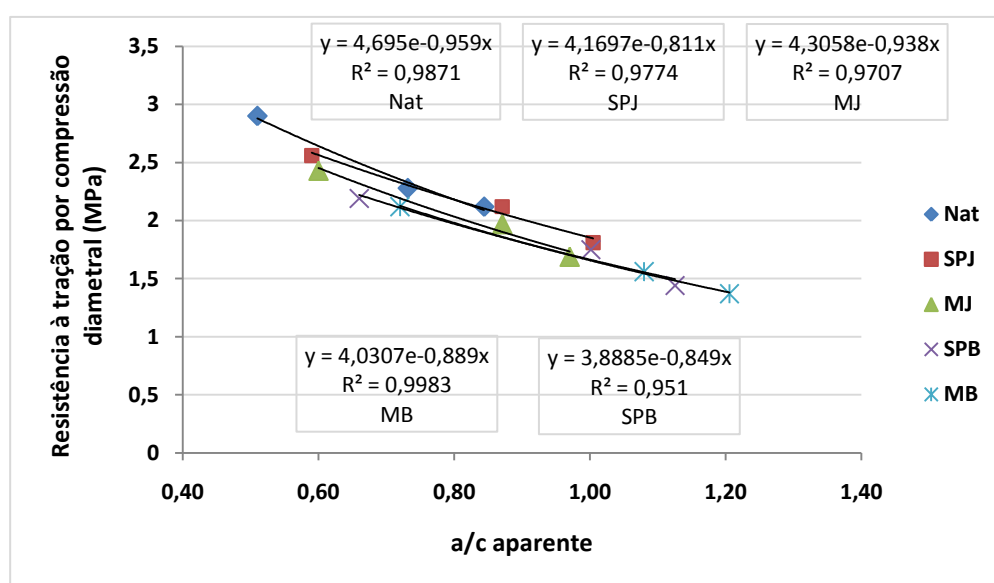


Figura 22 – Curva de resistência à tração por compressão diametral em função da relação a/c.

Com a substituição dos agregados reciclados no concreto, ocorre o deslocamento da curva para maiores valores da relação água/cimento. Esse deslocamento para a direita é mais expressivo para agregados de menor densidade, o que equivale a dizer que o tipo de tratamento dos agregados tem sua influência no comportamento do material como ocorreu para os concretos produzidos com agregados simplesmente britados (SPB – São Paulo Britado e MB – Macaé Britado) que, sendo mais porosos, produziram concretos menos resistentes.

Novamente o tratamento dos agregados demonstrou-se um fator relevante bem como a origem dos mesmos, sendo que os concretos produzidos com agregados da cidade de Macaé apresentaram baixa resistência à tração e maior demanda de água.

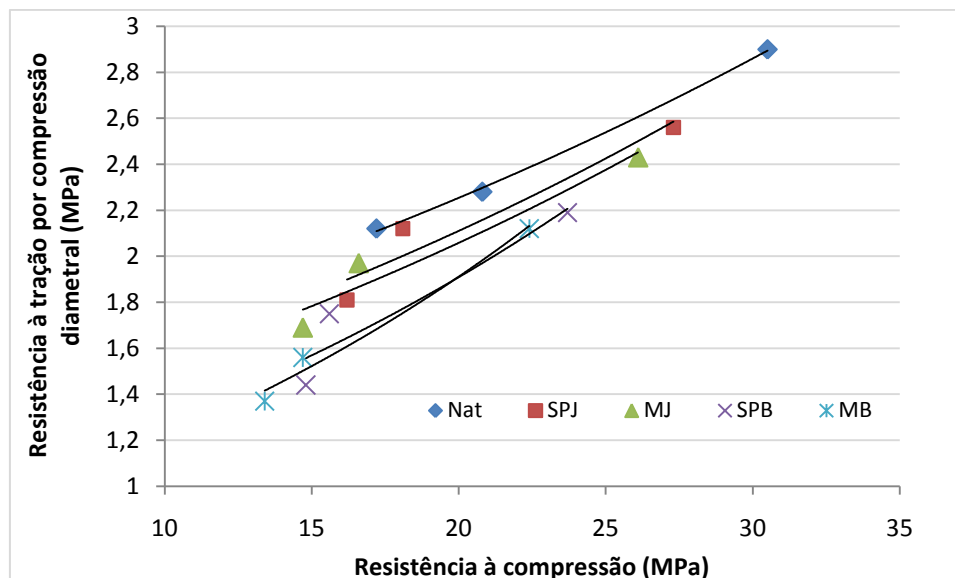
A seguir serão contemplados, na Tabela 11, os valores da variação de resistência à tração dos concretos produzidos com agregados reciclados em relação aos concretos naturais. Segundo Mehta e Monteiro (1994) a resistência à compressão e à tração são intimamente relacionadas, no entanto não há uma proporcionalidade direta.

**Tabela 11 – Comparação das resistências médias à tração por compressão diametral (ftD) dos concretos naturais pelos concretos reciclados.**

Traço	Concreto			a/c	ftD (MPa)	Variação de Resistência em relação ao concreto de referência
	Sigla	Origem	Tratamento			
Rico	Nat	Natural	Natural	0,51	2,9	-
	SPJ	São Paulo	Jigue	0,59	2,56	0,88
	MJ	Macaé	Jigue	0,6	2,43	0,84
	SPB	São Paulo	Britagem	0,66	2,19	0,76
	MB	Macaé	Britagem	0,72	2,12	0,73
Intermediário	Nat	Natural	Natural	0,73	2,28	-
	SPJ	São Paulo	Jigue	0,87	2,12	0,93
	MJ	Macaé	Jigue	0,87	1,97	0,86
	SPB	São Paulo	Britagem	1	1,75	0,77
	MB	Macaé	Britagem	1,08	1,56	0,68
Pobre	Nat	Natural	Natural	0,84	2,12	-
	SPJ	São Paulo	Jigue	1	1,81	0,8
	MJ	Macaé	Jigue	0,97	1,69	0,75
	SPB	São Paulo	Britagem	1,13	1,44	0,64
	MB	Macaé	Britagem	1,21	1,37	0,61

Pelos valores apresentados na Tabela 11, verifica-se que os valores de concretos com agregados reciclados apresentaram redução de resistência em relação ao concreto de referência. Pode-se associar essa redução à relação água/cimento, conforme este aumenta os valores de resistência tendem a diminuir.





**Figura 23 – Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão.**

Na Figura 23, observa-se claramente a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão. Os valores elevados de resistência à compressão estão associados aos valores de maior resistência à tração. No que se refere à discussão em relação à influência das origens e tratamento dos agregados reciclados, a Figura 23 tende a apoiar as análises anteriores. Quanto à origem os concretos de baixas resistências estão vinculados aos concretos produzidos com agregados da cidade de Macaé (MB e MJ), seguido da cidade de São Paulo (SPB e SPJ); e em relação ao tratamento os concretos produzidos com agregados reciclados simplesmente britados obtiveram menores valores de resistência (SPB e MB), tendo como referência o concreto natural (Nat).

### 5.5 Absorção de água no concreto

Foi realizado o ensaio de absorção de água por imersão de acordo com a norma NBR 9778 (2009) – Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. Esse ensaio permite avaliar o volume dos poros permeáveis a partir da quantidade total de água absorvida pelo compósito. Pela análise desta propriedade pode-se constatar a influência do tipo de agregado graúdo empregado sobre a porosidade e a absorção do concreto.

Os corpos-de-prova foram secos em estufa por três dias e em seguida foram imersos em água sem fervura pelo mesmo período de tempo (Figura 24).



