

# **AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONCRETO - UM NOVO MATERIAL PARA DOSAGENS ESTRUTURAIS.**

**Rodrigo Dantas Casillo Gonçalves**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

**Orientador:** Prof. Dr. Eloy Ferraz Machado Jr.

São Carlos  
2001

Ofereço este trabalho para meus pais, João e Ana Helena, para meus irmãos, Fernando, Eduardo e Gustavo, para minha querida Maria Teresa, para meus avós, Benvenuto (*in memorian*), Carlindo (*in memorian*), Linda (*in memorian*) e Cida, e para minha madrinha Maria Luiza.

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Eloy, pela orientação deste trabalho e por sua paciência durante o tempo de sua conclusão.

Aos professores Samuel Giongo e Jefferson Libório, pelas orientações durante o exame de qualificação.

Ao engenheiro Luís V. Vareda, que me auxiliou durante os ensaios realizados.

Aos técnicos do Laboratório do Departamento de Estruturas, Jorge, Ricardo, Amauri e João, e do Departamento de Construção Civil, Sérgio e Paulo, pela ajuda durante os ensaios.

## **SUMÁRIO**

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE FOTOS.....</b>	<b>ii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>vii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. GENERALIDADES.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. TERMINOLOGIA.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3. GERAÇÃO DE RESÍDUOS.....</b>	<b>7</b>
<b>1.4. IMPORTÂNCIA DA PESQUISA.....</b>	<b>9</b>
<b>1.5. OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
<b>1.6. METODOLOGIA EMPREGADA.....</b>	<b>13</b>
<b>1.6.1. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
<b>1.6.2. PESQUISA TEÓRICA.....</b>	<b>14</b>
<b>1.6.3. PESQUISA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>17</b>
<b>1.6.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>26</b>

<b>2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>27</b>
<b>2.1. A INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO.....</b>	<b>27</b>
<b>2.1.1. A ESTRUTURA DO CONCRETO.....</b>	<b>27</b>
<b>2.1.2.A INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA DO CONCRETO NA SUA RESISTÊNCIA.....</b>	<b>31</b>
<b>2.1.3.A INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA DO CONCRETO NO MÓDULO DE ELASTICIDADE.....</b>	<b>33</b>
<b>2.2. PROPRIEDADES DO MATERIAL – PESQUISAS COM AGREGADOS RECICLADOS.....</b>	<b>37</b>
<b>2.3. EXPERIÊNCIAS PRÁTICAS.....</b>	<b>54</b>
<b>3. PESQUISA TEÓRICA.....</b>	<b>58</b>
<b>4. PESQUISA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>67</b>
<b>4.1. AGREGADOS.....</b>	<b>67</b>
<b>4.1.1. AGREGADOS MIÚDOS.....</b>	<b>67</b>
<b>4.1.2. AGREGADOS GRAÚDOS.....</b>	<b>71</b>
<b>4.2. CONCRETO.....</b>	<b>74</b>
<b>4.2.1. CONCRETO NATURAL ( DOSAGEM 1) .....</b>	<b>76</b>
<b>4.2.2. CONCRETO RECICLADO ( DOSAGEM 2) .....</b>	<b>78</b>
<b>4.2.3. CONCRETO RECICLADO ( DOSAGEM 3) .....</b>	<b>80</b>
<b>4.2.4. CONCRETO RECICLADO ( DOSAGEM 4) .....</b>	<b>82</b>
<b>5. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>85</b>

<b>5.1. AGREGADOS.....</b>	<b>85</b>
<b>5.1.1. AGREGADOS MIÚDOS.....</b>	<b>85</b>
<b>5.1.2. AGREGADOS GRAÚDOS.....</b>	<b>91</b>
<b>5.2. CONCRETO.....</b>	<b>101</b>
<b>5.2.1. CONCRETO FRESCO.....</b>	<b>102</b>
<b>5.2.2. CONCRETO ENDURECIDO.....</b>	<b>108</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....</b>	<b>122</b>
<b>7. PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA.....</b>	<b>125</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>127</b>

## **LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 1 – Macroestrutura do concreto.....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 2 – Fases do concreto.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 3 – Modelos de Voigt e Reuss.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 4 - Modelo de Hirsch.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 5 - Modelos de Couto.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 6 – Modelo equivalente de barras paralelas de matriz e fibra SHAFFER* apud MAGAGNIN FILHO ( 1996 ).....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 7 – Classificação do agregado miúdo natural – NBR 7217/87.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 8 – Classificação do agregado miúdo reciclado – NBR 7217/87.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 9 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos.....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 10 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos.....</b>	<b>99</b>

## **LISTA DE FOTOS**

<b>Foto 1 – Detalhe geral do equipamento utilizado-Laboratório do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos–EESC...</b>	<b>16</b>
<b>Foto 2 – Corpo de prova posicionado na máquina de ensaio.....</b>	<b>17</b>
<b>Foto 3 – Detalhe geral do equipamento utilizado-Laboratório do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos–EESC...</b>	<b>22</b>
<b>Foto 4 – Detalhe do anel metálico para suporte dos transdutores.....</b>	<b>23</b>
<b>Foto 5 – Corpo de prova 150 mm x 300 mm com anel metálico.....</b>	<b>23</b>
<b>Foto 6 – Corpo de prova 150 mm x 300 mm com anel metálico posicionado dentro da máquina de ensaio).....</b>	<b>24</b>
<b>Foto 7 – Britador de mandíbula - Departamento de Geotecnia–Escola de Engenharia de São Carlos–EESC.....</b>	<b>25</b>
<b>Foto 8 – Britador de mandíbula – detalhe da mandíbula.....</b>	<b>25</b>
<b>Foto 9 – Agregado miúdo natural.....</b>	<b>67</b>
<b>Foto 10 – Agregado miúdo reciclado.....</b>	<b>69</b>
<b>Foto 11 – Agregado graúdo natural.....</b>	<b>71</b>
<b>Foto 12 – Agregado graúdo reciclado.....</b>	<b>73</b>
<b>Foto 13 – Agregados miúdos.....</b>	<b>86</b>
<b>Foto 14 – Agregados graúdos.....</b>	<b>91</b>



## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1 – Diferenças entre concretos reciclados e concretos naturais.....</b>	<b>03</b>
<b>Tabela 2 - Ensaio referente ao agregado.....</b>	<b>18</b>
<b>Tabela 3 – Composições de agregados nas dosagens dos concretos.....</b>	<b>19</b>
<b>Tabela 4 - Ensaio referente ao concreto fresco e endurecido.....</b>	<b>20</b>
<b>Tabela 5 – Coeficiente relativo ao tipo de agregado graúdo utilizado na dosagem.....</b>	<b>34</b>
<b>Tabela 6 - Variação da resistência à compressão em função da qualidade do agregado. (HANSEN &amp; NARUD (1983)).....</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 7 - Variação da resistência à compressão em função da qualidade do agregado. (RAVINDRARAJAH &amp; TAM (1985)) .....</b>	<b>40</b>
<b>Tabela 8 - Relação do módulo de elasticidade e da retração do concreto reciclado/concreto original. (BOEGH &amp; HANSEN (1985)) .....</b>	<b>41</b>
<b>Tabela 9 – Detalhes das dosagens - (RAVINDRARAJAH et al (1987)) .....</b>	<b>43</b>
<b>Tabela 10 – Relação propriedade concreto reciclado / concreto original (VAN ACKER (1996)).....</b>	<b>46</b>
<b>Tabela 11 - Classe de Resistência Permitida - RILEM ( 1994). .....</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 12 - Coeficientes de Projeto para o Concreto Reciclado - RILEM (1994).....</b>	<b>52</b>
<b>Tabela 13 – Porcentagem de partículas de argamassa aderida ao agregado natural conforme a dimensão do agregado ( HANSEN (1985)).....</b>	<b>60</b>
<b>Tabela 14 – Ensaio do módulo de elasticidade das argamassas utilizadas na pesquisa teórica.....</b>	<b>62</b>
<b>Tabela 15 – Cálculo do volume de agregados graúdos.....</b>	<b>62</b>

Tabela 16 – Valores dos módulos de elasticidade dos modelos teóricos.....	64
Tabela 17 – Relação entre os módulos de elasticidade teóricos para o concreto reciclado pelo natural.....	65
Tabela 18 – Análise granulométrica do agregado miúdo natural – NBR 7217/87.....	68
Tabela 19 – Análise granulométrica do agregado miúdo reciclado – NBR 7217/87.....	70
Tabela 20 – Caracterização do agregado graúdo natural.....	71
Tabela 21 – Análise granulométrica do agregado graúdo natural – NBR 7217/87.....	72
Tabela 22 – Caracterização do agregado graúdo reciclado.....	73
Tabela 23 – Análise granulométrica do agregado graúdo reciclado – NBR 7217/87.....	74
Tabela 24 – Principais características das dosagens dos concretos.....	75
Tabela 25 – Características das dosagens.....	75
Tabela 26 – Resultados dos ensaios no concreto fresco.....	76
Tabela 27 – Caracterização do concreto conforme a NBR 9778/87.....	76
Tabela 28 – Resistência à compressão aos 28 dias.....	77
Tabela 29 – Módulo de Elasticidade do concreto.....	77
Tabela 30 – Resultados dos ensaios no concreto fresco.....	78
Tabela 31 – Caracterização do concreto conforme a NBR 9778/87.....	78
Tabela 32 – Resistência à compressão aos 28 dias.....	79
Tabela 33 – Módulo de Elasticidade do concreto.....	79
Tabela 34 – Resultados dos ensaios no concreto fresco.....	80
Tabela 35 – Caracterização do concreto conforme a NBR 9778/87.....	81
Tabela 36 – Resistência à compressão aos 28 dias.....	81
Tabela 37 – Módulo de Elasticidade do concreto.....	82
Tabela 38 – Resultados dos ensaios no concreto fresco.....	83
Tabela 39 – Caracterização do concreto conforme a NBR 9778/87.....	83
Tabela 40 – Resistência à compressão aos 28 dias.....	83
Tabela 41 – Módulo de Elasticidade do concreto.....	84
Tabela 42 – Massa específica e massa unitária dos agregados miúdos.....	87

<b>Tabela 43 – Análise granulométrica dos agregados miúdos - NBR 7217/87.....</b>	<b>89</b>
<b>Tabela 44 – Porcentagem em relação ao volume total da partícula, de argamassa aderida sobre a superfície dos agregados graúdos naturais (HANSEN &amp; NARUD (1983)).....</b>	<b>92</b>
<b>Tabela 45 – Massa específica e massa unitária dos agregados graúdos.....</b>	<b>93</b>
<b>Tabela 46 – Valor da massa específica para agregados graúdos, reciclados e naturais (HANSEN &amp; NARUD (1983)).....</b>	<b>94</b>
<b>Tabela 47 – Absorção de água e índice de vazios.....</b>	<b>96</b>
<b>Tabela 48 – Valor da absorção de água para agregados graúdos, reciclados e naturais (HANSEN &amp; NARUD (1983)).....</b>	<b>97</b>
<b>Tabela 49 – Análise granulométrica dos agregados graúdos – NBR 7217/87....</b>	<b>99</b>
<b>Tabela 50 – Principais características das dosagens dos concretos.....</b>	<b>102</b>
<b>Tabela 51– Resultados do ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - NBR 7223/92.....</b>	<b>103</b>
<b>Tabela 52 – Massa específica no estado fresco - NBR 9833/87.....</b>	<b>107</b>
<b>Tabela 53 – Massa específica do concreto endurecido – NBR 9778/87.....</b>	<b>109</b>
<b>Tabela 54 – Absorção de água e índice de vazios – NBR 9778/87.....</b>	<b>110</b>
<b>Tabela 55 – Valores da resistência à compressão aos 28 dias para as dosagens.....</b>	<b>113</b>
<b>Tabela 56 – Valores da resistência à compressão aos 28 dias e do consumo de cimento por metro cúbico para as dosagens.....</b>	<b>114</b>
<b>Tabela 57 – Resistência à compressão das argamassas e dos concretos.....</b>	<b>115</b>
<b>Tabela 58 – Valores para a relação entre a resistência à compressão dos concretos reciclados pelos naturais.....</b>	<b>116</b>
<b>Tabela 59 – Valores do módulo de elasticidade das dosagens.....</b>	<b>118</b>
<b>Tabela 60 – Valores do módulo de elasticidade das argamassas utilizados na pesquisa teórica.....</b>	<b>119</b>
<b>Tabela 61 – Relação entre os valores obtidos para o módulo de elasticidade do concreto reciclado pelo natural .....</b>	<b>120</b>

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

- CEB** - **Comité Euro-international du Béton..**
- EESC** - **Escola de Engenharia de São Carlos.**
- NBR** - **Norma Brasileira Regulamentada.**
- RILEM** - **Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions.**

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$  - área da seção transversal da barra ( fibra mais matriz ).

$A_f$  - área da seção transversal da barra de fibra.

$\alpha_E$  - coeficiente que depende do tipo de agregado usado.

C.P. - corpo de prova.

$f$  - fibra.

$\rho$  - massa específica do concreto,  $\text{kg/m}^3$ .

$m$  - matriz.

$E_{co}$  -  $2,15 \cdot 10^4$  MPa.

$E_c$  - módulo de elasticidade do concreto, MPa.

$E_{arg}$  - módulo de elasticidade da argamassa, MPa.

$E_{agg}$  - módulo de elasticidade do agregado graúdo, MPa.

$E_{ci}$  - módulo de elasticidade tangente, MPa.

$E_i$  - módulo de elasticidade da fase ( matriz ou fibra ).

$a/c$  - relação água/cimento.

$f_{c'}$  - resistência à compressão, MPa

$f_{cm}$  - resistência média à compressão, MPa.

$f_{cmo}$  - 10 MPa.

$V_{agg}$  - volume do agregado graúdo,  $\text{m}^3/\text{m}^3$  concreto.

## RESUMO

GONÇALVES, R. D. C. (2000). *Agregados reciclados de resíduos de concreto – Um novo material para dosagens estruturais*. São Carlos, 2000. 132p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A maioria dos processos de fabricação de um produto geram resíduos. Quando não se dispõem de uma tecnologia para o seu reaproveitamento, certamente este material será depositado na natureza e poderá ocasionar inúmeros problemas ambientais. Este trabalho trata da reutilização dos resíduos de concreto como agregado, para dosagens de concreto estrutural. Na maioria das vezes, os agregados provenientes de resíduos são considerados materiais de baixa qualidade, isso ocorre pelo desconhecimento de suas propriedades e da tecnologia para seu emprego. Fazendo uma pesquisa bibliográfica, teórica e experimental, o objetivo deste estudo foi de uma maneira informativa, contribuir para o entendimento do material, caracterizando algumas propriedades do agregado e do concreto reciclado.

Palavras-chave: agregado reciclado; concreto reciclado; reciclagem.

## **ABSTRACT**

GONÇALVES, R. D. C. (2000). *Recycled aggregates of concrete residues – A new material for dosage of structural concrete*. São Carlos, 2000. 132p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Most of making process of a product produces residue. When there isn't a technology to use it again, certainly this material will be deposited in nature and it can bring about countless environmental problems. This work presents the reuse of concrete residues as aggregate, for dosage of structural concrete. Most of times, the aggregates provenient from the residues are considered low quality materials, it occurs due to the lack of knowledge of its properties and technology for its use. Doing a bibliographical, theoretical and experimental research, the objective of this study was, on an informative way, to contribute for understanding of the material, characterizing some properties of aggregate and the recycled concrete.

Keywords: recycled aggregate; recycled concrete; recycling.

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.2. GENERALIDADES**

A maioria dos processos de fabricação de um produto geram resíduos. Quando não se dispõem de uma tecnologia para o seu reaproveitamento, certamente este material será depositado na natureza e poderá ocasionar inúmeros problemas ambientais.

A extração de matérias primas para diversas utilizações, além de deteriorar a natureza, também está gerando em certas áreas desajustes ecológicos, como se pode notar na maioria das regiões de extração mineral. Também devido à necessidade de extrair algumas matérias primas, à distâncias cada vez maiores dos centros consumidores, pode inviabilizar sua utilização em algumas localidades, pelo custo do transporte.

No contexto da indústria da construção civil a quantidade de resíduos produzidos e despejados na natureza, está chegando cada vez mais a valores preocupantes, principalmente quando é atribuído o índice de desperdício histórico de 30 %. Nestes resíduos existem uma variedade enorme de materiais, o que em muitos momentos limita sua reutilização.

O tipo de resíduo produzido por uma obra está condicionado à algumas características do processo construtivo, como fatores de qualidade e cultura da empresa, além de quais materiais estão sendo usados.

Os resíduos na construção civil não são gerados somente por novas obras e empreendimentos, também existem as demolições de estruturas que em alguns casos geram uma quantidade enorme de material. No Brasil por exemplo, algumas estradas estão sendo construídas com pavimentos rígidos de concreto, que possuem uma vida



útil, após este período é necessário que este material seja substituído por um novo, este processo gera uma quantidade grande de resíduos, no caso resíduos de concreto. Os Estados Unidos investiram muito para obterem metodologias para o reaproveitamento deste material, a maioria de suas estradas é feita de pavimentos rígidos e muitas já estavam com sua vida útil vencida. Além de ganharem benefícios ecológicos também foi criada uma nova forma de comércio, a dos resíduos, que geram muitos milhões de dólares anuais, como é comprovado nas inúmeras publicações relacionadas ao tema.

Entre os vários tipos de resíduos da indústria da construção civil, os resíduos de concreto possuem um dos maiores potenciais de reutilização, devido principalmente ao conhecimento de suas características básicas ( $f_{ck}$ , idade, etc..) e seu menor grau de contaminação por outros materiais (vidro, borracha, etc..) quando comparado com outros resíduos.

Os principais agentes geradores, de resíduos de concreto, são as fábricas de pré-moldados, as demolições de construções e de pavimentos rodoviários de concreto, e as usinas de concreto pré-misturado.

Uma das possibilidades da utilização dos resíduos de concreto, é como agregado reciclado para produção de concreto. Os agregados reciclados provenientes de resíduos de concreto, possuem algumas diferenças entre suas propriedades e a dos agregados naturais, estas estão principalmente relacionadas à quantidade de argamassa do concreto original aderida à superfície dos mesmos. Esta camada de argamassa aderida influencia desde as propriedades do agregado, até as do concreto feito com ele, seja no estado fresco ou endurecido. Como exemplo, foram listadas algumas destas diferenças, onde os dados apresentados referem-se às propriedades dos concretos com agregados reciclados quando comparadas à dos concretos com agregados naturais de mesmas características, Tabela 1.

**Tabela 1 – Diferenças entre concretos reciclados e concretos naturais.**

<b>Propriedade</b>	<b>Diferença</b>
<b>Absorção de água</b>	Maior
<b>Massa específica</b>	Menor
<b>Módulo de elasticidade</b>	Menor
<b>Retração do concreto</b>	Maior
<b>Resistência à Compressão</b>	Igual
<b>Fluência</b>	Maior

Analisando os dados apresentados na Tabela 1, nota-se que um dos principais problemas dos concretos com agregados reciclados, é sua maior deformação quando comparado com um concreto de mesmas características, mas feito com agregados naturais. Em uma primeira análise, é necessário conhecer melhor as propriedades relacionadas à deformabilidade do material (módulo de elasticidade, retração e fluência), para ter um maior controle de sua tecnologia.

A tecnologia para o reaproveitamento dos resíduos de concreto no Brasil, ainda está começando, os principais estudos são relacionados à utilização do entulho de construção, que possui propriedades totalmente diferentes. Além do mais existem duas faixas de agregados reciclados de resíduos de concreto.

Após o processo de britagem, foi constatado experimentalmente, comprovado pelos dados obtidos da pesquisa bibliográfica, que existem dois materiais gerados, um com diâmetro maior que 4,8 mm com características de agregado graúdo, e outro mais fino com características de agregado miúdo. A porcentagem em relação ao resíduo inicial de cada material ficou muito semelhante, ou seja, após o processo de

britagem é obtido, em massa, 50% de agregado graúdo reciclado e 50% de agregado miúdo reciclado.

Um fato interessante é que a maioria das pesquisas internacionais consultadas, somente citam trabalhos com os agregados graúdos reciclados, deixando de lado a fração miúda. Nota-se um grande desperdício desta fração do material, pois como já comentado, após o processo de britagem existe uma quantidade de aproximadamente metade do material inicial.

Embora o processo de reciclagem de certos materiais da indústria da construção civil, seja uma técnica recente, e muitas pesquisas e testes práticos ainda necessitem ser realizados para seu melhor conhecimento, são inegáveis os benefícios que este processo proporciona. A reciclagem de resíduos permite amenizar o impacto ambiental, além de gerar produtos economicamente interessantes.

CORBIOLI (1996), apresenta uma definição interessante feita pelo arquiteto Tarcísio de Paula Pinto, da I&T-Informações e Técnicas em Construção Civil, que estuda desde 1983 a reciclagem de entulho. Segundo ele, todos os processos construtivos geram resíduos. “ Se a questão é redução de custos, o ideal é que a reciclagem seja somada a outras formas de economizar. Não existe nenhuma solução mágica. A melhoria dos processos construtivos, como a adoção da laje zero, fôrmas pré-fabricadas ou a aplicação do gesso diretamente sobre os blocos, é essencial para reduzir os custos e a quantidade de material desperdiçado. A reciclagem entra como uma forma de reaproveitar o que é inevitavelmente perdido”.

No entanto, é preciso cuidado com a simples substituição dos materiais convencionais pelos reciclados. É importante conhecer o material, para possuir o controle de suas propriedades. A reciclagem não somente acrescenta novos materiais ao mercado, mas também gera benefícios adicionais, pois sendo mais baratos que os convencionais, podem viabilizar projetos de interesse social.

## **1.2. TERMINOLOGIA**

Conforme LEVY (1997), a terminologia mais completa sobre reciclagem de entulho de construção, é a indicada na norma Japonesa preparada pela Sociedade de Construtores Prediais do Japão B.C.S.J. (1977). Os principais termos estão relacionados a seguir:

### **Entulho de Concreto:**

Entulho proveniente de demolição de estruturas de concreto assim como de concreto fresco e endurecido e rejeitado, proveniente de centrais dosadoras ou até mesmo produzido na própria obra.

### **Concreto Convencional:**

Concreto produzido com areia natural como agregado fino, e pedregulhos naturais ou pedra britada como agregado graúdo.

### **Concreto Original:**

Concreto proveniente de estruturas de concreto armado, protendidas ou simples o qual poderá ser reciclado para produção de agregados (ou para outros propósitos). Ocasionalmente o concreto original é denominado concreto antigo, ou concreto de demolição.

### **Concreto de Agregado Reciclado:**

Concreto produzido utilizando-se agregados obtidos por reciclagem de concretos originais e antigos, ou por combinação destes com agregados convencionais. O concreto de agregado reciclado algumas vezes é denominado como concreto novo.

### **Agregados de Concreto Reciclado:**

Agregados produzidos pela britagem de concreto original; esses agregados poderão ser miúdos ou graúdos.

### **Argamassa Original:**

Mistura endurecida de cimento, água e agregados miúdos convencionais com dimensão característica máxima inferior a 4 mm (no Brasil este valor é 4,8 mm), existente no concreto original.

### **Agregado Original:**

São denominados agregados originais os agregados com os quais foram produzidos o concreto original; poderão ser agregados naturais (seixos rolados, quando se tratar de agregados graúdos, ou areia de rio quando se tratar de agregados miúdos) ou agregados manufaturados (pedra britada quando se tratar de agregados graúdos, ou pó de pedra quando se tratar de agregados miúdos).

Como forma de padronização das informações existentes neste trabalho, será adotada a seguinte terminologia:

### **Agregado Natural:**

Agregados provenientes da extração na natureza, mesmo que recebam algum processo industrial posterior (britagem, peneiramento, etc..). Ex: brita, cascalho, areia, etc.. .

### **Agregado Reciclado:**

Agregados provenientes da britagem de resíduos de concreto.

### **Argamassa Natural:**

Argamassas feitas com agregados miúdos naturais, onde não existe nenhuma fração de agregados reciclados.

### **Argamassa Reciclada:**

Argamassas feitas com agregados miúdos reciclados, podendo existir alguma fração de agregados naturais.

### **Concreto Natural:**

Concretos feitos com agregados naturais, onde não existe nenhuma fração de agregados reciclados.

### **Concreto Original:**

Concreto natural que originou após um processo de britagem e peneiramento, os agregados reciclados.

### **Concreto Reciclado:**

Concretos feitos com agregados reciclados, podendo existir alguma fração de agregados naturais.

## **1.3. GERAÇÃO DE RESÍDUOS**

A geração de resíduos pela indústria de construção civil é um problema atual em todos os países do mundo, e em muitos deles já existem leis ambientais severas, que regulamentam a disposição e o gerenciamento destes rejeitos. Na maioria das

vezes, nestes países, é economicamente mais interessante fazer algum tipo de reaproveitamento, do que pagar as taxas ambientais.

TOALDO (1993), apresenta algumas informações sobre a legislação existente em países do Primeiro Mundo. No Japão, os construtores são obrigados a incluir em seus projetos a destinação final do resíduo gerado por suas obras. Ao mesmo tempo, o cidadão é impedido de jogar os rejeitos no primeiro córrego ou terreno baldio que encontrar pela frente, sob risco de ser autuado, pagando pesadas multas pela infração. É claro que para isso o poder público deve apresentar alternativas de locais para armazenamento adequado, e possíveis metodologias de aproveitamento deste material. Em São Paulo, cidade que gera 2.000 toneladas/dia de resíduos de construção, instalou uma Usina para reciclar este material, por falta de um planejamento adequado de gerenciamento de resíduos, este projeto está trabalhando com capacidade ociosa e altos custos de produção.

VAN ACKER (1996) cita a estimativa de resíduos sólidos de material de construção na Comunidade Européia, sendo o valor próximo de 170 milhões de toneladas/ano. Também fornece a porcentagem de alguns materiais sobre este valor, onde existe a seguinte distribuição:

- concreto: 41%
- tijolo, bloco : 40%
- asfalto: 12%
- materiais cerâmicos, etc. 7%

Analisando os dados apresentados por VAN ACKER (1996), é notado uma grande influência dos resíduos de concreto no volume total de material, 68 milhões de toneladas/ano, que é uma quantidade considerável. No artigo não é feita nenhuma observação sobre este valor, mas certamente ele está muito relacionado à demolição de estruturas. No Brasil o panorama de distribuição de materiais é diferente, onde a maior porcentagem é de entulho. Se prevê que existirá um aumento substancial da quantidade de resíduos relacionados ao concreto no futuro, principalmente com a necessidade de demolição de obras antigas para dar lugar à novos empreendimentos e ao reaproveitamento de peças refugadas em indústrias de pré-fabricados.

Segundo HANSEN (1985), existia a estimativa que nos Estados Unidos o valor da produção de resíduos de concreto chegue a 60 milhões de toneladas anuais, já no Japão este valor era próximo de 12 milhões. Nestes dois países a tecnologia para a reutilização deste material é muito desenvolvida, principalmente no Japão. Como eles foram abalados nos últimos anos por terremotos, Los Angeles e Kobe, que destruíram muitas obras, existe a necessidade de reutilizar o material proveniente destes desastres naturais. Outro motivo para eles terem desenvolvido esta tecnologia, é que a maioria de suas estradas são de pavimentos rígidos, que após o término de sua vida útil devem ser substituídos.

Em Ribeirão Preto, cidade de porte médio no interior paulista, a estimativa da geração de resíduos de construção chega a 970 toneladas/dia. Já em Campinas, uma cidade maior e com aproximadamente 1 milhão de habitantes, este valor está em torno de 1.260 toneladas/dia.

CORBIOLI (1996) cita o estudo feito em São José dos Campos. Um diagnóstico sobre a cidade revelou que durante 1995, o entulho de construção representou 65% dos resíduos sólidos urbanos.

Segundo dados atuais fornecidos pela ABESC - Associação Brasileira de Empresas de Serviço de Concretagem, o volume nacional de concreto dosado em central é de 12 milhões de metros cúbicos anuais. Adotando-se o índice de perda de 2,5 % para este material (índice alemão), o país teria um volume de cerca de 300.000 m<sup>3</sup> de resíduos deste material.

## **1.4. IMPORTÂNCIA DA PESQUISA**

Os resíduos de concreto, devido ao conhecimento das propriedades do material de origem, na maioria dos casos, possuem uma grande potencialidade para serem reutilizados como matéria prima. Infelizmente, ainda não existem procedimentos nacionais para a sua utilização, devido à isto ocorre o panorama existente no Brasil, onde os resíduos são na maioria das vezes despejados no meio ambiente. A falta de informação e estudos sobre estes materiais, levam à um



desperdício econômico enorme, pois se está jogando fora um material com grande possibilidade de ser reaproveitado.