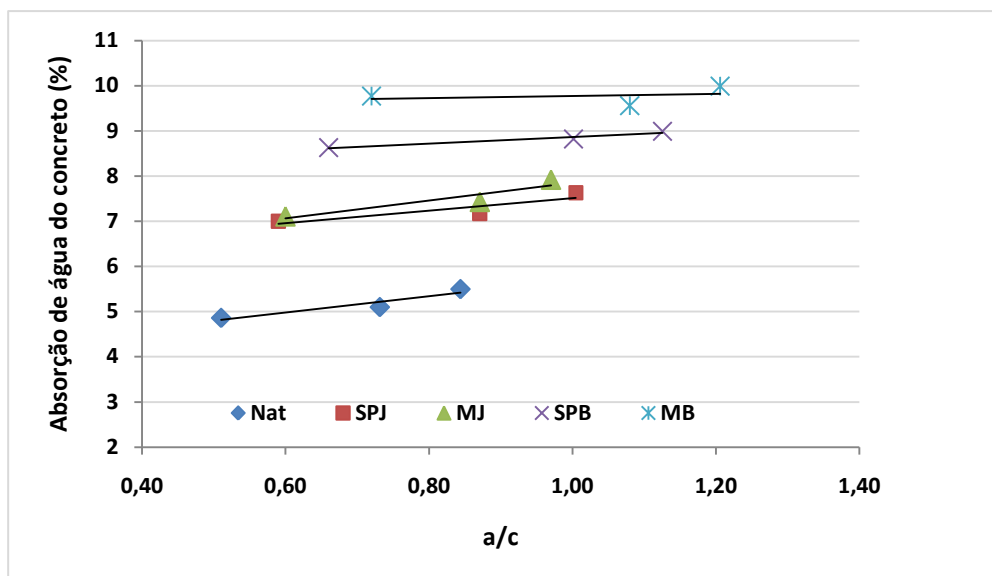
Figura 24 – Ensaio de absorção de água dos concretos.

Na Tabela 12 são apresentados os valores médios de absorção e índice de vazios obtidos para cada família de traço avaliada neste estudo.

Tabela 12 – Valores médios de absorção de água por imersão dos concretos.

Traço	Concreto			Absorção média (%)	Índice de vazios (%)
	Sigla	Origem	Tratamento		
Rico	Nat	Natural	Natural	4,86	10,9
	SPJ	São Paulo	Jigue	7	14,7
	MJ	Macaé	Jigue	7,11	14,8
	SPB	São Paulo	Britagem	8,63	17,2
	MB	Macaé	Britagem	9,77	18,9
Intermediário	Nat	Natural	Natural	5,1	11,3
	SPJ	São Paulo	Jigue	7,17	14,8
	MJ	Macaé	Jigue	7,43	15,3
	SPB	São Paulo	Britagem	8,82	17,4
	MB	Macaé	Britagem	9,56	18,4
Pobre	Nat	Natural	Natural	5,5	12,2
	SPJ	São Paulo	Jigue	7,63	15,7
	MJ	Macaé	Jigue	7,92	16,3
	SPB	São Paulo	Britagem	8,99	17,7
	MB	Macaé	Britagem	9,99	19,1

Na Figura 25 se encontram apresentadas as correlações entre os resultados de absorção de água por imersão do concreto e a relação água/cimento para diferentes tratamentos e origens do agregado gráudo reciclado.



**Figura 25 – Comparação entre os resultados de absorção de água do concreto em relação às diferentes famílias de concretos.**

Pode-se observar que, como era esperado, com o aumento da relação água/cimento a absorção de água no concreto tende a aumentar, independente do agregado utilizado, como pode ser constatado na Figura 25. Isto ocorre porque relações água/cimento maiores tornam a pasta endurecida mais porosa e com maior capacidade de absorção de água. No entanto, a maior absorção é atribuída aos concretos confeccionados com agregados menos densos, sendo esses agregados mais porosos e conseqüentemente a absorção de água é maior. No entanto, para os agregados muito porosos, como é o caso dos agregados de Macaé simplesmente britados, o efeito da relação água/cimento é muito pequeno ou, praticamente, nenhum. Isto demonstra que para agregados muito porosos, a porosidade dos mesmos passa a ser determinante para a absorção de água do concreto, ou seja, a absorção do concreto é muito mais influenciada pela porosidade dos agregados do que pela porosidade da pasta de cimento endurecida. Vale ressaltar que os comportamentos observados confirmam o constatado anteriormente para a resistência à compressão, ou seja, houve uma maior aproximação do comportamento dos concretos produzidos com agregados que passaram por jigues, o que mais uma vez comprova a relativa capacidade de uniformização do material que este tratamento oferece. Por outro lado, os agregados oriundos de Macaé continuam apresentando resultados inferiores aos de São Paulo, o que o tratamento de separação densitária minimizou, mas não eliminou por completo. No entanto, a

diferença de absorção não foi tão elevada para os agregados que passaram pelo jigue como foi para a resistência à compressão.

Para todos os traços, o concreto com agregados tratados em jigue apresentou baixa absorção de água em relação aos concretos com agregados britados, se comparado com o concreto de referência.

Quanto às origens desses agregados a Figura 25 apresenta os valores de absorção de água, sendo esta menor para os agregados reciclados paulistas, seguido os da cidade de Macaé com valores de 34 e 39 % respectivamente, tendo como parâmetro o concreto de referência, para o traço pobre.

### **5.6 Módulo de elasticidade**

O ensaio de módulo de elasticidade dos concretos foi realizado também no IPT, segundo a norma NBR 8522 (2008). Para esse ensaio foram aplicados nove ciclos de carregamento e descarregamento com cargas equivalentes a 30% da resistência à compressão prevista e 0,5 MPa. As medidas de deformação foram coletadas através de um extensômetro mecânico que possui um relógio comparador.

O módulo de elasticidade é uma propriedade do concreto que está relacionada ao módulo de elasticidade do agregado e da pasta de cimento e às características da zona de transição. O módulo de elasticidade do agregado, por sua vez, está relacionado à sua composição mineralógica e principalmente à sua porosidade. Desta maneira, a utilização de agregados mais porosos no concreto contribui para a redução do módulo de elasticidade deste (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Na Tabela 13 apresenta em conjunto os valores de módulo de elasticidade e da resistência para os diferentes tipos de concretos. Há uma tendência de aumento da porosidade e redução da rigidez do material e, desta maneira, os valores de módulo e resistência tende a diminuir com o aumento da porosidade do agregado. Isto já havia sido confirmado em trabalhos anteriores, onde os valores de módulo de elasticidade nos concretos com agregados reciclados apresentaram uma redução entre 15 a 40% em relação aos concretos convencionais (HANSEN, 1992).

**Tabela 13 – Valores médios do módulo de elasticidade e resistência à compressão dos concretos naturais e reciclados juntamente com a relação água/cimento.**

Traço	Concreto			Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à compressão (MPa)	a/c
	Sigla	Origem	Tratamento			
<b>Rico</b>	Nat	Natural	Natural	41,2	30,5	0,51
	SPJ	São Paulo	Jigue	40,3	27,3	0,59
	MJ	Macaé	Jigue	38,8	26,1	0,6
	SPB	São Paulo	Britagem	35,2	23,7	0,66
	MB	Macaé	Britagem	32,4	22,4	0,72
<b>Intermediário</b>	Nat	Natural	Natural	37,8	20,8	0,73
	SPJ	São Paulo	Jigue	36,3	18,1	0,87
	MJ	Macaé	Jigue	33,2	16,6	0,87
	SPB	São Paulo	Britagem	29,5	15,6	1
	MB	Macaé	Britagem	28,7	14,7	1,08
<b>Pobre</b>	Nat	Natural	Natural	32,6	17,2	0,84
	SPJ	São Paulo	Jigue	31,6	16,2	1
	MJ	Macaé	Jigue	30,2	14,7	0,97
	SPB	São Paulo	Britagem	27	14,8	1,13
	MB	Macaé	Britagem	24,6	13,4	1,21

No presente estudo a redução do módulo de elasticidade foi mais intensa para os concretos produzidos com agregados britados da cidade de Macaé em relação a São Paulo quando se compara com o concreto de referência.

Considerando os concretos com baixas relações água/cimento, os níveis de redução em relação ao concreto convencional foram de 26 e 32 % para os concretos de São Paulo e Macaé, respectivamente. Ou seja, a maior redução do valor de módulo de elasticidade ocorreu para os agregados mais porosos, como era de se esperar, dado que este fator gerou também a maior queda de resistência do concreto.

Os agregados reciclados paulistas evidenciaram novamente a melhor qualidade em relação aos agregados da cidade de Macaé, tanto para o tratamento em jigue como para os simplesmente britados. É notório o aumento do módulo de elasticidade nos concretos com agregados submetidos ao tratamento em jigue.

Na Figura 26 pode-se observar os crescentes valores de resistência à compressão com o aumento do módulo de elasticidade do concreto. O ganho de módulo de elasticidade é maior para o concreto produzido com agregado natural,

devido à constituição mineralógica dos agregados naturais que é mais uniforme e rígida que a constituição dos agregados de RCD.

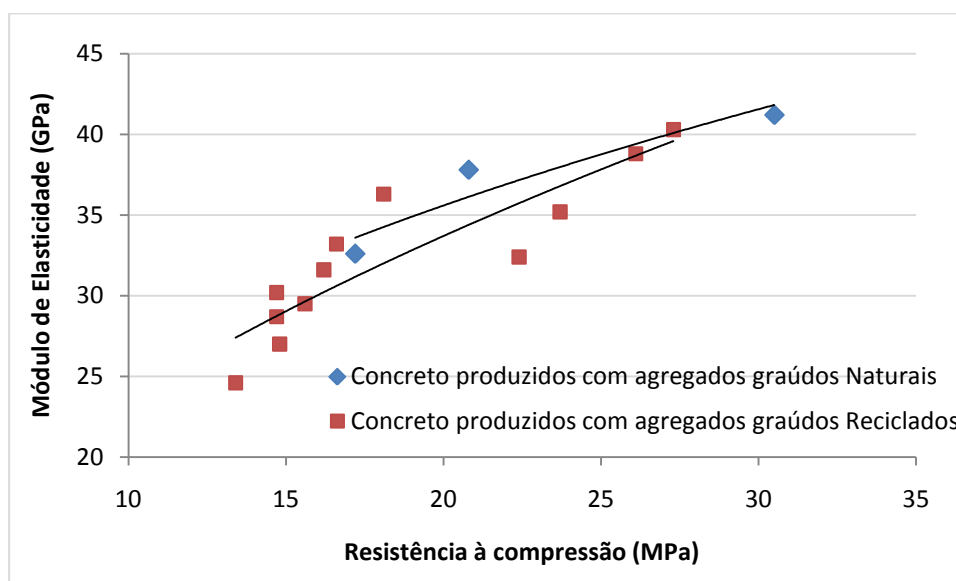
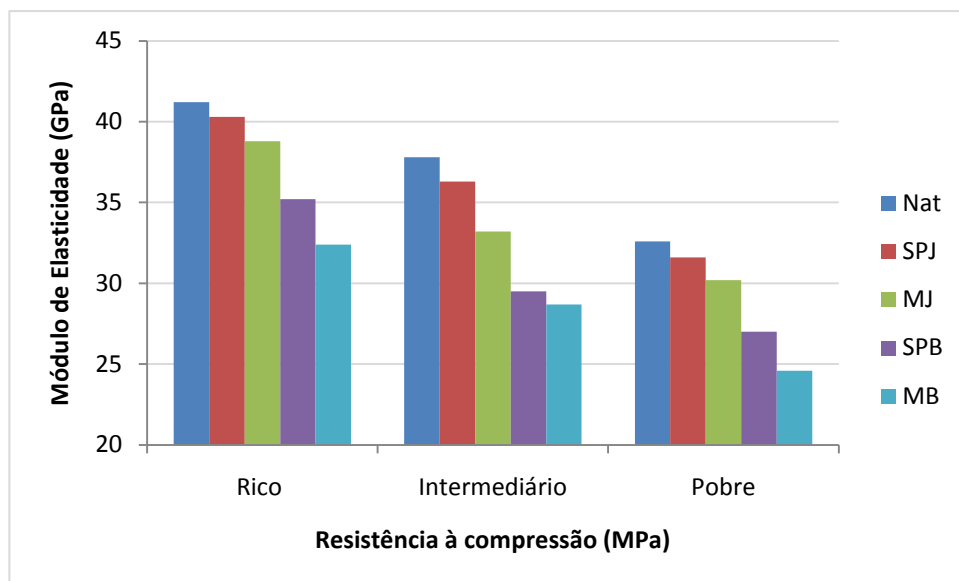


Figura 26 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto para concretos com baixa relação água/cimento.

O agregado graúdo natural por ser mais denso e de baixa porosidade apresenta menor deformação elástica e conseqüentemente maior módulo de deformação em relação aos agregados reciclados; deste modo os concretos produzidos com agregados naturais apresentam maior módulo de elasticidade em relação aos concretos com agregados reciclados como pode ser observado na Figura 27. Nota-se que com a diminuição da relação água/cimento a qualidade de pasta de cimento melhora o que contribui para o aumento da rigidez do concreto.



**Figura 27 – Módulo de elasticidade dos concretos convencionais e reciclados.**

Nota-se que, para os concretos produzidos com agregados de RCD, os maiores valores de módulo são obtidos com os concretos tratados em jigues seguidos dos concretos com agregados britados, em relação ao concreto de referência.

Quanto às cidades os concretos produzidos com agregados paulistas se sobressaíram, dado que os de Macaé apresentaram valores inferiores como nas demais análises já abordadas.

### **5.7 Correlação entre os ensaios mecânicos destrutivos e o ensaio de velocidade de propagação da onda ultra-sônica**

O ultra-som é um ensaio não destrutivo, ou seja, não afeta a aparência nem o desempenho da estrutura do concreto. Esse ensaio possibilita a análise da compacidade do concreto através da velocidade de propagação de ondas longitudinais obtidas por pulsos ultra-sônicos. O ensaio foi realizado no IPT, segundo a norma NBR 8802 (1994). O equipamento utilizado foi o PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester); inicialmente foi feita a calibração do equipamento com uma barra de referência de material metálico. Após a calibração do equipamento, foi aplicado graxas de silicone nas extremidades do concreto a fim de fornecer conexão entre as faces dos transdutores e o concreto a ser ensaiado (vide Figura 28).



**Figura 28 – Ensaio da determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas dos concretos naturais e reciclados.**

Os valores médios de ultra-som obtidos nos corpos-de-prova cilíndricos 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura), juntamente com as propriedades mecânicas determinadas anteriormente, são apresentados na Tabela 14 -



**Tabela 14 - Valores médios dos ensaios produzidos dos concretos com distintos tratamentos e origens.**

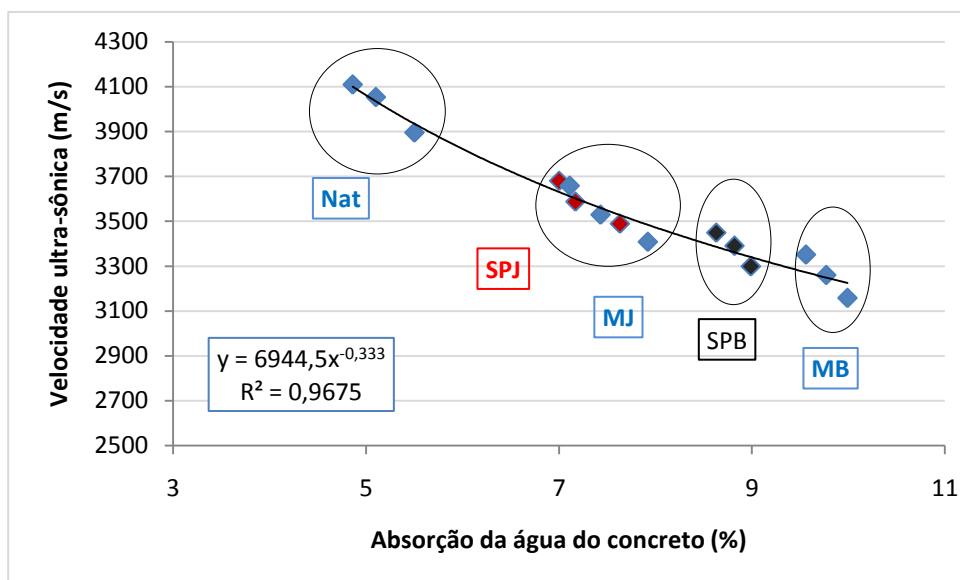
Traço	Concreto			Ultra-som (m/s)	a/c	Abs (%)	fc (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
	Sigla	Origem	Tratamento					
Rico	Nat	Natural	Natural	4110	0,51	4,86	30,5	41,2
	SPJ	São Paulo	Jigue	3681	0,59	7	27,3	40,3
	MJ	Macaé	Jigue	3649	0,6	7,11	26,1	38,8
	SPB	São Paulo	Britagem	3449	0,66	8,63	23,7	35,2
	MB	Macaé	Britagem	3332	0,72	9,56	22,4	32,4
Intermediário	Nat	Natural	Natural	4004	0,73	5,1	20,8	37,8
	SPJ	São Paulo	Jigue	3572	0,87	7,17	18,1	36,3
	MJ	Macaé	Jigue	3530	0,87	7,43	16,6	33,2
	SPB	São Paulo	Britagem	3390	1	8,82	15,6	29,5
	MB	Macaé	Britagem	3261	1,08	9,77	14,7	28,7
Pobre	Nat	Natural	Natural	3896	0,84	5,5	17,2	32,6
	SPJ	São Paulo	Jigue	3489	1	7,63	16,2	31,6
	MJ	Macaé	Jigue	3439	0,97	7,92	14,7	30,2
	SPB	São Paulo	Britagem	3280	1,13	8,99	14,8	27
	MB	Macaé	Britagem	3159	1,21	9,99	13,4	24,6

Os valores da Tabela 14 - serão analisados juntamente com o ensaio de absorção de água do concreto sem fervura e os ensaios destrutivos (resistência à compressão e módulo de elasticidade). Essas comparações permitem, de certa maneira, avaliar a homogeneidade da mistura do compósito, e, além disso, analisar o potencial do ultra-som em ponderar as propriedades dos concretos com agregados de RCD reciclados por meio de ensaios não destrutivos.