Uma possível solução para o problema dos resíduos da indústria da construção civil, é a sua valorização como matéria prima, isto se faz quando está disponível uma tecnologia confiável e segura para seu reaproveitamento. Um exemplo deste fato, é apresentado por DERMURP\* apud LATTERZA & MACHADO JR. (1997), que citam os dados da Coordenadoria da Estação de Reciclagem de Ribeirão Preto, onde obteve-se o custo de reciclagem, com a central operando com capacidade total, de U\$ 3,94/t, contra o valor de U\$ 5,37/t relacionado aos custos de gerenciamento das deposições irregulares de entulho, o que já demonstra de início uma economia considerável.

CORBIOLI (1996), apresenta alguns dados da cidade de Belo Horizonte, que comprovam o alto custo que as deposições irregulares de resíduos de construção geram para o poder público. Conforme os dados de 1993, existiam na cidade 134 pontos de deposição irregulares, eram 1.200 toneladas/dia de entulho, com um custo anual de remoção superior a meio milhão de dólares.

Através da pesquisa bibliográfica, constatou-se a importância do tipo de resíduo para as propriedades do concreto reciclado. Foram escolhidas duas propriedades principais para o estudo, resistência à compressão e módulo de elasticidade, que certamente são umas das mais relevantes para a utilização do material na prática. Como não foi encontradas pesquisas nacionais que estudassem experimentalmente o material, foram realizados ensaios de caracterização, para o agregado reciclado e o concreto feito com ele, além dos referentes para as duas propriedades escolhidas.

\*DERMURP (1997). *Diagnóstico da central de reciclagem de resíduo de construção civil em Ribeirão Preto*. Ribeirão Preto, SP. apud LATTERZA, L. M. ; MACHADO JR., E. F. (1997). Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição. Um novo material para fabricação de painéis leves de vedação. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 28., São Carlos v.5 , p.1967-1975.

No exterior existem muitos estudos sobre o concreto reciclado, como foi constatado durante o pesquisa bibliográfica, estes são relacionados a várias propriedades do material, indo desde a forma de extração, armazenamento, influência dos agregados reciclados nas características do concretos, até formas de utilização econômica. No Brasil como os estudos nesta linha de pesquisa são praticamente nulos, achou-se importante fazer uma verificação experimental de algumas conclusões apresentadas pelos pesquisadores estrangeiros.

Os resultados obtidos neste estudo foram semelhantes, em ordem de grandeza, aos fornecidos pelas pesquisas consultadas. Através da comparação de valores, foi dada uma grande importância a verificação dos conceitos apresentados nos trabalhos internacionais, e como eles podem ser aproveitados no contexto brasileiro. Este trabalho têm uma filosofia de ser um material informativo, onde existe além de uma pesquisa teórica, uma parte experimental e uma conclusão relacionando todos os dados obtidos.

## **1.5. OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é apresentar de uma maneira informativa, alguns conceitos sobre a utilização de resíduos de concreto como agregado reciclado, miúdo e graúdo. Como constatado na pesquisa bibliográfica os estudos deste tema no Brasil são poucos, restringindo-se em sua maioria ao do entulho de construção.

No exterior alguns países já possuem recomendações da utilização dos agregados reciclados, fornecendo até parâmetros de projeto. Como as principais propriedades tratadas nestes materiais a nível estrutural são a resistência à compressão, módulo de elasticidade, retração e fluência, foram escolhidos dois parâmetros para análise através de uma pesquisa experimental, utilizando os materiais disponíveis, que certamente são diferentes dos usados nas pesquisas estrangeiras.

Nesta pesquisa foram escolhidas como propriedades para estudo, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, sendo feita para a última uma análise

teórica através de modelos reológicos, para demonstrar o nível de importância do agregado graúdo, mesmo quando são variadas as características da argamassa (natural e reciclada). Este trabalho forneceu:

- Um panorama do estado da arte existente sobre este tema, principalmente relacionado à resistência à compressão e ao módulo de elasticidade do material.
- Um estudo da fração miúda e graúda do agregado reciclado, uma caracterização de suas propriedades e as principais diferenças em relação aos materiais naturais utilizados (areia e brita 1).
- A análise experimental e teórica de algumas propriedades de quatro tipos de dosagens diferentes, utilizando agregados naturais e reciclados, com a seguinte composição:
  - Dosagem 1 : agregado miúdo = areia natural.  
agregado graúdo = agregado graúdo natural (brita 1).
  - Dosagem 2 : agregado miúdo = areia natural.  
agregado graúdo = agregado graúdo reciclado.
  - Dosagem 3 : agregado miúdo = 50% areia natural e 50% de agregado miúdo reciclado.  
agregado graúdo = agregado graúdo reciclado.
  - Dosagem 4 : agregado miúdo = 50% areia natural e 50% de agregado miúdo reciclado.  
agregado graúdo = agregado graúdo natural (brita 1).
- Na análise experimental dos concretos reciclados, foram feitos ensaios de caracterização do material (densidade e absorção de água), resistência à

compressão e módulo de elasticidade, além de uma análise teórica desta última propriedade usando modelos reológicos.

- Uma confrontação dos valores obtidos da pesquisa bibliográfica, análise experimental e teórica, e as conclusões de todo este processo, gerando um material que seja interessante para outros estudos. O principal material de comparação relacionado à pesquisa bibliográfica, foram as recomendações da RILEM (1994), pois elas praticamente sintetizam todos os resultados encontrados.
- Sugestões para futuras pesquisas, e as principais linhas de estudo referentes ao material que se acham necessárias para uma melhor compreensão do material.

## **1.6. METODOLOGIA EMPREGADA**

A metodologia empregada para a pesquisa é composta de quatro etapas, tendo a seguinte ordem:

- pesquisa bibliográfica;
- pesquisa teórica;
- pesquisa experimental;
- análise dos resultados.

#### **1.6.4. Pesquisa Bibliográfica**

A pesquisa bibliográfica foi realizada objetivando um estado da arte com o maior número possível de informações sobre o tema, principalmente relacionados à propriedades estudadas (resistência à compressão e módulo de elasticidade), também foram apresentados alguns tópicos referentes à influência do tipo de agregado nas características do concreto.

Os assuntos adotados para a pesquisa bibliográfica foram:

- Influência dos agregados nas características do concreto.
- Propriedades do material – Pesquisas com agregados reciclados.
- Experiências práticas.

#### **1.6.5. Pesquisa Teórica**

Na pesquisa teórica foi escolhida como propriedade de estudo o módulo de elasticidade, usou-se modelos teóricos onde as características dos agregados e da argamassa foram as variáveis. Isto ocorreu pois no estudo experimental, ambas as frações do agregado reciclado, miúdo e graúdo foram utilizadas. A influência destas duas fases sobre o concreto foi analisada, e confrontada com os dados fornecidos nos ensaios experimentais e da pesquisa bibliográfica.

Os modelos teóricos utilizados na pesquisa foram os apresentados na teoria dos materiais compósitos, que relacionam os módulos de elasticidade das fases (matriz de argamassa e agregado graúdo) e suas frações em volume, diferenciando-se entre si pelo tipo de arranjo estrutural adotado.

A teoria utilizada foi a apresentada no artigo de autoria de BARR et al. (1995).

Para o estudo teórico do módulo de elasticidade do concreto, devem ser conhecidos os valores de três incógnitas para utilização das equações: Volume de agregado graúdo ( $V_{agg}$ ), Módulo de elasticidade do agregado graúdo ( $E_{agg}$ ) e Módulo de elasticidade da argamassa ( $E_{arg}$ ).

O volume de agregado graúdo foi obtido através do tipo de dosagem escolhida e dos materiais utilizados.

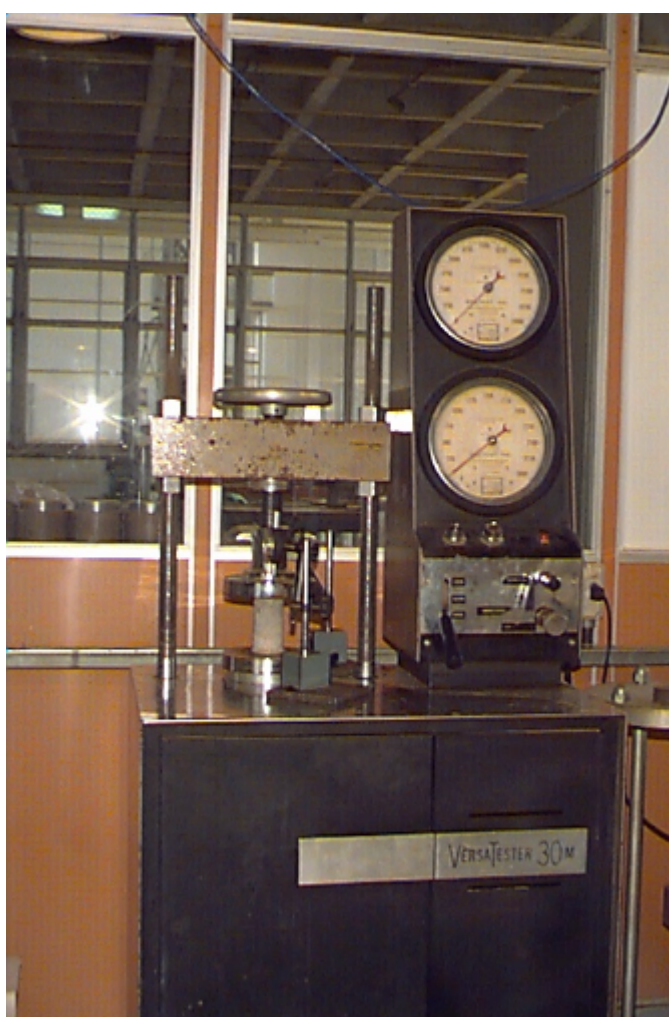
O valor do módulo de elasticidade do agregado graúdo natural, foi definido em relação à ensaios já realizados em rochas de mesmas características do material usado.

Para obtenção do valor do módulo de elasticidade do agregado graúdo reciclado, foi necessário fazer duas considerações. Através da análise visual deste material, constatou-se que existem dois tipos de partículas, uma são de agregados naturais com uma camada de argamassa aderida à sua superfície e outra de pedaços soltos de argamassa. Para o primeiro tipo de partícula foi usada uma expressão que relaciona duas fases entre si, uma de argamassa e outra de agregado natural, já para a outra, foram considerados os mesmos valores do módulo de elasticidade da argamassa. Também, comprovado pela análise visual, foi adotado que existe no agregado graúdo reciclado uma porcentagem de setenta por cento de agregados naturais com a camada de argamassa aderida, o resto são de pedaços soltos de argamassa.

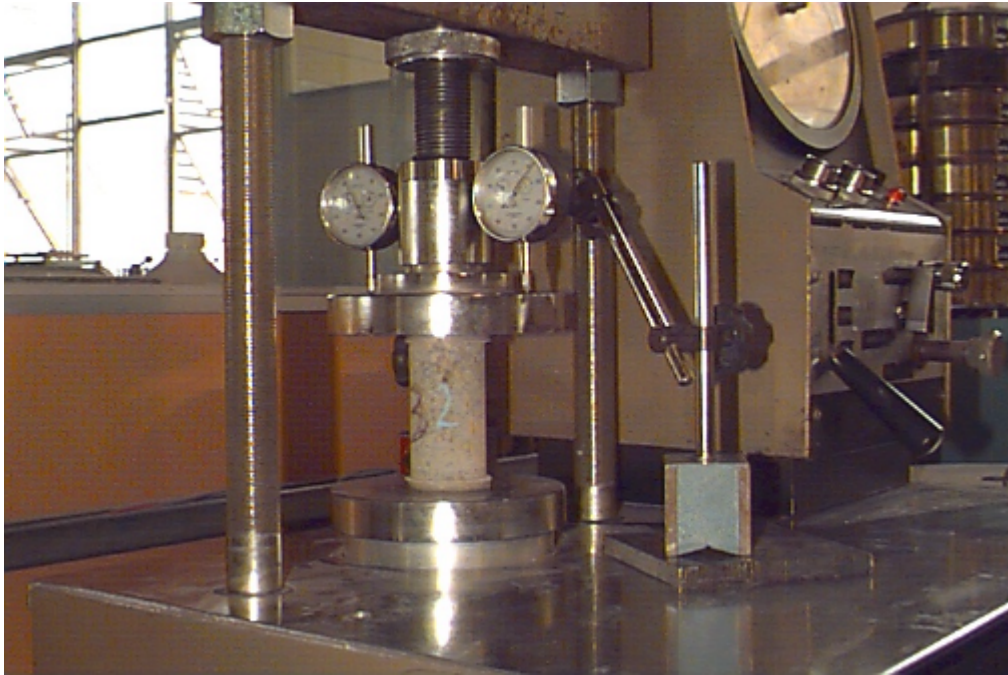
A maior dificuldade foi como obter o valor do módulo de elasticidade da argamassa que seja representativo em relação ao existente na dosagem do concreto. A maneira escolhida para conseguir este valor, foi peneirar em uma peneira com malha de abertura 4,8 mm uma parcela do concreto fresco, para reter a fração graúda, o que passou pelo peneiramento foi considerado argamassa, com este material foram moldados corpos de prova com altura de 100 mm e diâmetro de 50 mm..

Para cada dosagem foram moldados seis corpos de prova, que após um processo de cura em câmara úmida foram ensaiados com a idade de 28 dias. Para o ensaio do módulo de elasticidade utilizou-se três corpos de prova, o resultado foi a média dos valores.

O equipamento para o ensaio do módulo de elasticidade da argamassa foi uma máquina hidráulica tração/compressão da marca Solitest e modelo Versatester 30 M do Laboratório do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos–EESC, com capacidade de 150 kN. Para obtenção dos valores de deformação foram usados dois relógios comparadores, o resultado foi a média das leituras, Foto 1 e 2.



**Foto 1 – Detalhe geral do equipamento utilizado - Laboratório do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC.**



**Foto 2 – Corpo de prova posicionado na máquina de ensaio.**

### **1.6.6. Pesquisa Experimental**

Na pesquisa experimental foram usadas as frações miúda e graúda do agregado reciclado, também adotou-se três tipos de dosagens usando este material. Assim a pesquisa teve como material de estudo uma dosagem de concreto natural, que após o processo de britagem originou os resíduos, e três de concretos reciclados diferenciadas entre si pela composição de material reciclado usado. Estes materiais foram caracterizados por ensaios normalizados, agregado e concreto, para comparação durante a análise dos resultados. O cronograma dos trabalhos é apresentado abaixo:

#### **1. Caracterização dos agregados naturais**

Foram utilizados como agregados naturais os usados normalmente para dosagens de concretos na região de São Carlos, areia proveniente do rio Mogi-Guaçu



e pedra britada de origem basáltica (brita 1). Nesta etapa foram realizados os principais ensaios normalizados para a caracterização destes agregados ,Tabela 2 .

**Tabela 2 - Ensaio referentes ao agregado.**

NBR 7212/87 - Agregados - Determinação da composição granulométrica.
NBR 7251/82 - Agregados em estado solto - Determinação da massa unitária.
NBR 7810/83 - Agregado em estado compactado seco - Determinação da massa unitária.
NBR 9937/87 - Agregados - Determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo.
NBR 9776/87 - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.

## **2. Definição do traço a ser utilizado**

Os traços utilizados para todas as dosagens (concreto natural e concretos reciclados) foram iguais, variando somente a composição dos agregados, como parâmetro de controle foi escolhida a relação água/cimento que deverá ser igual para todos os casos. Foi utilizado um estudo de dosagem feito no Laboratório do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC. Nas dosagens foi usado o cimento Potland CP II 32 F da marca Itaú.

O traço em massa possui a seguinte composição:

$$1 : 1,4 : 2,4 : a/c = 0,41$$

Para o estudo da influência dos agregados reciclados no concreto, foram definidos três tipos de composições de agregados reciclados nas dosagens, usando-se a fração miúda ou a graúda, ou ambos, Tabela 3.

**Tabela 3 – Composições de agregados nas dosagens dos concretos.**

<b>Dosagem</b>	<b>Composição</b>
<b>1</b> ( concreto natural – referência )	agregado miúdo = areia natural. agregado graúdo = agregado natural - brita 1.
<b>2</b>	agregado miúdo = areia natural. agregado graúdo = agregado reciclado.
<b>3 (*)</b>	agregado miúdo = 50% de areia natural + 50% de agregado miúdo reciclado. agregado graúdo = agregado reciclado.
<b>4 (*)</b>	agregado miúdo = 50% de areia natural + 50% de agregado miúdo reciclado. agregado graúdo = agregado natural - brita 1.

(\*) – No início do estudo adotou-se que a substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado seria total, após um teste piloto foi comprovado que isto era inviável pois não daria para manter as mesmas características do traço original, o concreto ficou com pouca pasta se assemelhando a “concretos sem finos “. Portanto para a substituição da fração miúda, foi considerado uma composição entre uma parte de agregado natural e outra de reciclado. Mesmo usando esta composição de agregados miúdos, foi necessário a utilização de um aditivo superplastificante nestas dosagens, RX 3000 da REAX Indústria e Comércio Ltda., para ambas usou-se 1% deste material sobre a massa de cimento, com correção da quantidade de água para manter o mesmo fator água/cimento das outras dosagens ( $a/c = 0,41$ ).

Os agregados reciclados possuem características diferentes dos naturais, ou seja, para o estudo de um traço contendo agregados reciclados devem ser consideradas suas propriedades. Como o objetivo deste estudo é demonstrar algumas diferenças entre os concretos naturais e os reciclados, achou-se conveniente usar o mesmo traço para todas as dosagens, além de utilizar os agregados sem nenhum processo de peneiramento após o realizado para separar as frações, miúda e graúda. Uma das conclusões do trabalho é o conceito que este é um novo material, que suas propriedades, seja dos agregados, ou dos concretos feitos com eles, devem ser compreendidas e estudadas, e que a forma de trabalho é diferente da normalmente usada no dia a dia.

### 3. Preparação do concreto natural, ensaios e informações gerais.

O concreto natural foi preparado utilizando-se os procedimentos normais adotados no Laboratório do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos-EESC.

Os ensaios para o concreto endurecido foram realizados com a idade de 28 dias, o processo de cura foi feito em câmara úmida que armazenou os corpos de prova até a data dos ensaios.

Os ensaios escolhidos para ambas as fases do concreto (fresco ou endurecido) foram os listados na Tabela 4.

**Tabela 4 - Ensaios referentes ao concreto fresco e endurecido**

NBR 5738/94 – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto
NBR 7223/92 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.
NBR 5739/94- Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.
NBR 8522/84- Concreto - Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação.
NBR 9778/87- Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica.
NBR 9833/87 – Concreto Fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico.

Para os ensaios realizados no concreto endurecido, foram usados a seguinte quantidade de corpos de prova para cada ensaio.

Notas: 1 - C.P. – Corpo de prova.

2 – Dimensões dos corpos de prova: diâmetro (mm) x altura (mm).

- Módulo de Elasticidade = 3 C.P. ( 150x300 ).
- Resistência à Compressão = 6 C.P. ( 150x300 ).
- Absorção e Massa Específica = 3 C.P. ( 100x200 ).

Para obtenção do agregado reciclado para as outras dosagens, o concreto natural produzido na primeira dosagem foi totalmente britado. Através do cálculo da quantidade de resíduo necessária para fornecer as frações miúda e graúda do material reciclado, foi constatado que o volume referente aos corpos de prova utilizados, nos ensaios para o material natural, seriam insuficientes. Para estimar a quantidade de material excedente, foram utilizados alguns valores fornecidos na pesquisa bibliográfica, comprovados com um ensaio experimental.

HANSEN (1985), cita alguns valores encontrados para a porcentagem de finos, que passam na peneira com abertura de 5 mm, que são produzidos ao se realizar a britagem de peças de concreto. Em seu artigo o valor médio de finos fica em torno de 30% da massa inicial, dependendo da regulagem do britador. Para obter este valor com melhor precisão, foi realizado um ensaio com o equipamento usado neste estudo, britou-se um corpo de prova com dimensões de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Após todo o material ser britado e peneirado, foi medido a quantidade de finos produzidos, material que passou pela peneira com abertura de 4,8 mm. O valor encontrado no equipamento disponível foi de 45%, ou seja, maior que a apresentada na bibliografia.

Adotando que durante o processo de britagem exista a geração de 45% de resíduos com diâmetro abaixo de 4,8 mm (fração miúda), e o restante acima deste valor (fração graúda), foi calculada a quantidade total de agregados reciclados necessária para as outras dosagens (2, 3 e 4). Na primeira dosagem, concreto natural, a quantidade de material aumentou substancialmente, ficando com a seguinte disposição:

Notas: 1 - C.P. – Corpo de prova.

2 – Dimensões dos corpos de prova: diâmetro (mm) x altura (mm).

- 30 C.P. (150x300).
- 9 C.P. (100x200).

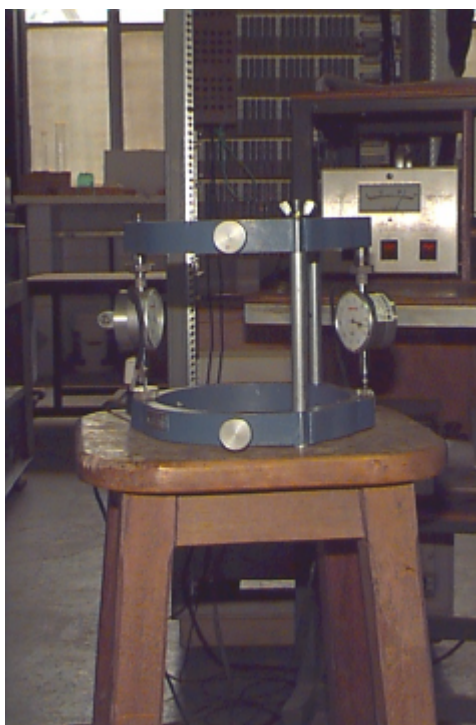
Para os ensaios de módulo de elasticidade e resistência à compressão do concreto, foi usada uma prensa hidráulica da marca ELE e modelo Autotest 2000

com capacidade de 2.000 kN. No ensaio de módulo de elasticidade, também foram usados um sistema computadorizado de aquisição de dados System 4000 da marca Measurements Group, transdutores de deslocamento com resolução de 0,002 mm da marca Kyowa e um anel metálico para suporte dos transdutores, Fotos 3, 4, 5 e 6.

No ensaio do módulo de elasticidade do concreto foi adotado um incremento de carga com valor de 50 kN, onde a leitura das deformações começou com a carga de 50 kN e terminou com 550 kN, que é aproximadamente setenta por cento da carga de ruptura. Foi escolhido o módulo de elasticidade tangente inicial para ser calculado nesta pesquisa, que têm como intervalo de tensão o valor inicial de 0,5 MPa e final de trinta por cento da carga de ruptura.



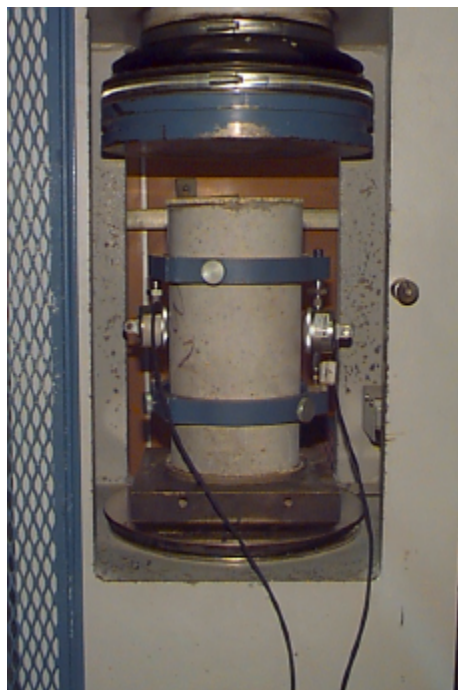
**Foto 3 – Detalhe geral do equipamento utilizado - Laboratório do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC.**



**Foto 4 – Detalhe do anel metálico para suporte dos transdutores.**



**Foto 5 – Corpo de prova 150 mm x 300 mm com anel metálico.**



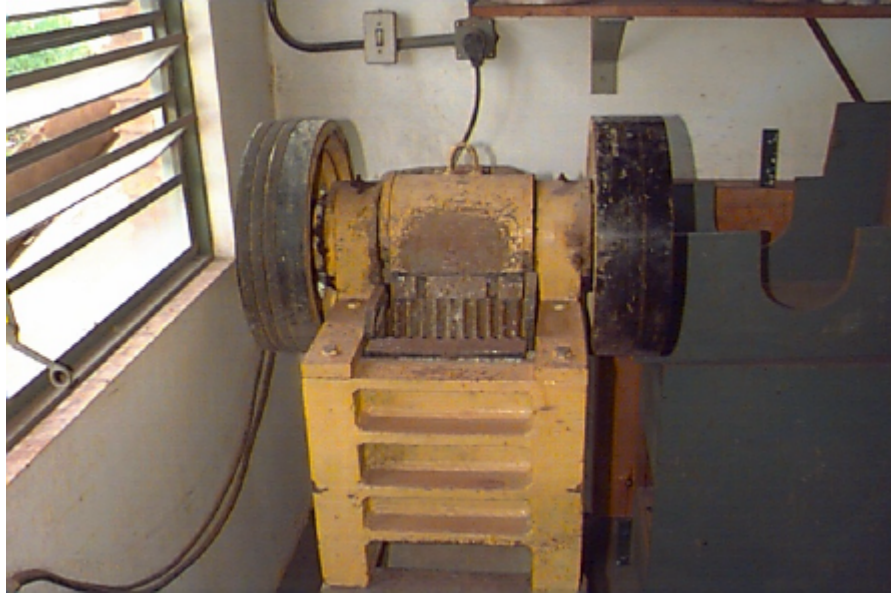
**Foto 6 – Corpo de prova 150 mm x 300 mm com anel metálico posicionado dentro da máquina de ensaio.**

#### **4. Preparação do agregado reciclado**

Após a realização dos ensaios no concreto com agregado natural, os corpos de prova foram quebrados em pedaços, e triturados em equipamento adequado para este fim, um britador de mandíbula do Departamento de Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Foto 7 e 8. Após o processo de britagem, os resíduos foram peneirados e separados em duas frações, uma miúda e outra graúda, e armazenados em tambores de aço para utilização posterior .

No dia da utilização do material para confeccionar o concreto reciclado, para a dosagem 2 os agregados reciclados estavam com 34 dias de armazenamento, já para as dosagens 3 e 4 este valor foi de 54 dias. Estes valores estão relacionados ao cronograma de ensaio disponível no Laboratório do Departamento de Engenharia de Estruturas – EESC.





**Foto 7 – Britador de mandíbula - Departamento de Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC.**



**Foto 8 – Britador de mandíbula – detalhe da mandíbula.**



## **5. Agregado reciclado e concreto reciclado.**

Para esta fase foram realizados os mesmos procedimentos listados nos itens 1 e 3, caracterização dos agregados reciclados e ensaios nos concretos reciclados, no estado fresco e endurecido.

### **1.6.4. Análise dos Resultados**

Os resultados obtidos nas etapas de estudo (pesquisa bibliográfica, pesquisa teórica e experimental) foram analisados levando-se em conta como valores de referência os obtidos para o agregado natural e o concreto feito com este agregado (dosagem 1). Procurou-se relacionar principalmente os conceitos apresentados pelos resultados, e como eles influenciam nas propriedades do material.

O principal material de comparação referente à pesquisa bibliográfica, foram as recomendações da RILEM (1994), que praticamente englobam o resultados de todas as outras pesquisas. Para propriedades que não são tratadas nesta recomendação, usou-se os resultados de outros trabalhos.

## **2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. A INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO**

As relações estrutura-propriedade são a base para o conhecimento de certas características que um material possui. Um material pode ser estudado a nível macroscópico, estrutura grosseira visível à vista humana, ou à um nível mais apurado que é o microscópico. O estudo da macroestrutura leva certamente a perguntas que somente são respondidas quando são analisadas propriedades da microestrutura.

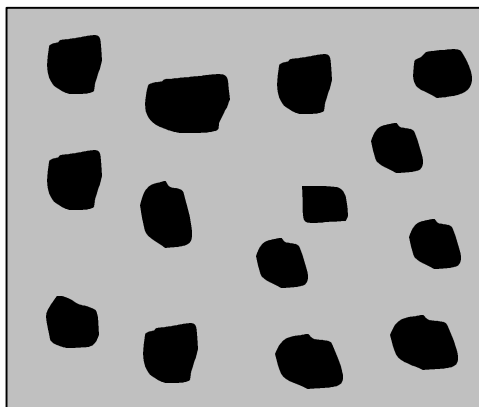
O concreto tem uma estrutura muito heterogênea e complexa, suas fases se interagem e as propriedades de cada uma influencia as outras. Portanto para ter um controle ou conhecimento de suas propriedades, é necessário conhecer seus principais constituintes, suas características e a relação entre eles.