A partir dessas análises pode-se observar que há influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados na resposta do concreto ao ensaio de ultra-som.

Os valores inferiores de propagação de onda em função da absorção de água do concreto são atribuídos aos concretos produzidos com agregados reciclados da cidade de Macaé. Com o ensaio de ultra-som pode-se perceber a influência dos tipos de materiais empregados no compósito. Na Figura 29, nota-se que os concretos confeccionados com os agregados da cidade de Macaé apresentam maior absorção de água, o que indica maior porosidade e conseqüentemente menor velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas. Porém através do tratamento em jigue, são utilizados agregados de maior densidade o que confere aos concretos

produzidos uma melhor qualidade, verificada pela maior velocidade de propagação de onda. Percebe-se também que há uma grande uniformização da reposta do material a partir do momento em que os agregados foram tratados por meio da separação densitária.

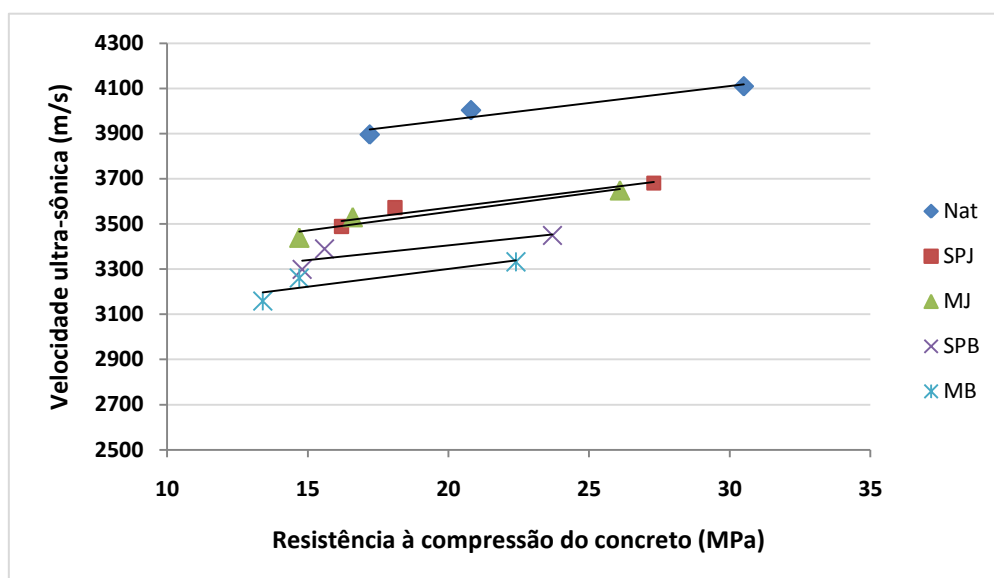


**Figura 29 - Análise da velocidade de propagação de onda ultra-sônica em função da absorção de água do concreto para os agregados reciclados das cidades de São Paulo e Macaé.**

Devido à heterogeneidade do concreto, as velocidades das ondas ultra-sônicas podem ser afetadas por diversas variáveis. Uma dessas variáveis é a idade do concreto, pois a medida que o cimento continua se hidratando a porosidade do compósito diminui e as ondas se propagam mais rapidamente no meio sólido. Outra variável é o nível de saturação do concreto que reduz o tempo de propagação da onda e a sua velocidade passa a ser maior; além disso, a quantidade e a qualidade dos agregados empregadas no concreto também aumentam ou diminui a velocidade média da onda do compósito, dependendo da sua densidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Para os concretos com agregados reciclados a velocidade de propagação da onda ultra-sônica é menor, pois, além da maior porosidade inerente ao agregado, ocorre também uma maior demanda de água, o que aumenta a relação água/cimento, o que acarreta em menor compacidade do concreto e conseqüentemente menor resistência. Nesse caso observa-se uma boa relação entre a velocidade de propagação de onda versus resistência, conforme apresentado na Figura 30.

A partir da análise da Figura 30 podem ser feitas algumas considerações. A primeira delas é a constatação do paralelismo entre as retas, demonstrando que as variações dos resultados das velocidades de propagação de onda ultra-sônicas ocorrem, principalmente, em função da porosidade do agregado empregado no concreto. A segunda conclusão é da existência de uma grande semelhança entre as correlações obtidas entre o ensaio de ultra-som e a absorção de água para os concretos produzidos com os agregados reciclados que passaram pelo jigue. Isto demonstra a capacidade que o tratamento tem de uniformizar o material. Isto faz com que estes concretos pareçam trabalhar com o mesmo agregado e as diferenças observadas parecem ser fruto apenas da diferença de porosidade da matriz de cimento.



**Figura 30 - Análise da velocidade de propagação de onda ultra-sônica em função da resistência à compressão do concreto para os diferentes tipos de tratamentos e origens dos agregados reciclados.**

O módulo de elasticidade expressa a rigidez do concreto no estado endurecido. A relação água/cimento e a rigidez do agregado são variáveis determinantes na resistência do concreto e tem influência direta no módulo de elasticidade.

Na Figura 31 podem ser observadas excelentes correlações entre a velocidade de propagação de onda e o módulo de elasticidade dos concretos. Observa-se novamente a capacidade de uma única reta explicar a correlação entre os resultados obtidos a partir dos concretos produzidos com agregados que foram

tratados pelo jigue. Com isto fica evidente a influência da natureza do agregado na resposta do material, como também a capacidade da separação densitária reduzir as diferenças relativas dos agregados produzidos a partir dos resíduos.

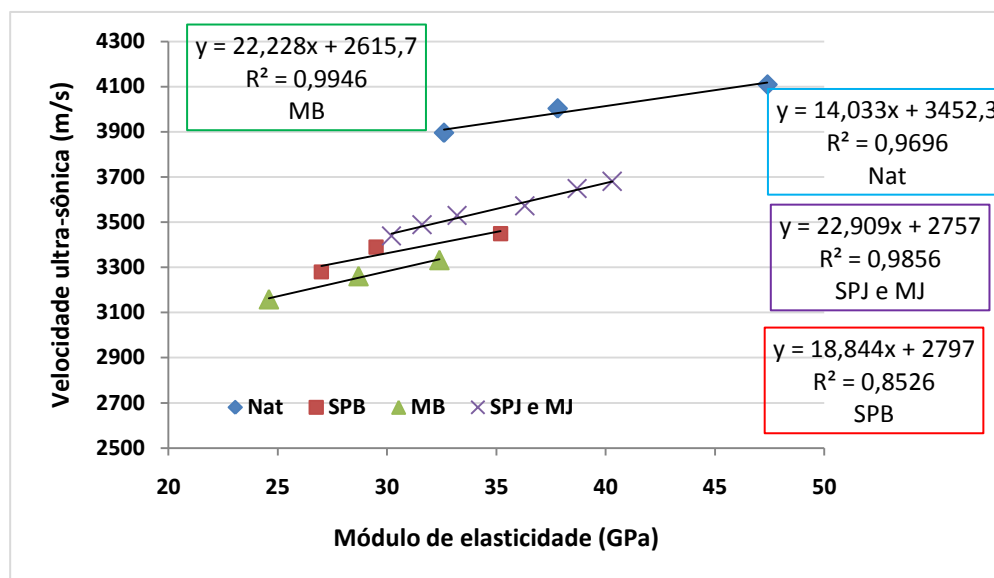


Figura 31 – Análise da velocidade de propagação de onda ultra-sônica em função da módulo de elasticidade do concreto para os diferentes tipos de tratamento dos agregados reciclados.

## 6. AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE SATURAÇÃO PRÉVIA DOS AGREGADOS DE RCD RECICLADOS

Tomando-se como referência os trabalhos de Carrijo (2005) e Pietra (2005) foram selecionados os resultados obtidos com agregados originados em São Paulo e britados com densidade de  $2,06\text{g/cm}^3$ . Estes agregados tem origem próxima dos utilizados nesta dissertação e praticamente a mesma densidade dos agregados que foram britados e não passaram pelo processo de jigagem, o que gerou um agregado de mesma dimensão máxima (19 mm) e densidade de  $2,06\text{g/cm}^3$ . Assim, os mesmos são algo comparáveis, apesar de não se poder esquecer as diferenças naturais dos resíduos que deram origem aos agregados, como também o tipo de cimento. No entanto, a diferença básica mais importante ocorreu nos concretos durante o procedimento de mistura dos materiais, sendo que nos trabalhos supra mencionados os materiais foram pré-saturados, enquanto no estudo experimental desta dissertação, os materiais foram misturados sem a pré-saturação. Assim, foram correlacionados os resultados obtidos de resistência à compressão e relação água/cimento, o que se encontra apresentado na Figura 32. Nela se pode observar que o valor da relação água/cimento utilizado neste trabalho é bem mais elevado do que os valores alcançados por Carrijo (2005) e Pietra (2005), isto porque nos valores de relação água/cimento deste trabalho também está embutida à água necessária para a saturação dos agregados reciclados.

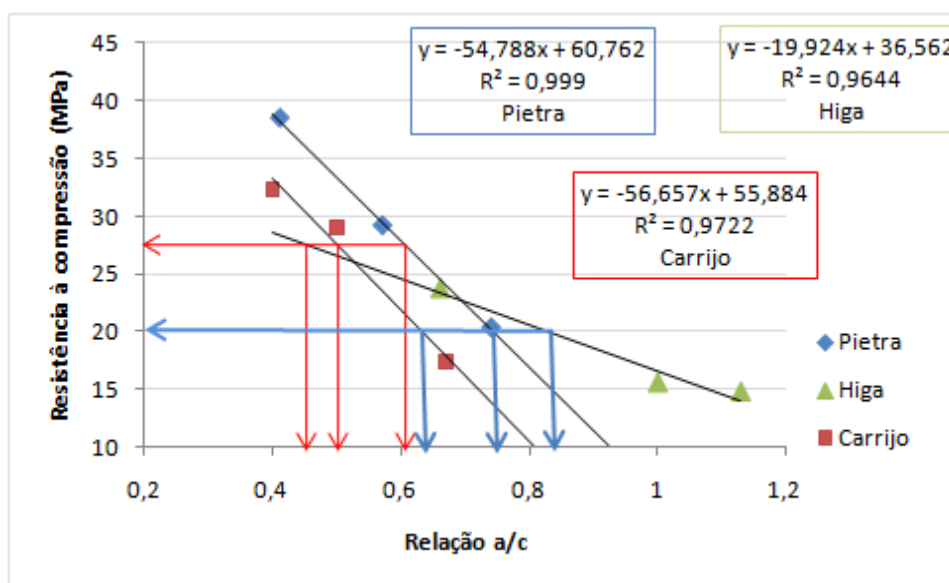


Figura 32 – Correlação entre o ensaio de resistência à compressão e a relação água/cimento.

Nota-se que, para resistências mecânicas maiores que 25 MPa, a relação água/cimento foi menor em relação aos trabalhos de Carrijo (2005) e Pietra (2005). No entanto, essa relação é maior para baixos valores de resistência à compressão.

Quando se correlacionaram os valores de resistência à compressão com absorção de água do concreto, observa-se que o nível de absorção de água do concreto no estado endurecido alcançados por Pietra (2005) e Carrijo (2005), são maiores em relação a este trabalho. Conforme a Figura 33, pode-se observar os maiores valores de absorção de água do concreto para uma dada resistência fixa no trabalho de Carrijo (2005) e Pietra (2005). Tal fato pode ser explicado pelo procedimento de mistura com a pré-saturação dos agregados reciclados. Ou seja, os poros que foram preenchidos por água no estado fresco apresentaram maior dificuldade para serem preenchidos pela pasta durante a mistura do concreto. Por outro lado, os poros não saturados dos agregados reciclados utilizados no programa experimental desta dissertação foram mais facilmente preenchidos pela pasta durante o processo de mistura, o que acabou por conduzir a uma colmatação parcial dos mesmos e, conseqüentemente, uma redução do nível de absorção. Como os resultados apresentados no item 5.5 demonstram, a absorção de água do concreto de RCD é fortemente afetada pela porosidade dos agregados. No entanto, fica claro que outros fatores contribuíram para que o concreto produzido por Carrijo (2005) e Pietra (2005) apresente um maior nível de resistência para a mesma faixa de porosidade, tais como constituição mineralógica dos agregados com maior qualidade, pasta de cimento endurecida mais resistente e outros.

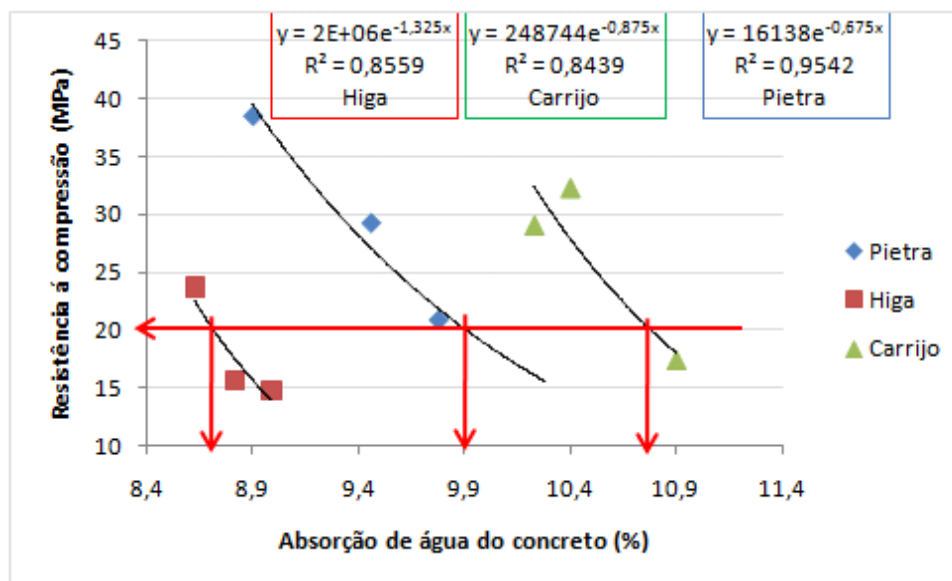


Figura 33 - Correlação entre o ensaio de resistência à compressão e a absorção de água do concreto.

Com isso pode-se concluir que independente do método de dosagem do concreto, ou seja, em massa ou em volume, o procedimento de não pré-saturação apresenta maior potencial para preenchimento dos poros dos agregados reciclados.

## 7. CONCLUSÕES

A análise dos resultados mostrou que a porosidade dos agregados reciclados é o fator preponderante no comportamento do concreto produzido a partir desses materiais. Assim, como os agregados de diferentes origens apresentavam diferentes porosidades, os mesmos proporcionaram diferentes condições para o desempenho do concreto produzido com estes materiais quando foram simplesmente britados. Além disso, o tratamento de separação densitária por meio de jigues é um instrumento interessante para a uniformização do comportamento do material, dado que aproxima a porosidade dos agregados e reduz a diferença de desempenho observada nos concretos produzidos com agregados de diferentes origens. Esta separação densitária não elimina completamente as diferenças relativas à origem do material, mas aproxima a resposta física e mecânica do concreto produzido com estes materiais. A separação densitária por jigues também mostrou-se eficiente no sentido de reduzir a demanda de cimento necessária para se atender determinada faixa de resistência.