#### **2.1.1. A ESTRUTURA DO CONCRETO**

A estrutura de um sólido é constituída, quando o material é heterogêneo como o concreto, por fases, estas se diferenciam principalmente em tipo, quantidade, tamanho e forma.

Uma análise inicial à nível macroscópico, mostra o concreto como uma material bifásico, constituído de duas fases, que são as partículas de agregados de

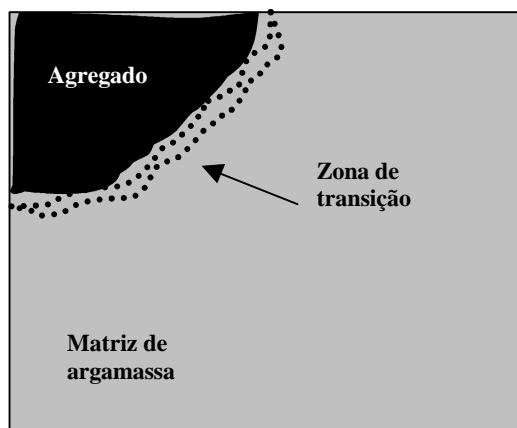
tamanho e formas variados e um meio ligante, composto de uma massa contínua de argamassa endurecida, Figura 1.



**Figura 1 – Macroestrutura do concreto.**

O problema de se estudar um material tão complexo como o concreto a nível macroscópico, é que com este grau de precisão muitas propriedades e características próprias do material não conseguem ser analisadas. Portanto para pesquisá-lo é necessário ter uma visão mais aprofundada, que somente é conseguida quando são utilizados parâmetros encontrados à nível microscópico.

O estudo da microestrutura do concreto fornece muitos parâmetros, que ao serem analisados mostram como este material possui uma estrutura complexa. Aparece uma outra fase, a zona de transição, que representa a região interfacial entre as partículas de agregado graúdo e a argamassa. Apesar de ter uma espessura muito delgada ao redor do agregado, a zona de transição, é geralmente mais fraca do que as duas outras fases, o agregado e a argamassa, e conseqüentemente, exerce uma influência muito maior nas propriedades do material do que poderia ser esperado pela sua espessura. Portanto o concreto é um material trifásico, que possui as seguintes fases, agregado graúdo, argamassa endurecida e zona de transição, além do mais estas duas últimas fases possuem uma distribuição altamente heterogênea, ou seja, suas propriedades variam dentro de uma mesma massa de material, Figura 2.



**Figura 2 – Fases do concreto.**

### **a) A estrutura da fase agregado**

O agregado graúdo é a fase que mais influencia a densidade, o módulo de elasticidade e a estabilidade dimensional do concreto. Estas propriedades do concreto são mais influenciadas por características físicas, do que químicas da estrutura do agregado, tais como volume, tamanho, forma, granulometria e distribuição de poros.

Por exemplo, um agregado britado é mais áspero que um seixo rolado, portanto a ligação com a pasta de cimento é mais forte, por outro lado existe uma grande quantidade de partículas chatas ou alongadas que afetam muitas propriedades do concreto, além de necessitar de mais água para uma mesma trabalhabilidade.

Devido ao valor de seu módulo de elasticidade elevado, na maioria dos casos, é esta fase que condiciona o valor do módulo de elasticidade do concreto, ou seja, é ela que restringe movimentações da matriz de argamassa.

Quando é analisada a resistência, a influência da fase agregado para concretos de baixa e média resistência, é menor que das outras duas fases, exceto para agregados altamente porosos e fracos. Nesta propriedade ela é a fase mais forte, portanto não condiciona a resistência na maioria dos casos. Mas quando são

analisados os concretos de alta resistência isto pode mudar, as características dos agregados graúdos devem ser levadas em consideração.

## **b) A estrutura da argamassa endurecida**

A estrutura da argamassa endurecida está relacionada principalmente aos produtos do processo de hidratação do cimento, onde aparecem compostos gerados durante as reações químicas, além de outros constituintes como vazios capilares, água, etc.

Um dos itens que mais influenciam as propriedades da argamassa, são os vazios capilares, que são os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos. Suas propriedades estão relacionadas ao grau de hidratação e da quantidade de água usada na mistura.

## **c) A estrutura da zona de transição**

A melhor maneira de analisar a zona de transição, é fazer um estudo químico e experimental de suas propriedades, MASO\* apud METHA & MONTEIRO (1994), descreve de uma maneira clara suas características:

“ Primeiro, em um concreto recentemente compactado, um filme de água forma-se ao redor das partículas grandes de agregado. Isto pode levar a

\* MASO, J.C. (1980). *Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements*. Editions Septima. v. 1, Paris apud MEHTA, P. K. ; MONTEIRO, P. J. M. (1994). *Concreto - estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo. PINI.

uma relação água/cimento mais elevada na proximidade do agregado graúdo do que longe dele (i.e., na matriz de argamassa). Em seguida, analogamente à matriz, os íons de cálcio, sulfato, hidroxila, e aluminatos formados pela dissolução dos compostos de sulfato de cálcio e de aluminato de cálcio, combinam-se para formar etringita e hidróxido de cálcio. Devido à relação água/cimento elevada, estes produtos cristalinos vizinhos ao agregado graúdo consistem de cristais relativamente grandes, e conseqüentemente, formam uma estrutura mais porosa do que da matriz de pasta de cimento ou na matriz de argamassa. “ (METHA & MONTEIRO, 1994, p. 37).

Pelo exposto, o volume e os tamanhos dos vazios na zona de transição, são maiores do que na matriz de argamassa, conseqüentemente sua resistência será menor. Contudo, com o aumento da idade, a resistência da zona de transição pode tornar-se igual ou mesmo maior. Mas este efeito benéfico, é mais pronunciado nas propriedades do módulo de elasticidade que da resistência à compressão. Outro fator que diminui sua resistência é a presença de microfissuras, que depende de vários fatores como por exemplo, granulometria e tipo do agregado, relação água/cimento, teor de cimento, grau de adensamento do concreto fresco e condições de cura.

Em relação à resistência, a zona de transição é a fase mais fraca, ou seja, o elo mais fraco da corrente, assim suas propriedades influenciam muito a resistência limite do concreto. É devido a presença da zona de transição, que o concreto se rompe à um nível de tensão consideravelmente mais baixo do que a resistência dos elementos constituintes nas outras fases, agregado e argamassa.

### **2.1.2.A INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA DO CONCRETO NA SUA RESISTÊNCIA**

Nos sólidos existe uma relação fundamental inversa entre porosidade e resistência. No concreto, material trifásico, a porosidade de cada fase influencia muito a resistência final do material. Como os agregados são normalmente densos e

resistentes, e o maior grau de porosidade fica na matriz de argamassa e na zona de transição, a resistência do concreto é mais influenciada pelas características destas últimas fases. Além do mais, na zona de transição existem microfissuras que também condicionam o valor da resistência.

Embora a relação água/cimento seja o fator condicionante para a porosidade da matriz de argamassa e da zona de transição, existem outros fatores que também influenciam esta propriedade, como: grau de adensamento, condições de cura e características físicas do agregado. Mas indiscutivelmente é a relação água/cimento, que independentemente de outros fatores, mais condiciona esta propriedade nas duas fases.

Um estudo recente, já realizado por vários autores, foi o de ÇEÇEN & OZTURAN (1997), que pesquisaram várias dosagens variando o tipo de agregado e a resistência à compressão aos 28 dias, que foram 30, 60 e 90 MPa. Seu estudo começou com a idéia que para concretos com resistências até 40 MPa, os fatores condicionantes para a resistência seriam as propriedades da matriz de argamassa e da zona de transição. Mas o que ocorreria para concretos de alta resistência, onde as resistências destas duas fases podem se igualar à do agregado ?. Assim foram feitas dosagens com vários tipos de agregados com variação do nível de resistência para cada dosagem, suas principais conclusões foram:

- Para concretos com resistência normal, o tipo de agregado influenciou pouco no valor da resistência, sendo os fatores condicionantes as propriedades da matriz de argamassa e da zona de transição.
- Nos concretos de alta resistência, a influência do tipo de agregado é maior que para concretos de resistência mais baixa. Portanto ao se fazer uma dosagem para este tipo de concreto, as propriedades do agregado devem ser consideradas.

Pelo colocado anteriormente, o agregado não condiciona a resistência do concreto, fora os casos de concretos de alta resistência, pois à exceção dos agregados leves, a partícula do agregado é várias vezes mais resistente que a matriz de argamassa e a zona de transição. É claro que algumas de suas propriedades podem

mudar o comportamento das outras fases, como granulometria, tamanho e forma, mas normalmente não é o fator principal condicionante para o valor final da resistência no concreto.

### **2.1.3.A INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA DO CONCRETO NO MÓDULO DE ELASTICIDADE**

O módulo de elasticidade do concreto está muito relacionado ao tipo e quantidade de agregado graúdo que ele possui, um agregado com um valor de módulo de elasticidade alto têm uma maior capacidade de restringir variações de volume na matriz. Como o módulo de elasticidade do agregado é diretamente relacionado à sua porosidade, a medida da massa específica do concreto é a maneira mais fácil de obter-se uma estimativa da porosidade do agregado no concreto.

“ Não há dúvidas de que o módulo de elasticidade aumenta com a resistência do concreto, mas não existe um acordo sobre a forma exata dessa dependência. Isso não deve surpreender, pois o módulo de elasticidade do concreto depende do módulo de elasticidade do agregado e da proporção em volume do agregado no concreto. Raramente o primeiro é conhecido, de modo que algumas expressões como, por exemplo, a do ACI 318-89 (revisada em 1992), leva em conta o módulo de elasticidade do agregado por meio de um coeficiente que é função da massa específica do concreto, geralmente elevada à potência de 1,5 “ (NEVILLE, 1997, p. 419).

Segundo NEVILLE (1997), quando a massa específica do concreto  $\rho$ , estiver entre cerca de  $2300 \text{ kg/m}^3$  e  $2500 \text{ kg/m}^3$  o módulo de elasticidade do concreto é dado pelo ACI 318-89 ( revisado em 1992 ) como :

$$E_C = 43. \rho^{1.5} . ( f_c )^{0.5} . 10^{-6}$$



onde  $E_C$  é o módulo de elasticidade do concreto em GPa,  $\rho$  é a massa específica do concreto em  $\text{kg/m}^3$  e  $f_c$  é a resistência em MPa.

ALEXANDER (1996) pesquisou a influência do tipo de agregado graúdo nas propriedades do concreto, utilizando para seu estudo 23 tipos diferentes de agregados. Sua conclusão foi que os agregados exercem uma importante influência nas propriedades do concreto, principalmente as relacionadas com a deformabilidade do material, módulo de elasticidade, retração e fluência.

Para mostrar a influência de um tipo de agregado no módulo de elasticidade do concreto, existem fórmulas teóricas para a estimativa de seu valor, uma delas é a apresentada no CEB-FIB (1999). A norma fornece um coeficiente de correção que é função do tipo de agregado utilizado.

A estimativa do módulo de elasticidade pelo CEB-FIB (1999), é realizada utilizando-se a seguinte expressão:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot E_{co} \cdot (f_{cm} / f_{cmo})^{1/3}$$

Onde:

$E_{ci}$  - Módulo de elasticidade tangente (MPa).

$E_{co}$  -  $2,15 \cdot 10^4$  MPa.

$f_{cm}$  - resistência média à compressão (MPa).

$f_{cmo}$  - 10 MPa.

$\alpha_E$  - Coeficiente que depende do tipo de agregado usado (Tabela 5).

**Tabela 5 – Coeficiente relativo ao tipo de agregado graúdo utilizado na dosagem.**

TIPOS DE AGREGADOS	$\alpha_E$
Basalto, calcário denso	1,2
Quartzítico	1,0
Calcário	0,9
Arenito	0,7

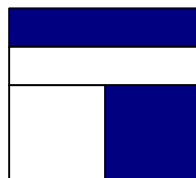
Uma forma de analisar a importância das fases no módulo de elasticidade do concreto, sem considerar a zona de transição, é através da teoria dos materiais compósitos. Para esta teoria ser utilizada, devem-se conhecer os módulos de elasticidade das fases e suas frações em volume.

Conforme METHA & MONTEIRO (1994), os dois modelos mais simples usados para simular uma material compósito são o modelo de Voigt e o modelo de Reuss. No modelo de Voigt, as fases são arranjadas segundo uma configuração em paralelo, impondo-se uma condição de deformação uniforme. No modelo de Reuss, as fases são arranjadas segundo uma configuração em série, impondo-se uma condição de tensão uniforme, Figura 3.



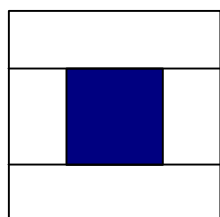
**Figura 3 – Modelos de Voigt e Reuss.**

BARR et al (1995) apresenta uma combinação dos modelos de Voigt e Reuss, chamado de modelo de Hirsch, Figura 4.

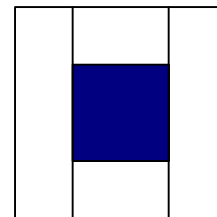


**Figura 4 - Modelo de Hirsch.**

Couto desenvolveu um modelo, que considera o caso de um agregado prismático colocado no centro de um prisma de concreto, ambos tendo a mesma relação entre altura e área da seção transversal. BARR et al (1995) apresenta duas versões, Figura 5.



**Modelo em série**



**Modelo em paralelo**

**Figura 5 - Modelos de Couto.**

BARR et al (1995) comparou o valor obtido pelos modelos anteriores com dados fornecidos por uma análise experimental, utilizando alguns tipos de agregados diferentes. Chegando-se às seguintes conclusões:

- Os modelos de Voigt e Reuss forneceram os limites superiores e inferiores respectivamente, da teoria utilizada.
- Os valores estimados ficam em média 10% menores do que os obtidos da análise experimental.
- Com exceção dos modelos de Voigt e Reuss, todos os outros modelos forneceram resultados semelhantes.
- O modelo que apresentou os melhores resultados quando comparado com os valores experimentais, foi o modelo de Couto em paralelo.
- Existe uma proporcionalidade entre os modelos teóricos e os resultados experimentais, relacionada ao tipo de agregado utilizado. Para uma mesma dosagem, quando o tipo de agregado era mudado, os modelos teóricos apresentavam valores correspondentes aos da análise

experimental, ou seja, nas fórmulas teóricas a fase que condiciona os valores é a do agregado, como era de se esperar.

Pelo exposto, pode-se concluir que a fase que mais influencia o módulo de elasticidade do concreto, é a dos agregados graúdos, é claro que todas se interagem para conferir as características desta propriedade, mas é o agregado com sua maior rigidez, que na maioria dos casos condiciona o comportamento do material.

## **2.2. PROPRIEDADES DO MATERIAL – PESQUISAS COM AGREGADOS RECICLADOS**

O potencial técnico da utilização de resíduos de concreto como agregado reciclado, graúdo ou miúdo, pode ser comprovado quando são analisados os resultados de pesquisas realizadas principalmente em outros países. No Brasil, as referências encontradas são relacionadas em sua maioria ao estudo do tratamento das sobras de concreto em centrais dosadoras, e ao reaproveitamento de resíduos de entulho de construção.

As pesquisas consultadas em sua maioria estudaram somente a fração graúda do agregado reciclado, onde foi observada uma grande quantidade de argamassa aderida ao agregado natural. Pelas conclusões destes estudos, pode-se perceber a grande influência que esta possui sobre as propriedades do agregado reciclado e do concreto feito com ele.

FRONDISTOU-YANNAS (1977) foi a primeira pesquisa encontrada na bibliografia relacionada ao tema, o estudo foi realizado sobre a fração graúda do agregado reciclado com total grau de substituição do agregado graúdo natural. O resíduo usado foi proveniente de lajes de concreto com dois anos de idade, que após um processo de britagem e peneiramento apresentou um diâmetro máximo de 25,4 mm. Em suas conclusões, a autora cita que a resistência à compressão do concreto reciclado ficou em torno de 14% mais baixa que a do concreto natural (referência) com as mesmas características. O efeito mais significativo da utilização do agregado

reciclado, foi a diminuição do valor do módulo de elasticidade em relação ao encontrado para o concreto natural de referência, chegando-se a valores de até 60% deste. A autora já esperava este resultado, pois o módulo de elasticidade de um concreto depende muito do módulo do agregado, e como foi constatado no agregado reciclado, existe uma grande quantidade de partículas de argamassa aderidas no agregado natural, que certamente influencia o valor do módulo de elasticidade do material.

HANSEN & NARUD (1983) estudaram a influência do tipo de agregado graúdo reciclado na resistência do concreto. Em sua pesquisa os autores adotaram como variável o valor da relação água/cimento, definindo três dosagens com níveis de resistência diferentes (baixa, média e alta). Os concretos feitos com estas dosagens seriam britados, dando origem a três tipos diferentes de agregados graúdos reciclados, conforme a resistência do concreto original. Para cada agregado reciclado também foram definidas três dosagens com níveis de resistência diferentes (baixa, média e alta) e substituição total dos agregados graúdos naturais. Os resultados são apresentados na Tabela 6.

As principais conclusões da pesquisa foram:

- Os agregados graúdos reciclados possuem uma menor densidade e uma maior absorção de água que os naturais, isto está principalmente relacionado à quantidade de argamassa do concreto original aderida na superfície dos agregados naturais. Analisando o material obtido após a britagem foi achada uma porcentagem média de 30% de argamassa aderida.
- A resistência à compressão do concreto reciclado é influenciada pela resistência do concreto que originou o resíduo, ou seja, pela relação água/cimento deste. Esta conclusão é confirmada, quando se analisa a diferença dos valores encontrados para uma mesma classe de resistência de concreto reciclado quando é variado o tipo de agregado.
- Os autores citaram a importância da qualidade do resíduo para a produção de agregados reciclados, principalmente para dosagens estruturais pois a maior diferença encontrada nos valores da pesquisa quando foi variado o

tipo de agregado reciclado, foram para concretos de média e alta resistência.

**Tabela 6 - Variação da resistência à compressão em função da qualidade do agregado. (HANSEN & NARUD (1983)).**

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa) (38 dias)</b>
<b>Obs: A 1º letra significa a classe de resistência do concreto, a 2º letra significa o tipo de agregado reciclado utilizado na produção deste concreto.</b>	
<b>A ( concreto original - referência )</b>	56.4
A/A	61.2
A/M	49.3
A/B	34.6
<b>M ( concreto original - referência )</b>	34.4
M/A	35.1
M/M	33.0
M/B	26.9
<b>B ( concreto original - referência )</b>	13.8
B/A	14.8
B/M	14.5
B/B	13.4
<b>Onde:</b>	
<b>A – Dosagem de alta resistência (a/c = 0,40)</b>	
<b>M – Dosagem de média resistência (a/c = 0,70)</b>	
<b>B – Dosagem de baixa resistência (a/c = 1,20)</b>	

RAVINDRARAJAH & TAM (1985) realizaram uma pesquisa com a mesma metodologia apresentada por HANSEN & NARUD (1983). Diferentemente do estudo anterior eles chegaram a conclusão que a influência da qualidade do agregado reciclado nesta propriedade do concreto são insignificantes, definindo que a maior influência está relacionada à relação água/cimento da dosagem. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7 - Variação da resistência à compressão em função da qualidade do agregado. (RAVINDRARAJAH & TAM (1985)).**

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa) (28 dias)</b>
<b>Obs: A 1º letra significa a classe de resistência do concreto, a 2º letra significa o tipo de agregado reciclado utilizado na produção deste concreto.</b>	
<b>A ( concreto original - referência )</b>	36.5
A/A	33.0
A/M	31.0
A/B	32.0
<b>M ( concreto original - referência )</b>	27.5
M/A	22.0
M/M	25.5
M/B	22.5
<b>B ( concreto original - referência )</b>	20.0
B/A	18.5
B/M	20.5
B/B	19.5
<b>Onde:</b>	
<b>A – Dosagem de alta resistência (a/c = 0,40)</b>	
<b>M – Dosagem de média resistência (a/c = 0,70)</b>	
<b>B – Dosagem de baixa resistência (a/c = 1,20)</b>	

Analisando os valores apresentados na pesquisa de RAVINDRARAJAH & TAM (1985), chega-se à mesma conclusão dos autores. Por exemplo, para o concreto reciclado de alta resistência, a variação da classe de resistência do agregado reciclado não gerou uma variação da resistência dos concretos.

BOEGH & HANSEN (1985) usando a mesma metodologia usada por HANSEN & NARUD (1983), estudaram o módulo de elasticidade e a retração. Fazendo uma relação entre os valores obtidos para as diversas dosagens com agregados reciclados e o concreto original (referência) é apresentada a Tabela 8:

**Tabela 8 - Relação do módulo de elasticidade e da retração do concreto reciclado/concreto original. (BOEGH & HANSEN (1985)).**

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Módulo de elasticidade</b>	<b>Retração</b>
<b>Obs: A 1º letra significa a classe de resistência do concreto, a 2º letra significa o tipo de agregado reciclado utilizado na produção deste concreto.</b>		
<b>A ( concreto original - referência )</b>	1	1
A/A	0.86	1.6
A/M	0.81	1.5
A/B	0.84	1.45
<b>M ( concreto original - referência )</b>	1	1
M/A	0.86	1.42
M/M	0.85	1.53
M/B	0.83	1.47
<b>B ( concreto original - referência )</b>	1	1
B/A	0.85	1.55
B/M	0.79	1.37
B/B	0.77	1.47
<b>Onde:</b>		
A – Dosagem de alta resistência (a/c = 0,40)		
M – Dosagem de média resistência (a/c = 0,70)		
B – Dosagem de baixa resistência (a/c = 1,20)		

Fazendo-se o estudo das propriedades destes concretos, os pesquisadores chegaram às seguintes conclusões:

- O módulo de elasticidade do concreto feito com agregado reciclado fica com o valor entre 70% a 85% do módulo do concreto original.
- A retração do concreto reciclado é maior que a do concreto original, sendo este valor entre 40% a 60% maior.
- Existe uma maior probabilidade de fissuração na retração seca do concreto reciclado do que no concreto original.



- A qualidade do resíduo de concreto é significativa para os valores das propriedades estudadas, isto já foi comprovado por um estudo anterior onde foi pesquisada a influência do tipo de resíduo na resistência à compressão do concreto reciclado, HANSEN & NARUD (1983).

HANSEN (1985) realizou um estado da arte onde analisa várias propriedades dos agregados reciclados, algumas de suas conclusões são:

- A densidade do agregado reciclado é menor, assim o concreto feito com estes agregados possui também uma densidade menor do que um concreto natural. É claro que isto vai depender da composição de agregados usados e de suas características. A densidade do agregado graúdo reciclado e do concreto reciclado ficaram com um valor médio de noventa por cento do valor dos materiais naturais.
- Os valores de absorção de água para o agregado graúdo reciclado tiveram uma grande dispersão, principalmente devido ao tipo de material do resíduo, mas foi notado um grande aumento em relação ao material natural.
- A utilização dos agregados reciclados geram uma grande perda de trabalhabilidade na mistura, relacionada principalmente à sua maior absorção de água.
- Concretos reciclados onde somente foi usada a fração graúda do agregado reciclado, tiveram uma diminuição de cinco por cento no valor da resistência à compressão em relação ao concreto natural. Para uma substituição global, ou seja, a utilização de ambas frações do agregado reciclado, miúdo e graúdo, esta diminuição ficou bastante acentuada chegando-se a valores entre vinte e quarenta por cento do encontrado para o concreto natural. Já para uma substituição parcial, onde existe na fração miúda uma composição de cinquenta por cento de material natural (areia) e cinquenta por cento de agregado reciclado este valor ficou entre dez e vinte por cento.

RAVINDRARAJAH et al (1987) analisaram as frações miúda e graúda do agregado reciclado de resíduos de concreto. Em sua pesquisa eles usaram como

agregados naturais, areia para a fração miúda e pedaços de granito para a graúda. Os resíduos do estudo foram obtidos da britagem de cubos de concreto com um ano de idade e resistência aproximada de 60 MPa. Após este processo eles foram peneirados e separados por tamanhos, e combinados para que possuíssem as mesmas características granulométricas dos agregados naturais. As dosagens feitas foram separadas em três séries com variação da relação água/cimento, Tabela 9:

**Tabela 9 – Detalhes das dosagens - (RAVINDRARAJAH et al (1987)).**

<b>Séries</b>	<b>Composição</b>	<b>Relação água/cimento (a/c)</b>
<b>I</b>	agregado miúdo natural agregado graúdo natural	0,30 – 0,40 – 0,50 – 0,60 – 0,70
<b>II</b>	agregado miúdo reciclado agregado graúdo reciclado	0,30 – 0,40 – 0,50 – 0,60 – 0,70
<b>III</b>	a) agregado miúdo natural agregado graúdo natural	0,57
	b) agregado miúdo natural agregado graúdo reciclado	0,57
	c) agregado miúdo reciclado agregado graúdo reciclado	0,57

As principais conclusões que os pesquisadores chegaram foram:

- Quando são analisadas as propriedades do concreto fresco, existe uma grande perda de trabalhabilidade quando são usados os agregados reciclados. Os autores citam a grande absorção de água destes agregados quando comparados com os naturais, e é esta a causa mais provável para esta ocorrência.
- O valor da resistência à compressão dos concretos reciclados é 10% menor que de um concreto natural. Quando foi analisada os resultados da Série III, onde se variou a composição dos agregados deixando a relação água/cimento constante, foi constatado que o agregado graúdo reciclado foi o que mais influenciou a perda de resistência.

- O módulo de elasticidade do concreto reciclado teve uma diminuição em relação ao do concreto natural. Quando utilizou-se somente a fração graúda do material reciclado, esta diminuição foi de quinze por cento. A maior diferença ocorreu quando ambas as frações foram usadas, miúda e graúda, o valor da diminuição foi de trinta e cinco por cento.
- A retração seca dos concretos reciclados é maior que do concreto natural. Quando foi usado somente o agregado graúdo reciclado, este valor ficou em torno de 55% maior que o encontrado para o concreto natural, já para utilização de todos os agregados reciclados (miúdo e graúdo) este valor foi o dobro.

GUNÇAN & TOPÇU (1995) estudaram algumas propriedades do concreto reciclado. Em sua pesquisa usaram resíduos de um concreto com resistência aos 28 dias de 16 MPa, que após triturado e peneirado gerou o agregado graúdo reciclado. Eles fizeram uma variação do grau de substituição do agregado natural pelo reciclado, com as seguintes porcentagens: 0 (concreto natural), 30, 50, 70 e 100%. As suas principais conclusões foram:

- O valor da densidade do concreto reciclado diminui em relação ao do concreto natural, conforme o aumento do grau de substituição. Isso ocorre pois como o agregado reciclado possui uma grande quantidade de argamassa aderida ao agregado natural, sua densidade é menor que de um agregado natural puro.
- O módulo de elasticidade do concreto reciclado é menor que do concreto natural, para substituição total do agregado natural pelo reciclado, este valor fica em torno de 80% do encontrado para um concreto natural de mesmas características.

VAN ACKER (1996), realizou uma pesquisa sobre resíduos de concreto provenientes de fábricas de pré-moldados (elementos rejeitados, finais de linhas de produção, etc). Em seu estudo, ele utilizou algumas dosagens, que diferenciavam entre si pela porcentagem de agregados reciclados e pelo tipo de agregado reciclado

usado (miúdo, graúdo ou ambos). A possibilidade de variação é enorme, assim ele resumiu sua pesquisa em algumas composições.

A composição das dosagens foi realizada sobre o valor total de agregados naturais. No caso da substituição parcial de x % (graúdo ou miúdo reciclado), o valor x % é calculado sobre o valor original do agregado natural (graúdo ou miúdo). Então esta quantidade de agregado reciclado é deduzida do valor original do agregado natural. Para dosagens com ambos os agregados reciclados (graúdo e miúdo), o processo é o mesmo, mas existe a repartição de x/2 % para a fração graúda e x/2 % para a fração miúda.

As composições adotadas por VAN ACKER (1996) foram:

- 0% de agregados reciclados (referência);
- 5% de agregado graúdo reciclado;
- 10% de agregado graúdo reciclado;
- 10% de agregado miúdo reciclado;
- 10% de agregado miúdo e graúdo reciclados;
- 10% de agregado miúdo e graúdo reciclados <sup>(1)</sup>;
- 10% de agregado miúdo reciclados <sup>(2)</sup>;
- 25% de agregado miúdo e graúdo reciclados;

<sup>(1)</sup> - Foi investigado a influência da resistência do concreto original que gera o resíduo utilizado nas dosagens. O concreto natural de referência que originou a maioria dos resíduos, possuía a resistência em corpos de prova cúbicos aos 28 dias com o valor de 80 MPa, enquanto para os resíduos utilizados nesta dosagem este valor ficou com 41 MPa.

<sup>(2)</sup> - A influência da quantidade de cimento também foi estudada. Na dosagem de referência o consumo de cimento por metro cúbico de concreto foi de 400 kg/m<sup>3</sup>, já para esta dosagem este valor foi definido com 300 kg/m<sup>3</sup>.

Quando são analisadas as propriedades dos agregados, dois itens se destacaram na pesquisa, a granulometria e a absorção de água. A granulometria do agregado reciclado ficou bastante variada quando comparado ao do agregado natural, foi

percebido que durante o processo de peneiramento a argamassa aderida ao agregado natural solta-se e gera uma quantidade enorme de materiais com várias dimensões. Já a absorção de água dos agregados reciclados é bem maior que a dos naturais, isto também é relacionado à quantidade de argamassa existente neste material. É sugerido para dosagens com agregados reciclados, que esta parcela de material seja usada úmida devido seu alto grau de absorção de água.

Para o concreto endurecido, VAN ACKER (1996) estudou algumas propriedades. Fazendo-se uma relação entre os valores obtidos para as diversas dosagens com agregados reciclados e o concreto original (referência), alguns dados desta pesquisa são apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10 – Relação propriedade concreto reciclado / concreto original (VAN ACKER (1996)).**

Dosagem	Res. Compressão 28 dias (MPa)	Retração (mm)	Módulo de Elasticidade	Absorção de água
0% de agregados reciclados	1	1	1	1
5% de agregado graúdo reciclado	0.90	1.12	0.95	0.98
10% de agregado graúdo reciclado	1.05	1.15	0.95	1.08
10% de agregado miúdo reciclado	0.92	1.12	0.95	1.19
10% de agregado miúdo e graúdo reciclados	0.98	0.91	0.93	1.15
10% de agregado miúdo e graúdo reciclados <sup>(1)</sup>	0.94	1.03	0.92	1.07
10% de agregado miúdo reciclado <sup>(2)</sup>	0.93	-	-	-
25% de agregado miúdo e graúdo reciclados	0.83	1.03	0.87	1.35

Suas principais conclusões sobre as propriedades do concreto endurecido foram:

- A resistência à compressão não é muito afetada quando se usa agregados reciclados, para o nível de substituição estudado, principalmente quando somente a fração graúda é utilizada. Isto é explicado pelo autor pelo fato

que ao passar pelo processo de britagem, as zonas fracas do material são rompidas. Em sua pesquisa ele somente substituiu uma pequena parcela do agregado natural pelo reciclado, esta conclusão somente pode ser aceita quando é analisado um contexto semelhante.

- Existe a influência da resistência do concreto original na resistência do concreto reciclado. Quando foram utilizados resíduos de um concreto de menor resistência, 41 MPa, houve um decréscimo de cinco por cento no valor da resistência em relação ao concreto reciclado de resíduos de um concreto de maior resistência, 80 MPa.
- A fração graúda do material reciclado forneceu resultados melhores do que a miúda, no caso da resistência à compressão.
- VAN ACKER (1996) sugere que uma substituição de até 5 % de agregado miúdo reciclado é aceitável, podendo chegar até o valor de 10 % com restrições, para valores maiores é necessário pesquisar mais.
- A retração e a absorção de água do concreto reciclado é maior do que a do concreto natural, principalmente devido ao baixo valor do módulo de elasticidade dos agregados reciclados.
- Analisando o estudo globalmente, o autor pode concluir que, se utilizar uma porcentagem de até 10% de agregado graúdo reciclado, algumas das propriedades do concreto não serão muito influenciadas e o material poderá ser usado para dosagens estruturais sem nenhum risco. A maior restrição da pesquisa, é sobre a utilização da fração miúda, que possuiu como valor máximo recomendado de substituição de 5 %, e ainda necessita ser melhor estudada. Para utilização conjunta dos dois materiais, podem ser usados os limites já apresentados, 10 % para a fração graúda e 5 % para a fração miúda.

SOROUSHIAN & TAVAKOLI (1996), pesquisaram resíduos de concreto provenientes de demolições de pavimentos rodoviários, fazendo total substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado nas dosagens de concreto realizadas. Em seu estudo eles analisaram dois tipos de agregados graúdos reciclados, provenientes de dois pavimentos rodoviários com características diferentes. Assim analisaram a

influência da origem do resíduo, além de outros fatores como tipo de mistura e relação água/cimento nas propriedades do concreto reciclado. As principais conclusões que chegaram foram:

- Se uma dosagem de concreto utiliza um agregado reciclado proveniente de resíduos de uma dosagem de resistência maior, a resistência obtida com o agregado reciclado pode ser maior que a com agregado natural.
- As propriedades do agregado reciclado são muito influenciadas pelas características do resíduo, ou seja, do concreto natural que o originou. Resíduos de concretos de boa qualidade fornecerão agregados reciclados com qualidade, assim acontecendo o contrário para resíduos de concretos de baixa qualidade. Entretanto, devido a outros fatores esta conclusão pode mudar, pois existem mais variáveis envolvidas no processo. Portanto cada caso deve ser analisado.

Existe uma oposição entre a pesquisa de RAVINDRARAJAH & TAM (1985) e a de HANSEN & NARUD (1983), SOROUSHIAN & TAVAKOLI (1996) e VAN ACKER (1996), para os primeiros a influência da qualidade dos resíduos é insignificante, dando para a relação água/cimento da dosagem do concreto reciclado o principal parâmetro de qualidade de suas propriedades. Já para os outros pesquisadores existe uma importância na qualidade do agregado reciclado usado, principalmente nas características do concreto que o originou. Deve-se lembrar que na primeira pesquisa os autores analisaram somente a resistência à compressão, portanto a conclusão que chegaram somente serve para explicar a influência do tipo de resíduo nesta propriedade. Quando o estudo é aprofundado para outros parâmetros, como o módulo de elasticidade e a retração, a influência do tipo de agregado reciclado é maior.

ABOURIZK & RASHWAN (1997) pesquisaram a influência do tempo de cura no concreto para a produção de resíduos, e o tempo de armazenagem deste material após o processo de britagem. Antes das análises experimentais, esperava-se que partículas não hidratadas de cimento contribuíssem de alguma forma para as propriedades do concreto reciclado, assim poderia ser definido um tempo ideal para a reciclagem de um material.

A fase experimental teve duas partes, a primeira começou com a moldagem de cilindros de dimensões 150x300 mm, após a desmoldagem eles foram levados para uma câmara úmida, exceto um quinto destes que imediatamente após serem desmoldados foram triturados, uma quantidade igual teve o mesmo destino nas seguintes idades, 2, 3, 4, e 7 dias respectivamente. Assim são obtidos resíduos de concreto com idades diferentes, ou seja, graus de hidratação variados. A outra fase usou resíduos que foram triturados no mesmo dia, mas que foram usados em dias diferentes, ou seja, com variação dos tempos de armazenamento, que foram, 1, 2, 3, 6 e 7 dias após a britagem. Estes resíduos foram peneirados e separados em duas frações, uma miúda e outra graúda, que foram usadas nas dosagens substituindo totalmente os agregados naturais. As suas principais conclusões foram:

- A densidade do agregado e do concreto reciclado não são muito influenciadas pelo grau de hidratação e o tempo de armazenamento do resíduo.
- A absorção de água é maior para resíduos com maiores graus de hidratação. Este resultado pode ser atribuído à perda de umidade devido o processo de hidratação do cimento e da formação do gel, esta diferença ficou mais acentuada na fração graúda do agregado reciclado. A influência do tempo de armazenamento foi muito pequena nesta propriedade.
- O concreto reciclado feito com resíduos de baixo grau de hidratação, triturados após a desmoldagem, foram os que tiveram os maiores valores para a resistência à compressão, superando até o do concreto natural com mesmas características, vinte e cinco por cento maior. Isto está relacionado principalmente, à existência de partículas não hidratadas de cimento nos resíduos. Já para os concretos reciclados feitos com resíduos mais antigos, houve uma pequena diminuição no valor da resistência, sete por cento menor.



DESMYTER et al (1998) estudaram três tipos diferentes de agregados reciclados: um de resíduos de concreto e dois tipos de resíduos de blocos de concreto. Algumas das suas conclusões foram :

- A densidade para todos os concretos com agregados reciclados é menor que a do concreto com agregados naturais, sendo os valores menores encontrados para os agregados de resíduos de blocos, isto deve-se principalmente à maior porosidade deste tipo de material .
- A absorção de água para os agregados reciclados é bem maior que a do agregado natural, ocorrendo a maior parte da absorção nos primeiros minutos de imersão.
- Não ocorreram muitas diferenças em relação a resistência à compressão dos concretos, mas foi notada uma diminuição do módulo de elasticidade e um aumento do valor da retração quando se usam os agregados reciclados.
- A fluência também foi maior para os concretos com agregados reciclados.

DILLMANN (1998) estudou resíduos de concreto usando dois tipos de agregados reciclados, a diferença entre eles era a classe de resistência do concreto original, um de baixa resistência e outro de alta. Suas conclusões são bastantes semelhantes à encontradas na maioria das pesquisas já citadas, que o valor da resistência não é muito afetado, notando-se uma diminuição do valor do módulo de elasticidade.

Através de inúmeras pesquisas, algumas instituições publicaram recomendações para a utilização do material reciclado. Uma das recomendações mais importantes que se tem conhecimento, são as propostas pela RILEM -“ Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions “ com o título “Specifications for Concrete with Recycled Aggregates “ publicadas em 1994. Esta informa os coeficientes de projeto a serem usados no cálculo de elementos estruturais que sejam feitos com concretos com agregados reciclados, conforme sua origem, e as restrições à sua utilização.

No caso de resíduos de concreto, as recomendações da RILEM (1994) os classificam em dois tipos de agregados:

- TIPO II - agregados graúdos provenientes totalmente de resíduos de concreto.
- TIPO III - agregados graúdos provenientes de uma mistura de agregados naturais e reciclados, onde :
  - porcentagem mínima de agregados naturais é 80%;
  - porcentagem máxima de agregados provenientes de pedaços de alvenaria é 10%.

As restrições da RILEM (1994) estão relacionadas principalmente ao nível de contaminantes nos agregados (metais pesados, materiais radioativos, etc.), onde é fornecido uma relação de itens que devem ser satisfeitos. No caso da sua utilização em estruturas, nas quais as deformações possuem um nível de importância relativamente alto, é sugerido que ensaios sejam feitos com o material, para obter dados mais apurados. Também são apresentadas as classes de resistência do concreto reciclado permitidas para cada tipo de agregado reciclado utilizado, Tabela 11.

Para o cálculo estrutural de elementos utilizando concretos reciclados, as recomendações da RILEM (1994) fornecem coeficientes de correção, que são multiplicados pelos valores encontrados das mesmas propriedades, mas para concretos naturais com mesmas características. Por exemplo, para achar o módulo de elasticidade de um concreto reciclado com agregados do Tipo II, calcula-se através de alguma fórmula normalizada o valor desta propriedade para um concreto natural, obtendo este valor é só multiplicá-lo pelo coeficiente apresentado na RILEM (1994), neste caso 0.80, Tabela 12.

**Tabela 11 - Classe de Resistência Permitida - RILEM ( 1994).**

<b>Agregado TIPO II</b>	C50 - C60
<b>Agregado TIPO III</b>	sem limites

**Tabela 12 - Coeficientes de Projeto para o Concreto Reciclado - RILEM (1994).**

<b>PROPRIEDADE</b>	<b>Agregado TIPO II</b>	<b>Agregado TIPO III</b>
<b>Resistência à Tração (<math>f_{ctm}</math>)</b>	1	1
<b>Módulo de Elasticidade (<math>E_{cm}</math>)</b>	0.8	1
<b>Coeficiente de Fluência (<math>f(\%, t_0)</math>)</b>	1	1
<b>Retração (<math>e_{cso}</math>)</b>	1.5	1

Comparando os coeficientes apresentados nas recomendações da RILEM (1994), e os dados obtidos nos trabalhos consultados, podem-se tirar algumas conclusões:

- O coeficiente da RILEM (1994) referente à resistência à compressão não foi listado na tabela, ou seja, é suposto que ele possua valor unitário não existindo diminuição da resistência quando é utilizado o agregado reciclado. Nos trabalhos consultados a maioria dos autores citaram a influência do tipo de resíduo nas características do concreto reciclado, FRONDISOU-YANNAS (1977), HANSEN & NARUD (1983), RAVINDRARAJAH et al (1987), SOROUSHIAN & TAVAKOLI (1996) e ABOURIZK & RASHWAN (1997), demonstrando com resultados experimentais que a resistência à compressão é afetada pela qualidade do resíduo utilizado, no caso de um resíduo proveniente de um concreto de boa qualidade, o concreto reciclado pode ter uma resistência até maior do que o concreto original. HANSEN (1985), em seu trabalho de estado da arte, dá muita ênfase às características dos resíduos e de onde eles foram originados, e mostra através de várias propriedades como suas características influenciam as propriedades do concreto. Neste mesmo estudo ele apresenta um coeficiente de variação para a resistência à compressão do concreto reciclado, e mostra que resíduos provenientes de várias localidades, sem um controle prévio de separação, principalmente por classe de resistência do concreto original, são muito ruins para a utilização deste material, pois inviabilizam seu uso em dosagens de maior

resistência. A RILEM (1994) não cita nada em relação à mistura de resíduos de diferentes locais, mas fala que para dosagens de maior resistência ou para locais onde as deformações serão importantes, é necessário a realização de ensaios com os materiais.

- O coeficiente da RILEM (1994) referente ao módulo de elasticidade, possui o valor de 0.8 para agregados TIPO II e 1.0 para agregados TIPO III.. Analisando os valores apresentados nas pesquisas consultadas, encontrou-se uma faixa de variação para o valor do módulo de elasticidade do concreto reciclado, sendo esta de 70% a 80% do valor do módulo de elasticidade do concreto original para total substituição do agregado gráudo natural (TIPO II – RILEM), e valores semelhantes para até 10% de substituição do agregado natural (TIPO III – RILEM). Para esta propriedade, os coeficientes apresentados pela RILEM (1994) foram satisfatórios, já se esperava esta conclusão pois desde a primeira pesquisa consultada, FRONDISTOU-YANNAS (1977), o módulo de elasticidade do concreto reciclado era menor do que do concreto original.

Desde a publicação das recomendações da RILEM em 1994, não foram apresentados novos procedimentos para a utilização de agregados reciclados, existindo somente simpósios que mostravam os resultados de novas pesquisas. Como já comentado, após 1994, existiram muitos estudos e conforme estes vão aparecendo novas perguntas são feitas. É claro que até hoje o concreto com agregados naturais é ainda estudado, possuindo muitas propriedades ou características para se descobrir. Certamente ocorrerá o mesmo para o concreto reciclado.

Um material para ser aceito no meio técnico e no mercado, têm que possuir algumas de suas propriedades conhecidas para possuir o controle de sua técnica, assim como ocorre no concreto natural, o concreto reciclado precisa ser melhor conhecido, podendo até ser chamado de um novo material. Os conceitos para os concretos reciclados, muitas vezes, como demonstrado nas pesquisas consultadas, não podem ser os mesmos utilizados pelos concretos naturais, as características dos agregados reciclados são totalmente diferentes daquelas encontradas para os naturais, normalmente utilizados em dosagens de concretos.

O estudo da técnica de utilização de agregados reciclados, não se resume apenas às propriedades do material, mas também a pesquisas relacionadas ao processo de britagem e extração de resíduos, de manufaturamento e da forma de acrescentar um valor econômico à este material.

## **2.3. EXPERIÊNCIAS PRÁTICAS**

Muitas experiências práticas de aplicação do material foram encontradas nos artigos consultados, a maioria concorda que o aumento do conhecimento da tecnologia de seu emprego, acrescentará novas perspectivas para sua utilização.

É claro que a tecnologia para o reaproveitamento dos resíduos de concreto não se limita somente à parte do material, mas engloba assuntos relativos à forma de demolição, no caso de estruturas ou pavimentos, gerenciamento destes materiais e formas de utilizá-los economicamente. Esses assuntos são temas de debates internacionais, onde vários pesquisadores e entidades cooperam para acrescentar informações sobre o tema. Um destes encontros foi o III Simpósio Internacional de Demolição e Reutilização de Concreto e Alvenaria, realizada pela RILEM em 1993 na Dinamarca, e que teve a cooperação das seguintes entidades: UNESCO, American Concrete Institute (ACI), International Solid Waste Association (ISWA), Danish Concrete Association (DBF), European Network of Building Research Institutes (ENBRI), Conseil International du Bâtiment (CIB), International Decade of Natural Disaster Reduction (IDNDR), UN Center of Regional Development (UNCRD), e Deutscher Beton-Verein E.V. (DVB); sendo que o Danish Building Research Institute ficou responsável pela organização do evento, (LAURITZEN, 1994).

Os temas abordados neste III Simpósio foram:

- Integração entre demolição, reciclagem e gerenciamento de resíduos.
- Experiências em demolições e linhas de pesquisa a seguir.
- Experiências em reciclagem e linhas de pesquisa a seguir.

- Especificações da RILEM para concretos com agregados reciclados.
- Demolição e reciclagem após desastres.
- Desenvolvimento de técnicas de demolição.
- Reciclagem e Propriedades dos materiais.
- Exemplos de reutilização de resíduos de concreto e alvenaria.

Uma das principais conclusões deste Simpósio foi que a utilização dos resíduos da construção civil é inevitável, independente dos processos que os geraram. Quando são analisadas questões ambientais, econômicas e práticas, chega-se a um consenso onde é necessário investimentos em pesquisas para que estes materiais sejam aceitos no mercado. Foi sugerido como meta para o futuro, que aproximadamente 60% dos resíduos da indústria de construção civil sejam reaproveitados.

VAN ACKER (1996), apresenta dados do aproveitamento da fração graúda e miúda do agregado reciclado, e cita a experiência de uma usina de pré-moldados na Bélgica que utiliza estes materiais na composição de suas dosagens de concreto. No processo de fabricação, alguns tipos de resíduos são gerados, principalmente relacionados à sobras de concreto e elementos refugados. Estes resíduos são depositados em uma área próxima da usina, e como o valor das taxas ambientais são elevadas, existe um período máximo que todo este material pode ser depositado, aproximadamente um ano. Após este tempo ele é levado para um processo de britagem para ser transformado em agregado reciclado.

Em 1995, o estoque de material depositado era de 7.423 toneladas. Após o processo de britagem o material foi separado em dois tipos, graúdo e miúdo, gerando 3.030 toneladas de agregado graúdo reciclado e 4.393 toneladas de agregado miúdo reciclado. Todo este material foi usado nas dosagens de concreto da usina, substituindo uma parte dos agregados naturais. Ocorreu uma grande economia neste processo, pois o custo do agregado reciclado ficou próximo ao do natural, além da não necessidade do pagamento das taxas ambientais.

HENDRIKS\* apud HANSEN (1985), cita a experiência holandesa na utilização do agregado graúdo reciclado em painéis de vedação de um edifício residencial.

HANSEN & NARUD (1983), apresentam as possibilidades de aplicação das três faixas de resistências existentes. Para concretos reciclados de alta e média resistência, a utilização mais interessante são como elementos estruturais, pois os resíduos utilizados possuem certamente uma boa qualidade. Para concretos de baixa resistência, a aplicação mais recomendada é sua utilização em elementos não estruturais.

O periódico BIOCYCLE, apresenta inúmeros artigos sobre a utilização de resíduos de concreto, principalmente nos Estados Unidos e no Japão. Através dos dados fornecidos, pode-se notar o grande crescimento das empresas ligadas ao ramo de reciclagem, e as crescentes possibilidades futuras que esta técnica possui.

LAURITZEN (1994), cita a experiência japonesa na utilização de resíduos de concreto em pavimentação, onde 50% do resíduo produzido no país são usados.

Segundo HANSEN (1985), existe uma grande experiência na utilização do agregado graúdo reciclado em pavimentação (base, sub-base, pavimentos rígidos, etc), principalmente nos Estados Unidos e Europa.

\*HENDRIKS, C. F. (1984). Wiederverwendung von Strassenaufbruch und Bauschutt in den Niederlanden, proc. In: 4th INTERNATIONAL RECYCLING CONGRESS, Berlin, p.972-977, October apud HANSEN, T. C. (1985). *Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, second state of the art report developments 1945-1985*. RILEN Technical Committee - 37 – DRC.

THE NORWEGIAN FOUNDATION FOR ENVIRONMENTAL LABELLING\* apud JOHN (1996), apresenta a exigência norueguesa de incorporação no produto final de um mínimo de 25% de matérias primas recicladas, para obtenção da marca de qualidade ambiental de painéis para exterior e interiores.

LATTERZA & MACHADO JR. (1997), apresentam os resultados obtidos de ensaios realizados no Departamento de Engenharia de Estruturas-EESC, em painéis leves de vedação feitos com agregados graúdos reciclados de resíduos de construção. Suas conclusões são que existe tanto a viabilidade técnica como a econômica, para o emprego destes materiais na prática.

TOALDO (1993) cita o emprego de resíduos de construção, na confecção de blocos para um alojamento de 190 m<sup>2</sup> na Usina de Asfalto Municipal de São Paulo. O custo deste bloco com material reciclado, ficou setenta por cento inferior ao do convencional. Testes realizados no IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, demonstraram um bom desempenho do material reciclado em ensaios de abrasão, resistência à compressão e absorção de água, indicando seu uso na fabricação de briquetes, lajes, guias de sarjetas, bocas de lobo, tampas de caixas de inspeção, mourões e blocos.

Algumas construtoras no Brasil estão usando moinhos-argamassadeiras, este equipamento tritura entulho à base de argila, concreto e restos de argamassa, formando um agregado fino que oferece excelentes qualidades à argamassa de assentamento ou para revestimento de alvenaria.

No Brasil, não foram encontradas experiências práticas na utilização dos resíduos de concreto, mas como ocorre com os resíduos de construção, que possuem viabilidade técnica e econômica, é esperado que isto ocorra para este material.

\*THE NORWEGIAN FOUNDATION FOR ENVIRONMENTAL LABELLING. (1992). Environmental Labelling of Buildinb Board and Panels for Interior and Exterior Use, *Interior Fixtures and Furniture-Making*. ( Criteria Document Translation) , October apud JOHN, V. M. . (1996). Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: WORKSHOP DE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL. SÃO PAULO. p .21-30.



### 3. PESQUISA TEÓRICA

Como já citado, na pesquisa teórica foi realizado um estudo para demonstrar a influência do tipo de agregado no módulo de elasticidade do concreto. Foi escolhida a teoria dos materiais compósitos para ser usada, conforme fórmulas matemáticas deduzidas por diversos autores. Na metodologia destas fórmulas existem algumas variáveis, que são:

- $E_c$  - Módulo de elasticidade do concreto.
- $E_{arg}$  - Módulo de elasticidade da argamassa.
- $E_{agg}$  - Módulo de elasticidade do agregado graúdo.
- $V_{agg}$  - Volume do agregado graúdo.

Os modelos utilizados foram:

**a) Modelo de Voigt**

$$\frac{E_c}{E_{arg}} = 1 + \left( \frac{E_{agg} - 1}{E_{arg}} \right) V_{agg}$$

**b) Modelo de Reuss**

$$\frac{E_{arg}}{E_c} = 1 + \left( \frac{E_{arg} - 1}{E_{agg}} \right) V_{agg}$$

c) **Modelo de Hirsch**

$$\frac{E_{arg}}{E_c} = \left( \frac{1}{1 + \left( \frac{E_{agg} - 1}{E_{arg}} \right) V_A} + \left( 1 + \left( \frac{E_{arg} - 1}{E_{agg}} \right) V_{agg} \right) \right)$$

d) **Modelo de Couto ( modelo em série )**

$$\frac{E_c}{E_{arg}} = 1 + \frac{V_{agg}}{\sqrt{V_{agg}} - V_{agg} + \frac{E_{arg}}{E_{agg} - E_{arg}}}$$

e) **Modelo de Couto ( modelo em paralelo )**

$$\frac{E_c}{E_{arg}} = 1 + \frac{V_{agg}}{\frac{E_{agg}}{E_{agg} - E_{arg}} - \sqrt{V_{agg}}}$$

A incógnita no estudo é o módulo de elasticidade do concreto ( $E_c$ ), e as variáveis o módulo de elasticidade do agregado graúdo ( $E_{agg}$ ), o módulo da argamassa ( $E_{arg}$ ) e o volume do agregado graúdo ( $V_{agg}$ ).

O valor do módulo de elasticidade para um agregado natural de origem basáltica com mesmas características do utilizado neste estudo, foi fornecido pelo Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, com valor de 80.000 MPa.

A metodologia para obtenção do módulo de elasticidade da argamassa, foi apresentada no capítulo sobre a metodologia do trabalho.

O módulo de elasticidade para o agregado graúdo reciclado, foi obtido através da composição dos módulos de elasticidade das duas partículas existentes em sua composição. A primeira partícula é de agregados graúdos naturais com uma camada de argamassa aderida em sua superfície, a outra são de pedaços soltos de argamassa.

Conforme constatado na análise visual, existe uma quantidade de setenta por cento sobre o volume total de material, de partículas de agregados graúdos naturais com a camada de argamassa aderida, o resto, trinta por cento, são de pedaços soltos de argamassa.

HANSEN (1985) cita que nos agregados reciclados, existe uma porcentagem de argamassa aderida na superfície dos agregados naturais, e que este valor varia conforme a dimensão do agregado, Tabela 13. Neste estudo teórico foi adotado 30% de partículas de argamassa aderida ao agregado graúdo natural.

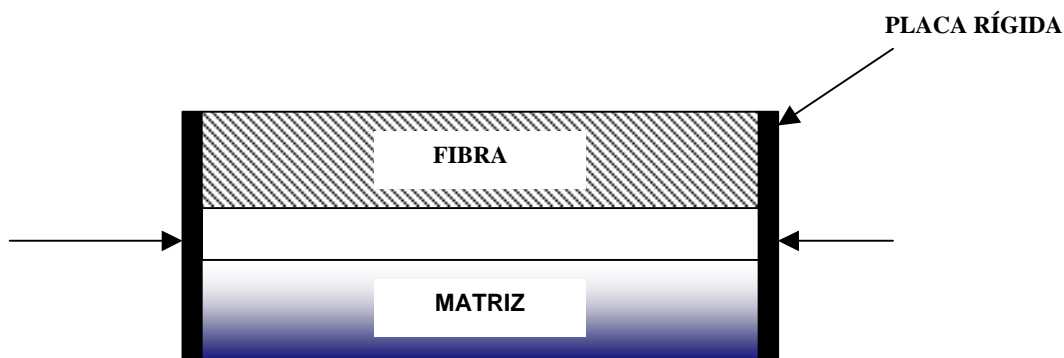
**Tabela 13 – Porcentagem de partículas de argamassa aderidas ao agregado natural conforme a dimensão do agregado ( HANSEN (1985)).**

Dimensão do agregado ( mm )	Porcentagem de argamassa aderida ( % )
4 a 8	60
8 a 16	40
16 a 32	25 a 32

Para o cálculo do módulo de elasticidade equivalente do agregado graúdo natural com a camada de argamassa aderida, foi empregado o modelo em paralelo para dois materiais diferentes (SHAFFER\* apud MAGAGNIN FILHO (1996)). Este modelo concentra toda a área relativa à cada material em duas áreas separadas como duas barras paralelas, uma de matriz (agregado) e outra de fibra

\*SHAFFER, B. W. ( 1964 ). Stress-Strain Relations of Reinforced Plastics Parallel and Normal to their Internal Filaments. *AIAA Journal*, v.2 , n. 2, p. 348-352 apud MAGAGNIN FILHO, N. ( 1996 ). *Placas Laminadas em Materiais Compostos de Fibras Longas: Propriedades termoelásticas dos materiais constituintes; propriedades equivalentes das lâminas; critérios de ruptura e análise pelo método dos elementos finitos*. São Carlos. Dissertação ( Mestrado ) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

(argamassa), com a mesma fração em volume do composto, unidas por placas rígidas na extremidade, onde é aplicada a força paralela às fibras, como mostra a Figura 6. Admite-se que as placas garantam que a fibra e a matriz sofram a mesma deformação.