O estudo experimental comprovou a eficácia da utilização da metodologia de dosagem experimental para a avaliação comparativa de desempenho dos concretos produzidos com agregados reciclados de diferentes origens.

A análise para as resistências de dosagens fixas de 20 e 18 MPa corroboram os resultados obtidos pelas diferentes famílias de concreto, evidenciando a influência da origem e principalmente no tratamento dos agregados. Isto ficou evidenciado pelo fato de os agregados menos densos gerarem maior demanda de cimento para a mesma faixa de resistência ou, em outras palavras, ter reduzido o seu BI.

A porosidade do agregado reciclado confirmou ser é a característica mais importante deste material para a tecnologia do concreto. E essa relevância é justificada pelas análises dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos (resistência e módulo de deformação do concreto), físicos (absorção e densidade) e de ultrassom. Os agregados reciclados da cidade de Macaé apresentaram-se menos densos que os agregados reciclados paulistas. Tal fato se deve pelas condições regionais em que esses agregados são produzidos e aplicados.



No estado fresco, os concretos confeccionados com agregados de RCD reciclados da cidade de São Paulo, obtiveram resultados de massa específica levemente superior ao da cidade de Macaé, o que é absolutamente justificado pela maior massa específica dos agregados paulistas.

O desempenho do concreto pode ser avaliado através da análise da velocidade de propagação da onda ultra-sônica, dos ensaios de absorção de água do concreto e através dos ensaios destrutivos. Para os ensaios de ultra-som observou-se uma grande similaridade de resposta dos concretos produzidos com agregados que passaram pelo tratamento de separação densitária.

A metodologia de mistura do concreto pode ser considerada um fator relevante à aplicação de agregados de RCD reciclados em concretos. A não pré-saturação dos agregados reciclados, empregada no estudo, pode ter possibilitado o preenchimento dos agregados pela pasta de cimento, o que contribuiu para uma menor diferença relativa de desempenho do concreto convencional em relação ao produzido com agregados reciclados, principalmente para os concretos de maior relação água/cimento.

### **7.1 Propostas de estudos futuros**

A seguir serão sugeridos alguns temas para as investigações futuras:

- Realizar estudos de dosagem com agregados reciclados utilizando ferramentas reológicas, a fim de avaliar o comportamento do concreto no estado fresco de maneira mais aprofundada.
- Realizar estudos que englobem o tratamento dos agregados reciclados e a durabilidade dos concretos produzidos a partir destes materiais.
- Realizar estudo na microestrutura do concreto através da utilização de ensaios de microscopia eletrônica de varredura e análise de imagem.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 172 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil. **In: IV Seminário Desenvolvimento sustentável a reciclagem na construção**. São Paulo;IBRACON CT-206/IPT/IPEN/PCC, 2001.

ANGULO, S. C. et al. Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. **In: V Seminário sobre o Desenvolvimento Sustentável e a reciclagem na construção civil**. IBRACON CT-205. São Paulo. 2002. p. 293- 307.

ANGULO, S. C. et al. **Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD**. **In: V Seminário sobre desenvolvimento sustentável a reciclagem na construção civil, 2002, São Paulo. V Seminário sobre desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil, 2002.**

ANGULO, S. C. et al. Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. **In: VI Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a reciclagem na construção civil**. IBRACON CT-206. São Paulo. 2003. p. 293-308.

ANGULO, S. C. **Caracterização e controle de qualidade de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2005. 236 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ANGULO, S. C. et al. **Amostragem dos RCD reciclados e agregados produzidos nas usinas em diferentes regiões**. Relatório Técnico. 2008.

ANGULO, S. C. **Jigue laboratorial de estratificação**. Relatório. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados graúdos-Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água – NBR NM 53**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação do módulo de elasticidade estática e diagrama – tensão deformação** – NBR 8522. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas**- NBR 8802. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica** – NBR 9778. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto**. NBR 5739, ABNT, Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e Concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. NBR 7222, ABNT, Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos de concreto**. NBR 5738, ABNT, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Determinação de Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone**. NBR 7223, ABNT, Rio de Janeiro, 1992.

BANTHIA, N.; CHAN, C. **Use of recycled aggregate in plain and fiber-reinforced shotcrete**. Concrete Internacional, v.22, n.6. June 2000. p. 41-45.

BARRA, M. **Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado**. 1996. 223p. Tese (Doutorado). Universitat Politècnica de la Catalunya. Barcelona, 1996.

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos**. 1999. 100 p. Dissertação (Mestrado). Curso de

Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

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

BUNTENBACH, S. et. al. 1997. Wet processing of demolition rubble. **Aufbereitungs-technik**. v. 38, n.3, p. 130-138.

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

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. 129 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. São Paulo: Signus, 1996. 2v. 424p.

CHEN, H.; YEN, T.; CHEN, K. Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cement and concrete research**. v. 33., p. 125 – 132, 2003.

CHUNG, S.; LO, C. W. H. Evaluating sustainability in waste management: the case of construction and demolition, chemical and clinical wastes in Hong Kong. **Resource, Conservation and Recycling**, vol.37, p. 119-145. Hong Kong. 2003.

DAMINELI, B. L. et al. Comparação entre métodos de caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. In: VII Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. IBRACON. São Paulo. 2006.

DAMINELI, B. L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement & concrete composites**. v. 32, p. 555-562, 2010.

DIAS, J. F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo.** 2004. 268 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

DOSHO, Y. Development of a sustainable concrete waste recycling system – application of recycled aggregate concrete produced by aggregate replacing method. **Journal of Advance Concrete Technology.** vol. 5, n. 1, p. 27-42. February 2007.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregate. **Cement & Concrete Composite.** n. 29, p. 397-401. January 2007.

ETXEBERRIA, M. et al. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research.** n. 37, p. 735 – 742. February 2007.

FARIAS FILHO, J. et al. Avaliação da atividade pozolânica de resíduos da construção civil. In: 17<sup>o</sup> CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2006, Foz do Iguaçu, PR.

GONÇALVES, R. D. C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto – um novo material para dosagens estruturais.** 2001. 148 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2001.

HAMASSAKI, L. T.; SBRIGHI NETO, C.; FLORINDO, M. C. Uso de entulho como agregado para argamassa de alvenaria. In: RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL (Workshop), São Paulo. **Anais...** São Paulo, EPUSP/ANTAC, p 107 – 115.

HANSEN, T. C. Recycled aggregate and fly ash produce concrete without Portland cement. **Cement and Concrete Research.** Vol. 20, pp. 355-356, 1989.

HANSEN, T. C.; BOEGH, E. Elasticity and drying shrinkage of recycled-aggregate concrete. **ACI journal.** v. 82, n. 5, 1985.

HANSEN, T. C.; NARUD, H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. **Concrete Internacional,** [S.I.], p. 79-83, 1983.

HANSEN, T. C. Recycling of demolished concrete and masonry. **RILEM Report 6**. Ed Chapman & Hall, London, 1992. 316 p.

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

HOLT, E.; RAIVIO, P. Use of gasification residues in aerated autoclaved concrete. **Cement and concrete research**. 2004.

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

JADOVSKI, I. **Diretrizes técnicas e econômicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição**. 2005. 180 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

JOHN, V. M. Panorama sobre reciclagem de resíduos na construção civil. In: II Seminário. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil. CT 206. 1999. **Ibracon**.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 113 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

JOHN, V. A.; AGOPYAN, V. Reciclagem da construção. In: Seminário de Resíduos Sólidos e domiciliares. CETESB, 2000. São Paulo. Seminário de resíduos sólidos e domiciliares CETESB. SÃO Paulo: CETESB, 2000.

JOHN, V. M.; ANGULO, S. C. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. In: Janaíde Cavalcante Rocha; Vanderley M. John. (Org.). Utilização de resíduos na construção habitacional. Porto Alegre: ANTAC, 2003, v. 4, p. 4-272.

JOHN, V. M. et al. Strategies For Innovation In Construction Demolition Waste Management In Brazil. In: CIB World Building Congress 2004 Building for the Future,

2004, Toronto. CIB World Building Congress 2004 - Building for the future. Rotterdam : CIB, 2004.

LEITE, M. B. **Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

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

LIMA, F. B.; BARBOSA, A. H. Estudo de aproveitamento de entulho como agregados para argamassas. **In: Congresso Brasileiro do Concreto, 43, 2001, Foz do Iguaçu. São Paulo: IBRACON, 2001.**

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 222 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 1999.