**Figura 6 – Modelo equivalente de barras paralelas de matriz e fibra SHAFER\* apud MAGAGNIN FILHO ( 1996 )**

O valor do Módulo de elasticidade equivalente (  $E$  ) é dado por :

$$E_{equivalente} = E_m \cdot [ (A_f \cdot E_f) / (A \cdot E_m) + ( 1 - (A_f / A) ) ] \quad ( 1 )$$

Onde:

$E_i$  – módulo de elasticidade da fase ( matriz ou fibra );

$m$  – matriz;

$f$  – fibra;

$A$  – área da seção transversal da barra ( fibra mais matriz );

$A_f$  – área da seção transversal da barra de fibra.

\*SHAFER, B. W. ( 1964 ). Stress-Strain Relations of Reinforced Plastics Parallel and Normal to their Internal Filaments. *AIAA Journal*, v.2 , n. 2, p. 348-352 apud MAGAGNIN FILHO, N. ( 1996 ). *Placas Laminadas em Materiais Compostos de Fibras Longas: Propriedades termoelásticas dos materiais constituintes; propriedades equivalentes das lâminas; critérios de ruptura e análise pelo método dos elementos finitos*. São Carlos. Dissertação ( Mestrado ) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Os ensaios realizados em corpos de prova de argamassa e o estudo dos materiais presentes em cada dosagem, forneceram os valores das variáveis, o módulo de elasticidade da argamassa e o volume de agregado graúdo. Para o ensaio do módulo de elasticidade foram usados três corpos de prova, o resultado é a média dos valores, Tabelas 14 e 15.

**Tabela 14 – Ensaio do módulo de elasticidade das argamassas utilizadas na pesquisa teórica.**

Propriedade	Dosagem			
	1	2	3	4
Módulo de elasticidade da argamassa (MPa)	10.352	11.033	9.673	9.213
Relação entre o módulo de elasticidade argamassa reciclada / argamassa natural	1,00	1,07	0,93	0,89
Resistência à compressão (MPa)	56	55	55	53

Pelos resultados dos ensaios do módulo de elasticidade da argamassa, é notado que a utilização da fração miúda do agregado reciclado condiciona à uma diminuição no seu valor em relação ao do material natural, de aproximadamente dez por cento, Tabela 14.

**Tabela 15 – Cálculo do volume de agregados graúdos nas dosagens.**

Propriedade	Dosagem			
	1	2	3	4
Obs: traço - 1 : 1,4 : 2,4 x = 0,41 Massa específica do agregado graúdo: Natural: 2.830 kg/m <sup>3</sup> Reciclado: 2.480 kg/m <sup>3</sup>				
Consumo teórico de cimento no concreto ( kg/m <sup>3</sup> )	476	450	446	473
Massa de agregado graúdo no concreto (kg/m <sup>3</sup> )	1.142	1.080	1.070	1.135
Volume do agregado graúdo ( volume real das partículas – sem vazios ) ( m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> concreto)	0,40	0,44	0,43	0,40

Para o cálculo do módulo de elasticidade equivalente do agregado graúdo natural com a camada de argamassa aderida, nas dosagens 2 e 3, foi usada a equação 1 com os seguintes dados:

$A_f$  – área da seção transversal da barra de fibra = 0,3 ( 30% de argamassa aderida).

$A$  – área da seção transversal da barra ( fibra mais matriz ) = 1,0.

$E_m$  – módulo de elasticidade da matriz ( agregado) = 80.000 MPa (agregado natural).

$E_f$  – módulo de elasticidade da fibra ( argamassa): valor obtido no ensaio dos corpos de prova, Tabela 14.

Dosagem 2 -  $E_f = 11.033$  MPa.

Dosagem 3 -  $E_f = 9.673$  MPa.

a) Cálculo do módulo de elasticidade equivalente do agregado graúdo natural com a camada de argamassa aderida, ( utilizando a equação 1):

$E_{equivalente}$  (dosagem 2) =  $80.000 \cdot [ (0,3 \cdot 11.033) / (1 \cdot 80.000) + (1 - (0,3 / 1)) ]$ .

$E_{equivalente}$  (dosagem 2) = **59.309 MPa**.

$E_{equivalente}$  (dosagem 3) =  $80.000 \cdot [ (0,3 \cdot 9.673) / (1 \cdot 80.000) + (1 - (0,3 / 1)) ]$ .

$E_{equivalente}$  (dosagem 3) = **58.901 MPa**.

b) Cálculo do módulo de elasticidade estimado para o agregado graúdo reciclado, considerando setenta por cento de agregados graúdos naturais com a camada de argamassa aderida e trinta por cento de partículas soltas de argamassa. Foi usado o modelo em paralelo:

$E_{agg}$  (reciclado -dosagem 2) =  $E_{equivalente}$  (dosagem 2) x 0,7 +  $E_f$  (dosagem 2) x 0,3.

$E_{agg}$  (reciclado-dosagem 2) =  $59.309 \times 0,7 + 11.033 \times 0,3 =$  **44.826 MPa**.

$E_{agg}$  (reciclado-dosagem 3) =  $E_{equivalente}$  (dosagem 3) x 0,7 +  $E_f$  (dosagem 3) x 0,3.

$E_{agg}$  (reciclado-dosagem 3) =  $58.901 \times 0,7 + 9.673 \times 0,3 =$  **44.132 MPa**.

Teoricamente, o valor do módulo de elasticidade do agregado graúdo reciclado teve uma diminuição de aproximadamente quarenta e quatro por cento em relação ao material natural, não foram encontradas informações na pesquisa bibliográfica sobre este valor mas ele é considerado adequado.

A utilização das fórmulas teóricas com os dados apresentados, forneceram os valores para os módulos de elasticidade do concreto, Tabela 16.

**Tabela 16 – Valores dos módulos de elasticidade dos modelos teóricos.**

<b>Modelo</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>			
	<b>Dosagem 1</b>	<b>Dosagem 2</b>	<b>Dosagem 3</b>	<b>Dosagem 4</b>
<b>Voight</b>	38.211	25.902	24.490	37.528
<b>Reuss</b>	15.883	16.509	14.562	14.260
<b>Hirsch</b>	22.439	20.165	18.264	20.667
<b>Couto ( modelo série )</b>	21.218	19.862	17.886	19.376
<b>Couto ( modelo paralelo )</b>	18.374	18.353	16.328	16.618

Analisando os resultados nota-se uma grande diferença entre os valores encontrados, assim como comentado na pesquisa de BARR et al (1995), os modelos de Voigt e Reuss forneceram os limites superior e inferior respectivamente. Os valores dos outros modelos ficaram com a mesma ordem de grandeza entre si. Em seu artigo este pesquisador também cita, que o modelo que teve os melhores resultados quando foram comparados os valores teóricos e os experimentais foi o de Couto.

Os resultados da Tabela 16, não podem ser comparados diretamente com os obtidos na pesquisa experimental, pois foram feitas algumas hipóteses e estas certamente os influenciaram. A comparação dos resultados encontrados na pesquisa teórica, com os da pesquisa bibliográfica e da experimental, foi realizada através das relações existentes entre os valores teóricos do módulo de elasticidade para os concretos reciclados (dosagens 2,3 e 4) pelo do concreto natural (dosagem 1), Tabela 17.

**Tabela 17 – Relação entre os módulos de elasticidade teóricos para o concreto reciclado pelo natural.**

<b>Modelo</b>	<b>Dosagem 1</b>	<b>Dosagem 2</b>	<b>Dosagem 3</b>	<b>Dosagem 4</b>
<b>Voight</b>	1,00	0,68	0,64	0,98
<b>Reuss</b>	1,00	1,04	0,92	0,90
<b>Hirsch</b>	1,00	0,90	0,81	0,92
<b>Couto ( modelo série )</b>	1,00	0,94	0,84	0,91
<b>Couto ( modelo paralelo )</b>	1,00	1,00	0,89	0,90

Os resultados da maioria dos modelos ficaram condicionado à utilização dos agregados reciclados, havendo uma diminuição em relação ao do material natural.

O modelo que mais se aproximou dos resultados esperados, conforme a pesquisa bibliográfica e o estudo da estrutura do concreto, para relação entre o concreto reciclado e o natural, foi o de Hirsch. Através dele é observado um decréscimo do valor do módulo de elasticidade proporcional ao aumento do nível de substituição pelo material reciclado.

Analisando os valores obtidos para o modelo de Hirsch, tem-se algumas conclusões:

- Comparando as relações entre as dosagens 1 e 2, é notada a grande influência que o agregado reciclado possui sobre o módulo de elasticidade do concreto, houve um decréscimo de dez por cento em relação ao material natural. Este valor é menor que a média encontrada para a mesma relação na pesquisa bibliográfica, mas ela já demonstra que existe uma diferença entre os materiais.
- Quando são comparados os resultados da dosagem 1 com a dosagem 4, dosagens que utilizaram agregados graúdos naturais, existe uma perda significativa no valor do módulo de elasticidade, de aproximadamente oito por cento. A única diferença entre as duas dosagens neste estudo teórico, é o valor do módulo de elasticidade da argamassa, que para dosagem 4 usou uma fração de agregado miúdo reciclado, seu valor teve um decréscimo de onze por cento em relação ao da dosagem 1, Tabela 14.



- O maior decréscimo no valor do módulo de elasticidade, como já era esperado, foi quando ambas frações do material reciclado foram usadas, sendo esta diminuição de dezenove por cento.

Em uma primeira análise, teoricamente é considerado que além do agregado graúdo reciclado, também a fração miúda reciclada influencia as propriedades do módulo de elasticidade, e que o grau desta é maior do que da fração graúda.

Ao se comparar todas as dosagens e o volume de cada material reciclado em cada dosagem, além do valor da diminuição do módulo de elasticidade para cada caso, nota-se que para uma quantidade de agregado miúdo reciclado menor que de graúdo reciclado, ocorre a mesma diminuição. Isto não era esperado, no estudo da estrutura do concreto, a influência do módulo de elasticidade do agregado graúdo foi considerado o fator condicionante para o módulo de elasticidade do concreto, sendo o da matriz de argamassa e da zona de transição colocados em segundo plano.

## **4. PESQUISA EXPERIMENTAL**

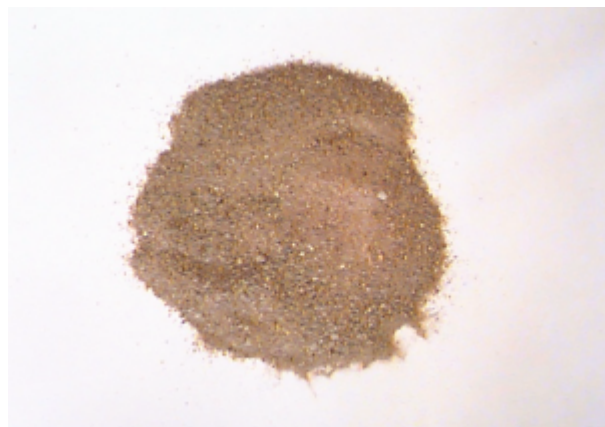
### **4.1. AGREGADOS**

#### **4.1.1. AGREGADOS MIÚDOS**

##### **a) AGREGADO MIÚDO NATURAL**

O agregado miúdo natural utilizado na dosagem do concreto, foi areia proveniente do rio Mogi-Guaçu – Região de São Carlos – SP. Foto 9.

Para ensaios de caracterização efetuados, foram tomados sempre como média de duas determinações: a massa específica, segundo a NBR 9776/87 foi de 2.680 kg/m<sup>3</sup> e a massa unitária, segundo a NBR 7251/82 foi de 1.430 kg/m<sup>3</sup>.



**Foto 9 – Agregado miúdo natural.**

A análise granulométrica, foi feita segundo a NBR 7217/87, tomando-se como média o valor de duas amostras, com os resultados apresentados na Tabela 18. Segundo esta norma, a areia pode ser classificada como média, Figura 7.

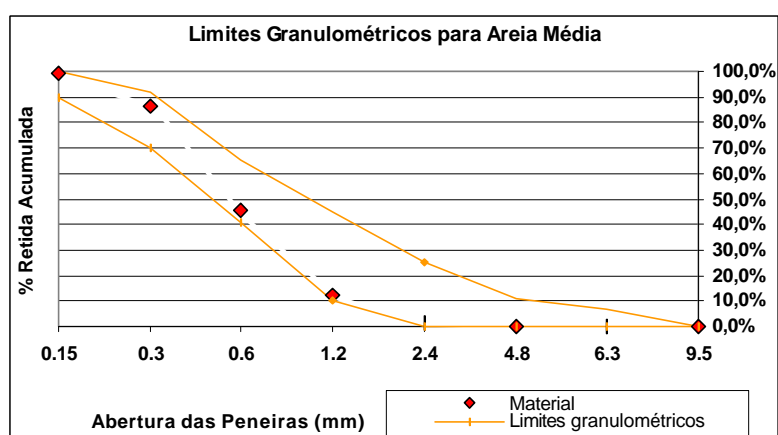
**Tabela 18 – Análise granulométrica do agregado miúdo natural – NBR 7217/87.**

Peneira ( mm )	Massa Retida ( g )	% Retida	% Retida Acumulada
9,5	0,0	0,0	0,0
6,3	0,0	0,0	0,0
4,8	0,5	0,1	0,1
2,4	7,0	1,4	1,5
1,2	51,5	10,5	12,0
0,6	165,0	33,6	45,6
0,3	199,0	40,5	86,2
0,15	65,50	13,3	99,5
Resíduo	2,5	0,5	100,0
Total	491,0	100,0	

**Dimensão máxima característica:  $D_{m\acute{a}x} = 2,4$  mm**

**Módulo de Finura: MF = 2,45**

**Classificação: areia média**



**Figura 7 – Classificação do agregado miúdo natural – NBR 7217/87.**

## **b) AGREGADO MIÚDO RECICLADO**

O agregado miúdo reciclado utilizado, foi o proveniente dos resíduos do concreto natural de referência (dosagem 1), que após triturados em um britador de mandíbulas e peneirados, forneceram o material para as dosagens. Foto 10.

Para ensaios de caracterização efetuados, foram tomados sempre como média de duas determinações: a massa específica, segundo a NBR 9776/87 foi de 2.480 kg/m<sup>3</sup> e a massa unitária, segundo a NBR 7251/82 foi de 1.330 kg/m<sup>3</sup>.



**Foto 10 – Agregado miúdo reciclado.**

A análise granulométrica, foi feita segundo a NBR 7217/87, tomando-se como média o valor de duas amostras, com os resultados apresentados na Tabela 19. Segundo os limites granulométricos para o agregado miúdo apresentados nesta norma, Figura 8, o agregado miúdo reciclado estudado nesta pesquisa pode ser classificado como areia grossa.

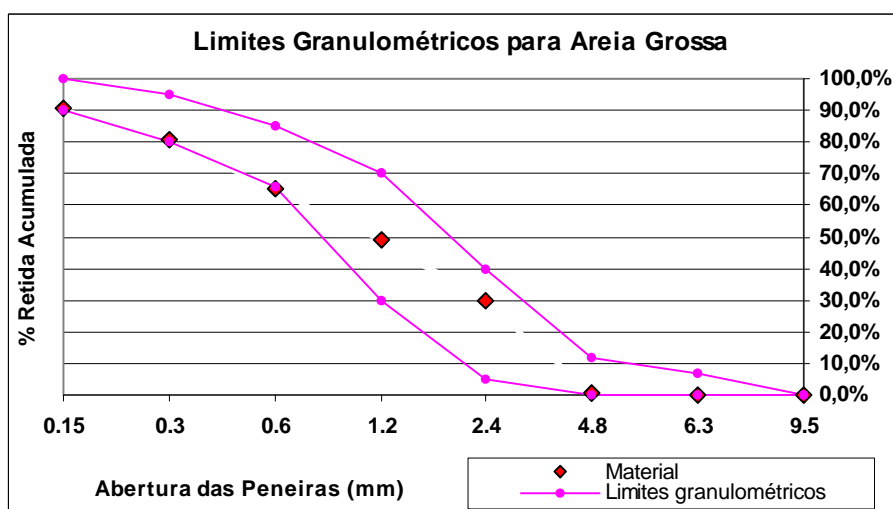
**Tabela 19 – Análise granulométrica do agregado miúdo reciclado – NBR 7217/87.**

Peneira ( mm )	Massa Retida ( g )	% Retida	% Retida Acumulada
9,5	0,0	0,0	0,0
6,3	0,0	0,0	0,0
4,8	2,8	0,5	0,5
2,4	164,0	29,5	30,0
1,2	107,2	19,3	49,3
0,6	89,4	16,1	65,4
0,3	86,1	15,5	80,9
0,15	54,7	9,8	90,7
Resíduo	52,4	9,4	100,0
Total	556,6	100,0	

**Dimensão máxima característica:  $D_{m\acute{a}x} = 4,8$  mm**

**Módulo de Finura: MF = 3,17**

**Classificação: areia grossa**



**Figura 8 – Classificação do agregado miúdo reciclado – NBR 7217/87.**

## 4.1.2. AGREGADOS GRAÚDOS

### a) AGREGADO GRAÚDO NATURAL

O agregado graúdo natural utilizado foi rocha britada de origem basáltica, da região de Araraquara –SP, Foto 11.

Para ensaios de caracterização efetuados, foram usadas as normas NBR 9937/87, NBR 9778/87 e a NBR 7251/82, que forneceram os seguintes valores, Tabela 20.



Foto 11 – Agregado graúdo natural.

Tabela 20 – Caracterização do agregado graúdo natural.

Propriedade	Resultado
Massa unitária – NBR 7251/82	1.480 kg/m <sup>3</sup>
Massa específica na condição seca – NBR 9937/87	2.830 kg/m <sup>3</sup>
Massa específica na condição saturada superfície seca – NBR 9937/87	2.880 kg/m <sup>3</sup>
Índice de vazios – NBR 9778/87	5,5 %
Absorção de água – NBR 9937/87	
30 min	1,4 %
24 horas	1,9 %

A análise granulométrica, foi feita segundo a NBR 7217/87, tomando-se como média o valor de duas amostras, com os resultados apresentados na Tabela 21.

**Tabela 21 – Análise granulométrica do agregado graúdo natural – NBR 7217/87.**

<b>Peneira ( mm )</b>	<b>Massa Retida ( g )</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Retida Acumulada</b>
<b>25</b>	0,0	0,0	0,0
<b>19</b>	26,5	0,5	0,5
<b>12,5</b>	1750,0	34,6	35,1
<b>9,5</b>	2250,0	44,5	79,6
<b>6,3</b>	920,0	18,2	97,8
<b>4,8</b>	87,5	1,7	99,5
<b>Resíduo</b>	19,0	0,4	100,0
<b>Total</b>	5053,0	100,0	
<b>Dimensão máxima característica: <math>D_{m\acute{a}x} = 19 \text{ mm}</math></b>			
<b>Módulo de Finura: MF = 6,80</b>			

## **b) AGREGADO GRAÚDO RECICLADO**

O agregado graúdo reciclado utilizado foi proveniente de resíduos do concreto natural de referência (dosagem 1), que após serem triturados e peneirados forneceram o material para as dosagens, Foto 12.

Para ensaios de caracterização efetuados, foram usadas as normas NBR 9937/87, NBR 9778/87 e a NBR 7251/82, que forneceram os seguintes valores, Tabela 22.



**Foto 12 – Agregado graúdo reciclado.**

**Tabela 22 – Caracterização do agregado graúdo reciclado.**

<b>Propriedade</b>	<b>Resultado</b>
<b>Massa unitária – NBR 7251/82</b>	1.290 kg/m <sup>3</sup>
<b>Massa específica na condição seca – NBR 9937/87</b>	2.480 kg/m <sup>3</sup>
<b>Massa específica na condição saturada superfície seca – NBR 9937/87</b>	2.610 kg/m <sup>3</sup>
<b>Índice de vazios – NBR 9778/87</b>	12,3 %
<b>Absorção de água – NBR 9937/87</b>	
<b>30 min</b>	4,4 %
<b>24 horas</b>	4,9 %

A análise granulométrica, foi feita segundo a NBR 7217/87, tomando-se como média o valor de duas amostras, com os resultados apresentados na Tabela 23.



**Tabela 23 – Análise granulométrica do agregado graúdo reciclado – NBR 7217/87.**

<b>Peneira ( mm )</b>	<b>Massa Retida ( g )</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Retida Acumulada</b>
<b>25</b>	0,0	0,0	0,0
<b>19</b>	0,0	0,0	0,0
<b>12,5</b>	100,0	2,0	2,0
<b>9,5</b>	1115,0	22,3	24,3
<b>6,3</b>	2265,0	45,4	69,7
<b>4,8</b>	1255,0	25,2	94,9
<b>Resíduo</b>	255,0	5,1	100,0
<b>Total</b>	4990,0	100,0	
<b>Dimensão máxima característica: <math>D_{m\acute{a}x} = 12,5</math> mm</b>			
<b>Módulo de Finura: MF = 6,19</b>			

## **4.2. CONCRETO**

Como já citado anteriormente, foram feitas quatro dosagens de concreto para esta pesquisa, uma com agregados naturais e as outras com reciclados, com as seguintes características, Tabela 24.

Como foi usado o mesmo traço para todas as dosagens, é necessário calcular algumas características teóricas para posterior análise, que são o consumo teórico de cimento por metro cúbico e o teor de argamassa, Tabela 25.

**Tabela 24 – Principais características das dosagens dos concretos**

Dosagem	Composição de agregados
<b>Traço ( 1 : a : p )</b> <b>1 : 1,4 : 2,4 : x = 0,41</b>	
<b>1</b> <b>( concreto natural –</b> <b>referência )</b>	agregado miúdo = areia natural. agregado graúdo = brita 1.
<b>2</b>	agregado miúdo = areia natural. agregado graúdo = agregado graúdo reciclado.
<b>3</b> <b>Obs: 1% de</b> <b>superplastificante</b>	agregado miúdo = 50% de areia natural + 50% de agregado miúdo reciclado. agregado graúdo = agregado reciclado.
<b>4</b> <b>Obs: 1% de</b> <b>superplastificante</b>	agregado miúdo = 50% de areia natural + 50% de agregado miúdo reciclado. agregado graúdo = brita 1.

**Tabela 25 – Características das dosagens.**

Dosagens	Consumo teórico de cimento ( kg/m <sup>3</sup> )	Teor de argamassa seca ( % )
<b>1</b>	476	50
<b>2</b>	450	50
<b>3</b>	446	50
<b>4</b>	473	50

**Onde:**  
**Obs: As fórmulas teóricas foram tiradas de HELENE & TERZIAN (1993) :**

**Consumo de cimento teórico:**  $C = 1000 / ( 1/g_c + a/g_a + p/g_p + a/c )$

**Teor de argamassa seca:**  $a = ( 1 + a ) / ( 1 + a + p )$

**Materiais- massa específica:**

**Cimento -**  $g_c = 3.120 \text{ kg/m}^3$

**Agregado miúdo natural -**  $g_a = 2.680 \text{ kg/m}^3$

**Agregado miúdo reciclado -**  $g_a = 2.480 \text{ kg/m}^3$

**Agregado graúdo natural-**  $g_p = 2.830 \text{ kg/m}^3$

**Agregado graúdo reciclado-**  $g_p = 2.480 \text{ kg/m}^3$

## 4.2.1. CONCRETO NATURAL ( DOSAGEM 1)

### a) CONCRETO FRESCO

Para a dosagem com agregados naturais, o material se comportou muito bem, apresentando trabalhabilidade e consistência satisfatórias. Para o concreto fresco foram usadas as seguintes normas: NBR 7223/92 e NBR 9833/87, que forneceram os seguintes valores, Tabela 26.

**Tabela 26 – Resultados dos ensaios no concreto fresco.**

<b>Propriedade</b>	<b>Resultado</b>
<b>Abatimento do tronco de cone – NBR 7223/92</b>	38 mm
<b>Massa específica – NBR 9833/87</b>	2.490 kg/m <sup>3</sup>
<b>Consumo real de cimento ( kg/m<sup>3</sup> )</b>	478

### b) CONCRETO ENDURECIDO

Para caracterização do concreto conforme a NBR 9778/87 foram usados três corpos de prova (10x20), onde a média dos resultados são apresentados na Tabela 27.

**Tabela 27 – Caracterização do concreto conforme a NBR 9778/87.**

<b>Propriedade</b>	<b>Resultado</b>
<b>Absorção de água por imersão</b>	5,2 %
<b>Índice de Vazios</b>	12,4 %
<b>Massa específica amostra seca</b>	2.379 kg/m <sup>3</sup>
<b>Massa específica amostra saturada</b>	2.504 kg/m <sup>3</sup>

Para o ensaio de resistência à compressão, foram usados os nove primeiros corpos de prova da dosagem, os resultados são apresentados na Tabela 28.

**Tabela 28 – Resistência à compressão aos 28 dias.**

<b>C.P</b>	<b>Carga de Ruptura ( kN )</b>	<b>Tensão ( MPa )</b>
<b>1</b>	839	47
<b>2</b>	891	50
<b>3</b>	842	48
<b>4</b>	856	48
<b>5</b>	859	49
<b>6</b>	828	47
<b>7</b>	831	47
<b>8</b>	828	47
<b>9</b>	833	47
<b>Média</b>	845	48
<b>Desvio Padrão</b>	21	1

Para os ensaios de módulo de elasticidade foram usados os procedimentos citados na metodologia, os resultados para os três corpos de prova são apresentados na Tabela 29.

**Tabela 29 – Módulo de Elasticidade do concreto.**

<b>C.P.</b>	<b>Módulo de Elasticidade ( MPa)</b>
<b>1</b>	36.196
<b>2</b>	39.367
<b>3</b>	36.346
<b>Média</b>	37.303
<b>Desvio Padrão</b>	1.789

**Onde:**  
**Módulo de elasticidade tangente inicial:**

$$E_0 = ( S_{sup} - S_{inf} ) / ( e_{sup} - e_{inf} )$$

$S_{inf}$  - 0,5 MPa.  
 $S_{sup}$  - 0,3xtensão de ruptura do concreto.  
 $e_{inf}$  - alongamento referente à tensão 0,5 MPa.  
 $e_{sup}$  - alongamento referente à tensão  $S_{sup}$ .

## 4.2.2. CONCRETO RECICLADO ( DOSAGEM 2)

### a) CONCRETO FRESCO

Para esta dosagem, houve uma grande perda de trabalhabilidade e consistência em relação à dosagem anterior, o material ficou muito seco, certamente devido à grande absorção de água do agregado reciclado. Para o concreto fresco foram usadas as seguintes normas: NBR 7223/92 e NBR 9833/87, que forneceram os seguintes valores, Tabela 30.

**Tabela 30 – Resultados dos ensaios no concreto fresco.**

<b>Propriedade</b>	<b>Resultado</b>
<b>Abatimento do tronco de cone – NBR 7223/92</b>	8 mm
<b>Massa específica – NBR 9833/87</b>	2.410 kg/m <sup>3</sup>
<b>Consumo real de cimento ( kg/m<sup>3</sup> )</b>	462

### b) CONCRETO ENDURECIDO

Para caracterização do concreto conforme a NBR 9778/87 foram usados três corpos de prova (10x20), onde a média dos resultados são apresentados na Tabela 31.

**Tabela 31 – Caracterização do concreto conforme a NBR 9778/87.**

<b>Propriedade</b>	<b>Resultado</b>
<b>Absorção de água por imersão</b>	6,18 %
<b>Índice de Vazios</b>	14,1 %
<b>Massa específica amostra seca</b>	2.266 kg/m <sup>3</sup>
<b>Massa específica amostra saturada</b>	2.406 kg/m <sup>3</sup>

Para o ensaio de resistência à compressão, foram usados os nove corpos de prova da dosagem, os resultados são apresentados na Tabela 32.

**Tabela 32 – Resistência à compressão aos 28 dias.**

<b>C.P</b>	<b>Carga de Ruptura ( kN )</b>	<b>Tensão ( MPa )</b>
<b>1</b>	853	48
<b>2</b>	867	49
<b>3</b>	838	47
<b>4</b>	872	49
<b>5</b>	863	49
<b>6</b>	899	51
<b>7</b>	859	49
<b>8</b>	910	51
<b>9</b>	892	50
<b>Média</b>	873	49
<b>Desvio Padrão</b>	23	1

Para os ensaios de módulo de elasticidade foram usados os procedimentos citados na metodologia, os resultados para os três corpos de prova são apresentados na Tabela 33.