LIN, Y. et al. An assessment of optical mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1373-1380, 2004.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. 2007. 180 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MANSUR, M. A.; WEE, T. H.; CHERAN, L. S. Crushed bricks as coarse aggregate for concrete. **ACI Materials Journal**, v. 96, n.4, p. 478-484, 1999.

MASCE, N. O.; MIYAZATO, S.; YODSUDJAI, W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 15, n. 5, p. 443-451, 2003.

METHA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MIRANDA, L. F. R. **Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. 2000. 190 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MIRANDA, L. F. R. **Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos classe A da construção civil**. 2005. 474 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. 2 Ed. Ver. Atual. São Paulo: Pini, 1997. 828p.

OZKAN, S. T. E. Recycling rubble in to aggregates: a model for local governments. **Habitat Internation**. v. 25, p. 493-502, 2001.

PIETRA, I. **Avaliação do concreto com agregados graúdos reciclados e resíduos de construção e demolição reforçado com fibras de aço**. 2005. 129 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

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

PINTO, T. P. Recycling in construction sites: environmental responsibility and cost reduction. In: CIB Symp Construction and environment: theory into practice. São Paulo, Brazil, 2002.

POON, C. S. Management and recycling of demolition waste in Hong Kong. **Waste Management & Research**. v. 15, p. 561-572, 1997.

POON, C. S. et al. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**. n. 34, p. 31-36, 2004.



RACKWITZ, R.; LENTZ, A.; FABER, M. Socio-economically sustainable civil engineering infrastructures by optimization. **Structural Safety**, n. 27, p. 187-229. Germany. September, 2005.

RASHWAN, M. S.; ABOURIZK, S. The properties of recycled concrete. **Concrete International**, v.19, n.7, p.56-60, 1997.

SAGOE-CRENTSIL, K. K; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n.5, p. 707-712, 2001.

SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. M. **Beneficiamento gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade**. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2005. 603p.

SCHNEIDER, D. M. **Transporte de resíduos de construção e demolição na cidade de São Paulo**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública. Universidade de São Paulo, 2002.

SHIMA, H. et al. An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis. 2005. **Journal of Advanced Concrete Technology**, vol. 3 n 1 p. 53-67. Japan Concrete Institute. February 2005.

SILVA, V. G. da, Avaliação do desempenho ambiental de edifícios. **Qualidade na construção**. n. 25 p. 14-22. Ano III, 2000. SindusCon SP.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Mirostructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and concrete research**. vol. 35, 2005, p. 1195-1203.

TAM, V. W. Y. et al. New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. **Construction and building materials**, n. 22, p. 364-369. March 2008.

TENÓRIO, L. J. J. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduo de construção e demolição visando aplicações estruturais**. 2007. 157p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

TOPÇU, I. B.; GUNÇAN, N. F. Using waste concrete as aggregate. **Cement and Concrete Research**. vol. 25, p. 1385-1390, 1995.

ULSEN, C. et al. **Caracterização dos agregados regionais e dos gerados nos diferentes “lay-outs” de processamento**. Relatório Técnico. 2008.

VAZQUEZ, E. Aplicación de nuevos materiales reciclados en la construcción civil. In: Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 4., São Paulo. **Anais ...** São Paulo: IBRACON, CT 206. p. 11-21, 2001.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2003. 151 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ZORDAN, S. E. **Metodologia de avaliação do potencial de reciclagem de resíduos**. 2003. 464 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

## ANEXO

Caracterização do cimento e dos agregados utilizados na moldagem dos concretos.

Densidade dos materiais: cimento, agregados graúdos e miúdos.

O cimento empregado foi o cimento Portland CP II E 32, com densidade média de  $3,01 \text{ kg/dm}^3$ , conforme apresentado na Tabela A.

**Tabela A - Determinação da densidade do cimento por picnometria de gás Hélio.**

P1	P2	Vcell	Vref	A	B	Volume	Peso (g)	Densidade
17,11	5,79	27,26	11,67	1,95	22,28	4,46	13,45	3,01
17,13	5,73	27,26	11,67	1,99	23,24	4,03	12,18	3,03
17,15	5,74	27,26	11,67	1,99	23,21	4,06	12,19	3,01
17,12	5,75	27,26	11,67	1,98	23,10	4,16	12,43	2,99
17,14	5,74	27,26	11,67	1,99	23,19	4,07	12,19	3,00
Média								<b>3,01</b>
Desvio Padrão								0,015

**Tabela B - Determinação da densidade do agregado graúdo por picnometria de gás Hélio.**

P1	P2	Vcell	Vref	A	B	Volume	Peso (g)	Densidade
17,02	7,52	148,24	80,12	1,26	101,27	46,98	125,67	2,68
17,02	7,31	148,24	80,12	1,33	106,37	41,87	112,43	2,69
17,02	7,40	148,24	80,12	1,30	104,25	44,00	117,91	2,68
17,02	7,44	148,24	80,12	1,29	103,13	45,11	120,17	2,66
17,02	7,40	148,24	80,12	1,30	104,01	44,23	118,62	2,68
Média								<b>2,68</b>
Desvio Padrão								0,008

**Tabela C - Determinação da densidade do agregado miúdo por picnometria de gás Hélio.**

P1	P2	Vcell	Vref	A	B	Volume	Peso (g)	Densidade
17,12	6,32	27,26	11,67	1,71	19,96	7,30	19,09	2,62
17,12	6,17	27,26	11,67	1,78	20,72	6,54	17,07	2,61
17,15	6,23	27,26	11,67	1,75	20,44	6,82	17,79	2,61
17,13	6,24	27,26	11,67	1,75	20,37	6,90	18,05	2,62
17,14	6,25	27,26	11,67	1,74	20,31	6,95	18,16	2,61
							Média	<b>2,62</b>
							Desvio Padrão	0,004

**Tabela D - Propriedades físicas dos agregados graúdos reciclados.**

Cidade – tratamento	Sigla	Absorção de água (%)	Teor de pulverulento (%)	MEA (g/cm <sup>3</sup> )
São Paulo – britagem	SPB	8,41	3,3	2,06
Macaé – britagem	MB	11,26	1,45	1,95
São Paulo – jigue	SPJ	5,23	1,05	2,29
Macaé – jigue	MJ	5,84	1,23	2,2

**Tabela E – Caracterização química do cimento.**

Composição química	Resultados *	Limites da NBR 5736 (ABNT, 1992)
Perda ao fogo	5,91	≤ 4,5
Resíduos insolúveis	1,71	-
MgO	1,88	≤ 6,5
SO <sub>3</sub>	1,39	≤ 4,0
CO <sub>2</sub>	4,95	≤ 3,0
C <sub>3</sub> A teórico	5	-
Ponto de Fusão 500°C	0,47	-
* dados fornecido pelo fabricante		

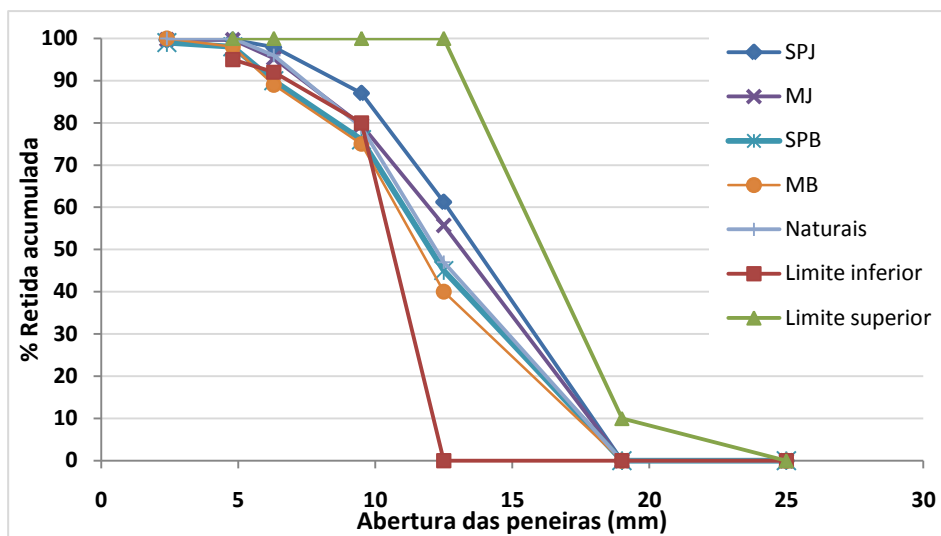


Figura A – Curva granulométrica obtidas para os agregados graúdos.