**Tabela 33 – Módulo de Elasticidade do concreto.**

<b>C.P.</b>	<b>Módulo de Elasticidade ( MPa)</b>
<b>1</b>	34.813
<b>2</b>	32.575
<b>3</b>	32.340
<b>Média</b>	33.243
<b>Desvio Padrão</b>	1.365

**Onde:**  
**Módulo de elasticidade tangente inicial:**

$$E_0 = ( S_{sup} - S_{inf} ) / ( e_{sup} - e_{inf} )$$

**S<sub>inf</sub> - 0,5 MPa.**  
**S<sub>sup</sub> - 0,3xtensão de ruptura do concreto.**  
**e<sub>inf</sub> - alongamento referente à tensão 0,5 MPa.**  
**e<sub>sup</sub> - alongamento referente à tensão S<sub>sup</sub>.**

### **4.2.3. CONCRETO RECICLADO ( DOSAGEM 3)**

#### **a) CONCRETO FRESCO**

No início optou-se na total substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado, durante um teste piloto notou-se que seria impossível realizar o concreto mantendo as características do traço básico, que foi usado nas dosagens anteriores, mesmo através da utilização de aditivo.

Para esta pesquisa a idéia inicial da substituição do agregado miúdo natural foi mantida, mas diminuiu-se a porcentagem de agregado miúdo reciclado pela metade, ou seja, o agregado miúdo desta dosagem foi uma composição de cinquenta por cento de cada material, agregado natural e reciclado. Mesmo assim foi necessário a utilização de um aditivo superplastificante, RX 3000, na quantidade de 1% sobre a massa de cimento, também foi feito uma correção da quantidade de água para manter a mesma relação água/cimento do traço básico. Apesar do uso do aditivo, houve uma grande perda de trabalhabilidade e consistência em relação à dosagem 1, o material ficou muito seco, certamente devido à grande absorção de água dos agregados reciclados, miúdo e graúdo.

Para o concreto fresco foram usadas as seguintes normas: NBR 7223/92 e NBR 9833/87, que forneceram os seguintes valores, Tabela 34.

**Tabela 34 – Resultados dos ensaios no concreto fresco.**

<b>Propriedade</b>	<b>Resultado</b>
<b>Abatimento do tronco de cone – NBR 7223/92</b>	9 mm
<b>Massa específica – NBR 9833/87</b>	2.330 kg/m <sup>3</sup>
<b>Consumo real de cimento ( kg/m<sup>3</sup> )</b>	447

#### **b) CONCRETO ENDURECIDO**

Para caracterização do concreto conforme a NBR 9778/87 foram usados três corpos de prova (10x20), onde a média dos resultados são apresentados na Tabela 35.

**Tabela 35 – Caracterização do concreto conforme a NBR 9778/87.**

<b>Propriedade</b>	<b>Resultado</b>
<b>Absorção de água por imersão</b>	6,82 %
<b>Índice de Vazios</b>	14,8 %
<b>Massa específica amostra seca</b>	2.168 kg/m <sup>3</sup>
<b>Massa específica amostra saturada</b>	2.316 kg/m <sup>3</sup>

Para o ensaio de resistência à compressão, foram usados os nove corpos de prova da dosagem, os resultados são apresentados na Tabela 36.

**Tabela 36 – Resistência à compressão aos 28 dias.**

<b>C.P</b>	<b>Carga de Ruptura ( kN )</b>	<b>Tensão ( MPa )</b>
<b>1</b>	879	50
<b>2</b>	773	44
<b>3</b>	785	44
<b>4</b>	760	43
<b>5</b>	767	43
<b>6</b>	867	49
<b>7</b>	878	50
<b>8</b>	776	44
<b>9</b>	862	49
<b>Média</b>	816	46
<b>Desvio Padrão</b>	53	3

Para os ensaios de módulo de elasticidade foram usados os procedimentos citados na metodologia, os resultados para os três corpos de prova são apresentados na Tabela 37.



**Tabela 37 – Módulo de Elasticidade do concreto.**

<b>C.P.</b>	<b>Módulo de Elasticidade ( MPa)</b>
<b>1</b>	29.558
<b>2</b>	28.929
<b>3</b>	27.788
<b>Média</b>	28.758
<b>Desvio Padrão</b>	897

**Onde:**  
**Módulo de elasticidade tangente inicial:**

$$E_0 = ( S_{sup} - S_{inf} ) / ( e_{sup} - e_{inf} )$$

$S_{inf}$  - **0,5 MPa.**  
 $S_{sup}$  - **0,3xtensão de ruptura do concreto.**  
 $e_{inf}$  - **alongamento referente à tensão 0,5 MPa.**  
 $e_{sup}$  - **alongamento referente à tensão  $S_{sup}$ .**

#### **4.2.4. CONCRETO RECICLADO ( DOSAGEM 4)**

##### **a) CONCRETO FRESCO**

Comentários semelhantes aos realizados para a dosagem 3 podem ser feitos para esta dosagem, mesmo com a utilização do agregado graúdo natural, através do teste piloto notou-se a impossibilidade do uso da total substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado, assim foi considerada a mesma composição de material para o agregado miúdo realizada na dosagem anterior. Como forma de comparação, foi usada a mesma quantidade de aditivo da dosagem 3, após o ensaio de abatimento comprovou-se que existiu um excesso deste material na mistura, mas não foi feita nenhuma correção na quantidade de aditivo.

Para o concreto fresco foram usadas as seguintes normas: NBR 7223/92 e NBR 9833/87, que forneceram os seguintes valores, Tabela 38.

**Tabela 38 – Resultados dos ensaios no concreto fresco.**

<b>Propriedade</b>	<b>Resultado</b>
<b>Abatimento do tronco de cone – NBR 7223/92</b>	89 mm
<b>Massa específica – NBR 9833/87</b>	2.440 kg/m <sup>3</sup>
<b>Consumo real de cimento ( kg/m<sup>3</sup> )</b>	468

## **b) CONCRETO ENDURECIDO**

Para caracterização do concreto conforme a NBR 9778/87 foram usados três corpos de prova (10x20), onde a média dos resultados são apresentados na Tabela 39.

**Tabela 39 – Caracterização do concreto conforme a NBR 9778/87.**

<b>Propriedade</b>	<b>Resultado</b>
<b>Absorção de água por imersão</b>	6,03 %
<b>Índice de Vazios</b>	13,55 %
<b>Massa específica amostra seca</b>	2.247 kg/m <sup>3</sup>
<b>Massa específica amostra saturada</b>	2.382 kg/m <sup>3</sup>

Para o ensaio de resistência à compressão, foram usados os nove corpos de prova da dosagem, os resultados são apresentados na Tabela 40.

**Tabela 40 – Resistência à compressão aos 28 dias.**

<b>C.P</b>	<b>Carga de Ruptura ( kN )</b>	<b>Tensão ( MPa )</b>
<b>1</b>	689	39
<b>2</b>	784	44
<b>3</b>	796	45
<b>4</b>	763	43
<b>5</b>	785	44
<b>6</b>	726	41
<b>7</b>	781	44
<b>8</b>	770	44
<b>9</b>	754	43
<b>Média</b>	761	43
<b>Desvio Padrão</b>	34	2

Para os ensaios de módulo de elasticidade foram usados os procedimentos citados na metodologia, os resultados para os três corpos de prova são apresentados na Tabela 41.

**Tabela 41 – Módulo de Elasticidade do concreto.**

<b>C.P.</b>	<b>Módulo de Elasticidade ( MPa)</b>
<b>1</b>	33.845
<b>2</b>	33.801
<b>3</b>	32.053
<b>Média</b>	33.233
<b>Desvio Padrão</b>	1.022
<p><b>Onde:</b>  <b>Módulo de elasticidade tangente inicial:</b></p> $E_0 = ( S_{sup} - S_{inf} ) / ( e_{sup} - e_{inf} )$ <p><math>S_{inf}</math> - 0,5 MPa.  <math>S_{sup}</math> - 0,3xtensão de ruptura do concreto.  <math>e_{inf}</math> - alongamento referente à tensão 0,5 MPa.  <math>e_{sup}</math> - alongamento referente à tensão <math>S_{sup}</math>.</p>	

## **5. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **5.1. AGREGADOS**

Na parte experimental foi notada uma grande diferença entre os agregados naturais e os reciclados, principalmente em relação à heterogeneidade do material. Os agregados reciclados, conforme constatado na pesquisa bibliográfica, são muito influenciados pela argamassa, seja em pedaços ou aderida na superfície do agregado graúdo natural. Devido esta argamassa, sua densidade é menor que a dos naturais, e o valor de absorção de água maior. Isto demonstra que estes materiais devem ser vistos como novos, ou seja, é necessário desenvolver uma técnica própria para sua utilização, pois suas propriedades influenciam muito as características do concreto, seja no estado fresco ou endurecido.

Comparando os resultados da análise experimental com os da pesquisa bibliográfica, é notada uma grande semelhança entre os valores obtidos para o material usado neste trabalho, e os encontrados pelos pesquisadores estrangeiros. Este fato é considerado de muita importância, pois mostra que os mesmos conceitos aplicados em outros países podem ser usados no Brasil.

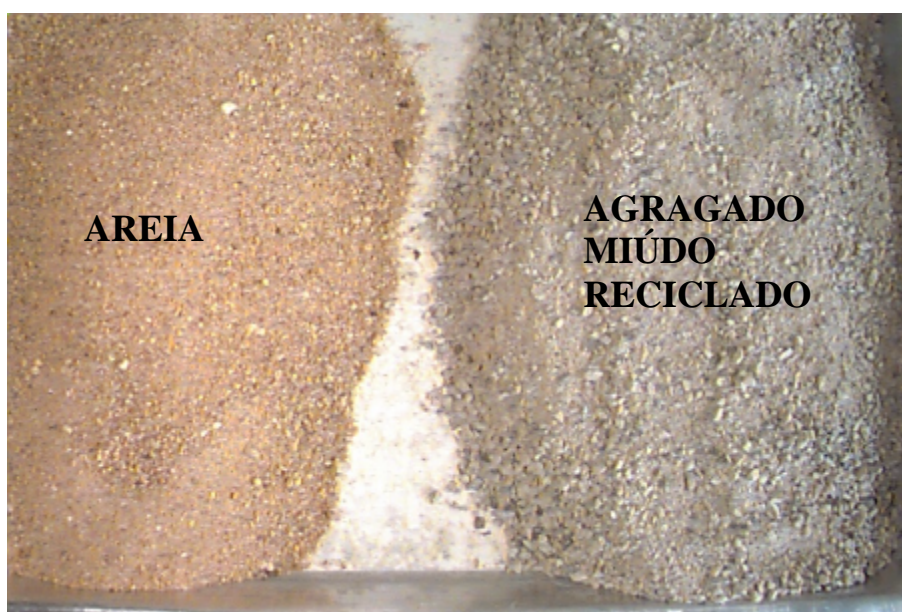
#### **5.1.1. AGREGADOS MIÚDOS**

##### **a) ANÁLISE VISUAL**

A análise visual dos dois tipos de agregados miúdos, o natural e o reciclado, mostrou uma grande diferença entre eles, principalmente relacionada ao tipo de partículas, Foto 13.

O agregado natural (areia) possui a coloração bege e partículas arredondadas, relacionado ao processo de intemperismo.

Para o agregado reciclado, as características visuais mudam bastante, ele é de cor cinza claro pois é originado de resíduos de argamassa. Visualmente foram notados alguns grãos maiores de forma lamelar, retidos na peneira com abertura de 2,4 mm, e uma grande quantidade de finos com características semelhantes ao cimento. Na bibliografia foi constatado que alguns autores citam sobre partículas de cimento não hidratado, neste estudo não foi analisado experimentalmente isto, mas é provável que existam no material.



**Foto 13 – Agregados miúdos.**

O agregado reciclado é também muito mais áspero que o natural, isto é relacionado ao tipo de processo que o originou. Enquanto a areia é fruto de milhares de anos de um processo natural dentro de rios, o agregado reciclado, assim como a extração de rochas basálticas, é o produto de uma britagem de pedaços maiores.

HANSEN (1985), cita que os agregados miúdos reciclados são mais angulares que os naturais e possuem partículas lamelares, além de serem mais ásperos, isto também foi comprovado visualmente para o material deste trabalho, como já comentado, principalmente para a fração retida na peneira 2,4 mm (30

porcento da massa retida – Tabela 19). Um resultado semelhante foi obtido por VAN ACKER (1996) e ABOURIZK & RASHWAN (1997).

## **b) MASSA ESPECÍFICA E MASSA UNITÁRIA**

Devido a grande quantidade de argamassa moída existente no agregado reciclado, como já era esperado, conforme a pesquisa bibliográfica, que sua densidade seria menor que a do agregado natural, Tabela 42.

**Tabela 42 – Massa específica e massa unitária dos agregados miúdos.**

<b>Propriedade</b>	<b>Massa específica NBR 9776/87</b>	<b>Massa unitária NBR 7251/82</b>
<b>Agregado natural (areia)</b>	2.680 kg/m <sup>3</sup>	1.430 kg/m <sup>3</sup>
<b>Agregado reciclado</b>	2.480 kg/m <sup>3</sup>	1.330 kg/m <sup>3</sup>
<b>Relação agregado reciclado/agregado natural</b>	0,93	0,93

Neste estudo a relação entre as massas do agregado reciclado e do natural ficou com o valor de 0,93, ou seja, a massa específica do agregado reciclado é sete por cento menor que a do natural. Como o material que originou as partículas do agregado miúdo reciclado, são de pedaços de argamassa, é esperado que para outros tipos de dosagens esta diferença entre o material natural e o reciclado não mude muito.

HANSEN (1985), analisando o resultado de várias pesquisas apresenta para o agregado miúdo reciclado, uma diminuição média de onze por cento no valor da massa específica em relação ao material natural, resultado semelhante ao da pesquisa de RAVINDRARAJAH et al (1987).

TOPÇU (1997) cita a faixa de valores para a massa específica do agregado miúdo reciclado apresentada pela Sociedade de Construtores Prediais do Japão B.C.S.J. (1977), para esta recomendação o valor desta propriedade está entre 1.970 kg/m<sup>3</sup> a 2.140 kg/m<sup>3</sup>. Fazendo a relação do limite superior desta faixa de valores com

o do material natural deste trabalho, encontra-se uma diminuição de vinte por cento para o agregado reciclado. É considerado que esta faixa de valores possui os limites muito baixos, quando comparados com os dados experimentais encontrados e de pesquisas mais recentes. Existe uma proposta de normalização para aumentar estes valores, para o mínimo de  $2.000 \text{ kg/m}^3$ .

Comparando os resultados encontrados na pesquisa bibliográfica e na análise experimental, para a diminuição do valor da massa específica do agregado miúdo reciclado pelo natural, considera-se que ambos estão com a mesma ordem de grandeza.

### **c) GRANULOMETRIA**

A maior diferença entre o material natural e o reciclado foi na granulometria. Para o primeiro existe uma boa distribuição e sua classificação foi de areia média. Já para o reciclado houve uma grande dispersão de partículas, onde existiu uma maior quantidade de finos em comparação ao material natural, mesmo assim ele foi caracterizado como areia grossa. As diferenças entre os dois materiais podem ser vistas na Tabela 43 e na Figura 9.

O agregado miúdo reciclado possuiu uma dimensão de partículas maior do que o natural. Neste estudo as partículas que saíram do britador, sofreram somente um processo de peneiramento para separar as frações miúda e graúda. Sabe-se que a granulometria destas frações depende muito das características do britador usado, neste caso foi um britador de mandíbulas. Como a abertura da mandíbula deste britador pode ser regulada, as características dos resíduos que ele gera são influenciadas pela sua disposição. Não é objetivo desta pesquisa estudar o tipo de processo de britagem, e sua influência nas características do agregado e do concreto reciclado, mas é conveniente que isto seja realizado em futuros trabalhos.

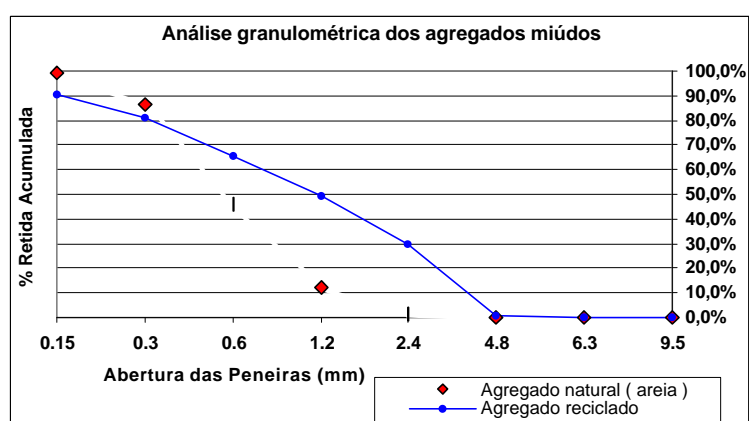
**Tabela 43 – Análise granulométrica dos agregados miúdos - NBR 7217/87.**

Peneira (mm)	Agregado Natural			Agregado Reciclado		
	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Massa Retida ( g )	% Retida	% Retida Acumulada
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4,8	0,5	0,1	0,1	2,8	0,5	0,5
2,4	7,0	1,4	1,5	164,0	29,5	30,0
1,2	51,5	10,5	12,0	107,2	19,3	49,3
0,6	165,0	33,6	45,6	89,4	16,1	65,4
0,3	199,0	40,5	86,2	86,1	15,5	80,9
0,15	65,50	13,3	99,5	54,7	9,8	90,7
Resíduo	2,5	0,5	100,0	52,4	9,4	100,0
Total	491,0	100,0		556,6	100,0	

**Dimensão máxima característica:** agregado natural -  $D_{m\acute{a}x} = 2,4$  mm.  
 agregado reciclado -  $D_{m\acute{a}x} = 4,8$  mm.

**Módulo de Finura:** agregado natural - MF = 2,45.  
 agregado reciclado - MF = 3,16.

**Classificação:** agregado natural - areia média.  
 agregado reciclado - areia grossa.



**Figura 9 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos.**



Uma das coisas que mais chamou atenção foi a grande quantidade de finos do agregado reciclado, passaram pela peneira 0,15 mm quase dez por cento da massa do ensaio, este valor para o material natural ficou em torno de meio por cento. Visualmente este material se assemelha ao cimento, algumas pesquisas consultadas citam sobre a existência de partículas de cimento não hidratadas, como não é o objetivo deste trabalho analisar este material para conferir suas propriedades aglomerantes, ele foi considerado como um resíduo.

Quando visualmente foi constatado a presença desta grande quantidade de finos no material reciclado, antecipadamente ao teste piloto das dosagens 3 e 4, intuitivamente se achou difícil a utilização da substituição total da fração miúda do material natural.

Conforme HANSEN (1985), os procedimentos japoneses para a utilização dos agregados reciclados, citam a existência de partículas não hidratadas de cimento, e até recomendam que o tempo de armazenamento deste material seja pequeno para que não exista a hidratação destas partículas com posterior perda do material. Em suas conclusões ele não aceita esta hipótese, pois apresenta dados que a quantidade destas partículas não hidratadas é tão pequena, que seu grau de influência é mínimo.

HANSEN (1985) e ABOURIZK & RASHWAN (1997) encontraram o mesmo resultado deste trabalho, que as partículas do agregado miúdo reciclado são mais grossas que do natural.

RAVINDRARAJAH et al (1987) ao compararem a granulometria do agregado miúdo reciclado pelo natural, notaram que o material reciclado ficou com partículas mais finas do que o natural.

Sempre existirá diferença entre resultados de diferentes pesquisas, isto mostra que o processo de britagem influencia muito as características granulométricas do agregado. Existem vários tipos de equipamentos para britar, como britador de mandíbulas, cone e martelo, cada um possui características diferentes e conferem ao produto uma qualidade específica.

Apesar de algumas diferenças entre os resultados experimentais e os das pesquisas estrangeiras, foi considerado que a ordem de grandeza e principalmente os conceitos envolvidos são semelhantes.

## 5.1.2. AGREGADOS GRAÚDOS

### a) ANÁLISE VISUAL

A análise visual dos dois tipos de agregados, o natural (brita 1) e o reciclado, comprovou a principal diferença existente entre eles que foi citada em todos os artigos da pesquisa bibliográfica. Os agregados reciclados possuem uma grande quantidade de argamassa do concreto original aderida nos agregados naturais, além de pedaços soltos de argamassa. Sua coloração é cinza claro, como no caso do agregado miúdo reciclado, principalmente devido a grande quantidade de argamassa existente. O tamanho das partículas do agregado reciclado ficaram menores que do material natural, isto depende muito do tipo de processo de britagem, neste caso houve uma diminuição da dimensão máxima característica, Foto 14.



Foto 14 – Agregados graúdos.

HANSEN & NARUD (1983), estudaram a influência da resistência do concreto original e do tamanho das partículas do agregado, sobre a porcentagem de argamassa aderida à superfície dos agregados graúdos naturais. Em suas conclusões, eles citam que não existe influência da resistência do concreto que originou o resíduo, mas o tamanho das partículas condiciona a quantidade de argamassa que ficará aderida, Tabela 44. Partículas menores possuem uma maior porcentagem de argamassa aderida.

**Tabela 44 – Porcentagem em relação ao volume total da partícula, de argamassa aderida sobre a superfície dos agregados graúdos naturais (HANSEN & NARUD (1983)).**

<b>Tipo de Agregado</b>	<b>Fração (mm)</b>	<b>Porcentagem</b>
<b>Natural</b>	<b>4-8</b>	0
	<b>8-16</b>	0
	<b>16-32</b>	0
<b>Reciclado ( A )</b>	<b>4-8</b>	58
	<b>8-16</b>	38
	<b>16-32</b>	35
<b>Reciclado ( M )</b>	<b>4-8</b>	64
	<b>8-16</b>	39
	<b>16-32</b>	28
<b>Reciclado ( B )</b>	<b>4-8</b>	61
	<b>8-16</b>	39
	<b>16-32</b>	25
<b>Resistência do concreto original:</b>		
<b>A – Dosagem de alta resistência (a/c = 0,40)</b>		
<b>M – Dosagem de média resistência (a/c = 0,70)</b>		
<b>B – Dosagem de baixa resistência (a/c = 1,20)</b>		

Em todas as pesquisas consultadas, foi citada a existência da camada de argamassa aderida ao agregado natural, além dos pedaços soltos de argamassa. Apesar de existirem vários processos de britagem, a aparência visual do agregado graúdo reciclado para todas as pesquisas é semelhante à encontrada neste trabalho.

## b) MASSA ESPECÍFICA E MASSA UNITÁRIA

Devido a grande quantidade de argamassa aderida nos agregados naturais e partículas de argamassa no agregado reciclado, já era esperado, conforme a pesquisa bibliográfica, que sua densidade seria menor que a do agregado natural, Tabela 45.

**Tabela 45 – Massa específica e massa unitária dos agregados graúdos.**

Propriedade	Massa unitária – NBR 7251/82	Massa específica na condição seca NBR 9937/87	Massa específica na condição saturada superfície seca – NBR 9937/87
<b>Agregado Natural ( brita 1)</b>	1.480 kg/m <sup>3</sup>	2.830 kg/m <sup>3</sup>	2.880 kg/m <sup>3</sup>
<b>Agregado reciclado</b>	1.290 kg/m <sup>3</sup>	2.480 kg/m <sup>3</sup>	2.610 kg/m <sup>3</sup>
<b>Relação agregado reciclado/agregado natural</b>	0,87	0,88	0,91

Neste estudo a relação entre as massas específicas do agregado reciclado e do natural ficou com o valor médio de 0,90, ou seja, a densidade do agregado reciclado é dez por cento menor que a do natural.

HANSEN & NARUD (1983), estudaram a influência da resistência do concreto original e do tamanho das partículas do agregado, na massa específica do agregado graúdo reciclado. Em suas conclusões eles citam que não existe influência da qualidade do resíduo nesta propriedade, mas o tamanho das partículas condiciona este valor. Como já apresentado, partículas menores possuem uma maior quantidade de argamassa aderida no agregado natural, e portanto um menor valor de massa específica, Tabela 46.

**Tabela 46 – Valor da massa específica para agregados graúdos, reciclados e naturais ( HANSEN & NARUD (1983)).**

<b>Tipo de Agregado</b>	<b>Fração (mm)</b>	<b>Massa específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Relação agregado reciclado/agregado natural</b>
<b>Natural</b>	<b>4-8</b>	2.500	1,00
	<b>8-16</b>	2.620	1,00
	<b>16-32</b>	2.610	1,00
<b>Reciclado ( A )</b>	<b>4-8</b>	2.340	0,94
	<b>8-16</b>	2.450	0,94
	<b>16-32</b>	2.490	0,95
<b>Reciclado ( M )</b>	<b>4-8</b>	2.350	0,94
	<b>8-16</b>	2.440	0,93
	<b>16-32</b>	2.480	0,95
<b>Reciclado ( B )</b>	<b>4-8</b>	2.340	0,94
	<b>8-16</b>	2.420	0,92
	<b>16-32</b>	2.490	0,95
<b>Resistência do concreto original:</b>			
<b>A – Dosagem de alta resistência (a/c = 0,40)</b>			
<b>M – Dosagem de média resistência (a/c = 0,70)</b>			
<b>B – Dosagem de baixa resistência (a/c = 1,20)</b>			

Analisando o valor para as relações apresentadas por HANSEN & NARUD (1983), quando é variado o tamanho das partículas e a resistência do concreto original, é notado que praticamente todos ficaram com o mesmo valor. Pode-se concluir deste estudo:

- A resistência do concreto original não condiciona o valor da massa específica do agregado graúdo reciclado.
- O tamanho das partículas influencia o valor da massa específica do material reciclado, mas a relação entre frações de mesmo tamanho entre o material reciclado e o natural praticamente é igual.
- Existe uma diminuição média de seis por cento, entre o valor da massa específica do material reciclado em comparação ao natural.

RAVINDRARAJAH et al (1987), obtiveram o resultado de  $2.490 \text{ kg/m}^3$  para o valor da massa específica do agregado graúdo reciclado, que é bastante semelhante ao encontrado neste trabalho ( $2.480 \text{ kg/m}^3$ ). A relação entre o valor encontrado para o material reciclado e o natural, foi de 0,93.

ABOURIZK & RASHWAN (1997), citam que o tempo de armazenamento e o grau de hidratação do agregado, influenciam pouco no valor da massa específica. Mas existe uma diminuição deste valor quando comparado com o material natural, de aproximadamente dez por cento.

TOPÇU (1997) cita a faixa de valores para a massa específica do agregado graúdo reciclado apresentada pela Sociedade de Construtores Prediais do Japão B.C.S.J. (1977), para esta recomendação o valor desta propriedade está entre  $2.120 \text{ kg/m}^3$  a  $2.430 \text{ kg/m}^3$ . Fazendo a relação do limite superior desta faixa de valores com o do material natural deste trabalho, encontra-se uma diminuição de quatorze por cento para o agregado reciclado. Existe uma proposta para aumentar o limite inferior para  $2.200 \text{ kg/m}^3$ .

Analisando os resultados encontrados na pesquisa bibliográfica e na experimental, considerou-se que existe uma diminuição do valor da massa específica do agregado reciclado em relação ao natural, e que esta possui uma ordem de grandeza de dez por cento. A comparação dos valores, mais uma vez mostrou que existe uma similaridade entre os materiais estudados pelos pesquisadores estrangeiros e o deste trabalho.

### **c) ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS**

O agregado natural é a fase da estrutura do concreto com o maior valor de densidade, e portanto com o menor índice de vazios e poros. A porosidade de um concreto é influenciada pelas características da matriz de argamassa, que possui vazios capilares que podem ou não estarem conectados. Portanto como também foi constatado na pesquisa bibliográfica, os agregados reciclados devido a presença de uma grande quantidade de argamassa, possuem uma absorção de água incrivelmente maior do que um agregado natural, neste estudo isto pode-se notar pelos resultados obtidos, Tabela 47.

**Tabela 47 – Absorção de água e índice de vazios.**

Propriedade	Índice de vazios – NBR 9778/87	Absorção de água NBR - 9937/87	
		30 min	24 horas
<b>Agregado natural</b>	5,5 %	1,4 %	1,9 %
<b>Agregado reciclado</b>	12,3 %	4,4 %	4,9 %
<b>Relação agregado reciclado/agregado natural</b>	2,24	3,14	2,58

Analisando os resultados para a absorção de água, nota-se que nos primeiros minutos praticamente noventa por cento da água total absorvida foi assimilada pelo agregado reciclado, este valor para o natural foi de setenta e quatro por cento. A compreensão desta propriedade do material reciclado é muito importante, pois ela condiciona à uma perda de trabalhabilidade considerável no concreto fresco.