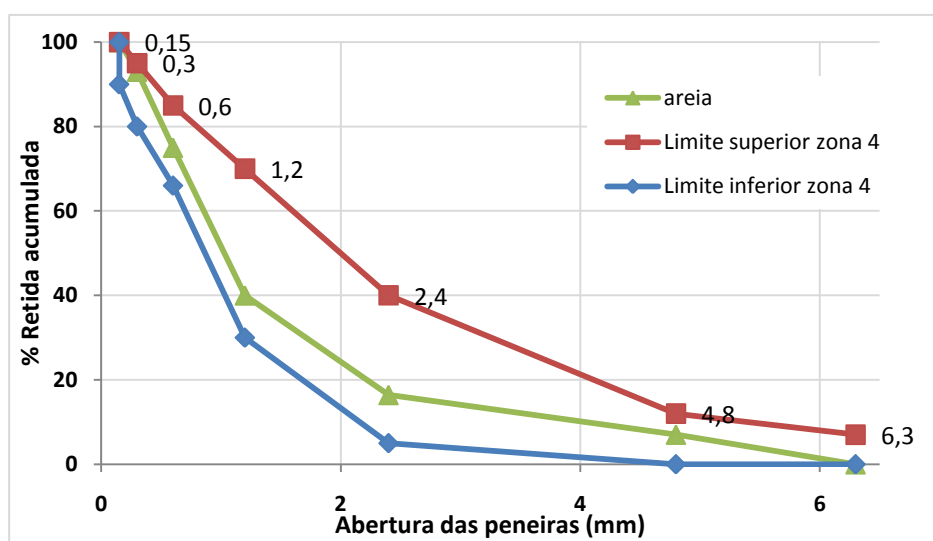


Figura B – Curva granulométrica obtida para o agregado miúdo e limite superior e inferior da zona 4.

Tabela F1 – Valores de absorção de água e índice de vazios dos concretos, para os traços rico e intermediários.

<b>Traço</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Absorção (%)</b>	<b>Absorção média (%)</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Índice de vazios média (%)</b>
<b>Rico</b>	Nat	4,89	4,86	10,9	10,9
		4,90		11,0	
		4,78		10,7	
	SPJ	6,94	7,00	14,6	14,7
		7,07		14,8	
		7,00		14,8	
	MJ	6,97	7,11	14,5	14,8
		7,25		15,0	
		7,12		15,0	
	SPB	8,40	8,63	16,8	17,2
		8,58		17,1	
		8,92		17,8	
MB	9,83	9,77	18,9	18,9	
	9,72		18,8		
	9,76		18,8		
<b>Intermediário</b>	Nat	5,14	5,10	11,4	11,3
		5,12		11,4	
		5,03		11,1	
	SPJ	7,28	7,17	14,5	14,8
		7,06		15,0	
		7,15		15,0	
	MJ	6,98	7,43	14,5	15,3
		7,26		15,1	
		8,05		16,5	
	SPB	8,62	8,82	17,1	17,4
		8,68		17,2	
		9,16		18,1	
MB	9,70	9,56	18,7	18,4	
	9,76		18,7		
	9,23		17,8		

Tabela F2 – Valores de absorção de água e índice de vazios dos concretos, para o traço pobre.

Traço	Nomenclatura	Absorção (%)	Absorção média (%)	Índice de vazios (%)	Índice de vazios Média (%)
Pobre	Nat	4,82	5,50	11,0	12,2
		5,71		12,5	
		5,96		13,0	
	SPJ	7,93	7,63	16,2	15,7
		7,31		15,2	
		7,66		15,7	
	MJ	7,59	7,92	15,6	16,3
		7,82		16,1	
		8,36		17,1	
	SPB	9,45	8,99	18,6	17,7
		8,97		17,7	
		8,55		17,0	
	MB	9,50	9,99	18,3	19,1
		9,90		18,9	
		10,58		20,2	

Tabela G1 – Valores de Resistência à compressão por tração diametral (ftD) dos concretos de traço rico.

Traço	Concreto			ftD (MPa)	ftD (MPa)
	Sigla	Origem	Tratamento		
Rico	Nat	Natural	Natural	3,12	2,90
				2,68	
	SPJ	São Paulo	Jigue	2,57	2,56
				2,56	
	MJ	Macaé	Jigue	2,42	2,43
				2,43	
	SPB	São Paulo	Britagem	2,56	2,19
				1,81	
	MB	Macaé	Britagem	2,11	2,12
				2,12	

Tabela G2 – Valores de Resistência à compressão por tração diametral (ftD) dos concretos de traço intermediários e pobres.

Traço	Concreto			ftD (MPa)	ftD (MPa)
	Sigla	Origem	Tratamento		
Intermediário	Nat	Natural	Natural	2,00	2,28
				2,56	
	SPJ	São Paulo	Jigue	2,31	2,12
	1,94				
	MJ	Macaé	Jigue	1,87	1,97
2,06					
SPB	São Paulo	Britagem	1,75	1,75	
1,76					
MB	Macaé	Britagem	1,44	1,56	
1,69					
Pobre	Nat	Natural	Natural	2,13	2,12
				2,10	
	SPJ	São Paulo	Jigue	1,81	1,81
	1,81				
	MJ	Macaé	Jigue	1,62	1,69
1,75					
SPB	São Paulo	Britagem	1,44	1,44	
1,44					
MB	Macaé	Britagem	1,31	1,37	
1,44					



Tabela H1 – Valores dos resultados do ensaio de ultra-som dos concretos de traço rico e intermediário.

Traço	Concreto			Ultra-som (m/s)	Ultra-som (m/s)
	Sigla	Origem	Tratamento		
Rico	Nat	Natural	Natural	4082	4110
				4082	
				4167	
	SPJ	São Paulo	Jigue	3704	3681
				3636	
				3704	
	MJ	Macaé	Jigue	3694	3649
				3626	
				3626	
	SPB	São Paulo	Britagem	3509	3449
				3448	
				3390	
	MB	Macaé	Britagem	3330	3332
				3333	
				3333	
Intermediário	Nat	Natural	Natural	4003	4004
				4007	
				4003	
	SPJ	São Paulo	Jigue	3636	3572
				3571	
				3509	
	MJ	Macaé	Jigue	3571	3530
				3509	
				3509	
	SPB	São Paulo	Britagem	3448	3390
				3333	
				3390	
	MB	Macaé	Britagem	3279	3261
				3226	
				3279	

Tabela H2 - Valores dos resultados do ensaio de ultra-som dos concretos de traço pobre.

Traço	Concreto			Ultra-som (m/s)	Ultra-som (m/s)
	Sigla	Origem	Tratamento		
Pobre	Nat	Natural	Natural	3922	3896
				3922	
				3846	
	SPJ	São Paulo	Jigue	3509	3489
				3509	
				3448	
	MJ	Macaé	Jigue	3390	3439
				3448	
				3480	
	SPB	São Paulo	Britagem	3175	3280
				3274	
				3390	
	MB	Macaé	Britagem	3226	3159
				3175	
				3077	

Tabela I – Módulo de elasticidade dos concretos dos concretos e desvio padrão dos corpos-de-prova ensaiados.

Traço	Concreto			Módulo de elasticidade (GPa)	Desvio Padrão (GPa)
	Sigla	Origem	Tratamento		
Rico	Nat	Natural	Natural	41,2	4,08
	SPJ	São Paulo	Jigue	40,3	7,43
	MJ	Macaé	Jigue	38,8	6,73
	SPB	São Paulo	Britagem	35,2	1,13
	MB	Macaé	Britagem	32,4	6,47
Intermediário	Nat	Natural	Natural	37,8	6,22
	SPJ	São Paulo	Jigue	36,3	4,31
	MJ	Macaé	Jigue	33,2	5,16
	SPB	São Paulo	Britagem	29,5	0,5
	MB	Macaé	Britagem	28,7	0,71
Pobre	Nat	Natural	Natural	32,6	1,73
	SPJ	São Paulo	Jigue	31,6	3,89
	MJ	Macaé	Jigue	30,2	2,72
	SPB	São Paulo	Britagem	27	3,01
	MB	Macaé	Britagem	24,6	5,43