HANSEN & NARUD (1983), estudaram a influência da resistência do concreto original e do tamanho das partículas do agregado, na absorção de água do agregado graúdo reciclado. Em suas conclusões eles citam que não existe influência da qualidade do resíduo nesta propriedade, mas o tamanho das partículas condiciona este valor. Como já apresentado, partículas menores possuem uma maior quantidade de argamassa aderida, e portanto possuem uma maior absorção de água, Tabela 48.

Analisando o valor para as relações apresentadas por HANSEN & NARUD (1983). Pode-se concluir deste estudo:

- A resistência do concreto original não condiciona o valor da absorção de água do agregado graúdo reciclado, os valores tiveram a mesma ordem de grandeza.
- O tamanho das partículas influencia o valor da absorção de água do material reciclado, onde os maiores valores foram para as partículas menores.
- A fração com características granulométricas que o material desta pesquisa se enquadra é a 8-16 mm, do estudo de HANSEN & NARUD

(1983). Para a dosagem com a relação água/cimento de 0,40 (bem próxima da usada na parte experimental deste estudo –  $a/c=0,41$ ), o valor da relação entre a absorção do material reciclado pelo natural foi de 2,78, que é semelhante ao encontrado na pesquisa experimental, 2,58.

**Tabela 48 – Valor da absorção de água para agregados graúdos, reciclados e naturais( HANSEN & NARUD (1983)).**

<b>Tipo de Agregado</b>	<b>Fração (mm)</b>	<b>Absorção de água (%)</b>	<b>Relação agregado reciclado/agregado natural</b>
<b>Natural</b>	<b>4-8</b>	3,7	1,00
	<b>8-16</b>	1,8	1,00
	<b>16-32</b>	0,8	1,00
<b>Reciclado ( A )</b>	<b>4-8</b>	8,5	2,30
	<b>8-16</b>	5,0	2,78
	<b>16-32</b>	3,8	4,75
<b>Reciclado ( M )</b>	<b>4-8</b>	8,7	2,35
	<b>8-16</b>	5,4	3,00
	<b>16-32</b>	4,0	5,00
<b>Reciclado ( B )</b>	<b>4-8</b>	8,7	2,35
	<b>8-16</b>	5,7	3,17
	<b>16-32</b>	3,7	4,63
<b>Resistência do concreto original:</b>			
<b>A – Dosagem de alta resistência (a/c = 0,40)</b>			
<b>M – Dosagem de média resistência (a/c = 0,70)</b>			
<b>B – Dosagem de baixa resistência (a/c = 1,20)</b>			

Conforme ABOURIZK & RASHWAN (1997), a absorção de água é maior para agregados reciclados com maiores graus de hidratação. O tempo de armazenamento influenciou pouco esta propriedade. As relações encontradas para o valor da absorção de água do agregado reciclado pelo natural, foram semelhantes em ordem de grandeza às obtidas neste trabalho.

LEVY (1997), apresenta o valor máximo aceitável da recomendação japonesa para a absorção de água do agregado graúdo reciclado, este valor é de sete por cento. Analisando todos os valores encontrados, da pesquisa bibliográfica e da análise experimental, nenhum deles ultrapassou este limite.



Foi considerado que a ordem de grandeza dos valores encontrados, da pesquisa bibliográfica e da análise experimental, são semelhantes. Portanto os mesmos conceitos aplicados nas pesquisas estrangeiras podem ser usados no Brasil.

As características de absorção de água em um agregado, influência muito o grau de trabalhabilidade na massa fresca do concreto. Como o agregado reciclado possui uma maior absorção, quando comparado com o material natural, ao ser utilizado uma mesma quantidade de água em duas dosagens, que somente se diferenciarem pelo tipo de agregado usado, certamente a que teve a fração do material reciclado será mais seca. Isto foi comprovado durante a moldagem dos corpos de prova deste trabalho.

#### **d) GRANULOMETRIA**

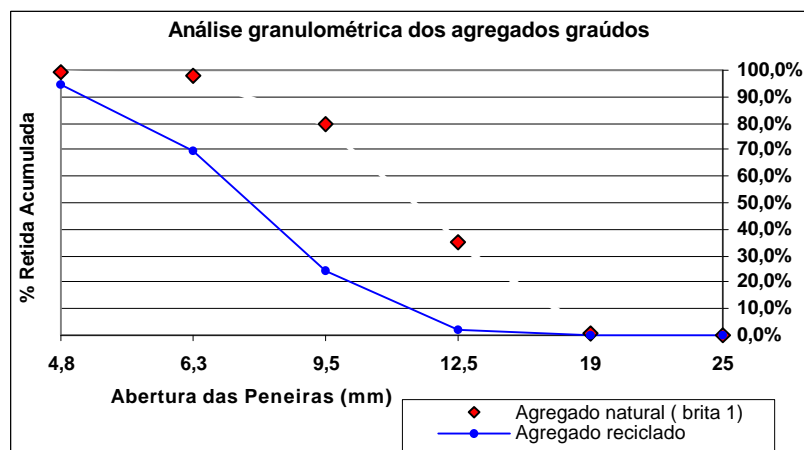
Ao analisar a granulometria do agregado graúdo reciclado em comparação ao natural, ocorre o inverso em relação à fração miúda que ficou com a dimensão de partículas maior do que a da areia. Este material possui a dimensão máxima característica menor que do material natural, é claro que existe uma grande influência do processo de britagem no resultado. A abertura da mandíbula do britador é que vai condicionar o tamanho das partículas. Na pesquisa bibliográfica foi encontrado para os agregados graúdos reciclados uma grande variação da dimensão máxima, indo desde 6,3 mm até 32 mm, portanto o valor encontrado neste estudo está dentro da média, Tabela 49 e Figura 10.

**Tabela 49 – Análise granulométrica dos agregados graúdos – NBR 7217/87.**

Peneira ( mm )	Agregado Natural			Agregado Reciclado		
	Massa Retida ( g )	% Retida	% Retida Acumulada	Massa Retida ( g )	% Retida	% Retida Acumulada
25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	26,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0
12,5	1750,0	34,6	35,1	100,0	2,0	2,0
9,5	2250,0	44,5	79,6	1115,0	22,3	24,3
6,3	920,0	18,2	97,8	2265,0	45,4	69,7
4,8	87,5	1,7	99,5	1255,0	25,2	94,9
Resíduo	19,0	0,4	100,0	255,0	5,1	100,0
Total	5053,0	100,0		4990,0	100,0	

**Dimensão máxima característica: agregado natural -  $D_{m\acute{a}x} = 19$  mm.**  
**agregado reciclado -  $D_{m\acute{a}x} = 12,5$  mm.**

**Módulo de Finura: agregado natural - MF = 6,80.**  
**agregado reciclado - MF = 6,19.**



**Figura 10 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos.**

Ao se analisar a quantidade de material que passa pela peneira de abertura 4,8 mm, é constatado novamente, como no caso da fração miúda, que o agregado reciclado fornece uma quantidade de finos maior que o material natural. Um explicação deste fato em relação à fração graúda do material reciclado, é que durante o ensaio de granulometria existe o desprendimento e quebra de partículas de argamassa que antes estavam aderidas no agregado natural, ocasionando a grande quantidade de finos.

HANSEN & NARUD (1983), analisaram a influência da resistência do concreto original na granulometria do agregado graúdo reciclado, não encontrando diferenças significativas entre as dosagens. Em seu trabalho o material reciclado teve dezessete por cento de partículas menores que 5mm, na análise experimental deste trabalho o valor para partículas passantes pela peneira com abertura de 4,8 mm foi de cinco por cento.

VAN ACKER (1996), apresenta algumas conclusões quando comparou a granulometria de agregados naturais com reciclados, miúdo e graúdo. Em seus resultados, ambas as frações do material reciclado apresentaram uma grande dispersão de valores, e possuíam uma grande quantidade de finos em comparação ao material natural. Sua explicação para este fato, é que existe uma grande quantidade de partículas de argamassa, soltas ou aderidas ao agregado natural, durante o ensaio de peneiramento algumas delas se quebram ou soltam da superfície do agregado natural. A mesma conclusão foi obtida para este trabalho.

ABOURIZK & RASHWAN (1997), citam que em sua pesquisa o agregado graúdo reciclado foi mais fino que o material natural. Também apresentam dados onde mostram que o tempo de armazenamento e grau de hidratação do concreto, não influenciam a granulometria do material.

A granulometria do material reciclado depende muito do tipo de britador usado, e se existe algum processo posterior para separação e composição das frações. Os resultados obtidos na análise experimental, foram muito significativos e quando comparados com os da pesquisa bibliográfica, foi considerado que todos possuem a mesma ordem de grandeza.

## 5.2. CONCRETO

Os agregados reciclados, conforme já comentado anteriormente, apresentam uma absorção de água bem maior do que os naturais, além de possuírem uma granulometria bastante variada. Como já era esperado, as dosagens com agregados reciclados tiveram uma perda de trabalhabilidade em relação ao do concreto natural com mesmas características, acentuada quando foram usados ambos agregados reciclados, miúdo e graúdo.

Em relação ao agregado graúdo reciclado, existe uma grande quantidade de argamassa aderida ao agregado natural, além de pedaços soltos de argamassa. Isto influenciou muito o valor da densidade e do módulo de elasticidade do concreto. Conforme o nível de substituição por agregados reciclados aumentava, ocorreu um decréscimo destas propriedades.

Analisando os valores do ensaio de resistência à compressão para todas as dosagens, notou-se que a influência dos agregados graúdos reciclados foi menor do que para as outras propriedades. Mas existiu uma diminuição deste valor, quando foi usada a fração miúda.

Era esperado a existência de algumas partículas de cimento não hidratado, e que estas influenciariam a resistência à compressão. Na parte experimental, isto não foi comprovado quando a fração miúda foi utilizada, dosagens 3 e 4. HANSEN (1985) cita que a quantidade de partículas não hidratadas é tão pequena, em comparação ao volume de material que sua influência é mínima.

Como já citado anteriormente, esta pesquisa teve quatro dosagens para estudo, com as seguintes características, Tabela 50.

**Tabela 50 – Principais características das dosagens dos concretos.**

<b>Dosagem (em massa)</b>	<b>Composição de agregados</b>	<b>Consumo real de cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Traço (c : a : p) 1 : 1,4 : 2,4 : a/c = 0,41</b>		
<b>1 (concreto natural - referência)</b>	agregado miúdo = areia natural. agregado graúdo = brita 1.	478
<b>2</b>	agregado miúdo = areia natural. agregado graúdo = agregado reciclado.	462
<b>3 Obs: 1% de superplastificante</b>	agregado miúdo = 50% de areia natural + 50% de agregado miúdo reciclado. agregado graúdo = agregado reciclado.	447
<b>4 Obs: 1% de superplastificante</b>	agregado miúdo = 50% de areia natural + 50% de agregado miúdo reciclado. agregado graúdo = brita 1.	468

### **5.2.1. CONCRETO FRESCO**

Um dos parâmetros considerados mais importantes para esta comparação de dosagens, foi a relação água/cimento, para todas ela teve o mesmo valor. Quando houve a necessidade de usar um superplastificante, dosagens 3 e 4, se realizou a correção da quantidade de água, pois o aditivo que é calculado sobre a massa de cimento, possui uma certa porcentagem de água em sua composição.

Para a dosagem 4 foi adotada a mesma quantidade de aditivo da dosagem 3, como forma de comparação. Pelo resultado do ensaio de consistência, existiu um grande excesso de aditivo nesta mistura, que gerou além do maior valor de abatimento de todas as dosagens, a menor resistência à compressão.

## **a) CONSISTÊNCIA**

Os agregados reciclados influenciaram muito a consistência do concreto, principalmente devido sua grande absorção de água. Os resultados para o ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, são apresentados na Tabela 51.

**Tabela 51 – Resultados do ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - NBR 7223/92.**

<b>Dosagem</b>	<b>Abatimento do tronco de cone – NBR 7223/92</b>
<b>1</b>	38 mm
<b>2</b>	8 mm
<b>3</b>	9 mm
<b>4</b>	89 mm

É considerado que as ocorrências obtidas nesta parte da pesquisa experimental, são bastante semelhantes às aquelas apresentadas pelos pesquisadores estrangeiros. A importância disto é que os conceitos envolvidos são iguais, e podem ser usados no contexto brasileiro.

Cada dosagem teve algumas particularidades, que são explicadas abaixo:

### **a.1) DOSAGEM 1**

O concreto fresco se apresentou com características satisfatórias.

### **a.2) DOSAGEM 2**

Quando foi usado o agregado graúdo reciclado, houve uma grande perda de consistência, o concreto possuía uma massa bem mais seca do que a da primeira dosagem. Na bibliografia consultada, os autores definem esta perda de consistência devido à grande absorção de água do agregado reciclado.

Na pesquisa experimental, nos primeiros minutos, o agregado graúdo reciclado teve uma absorção de água aproximadamente três vezes maior do que o material natural. Esta grande absorção do material reciclado, tira uma quantidade de água que antes seria usada para dar trabalhabilidade à mistura, e portanto ela fica mais seca e menos trabalhável que a com material natural.

HANSEN & NARUD (1983), pesquisaram a influência da qualidade dos resíduos nas propriedades do concreto. Em relação ao concreto fresco, eles chegaram à uma conclusão interessante. Para resíduos de concretos de baixa resistência, em seu estudo a relação água/cimento foi de 1,20, quando comparados com resíduos de concretos de resistência mais elevada, existe uma maior coesão. A conclusão deste fato, é que durante o processo de mistura existe o atrito entre partículas de argamassa e a geração de finos.

HANSEN (1985), analisando os resultados de várias pesquisas, cita que quando é usado somente a fração graúda do agregado reciclado, para se manter as mesmas características de consistência do concreto natural, se deve acrescentar mais cinco por cento de água na mistura.

Na pesquisa bibliográfica, também foi constatado que diversos autores falam da grande perda de consistência do concreto reciclado conforme o tempo de mistura aumenta, certamente isto está relacionado à absorção de água do material. Na pesquisa experimental deste trabalho, nos primeiros minutos o agregado reciclado praticamente absorveu toda a quantidade de água.

RAVINDRARAJAH et al (1987), analisaram as frações miúda e graúda do agregado reciclado, seus resultados mostram que com o aumento do nível de substituição existe uma perda considerável da trabalhabilidade da mistura.

Conforme METHA & MONTEIRO (1994), em um concreto normal, a um dado consumo de água, um decréscimo considerável na quantidade de cimento tende a produzir misturas ásperas, e conseqüentemente existe uma perda da consistência. Quando se usou o agregado graúdo reciclado, houve uma diminuição de aproximadamente três por cento da massa de cimento por metro cúbico de concreto, é considerado que a influência deste parâmetro é mínima neste caso quando comparado, por exemplo, com a absorção de água do agregado reciclado.

ABOURIZK & RASHWAN (1997), em sua pesquisa constata a grande perda de trabalhabilidade do concreto reciclado em relação ao natural. Em suas conclusões, eles citam que o agregado reciclado além de absorver uma maior quantidade de água do que o natural, possui uma superfície mais áspera e formas lamelares.

### **a.3) DOSAGEM 3**

Como já citado, no início deste trabalho a idéia era a substituição total da fração miúda do agregado natural pelo reciclado, após um teste piloto foi constatado que isto seria inviável, a mistura ficou muito seca e com aparência de concretos sem finos, ou seja, faltava argamassa. Mudando um pouco a composição do agregado miúdo, para uma fração de material natural e outra de igual quantidade de material reciclado, foram realizados alguns testes. O primeiro foi excluído pois o material ficou muito seco, após este foi acrescentado quantidades crescentes de aditivo sobre a massa de cimento até o máximo recomendado, que para o material utilizado, RX 3000, é de três por cento sobre a massa de cimento. A quantidade de aditivo considerada ideal foi de um por cento sobre a massa de cimento, este valor foi o escolhido pois para acréscimos maiores não era notado muita diferença.

Quando foi utilizado o agregado graúdo reciclado e a composição de agregados miúdos, cinquenta por cento areia e o resto de miúdo reciclado, a dosagem perdeu muito sua consistência, mesmo usando o aditivo. Comparando o valor do ensaio de abatimento do tronco de cone para as dosagens 2 e 3, Tabela 51, que foi praticamente igual, pode-se concluir que o agregado miúdo reciclado influencia muito a consistência do concreto, pois na segunda dosagem não foi usado nenhum tipo de aditivo.

HANSEN (1985), analisando os resultados de várias pesquisas, cita que quando é usada a fração graúda e miúda do agregado reciclado, com grau de substituição de cem por cento, para se manter as mesmas características de consistência do concreto natural, é necessário acrescentar mais quinze por cento de água na mistura. Quando somente é utilizado a fração graúda, este valor é de cinco



porcento. Através desta recomendação, é notada a maior influência da fração miúda sobre a graúda.

#### **a.4) DOSAGEM 4**

A utilização da composição de agregados miúdos e a quantidade de aditivo nesta dosagem, foi condicionada pelo estudo realizado para dosagem 3.

O resultado do ensaio de abatimento de tronco de cone, mostrou que esta dosagem tinha aditivo em excesso, mas como o objetivo foi a comparação com os resultados da dosagem 3, não foi realizada nenhuma correção. Através dos resultados, concluiu-se alguns conceitos muito interessantes em relação às outras dosagens.

Comparando os resultados desta dosagem com as dosagens feitas com agregados miúdos naturais, dosagem 1 e dosagem 2, é notado que a influência do agregado miúdo reciclado sobre a consistência do concreto para este nível de substituição, é menor em comparação à substituição total do agregado graúdo natural pelo reciclado.

Na dosagem 4 com a utilização do aditivo, o valor do ensaio de abatimento do tronco de cone foi o maior de todos, chegando a ser mais que o dobro da primeira dosagem. Já para a terceira dosagem, que unicamente se diferencia da quarta pela utilização da fração graúda do material reciclado, o valor desse ensaio foi bastante baixo, o que mostra que a maior influência neste caso foi devida a utilização do agregado graúdo reciclado.

Para esta dosagem, houve uma diferença entre sua conclusão e as apresentadas para dosagem 3. Na dosagem 3, é colocado que a maior influência é da fração miúda, comprovado por HANSEN (1985), já para esta dosagem o resultado é oposto, a fração graúda é a mais importante. É claro que para definir com exatidão este grau de influência, é necessário que mais ensaios sejam realizados, variando características de dosagem e dos materiais. Mas existe um consenso em uma coisa, a utilização dos agregados reciclados geram uma perda de trabalhabilidade, e esta é proporcional à quantidade de material na mistura, como foi comprovado por todas as pesquisas consultadas.

## b) MASSA ESPECÍFICA

Conforme já era esperado, o aumento do nível de substituição dos materiais naturais pelos reciclados, é acompanhado por uma diminuição da densidade do concreto. Isto se deve às características dos materiais reciclados, que neste caso possuem muitas partículas de argamassa, que têm uma densidade menor que dos materiais naturais, Tabela 52.

**Tabela 52 – Massa específica no estado fresco - NBR 9833/87.**

<b>Dosagem</b>	<b>Massa específica – NBR 9833/87</b>	<b>Relação concreto reciclado/ concreto natural</b>
<b>1</b>	2.490 kg/m <sup>3</sup>	1
<b>2</b>	2.410 kg/m <sup>3</sup>	0,97
<b>3</b>	2.330 kg/m <sup>3</sup>	0,94
<b>4</b>	2.440 kg/m <sup>3</sup>	0,98

HANSEN & NARUD (1983), encontraram que a massa específica no estado fresco do concreto reciclado, com agregados graúdos reciclados e miúdos naturais, é de 50 a 100 kg/m<sup>3</sup> menor que o natural. Um valor semelhante foi obtido na parte experimental deste trabalho, Tabela 52, este valor foi de 80 kg/m<sup>3</sup>.

HANSEN (1985) cita os resultados de algumas pesquisas, em relação à massa específica no estado fresco do concreto reciclado, a maioria apresenta uma diminuição de cinco a dez por cento em seu valor, em comparação ao do concreto natural.

Analisando os valores encontrados na bibliografia, considera-se que os resultados obtidos na parte experimental, possuem a mesma ordem de grandeza dos apresentados pelas pesquisas estrangeiras.

## **5.2.2. CONCRETO ENDURECIDO**

As propriedades do concreto endurecido foram influenciadas pela composição de agregados reciclados usadas, conforme já citado na pesquisa bibliográfica, a maior diferença entre o concreto reciclado e o natural com mesmas características, ocorre no valor da densidade e do módulo de elasticidade.

O valor da resistência à compressão não é muito influenciada quando se usa somente a fração graúda do material, mas quando existe a utilização da fração miúda ocorre uma diminuição deste valor.

Em relação a resistência à compressão os resultados forneceram algo interessante. As dosagens que utilizaram a fração graúda reciclada, tiveram o valor da resistência maior que a de mesmas características, mas com agregados graúdos naturais. Dosagem 2 em comparação com a primeira, e dosagem 3 em comparação à quarta.

Para os corpos de prova de todas as dosagens, foi usado o mesmo processo de cura, em uma câmara úmida, e a mesma idade de ensaio, 28 dias.

### **a) MASSA ESPECÍFICA**

A massa específica do agregado graúdo é a que mais influencia o valor da massa específica do concreto, como esta fase é a mais densa, uma variação de seu valor ocasiona uma grande influência para esta propriedade no concreto.

Neste estudo a massa específica do agregado graúdo reciclado ficou aproximadamente dez por cento menor do que a do material natural, no caso da fração miúda este valor foi de aproximadamente sete por cento. Os resultados da massa específica para os concretos são apresentados na Tabela 53.

**Tabela 53 – Massa específica do concreto endurecido – NBR 9778/87.**

<b>Dosagem</b>	<b>Massa específica amostra seca</b>	<b>Relação concreto reciclado/concreto natural</b>	<b>Massa específica amostra saturada</b>	<b>Relação concreto reciclado/concreto natural</b>
<b>1</b>	2.379 kg/m <sup>3</sup>	1	2.504 kg/m <sup>3</sup>	1
<b>2</b>	2.266 kg/m <sup>3</sup>	0,95	2.406 kg/m <sup>3</sup>	0,96
<b>3</b>	2.168 kg/m <sup>3</sup>	0,91	2.316 kg/m <sup>3</sup>	0,92
<b>4</b>	2.247 kg/m <sup>3</sup>	0,94	2.382 kg/m <sup>3</sup>	0,95

Analisando os valores dos resultados, é notado que o aumento da quantidade de material reciclado é acompanhado por uma diminuição da massa específica, como já era esperado, e que a fração graúda têm a maior influência sobre esta diminuição de valor. Nos artigos consultados são encontrados valores para esta diminuição, dentro de um intervalo de cinco até quinze por cento. Na maioria dos casos a média ficou aproximadamente de dez por cento, que é bastante semelhante ao resultado encontrado na parte experimental deste estudo.

ABOURIRIZK & RASHWAN (1997), encontram o valor médio de dez por cento para diminuição do valor da massa específica do concreto reciclado quando comparado ao natural.

Como já comentado, o tamanho das partículas influencia a quantidade de argamassa aderida ao agregado natural, e esta condiciona o valor da massa específica do agregado. Como a massa específica do concreto é muito influenciada pela do agregado, e esta está relacionada principalmente ao processo de britagem, para cada pesquisa será encontrado um valor, mas conforme foi constatado, a ordem de grandeza dos resultados é bastante semelhante.

## **b) ABSORÇÃO DE ÁGUA**

Na maioria das pesquisas consultadas, é citado o aumento do valor da absorção de água e do índice de vazios com o uso do material reciclado. As maiores diferenças ocorreram quando a relação água/cimento da dosagem era baixa, ou seja,

para concretos de resistência elevada. A conclusão geral é que para estes concretos, a influência do agregado reciclado, principalmente o graúdo, é mais pronunciada, pois ele possui uma porosidade muito maior que do material natural, e como fica distribuído em uma matriz de argamassa mais densa que de concretos de resistência mais baixa, sua influência é mais significativa.

Neste estudo, os valores de absorção de água e de índice de vazios do concreto reciclado são maiores que do concreto natural, Tabela 54. Analisando os resultados, pode-se concluir que a maior influência ocorreu quando foi usada a fração miúda do material reciclado.

Na dosagem 4, onde foi usado somente uma fração de material reciclado na composição de agregados miúdos, se encontrou valores aproximadamente iguais aos da dosagem 2, que teve a fração graúda totalmente substituída por materiais reciclados, ou seja, a influência do agregado miúdo reciclado nestas propriedades é maior. A maior diferença de valores foi para a dosagem 3, onde ambas as frações de agregados reciclados foram usadas.

**Tabela 54 – Absorção de água e índice de vazios – NBR 9778/87.**

<b>Dosagem</b>	<b>Absorção de água</b>	<b>Relação concreto reciclado/concreto natural</b>	<b>Índice de vazios</b>	<b>Relação concreto reciclado/concreto natural</b>
<b>1</b>	5,2 %	1	12,4 %	1
<b>2</b>	6,18 %	1,19	14,1 %	1,14
<b>3</b>	6,82 %	1,31	14,8 %	1,19
<b>4</b>	6,03 %	1,16	13,6 %	1,09

Esta maior influência da fração miúda do material reciclado nas dosagens, certamente está relacionada as características do material, na análise visual foi notado que ele é praticamente constituído de partículas de argamassa, que possuem uma absorção de água maior do que a areia. Na fração graúda, já ocorre algo diferente, além das partículas de argamassa, aproximadamente trinta por cento, existem agregados naturais recobertos por uma camada de argamassa.

HANSEN (1985), apresenta os resultados de algumas pesquisas, nelas existem uma variação do acréscimo da absorção de água do concreto reciclado em relação ao natural de aproximadamente duas vezes. Também recomenda que para um concreto reciclado ficar com o mesmo valor da absorção de água do concreto natural, é necessário que exista uma diminuição de 0,05 a 0,10 do fator água/cimento.

VAN ACKER (1996), encontrou que o valor da absorção de água do concreto reciclado é maior que o do material natural, justificando este resultado pela grande quantidade de pedaços de argamassa existentes no material. Ao comparar-se os resultados de absorção de água para o concreto com um nível de substituição de dez por cento, o grau de influência da fração miúda foi maior que da gráuda.

Todas as pesquisas chegaram à um consenso, sobre a maior absorção de água do agregado reciclado em comparação ao natural. Sabe-se que esta propriedade do agregado influencia muito o valor da absorção de água no concreto, e portanto existe também o mesmo resultado quando são comparados os concretos reciclados com os naturais.

As características das partículas influenciam muito a absorção de água do concreto reciclado, como já comentado, partículas menores possuem uma maior quantidade de argamassa aderida na superfície. Os resultados desta pesquisa e os encontrados nos artigos consultados, possuem a mesma ordem de grandeza, mas acha-se conveniente que novos trabalhos sejam feitos para analisar esta propriedade.

As características de absorção de água dos concretos reciclados, devem ser estudadas, principalmente em relação à durabilidade de estruturas feitas com estes materiais. Em algumas normas são apresentadas recomendações de cobrimentos mínimos de armadura, conforme o grau de agressividade do meio ambiente, como a absorção de água para os concretos reciclados é maior que dos concretos naturais, estes valores necessitam ser conferidos se são satisfatórios.

### **c) RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

Analisando a pesquisa bibliográfica referente ao estudo da estrutura do concreto, é notado que a influência do agregado gráudo em sua resistência é o fator

menos importante. A porosidade da matriz e as características da zona de transição são consideradas as fases mais significativas, e as com maior grau de influência na sua resistência.

A maioria das pesquisas consultadas, falam da importância das características do resíduo de concreto para a resistência à compressão do concreto reciclado. Resíduos provenientes de concretos de baixa resistência, ou que são frutos da composição de vários sobras, de concretos de resistência variada, podem ocasionar no concreto reciclado um valor de resistência mais baixo do que o esperado.

Os resíduos usados neste trabalho foram provenientes de um concreto com mesma resistência das dosagens dos concretos reciclados, ou seja, é um material com boa qualidade. Nos artigos consultados quando se utiliza somente a fração graúda do agregado reciclado, para resíduos de boa qualidade a resistência do concreto reciclado é aproximadamente igual ao do concreto original, já para outros tipos de substituições existe uma pequena variação. HANSEN (1985), já citado anteriormente, através da pesquisa de diversos artigos, chegou à seguinte conclusão:

- Concretos reciclados onde somente foi usada a fração graúda do agregado reciclado, tiveram uma diminuição de cinco por cento no valor da resistência à compressão em relação ao concreto natural. Para uma substituição global, ou seja, a utilização de ambas frações do agregado reciclado, miúdo e graúdo, esta diminuição ficou bastante acentuada chegando-se a valores entre vinte e quarenta por cento do encontrado para o concreto natural. Já para uma substituição parcial, onde existe na fração miúda uma composição de cinquenta por cento de material natural (areia) e cinquenta por cento de agregado reciclado, este valor ficou entre dez e vinte por cento.

As recomendações da RILEM (1994), não apresentam nenhum valor de coeficiente para a resistência à compressão, no caso da composição usada na segunda dosagem (agregado Tipo II- RILEM), considera-se que para este tipo de material não exista perda de resistência do concreto reciclado frente ao concreto original de mesmas características. Para a utilização da fração miúda, a RILEM (1994) não apresenta nenhuma informação.

Os concretos deste estudo foram ensaiados com a idade de 28 dias e os resultados da resistência à compressão são apresentados na Tabela 55.

**Tabela 55 – Valores da resistência à compressão aos 28 dias para as dosagens.**

<b>Dosagem</b>	<b>Resistência à compressão média ( MPa )</b>	<b>Relação concreto reciclado/concreto natural</b>
<b>1</b>	48	1
<b>2</b>	49	1,02
<b>3</b>	46	0,96
<b>4</b>	43	0,90

Antes da execução dos ensaios, através da pesquisa bibliográfica e do estudo da estrutura do concreto, era esperado que para a dosagem 2 não existiria queda de resistência, já para as outras duas, devido a utilização da fração miúda do agregado reciclado, isto aconteceria.

Ao se comparar a dosagem 2 com a dosagem 1, pode-se concluir que neste caso a influência do agregado graúdo reciclado não é o fator determinante na resistência à compressão. Conforme é citado na bibliografia, a fração do agregado reciclado que mais influencia a resistência do concreto é a miúda, isto pode ser comprovado quando as dosagens 3 e 4, são comparadas com as duas primeiras.

Ao relacionar a quantidade de cimento por metro cúbico de concreto com a resistência à compressão de cada dosagem, Tabela 56, é notado que a influência do consumo de cimento para este estudo, é insignificante para esta propriedade. A dosagem 4 que teve o consumo de cimento maior das dosagens com material reciclado, ficou com o menor valor da resistência à compressão. Enquanto que a dosagem 2, que teve o consumo de cimento até menor que o da dosagem 4, teve o maior valor de resistência de todas as dosagens.



**Tabela 56 – Valores da resistência à compressão aos 28 dias e do consumo de cimento por metro cúbico para as dosagens.**

<b>Dosagem</b>	<b>Resistência à compressão média ( MPa )</b>	<b>Relação concreto reciclado/concreto natural</b>	<b>Consumo real de cimento ( kg/m<sup>3</sup> )</b>	<b>Relação concreto reciclado/concreto natural</b>
<b>1</b>	48	1	478	1,00
<b>2</b>	49	1,02	462	0,97
<b>3</b>	46	0,96	447	0,94
<b>4</b>	43	0,90	468	0,98

No estudo da estrutura do concreto, quando é analisado os fatores que influenciam a resistência à compressão, uma grande importância é dada para as características da matriz de argamassa e da zona de transição.

A maior absorção de água do agregado graúdo reciclado, pode ser a causa da maior resistência da dosagem 2 em relação a primeira dosagem. Com esta maior absorção, internamente existe uma diminuição da relação água/cimento, principalmente mais perto da superfície do agregado graúdo, promovendo posteriormente uma espécie de “cura interna” na zona de transição (argamassa/agregado graúdo) melhorando suas propriedades. O mesmo ocorreu quando são comparados os resultados das outras dosagens entre si, a terceira que utilizou o agregado graúdo reciclado teve o valor da resistência à compressão maior do que da quarta.

Através da análise visual também foi notado uma grande quantidade de partículas lamelares no agregado miúdo reciclado, retidas na peneira com abertura de de 2,4 mm. Este tipo de material condiciona à um filme de água próximo ao agregado, maior do que em partículas mais esféricas, como é o caso da areia, deixando assim a zona de transição agregado-pasta enfraquecida.

Analisando os valores das relações entre a resistência à compressão do material reciclado pelo natural, da argamassa, é notado que os resultados para a diminuição dos valores são em ordem de grandeza iguais aos encontrados para o concreto. Uma das conclusões é que as fases, zona de transição (argamassa/agregado

graúdo) assim como a argamassa, condicionaram os resultados, e que a resistência da fração graúda não teve influência, Tabela 57.

**Tabela 57 – Resistência à compressão das argamassas e dos concretos.**

Dosagem	Resistência à compressão da argamassa (MPa)	Relação argamassa reciclada/ argamassa natural	Resistência à compressão do concreto (MPa)	Relação concreto reciclado/ concreto natural
1	56	1	48	1
2	55	0,98	49	1,02
3	55	0,98	46	0,96
4	53	0,95	43	0,90

Na bibliografia consultada, alguns autores citam que no material reciclado existem partículas de cimento não hidratadas, e que elas influenciam a resistência do concreto reciclado. Através dos resultados experimentais deste estudo, isto não foi comprovado. Todos os valores para a resistência à compressão das argamassas recicladas foram menores que da natural, e o acréscimo de resistência da dosagem 2 em relação à primeira dosagem possui outra explicação. Esta mesma conclusão foi comprovada por HANSEN (1985), que fala que a quantidade de partículas não hidratadas é tão pequena que não influenciam as propriedades do material.

FRONDISTOU-YANNAS (1977), encontrou uma diminuição de quatorze por cento no valor da resistência à compressão em relação ao concreto natural, quando é utilizado a fração graúda reciclada.

HANSEN & NARUD (1983), citam que existe uma grande influência da qualidade do resíduo na resistência à compressão do concreto reciclado. Para resíduos de boa qualidade, quando somente é usada a fração graúda reciclada, praticamente não existe queda de resistência em comparação com o concreto natural.

Como existe uma grande diferença de materiais, resíduos e outras coisas que influenciam o concreto, foi encontrado uma pesquisa que não teve o mesmo resultado deste trabalho e da maioria dos artigos consultados. RAVINDRARAJAH et al (1987), mostram em suas conclusões que a fração do agregado reciclado que mais influencia a perda de resistência do concreto reciclado, é a graúda, e que a utilização de um nível de substituição total dos agregados naturais pelos reciclados, ocasiona uma queda de resistência de aproximadamente dez por cento.

VAN ACKER (1996), encontrou para o nível de substituição de dez por cento de material reciclado, que a fração miúda condiciona à um valor menor da resistência à compressão do que a fração graúda. Em sua pesquisa, ele cita que a literatura técnica confirma, que o uso do agregado miúdo reciclado ocasiona uma queda de resistência bem maior do que a da fração graúda do material. Uma possível causa disto, conforme conclui em sua pesquisa, quando é utilizado a mesma quantidade de água na mistura, é a grande quantidade de finos e impurezas na fração miúda do material reciclado.

Para resumir alguns resultados encontrados, é apresentada a Tabela 58.

**Tabela 58 – Valores para a relação entre a resistência à compressão dos concretos reciclados pelos naturais.**

Pesquisa	Grau de Substituição				
	100 % graúdo ( dosagem 2)	100% miúdo	100% graúdo 100% miúdo	50% miúdo ( dosagem 4)	50% miúdo 100% graúdo ( dosagem 3 )
ANÁLISE EXPERIMENTAL	1,02	-	-	0,90	0,96
FRONDISTOU - YANNAS ( 1977)	0,86	-	-	-	-
HANSEN & NARUD (1983)	1,00	-	-	-	-
HANSEN (1985)	0,95	-	0,6 – 0,80	-	0,80 – 0,90
RAVINDRARAJAH & TAM (1985)	0,94	-	-	-	-
RAVINDRARAJAH et al ( 1987)	0,87	-	0,83	-	-
RILEM (1994)	1,00	-	-	-	-
GUNÇAN & TOPÇU (1995)	0,90	-	-	-	-
SOROUSHIAN & TAVAKOLI (1996)	1,00				
TOPÇU (1997)	0,80 – 0,95				

Analisando os resultados apresentados na Tabela 58, pode-se concluir:

- A utilização da fração graúda do material reciclado, em média praticamente não condiciona à uma perda de resistência. Podendo conferir valores até maiores que do material natural. É claro, como comprovado na pesquisa bibliográfica, isto vai depender da qualidade do resíduo.
- Em algumas pesquisas estrangeiras, o valor da resistência à compressão do concreto reciclado teve uma diminuição considerável em relação à encontrada na parte experimental deste trabalho, FRONDISOU-YANNAS (1977), RAVINDRARAJAH et al (1987) e GUNÇAN & TOPÇU (1995). A explicação para este fato, é que estes pesquisadores utilizaram em suas pesquisas como parâmetro de controle de suas misturas, o abatimento do tronco de cone, e não a relação água/cimento. Como o concreto reciclado para ter a mesma trabalhabilidade do natural, é necessário possuir mais água em sua mistura, nestas pesquisas a relação água/cimento para o concreto reciclado ficou maior que a do concreto natural, e assim sua resistência diminuiu.
- Existiu uma diminuição da resistência com a utilização da fração miúda do material reciclado, e que sua influência é maior do que a fração graúda do material, comprovado também por HANSEN (1985) e RAVINDRARAJAH et al (1987).
- A dosagem 4, que teve um excesso de aditivo ficou com o menor valor da resistência à compressão na parte experimental deste estudo.

Os resultados obtidos para esta propriedade neste trabalho, foram satisfatórios e estão dentro da ordem de grandeza dos encontrados nas pesquisas estrangeiras, além de estarem coerentes com os conceitos apresentados quando se tratou da estrutura do concreto na pesquisa bibliográfica. É claro que mais ensaios precisam ser realizados, para analisar outras influências sobre o concreto reciclado, como, consumo de cimento, qualidade do resíduo, idade e tempo de armazenamento deste

material e influência do tipo de agregado graúdo natural, isto ocorrerá com o tempo e conforme seja realizado o material será melhor compreendido e aproveitado.

#### **d) MÓDULO DE ELASTICIDADE**

No estudo da estrutura do concreto, foi apresentada a influência que a fase agregado possui sobre o valor do módulo de elasticidade do concreto. Como esta fase é a que têm a maior rigidez, é ela que controla as variações de volume da matriz de argamassa.

Na fase experimental, como era de se esperar, existiu uma grande influência dos agregados reciclados no valor do módulo de elasticidade do concreto, houve uma diminuição de seu valor proporcional ao aumento do grau de substituição do agregado natural, Tabela 59.

A influência do agregado nesta propriedade, também foi comprovada quando são analisados os resultados da dosagem 2 com a primeira. A resistência à compressão da dosagem com agregados graúdos reciclados ficou até maior que a do concreto natural, mas o valor de seu módulo de elasticidade ficou oitenta e nove por cento desta.

**Tabela 59 – Valores do módulo de elasticidade das dosagens.**

<b>Dosagem</b>	<b>Módulo de Elasticidade ( MPa )</b>	<b>Relação concreto reciclado/concreto natural</b>
<b>1</b>	37.303	1
<b>2</b>	33.243	0,89
<b>3</b>	28.758	0,77
<b>4</b>	33.233	0,89

As recomendações da RILEM (1994) fornecem que para agregados do TIPO II, semelhantes a composição usada na segunda dosagem, o valor do módulo de elasticidade do concreto reciclado seja oitenta por cento do concreto natural. Neste trabalho o valor encontrado para esta relação foi de oitenta e nove por cento, ou seja,

um pouco maior do que a sugerida pela RILEM (1994). É claro que existe uma diferença entre os materiais utilizados, as recomendações da RILEM (1994) são fruto de inúmeras pesquisas, com vários tipos de agregados naturais. Na pesquisa bibliográfica também foram encontrados variações para este valor, portanto consideram-se satisfatórios os resultados experimentais encontrados.

RAVINDRARAJAH et al (1987) estudaram dosagens utilizando totalmente os agregados reciclados, gráudo e miúdo, encontrando valores da diminuição do módulo de elasticidade dos concretos reciclados de até trinta e cinco por cento. Este estudo teve uma dosagem semelhante, dosagem 3, diferenciando-se somente pela composição da fração miúda, metade de material reciclado. O valor da diminuição do módulo de elasticidade foi de vinte e três por cento.

Foi comprovado que existe uma grande influência do agregado gráudo reciclado no valor do módulo de elasticidade, mas quando se usa a fração miúda, qual das outras duas fases mais condiciona esta perda de valor ?.

Conforme já citado no item anterior, sobre a resistência à compressão, a fração miúda do material teve muitas partículas grandes de forma lamelar, como se sabe este material influencia as propriedades do concreto de forma negativa. Analisando os resultados nos ensaios de argamassa das dosagens, nota-se uma diminuição no valor do módulo de elasticidade quando foi usada a fração miúda. Certamente as características desta fração influenciaram muito estes valores, Tabela 60.

**Tabela 60 – Valores do módulo de elasticidade das argamassas utilizados na pesquisa teórica.**

Propriedade	Dosagem			
	1	2	3	4
Módulo de elasticidade da argamassa (MPa)	10.352	11.033	9.673	9.213
Relação argamassa reciclada/argamassa natural	1	1,07	0.93	0,89

Para resumir alguns resultados encontrados, é apresentada a Tabela 61.

**Tabela 61 – Relação entre os valores obtidos para o módulo de elasticidade do concreto reciclado pelo natural.**

Pesquisa	Grau de Substituição				
	100 % graúdo ( dosagem 2)	100% miúdo	100% graúdo 100% miúdo	50% miúdo ( dosagem 4)	50% miúdo 100% graúdo ( dosagem 3 )
ANÁLISE EXPERIMENTAL	0,89	-	-	0,89	0,77
PESQUISA TEÓRICA – MODELO DE HIRSCH	0,90	-	-	0,92	0,81
FRONDISTOU -YANNAS ( 1977)	0,60	-	-	-	-
BOEGH & HANSEN (1985)	0,77 – 0,86	-	-	-	-
HANSEN (1985)	0,80 - 0,90	-	0,60 – 0,75	-	-
RAVINDRARAJAH et al ( 1987)	0,85	-	0,65	-	-
RILEM (1994)	0,80	-	-	-	-
GUNÇAN & TOPÇU (1995)	0,80 – 0,85	-	0,60 – 0,75	-	-
ABOURIZK &RASHWAN (1997)	-	-	0,93	-	-

Analisando os resultados apresentados na Tabela 61, é notado que para todas as pesquisas houve um consenso, o aumento do grau de substituição dos materiais naturais pelos reciclados causa uma diminuição no valor do módulo de elasticidade. A influência das frações do agregado reciclado também ficou demonstrada, a fração miúda influencia de uma maneira significativa o módulo de elasticidade, ao contrário do que era esperado.

Comparando os resultados encontrados na pesquisa teórica com os da análise experimental, é notado que a fração miúda possui uma grande influência sobre a diminuição do valor do módulo de elasticidade, chegando ser até maior que a da fração graúda. A dosagem 4, que usou somente uma fração do agregado miúdo reciclado, 50 por cento do agregado miúdo, teve praticamente a mesma diminuição de

valor que a dosagem 2, que substituiu totalmente o agregado graúdo natural pelo material reciclado.

Um resultado que chamou bastante a atenção, na pesquisa teórica e na análise experimental, foram os valores obtidos para a dosagem 3, que usou totalmente o agregado graúdo reciclado e uma fração do miúdo. Analisando a Tabela 61, nota-se que a diminuição do valor de módulo de elasticidade foi proporcional ao aumento da quantidade de material reciclado. Para dosagem 2, que usou a fração graúda do material reciclado, a diminuição ficou em torno de dez por cento, o mesmo valor foi obtido para dosagem 4, que usou somente uma fração do miúdo reciclado. Na dosagem 3, esta diminuição teve um valor aproximado de vinte por cento, ou seja, é a somatória dos resultados encontrados para as dosagens anteriores.

O valor da relação apresentado pela RILEM (1994), no caso da utilização da fração graúda do material reciclado, é um dos mais baixos. É claro que este foi definido através de inúmeras pesquisas, a favor da segurança, com o objetivo de dar informações para a utilização do material na prática.

Analisando os resultados encontrados na parte experimental e teórica deste trabalho, com os fornecidos da pesquisa bibliográfica, pode-se concluir:

- O aumento da composição de agregados reciclados no concreto, diminui o valor do módulo de elasticidade.
- Ambas as frações do agregado reciclado influenciam a diminuição do valor do módulo de elasticidade. Comparando os resultados da Tabela 61, para a pesquisa bibliográfica, é notado que o grau de influência das frações, miúda e graúda, é da mesma ordem de grandeza. Resultado diferente ao encontrado para a análise experimental e teórica, onde a maior influência foi da fração miúda.
- É considerado que a ordem de grandeza dos resultados encontrados para todas as pesquisas, teórica, experimental e bibliográfica são semelhantes, e que os mesmos conceitos aplicados nos estudos estrangeiros podem ser usados no Brasil.



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

As conclusões obtidas neste trabalho foram muito satisfatórias, principalmente porque através dos resultados de três tipos de pesquisas, bibliográfica, teórica, e experimental, foi comprovado que os mesmos conceitos apresentados em trabalhos estrangeiros, podem ser usados para estudos nacionais.

É claro que o material utilizado em cada pesquisa, está de acordo com o normalmente encontrado em sua região, ou conforme o tipo de equipamento disponível, mas todos chegam a um consenso referente à algumas propriedades.

Analisando os resultados como um todo, esta pesquisa concluiu:

- Os resíduos de concreto possuem um grande potencial para serem utilizados, através de mais estudos suas propriedades serão melhor conhecidas, gerando um produto economicamente interessante, como foi citado em alguns casos práticos.
- Existe uma grande influência na utilização do agregado reciclado sobre as propriedades estudadas do concreto. Este material deve ser considerado como um “novo material”, onde suas propriedades e a forma de utilizá-lo racionalmente precisam ser melhor conhecidos.
- Os agregados graúdos reciclados, possuem uma camada de argamassa aderida ao agregado natural, além de pedaços soltos de argamassa, isto influencia muito suas propriedades e a dos concretos feitos com eles. O mesmo ocorre para a fração miúda, que é composta na sua maioria de pedaços de argamassa.
- Os agregados reciclados possuem o valor da massa específica menor que dos materiais naturais, e uma absorção de água maior. Sua granulometria é muito influenciada pelo processo de britagem.

- As propriedades dos concretos reciclados, são influenciadas pelo nível de substituição dos materiais naturais pelos reciclados. Sua massa específica é menor e a absorção de água maior, que do concreto natural.
- Normalmente a resistência à compressão é pouco influenciada pela presença dos agregados reciclados, diferentemente do valor do módulo de elasticidade que têm uma diminuição considerável. Quando somente houve a substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado, a resistência foi até um pouco maior que do concreto natural, mas ocorreu uma diminuição de onze por cento no valor do módulo de elasticidade. A maior diferença foi quando além da fração graúda do material reciclado, também foi usada uma parcela da miúda deste material, a diminuição do valor do módulo de elasticidade foi de vinte e sete por cento.
- A fração miúda do material reciclado, teve uma influência maior do que a esperada nas propriedades do concreto, principalmente no módulo de elasticidade e na resistência à compressão.
- As propriedades dos agregados reciclados são muito influenciadas pelas características do resíduo de concreto, ou seja, a qualidade do concreto original, resíduos provenientes de vários locais sem uma separação prévia podem inviabilizar sua utilização. Também existe uma influência referente ao processo de demolição, britagem, peneiramento e armazenamento deste material.
- Considerou-se as recomendações da RILEM (1994), satisfatórias para a utilização do material na prática. É claro que para dosagens de maior responsabilidade, como é citado nesta publicação, devem ser realizados ensaios com o material.
- Para agregados reciclados que foram originados de resíduos com características conhecidas, resíduos de boa qualidade, existe a viabilidade técnica na utilização do material na prática.

Este trabalho tratou somente da parte técnica do material, para que ele seja utilizado na prática, outros tipos de pesquisa precisam ser realizadas. O planejamento e gerenciamento de resíduos, são formas de conferir ao material uma possibilidade de

possuir um valor econômico. Os agregados reciclados não devem ser vistos como “lixo” ou produtos de baixa qualidade, mas como materiais que possuem propriedades diferentes dos naturais, e que quando bem utilizados são interessantes pois além de trazerem recursos financeiros, por exemplo como ocorre nos Estados Unidos, também geram benefícios ambientais.

## **7. PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA**

Este trabalho apresentou algumas diferenças entre os agregados e concretos reciclados e os materiais naturais, seu objetivo foi mais informativo do que o de sugerir procedimentos para a utilização destes materiais. Como é citado na pesquisa bibliográfica, através de inúmeras pesquisas foi publicado recomendações para a substituição dos agregados naturais pelos reciclados em dosagens de concreto, RILEM (1994), mas elas são referentes somente ao cálculo estrutural, deixando de lado características como formas de gerenciamento e planejamento de resíduos, como obter estes materiais, durabilidade e maneiras de aplicá-los de forma economicamente interessantes. É claro que existem muitos artigos estrangeiros que citam outras propriedades, mas devido a grande variabilidade de materiais não existe uma padronização.

Para que o uso dos agregados reciclados seja aceito no Brasil, é interessante que mais pesquisas sejam feitas, pelo menos para dar alguma recomendação confiável e segura. Abaixo são sugeridas algumas linhas de pesquisa que se acham interessantes:

- O estudo do gerenciamento e planejamento de resíduos, é claro que no atual contexto brasileiro isso está mais ligado à sobras de entulho de construção, mas no futuro certamente estas linhas de pesquisa poderão ser adequadas aos resíduos de concreto.
- A influência do processo de demolição, britagem e peneiramento no material, além do tempo de armazenamento.

- As características do agregado e do concreto reciclado provenientes de resíduos de concretos com diferentes tipos de agregados naturais, como por exemplo, seixo rolado, brita e granito.
- A influência da dosagem nas propriedades do concreto reciclado.
- A influência do tipo de cimento, resistência e idade do concreto original, nas propriedades do concreto.
- As propriedades das frações do agregado reciclado, miúda e graúda, seu grau de influência nas características do concreto, e como elas podem ser utilizadas.
- A influência na durabilidade do concreto quando se usa os agregados reciclados, e a verificação se os cobrimentos mínimos de armadura apresentados em algumas normas são satisfatórios.
- Estudo da influência do material reciclado na fluência, retração seca, aderência da armadura, etc.
- Sugestões para a utilização do material na prática.

Neste capítulo poderiam ser listadas mais linhas de pesquisa, mais as já apresentadas para serem realizadas necessitarão de um grande trabalho. As propriedades do agregado e do concreto reciclados não são iguais à dos materiais naturais, portanto suas características podem ser vistas como de um novo material, ou seja, a tecnologia para seu emprego precisa ser melhor conhecida.

## 8. BIBLIOGRAFIA

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

ALEXANDER, M. G. (1996). Aggregates and the deformation properties of concrete. *ACI Materials Journal*. v.93, n.6, p.569–576, November-December.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1978). *NBR. 6118-Projeto e execução de obras de concreto armado*. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). *NBR 7251-Agregados em estado solto – Determinação da massa unitária*. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). *NBR 7211-Agregado para concreto*. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). *NBR. 7810-Agregado em estado compactado seco – Determinação da massa unitária*. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). *NBR 8522-Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação*. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *NBR 9937-Agregados – Determinação da absorção de água e da massa específica do agregado graúdo*. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *NBR 9776-Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman*. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *NBR. 7212-Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *NBR. 9778-Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *NBR 9833-Concreto Fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico*. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992). *NBR.7223-Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1994). *NBR. 5739-Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1994). *NBR. 5738-Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto*. Rio de Janeiro, ABNT.

BARR, B. I. G. ; LYDON, F. D. ; ZHOU, F. P. (1995). Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*. v.25, n.1, p.177-186.

BAUER, L. A . F. (1987). *Materiais de construção*, 4.ed. Rio de Janeiro, LTC-Livros Técnicos e Científicos.v.1.

BIOCYCLED. (1994). Meeting the challenge of earthquake recycling. *Biocycled*, p.55-57, November.

BOEGH, E. ; HANSEN, T. (1985). Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate. *Journal of American Concrete Institute Proceedings*, v.82,n.5, p.648-652, Setember-October.

ÇEÇEN, C ; OZTURAN, T. (1997). Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with diffeerent strengths. *Cements and Concrete Research*, v.27 , n.2, p.165-170. January.

CORBIOLI, N. (1996). Do caos à solução. *Construção*, São Paulo n.2505, p.4-7, fevereiro.

CEB– FIB (1999). Structural Concrete – Textbook on behaviour, design and performance. v.1, p.29-30. July.

DE VRIES, P. (1993). Concrete recycled - crushed concrete as aggregate. *Concrete*, p.9-13, May-June.

DESMYTER, J. ; DE PAUW, P. ; THOMAS, P. ; VYNCKE, J. . (1998). Shrinkage and creep of concrete with recycled materials as coarse aggregates. Sustainable Construction: Use of Recycled Aggregate. *International Symposium. Concrete Technology Unit*, University of Dundee. England. p.213-225, November.



DILLMANN, R. (1998). Concrete with recycled concrete aggregate. Sustainable Construction: Use of Recycled Aggregate. *International Symposium. Concrete Technology Unit*, University of Dundee. England. p.239-253, November.

FENWICK, R. C. ; SRITHARAN, S. (1995) . Creep and shrinkage effects in prestressed beams. *Magazine of Concrete Research*, n.170, p.45–55, March.

FRONDISTOU-YANNAS, S. (1977). Waste concrete as aggregate for new concrete. *Journal of the American Concrete Institute Proceedings*. p-373-376. August.

GUNÇAN, N. F. ; TOPÇU, I. B. (1995). Using waste concrete as aggregate. *Cement and Concrete Research*. v.25, n.7, p.1385-1390, June.

HANSEN, T. ; NARUD, H. (1983). Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International - Design and Construction*, v.5, n.1, p.79-83, January.

HANSEN, T. C. (1985). *Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, second state of the art report developments 1945-1985*. RILEN Technical Committee -37- DRC.

HELENE, P. ; TERZIAN, P. (1993). *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo. PINI.

KALIN, Z. (1991). Canada targets C&D debris. *Biocycled*, p.35-36, January.

JOHN, V.M. (1996). Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: WORKSHOP DE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL. São Paulo. p.21-30.

LATTERZA, L. M. ; MACHADO JR., E. F. (1997). Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição. Um novo material para fabricação de painéis leves de vedação. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 28. , São Carlos v.5 , p.1967-1975.

LAURITZEN, E. K. (1994). Third International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry Odense. *Material and Structures* n.27, Denmark, p.307-310, October.

LEVY, S. M. ; HELENE, P. (1997). Vantagens e desvantagens de argamassas produzidas com entulho de obra, finamente moído. *Boletim técnico da Escola Politécnica da USP*, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/ PCC/ 185 , São Paulo.

LEVY, S. M. (1997). *Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos*. São Paulo. 146p. Dissertação (Mestrado)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MAGAGNIN FILHO, N. (1996). *Placas Laminadas em Materiais Compostos de Fibras Longas: Propriedades termoelásticas dos materiais constituintes; propriedades equivalentes das lâminas; critérios de ruptura e análise pelo método dos elementos finitos*. São Carlos. Dissertação ( Mestrado ) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MEHTA, P. K. ; MONTEIRO, P. J. M. (1994). *Concreto - estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo. PINI.

NEVILLE, A . M. (1982). *Propriedades do concreto*. São Paulo. PINI.

NEVILLE, A . M. (1997). *Propriedades do concreto*. 2.<sup>a</sup> ed. São Paulo. PINI.

RAVINDRARAJAH, R. S. ; LOO, Y.H. ; TAM, T.C. (1987). Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. *Magazine of Concrete Reserch*. v.39, n. 141, p.214-220, December.

RAVINDRARAJAH, R. S. ; TAM, T. C. (1985). Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Reserch*. v.37, n.130, p.29-38, March.

RILEM - TC - 121 - DRG (1994). Specifications for concrete with recycled aggregates. *Material and Structures*, v.27, p.557-559.

SOROUSHIAN, P. ; TAVAKOLI, M. (1996). Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. *Journal of the American Concrete Institute Proceedings*, v.93, n.2, p.182-190, March-April.

SPENCER, R. (1990). Opportunities for recycling C&D debris. *Biocycled*, p.56-58, July.

TOALDO, E. (1993). Para não virar pó. *Construção*, São Paulo n.2348, p.10, fevereiro.

TOPÇU, I. B. (1997). Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete. *Cement and Concrete Research*, v.27, n.12, p.1817-1823. September.

VAN ACKER, A . (1996). Recycling of concrete at precast concrete plant. *BIBM*. Paris. p.55-67, juliet.

ZORDAN, S. E. (1997). *A utilização do entulho do entulho como agregado, na confecção do concreto*. Campinas. 136p. Dissertação ( Mestrado ) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.

