

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

KARLISSON ANDRÉ NUNES DA SILVA

**ESTUDO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS PRODUZIDOS  
COM DIFERENTES AGREGADOS RECICLADOS**

Maceió

2011

KARLISSON ANDRÉ NUNES DA SILVA

**ESTUDO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS PRODUZIDOS  
COM DIFERENTES AGREGADOS RECICLADOS**

Dissertação apresentada à Universidade  
Federal de Alagoas, como requisito parcial  
para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Civil.

Área de concentração: *Estruturas*

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Correia  
Gomes

Maceió

2011

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale**

S586e Silva, Karlisson André Nunes da.  
Estudo de propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes agregados reciclados / Karlisson André Nunes da Silva. – 2011.  
113 f : il., graf., tabs.

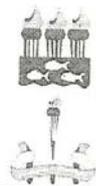
Orientador: Paulo César Correia Gomes.

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Maceió, 2011.

***Bibliografia: f. 94-103.***

1. Concreto. 2. Propriedades mecânicas. 3. Agregados reciclados. I. Título.

CDU: 691.322



Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia – CTEC  
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil – PPGEC



**AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO DOS CONCRETOS  
PRODUZIDOS COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS**

**KARLISSON ANDRÉ NUNES DA SILVA**

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 11 do mês de março do ano de 2011.

Banca Examinadora:

  
**Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes**  
Orientador – CTEC/UFAL.

  
**Prof. Dr. Aline da Silva Ramos Barboza**  
CTEC/UFAL

  
**Prof. Dr. Jardel Pereira Gonçalves**  
UFBA

Campus A. C. Simões, Av. Lourival de Melo Mota, S/N  
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas  
Tel/Fax: (82) 3214-1863  
E-mail: [ppgec@ctec.ufal.br](mailto:ppgec@ctec.ufal.br)  
Homepage: [www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec](http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Senhor, por me permitir chegar até aqui, pois ele – da sua forma – me deu forças para superar os obstáculos que a vida nos impõe.

Ao meu pai e minha mãe, que sempre estiveram incondicionalmente ao meu lado. À minha querida irmã, que mesmo longe torce sempre por mim.

À minha querida madrinha Flora, que sempre me deu incentivo a estudar.

À minha noiva Alessandra, que mesmo em nossos altos e baixos nunca me abandonou.

Ao professor Paulo César, pelos seus conselhos que quase nunca segui e hoje lamento.

Aos colegas do mestrado Kleiton, Romildo e, em especial, a Alexandre e Fernanda, que me ajudaram bastante.

Aos Técnicos do LEMA: Flabeu, Girlei, Sidelei, Sr. Fábio, Sr. Cícero, Valdemir, Henrique, Rafael.

A Jonathas e Antônio, que sempre me deram conselhos úteis.

Aos amigos Hebert Vagner, Nailton e Nadine.

Agradeço à AGM pela possibilidade que me deram para concluir esta etapa da minha vida.

## RESUMO

A pesquisa teve como objetivo principal avaliar as propriedades mecânicas dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados, nas idades de 28 dias e 240 dias, para uso em elementos estruturais. Utilizaram-se dois tipos de resíduos: um formado da mistura de resíduos de construção, reforma e demolição, e outro apenas de resíduos de concreto. O primeiro foi coletado dentro do campus da Universidade Federal de Alagoas; o segundo foi proveniente de trabalhos de pesquisa e de amostras de concretos de várias obras de Maceió e outros municípios do estado. Após o beneficiamento dos resíduos, apenas os agregados graúdos foram utilizados. Para a produção dos concretos foram consideradas duas relações a/c (0,4 e 0,5) e dois níveis de substituição do agregado graúdos (100% RCD e 100% Concreto). As combinações para execução dos mesmos foram definidas através de planejamento fatorial  $2^2$  para a idade de 28 dias. As propriedades analisadas foram a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. A partir dos resultados obtidos, através da análise estatística para a idade de 28 dias foi possível observar que a resistência à compressão dos concretos obedeceu a Lei de Abrams e que a relação a/c teve efeito significativo sobre esta propriedade. Já para o módulo de elasticidade a massa específica teve uma maior influência sobre o seu resultado. Com relação aos concretos de idade mais avançada as propriedades mecânicas citadas acima apresentaram uma evolução satisfatória quando comparados aos concretos de referência. Os resultados mostram que o uso de concretos com agregados graúdos de ambos os tipos podem ser viáveis para determinadas classe de resistência do concreto.

**Palavras-chave: Concreto. Propriedades Mecânicas. Agregados reciclados.**

## **ABSTRACT**

The research aimed to evaluate the mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregate, at ages 28 days and 240 days for use in structural elements. We used two types of waste: a mixture of waste consisting of construction, renovation and demolition waste and others just concrete. The first was collected on the campus of Federal University of Alagoas, the second was from research papers and several samples of concrete works of Macedonia and other cities in the state. After the processing of waste, only the coarse aggregate were used. For the production of concrete were considered two ratios  $a / c$  (0.4 and 0.5) and two levels of substitution of coarse aggregate (100% RCD and 100% Concrete). The implementation of these combinations were defined using 22 factorial design for the age of 28 days. The properties studied were compressive strength and modulus of elasticity. From the results obtained by statistical analysis to the age of 28 days was observed that the compressive strength of concrete obeyed the Law of Abrams and the  $w / c$  ratio had a significant effect on this property. As for the modulus of elasticity specifies the mass had a greater influence on its outcome. With regard to older concrete mechanical properties mentioned above had a satisfactory outcome when compared to reference concrete. The results show that the use of concrete with coarse aggregate of both types may be viable for certain class of concrete strength.

**Keywords: Concrete. Properties mechanicals. Recycled aggregate**

## LISTAS DE FIGURAS

<b>Figura 1 – Ordem das operações unitárias para obter os agregados.</b>	<b>19</b>
<b>Figura 2 – Equipamento utilizado para cominuição, (a) moinho de Martelos, (b) martelos, (c) grade.</b>	<b>20</b>
<b>Figura.3 – Peneirador Mecânico. Fonte: Autor</b>	<b>21</b>
<b>Figura 4 – Relações tensão-deformação: regime elástico (a); regime plástico (b).</b>	<b>28</b>
<b>Figura 5 – Comportamentos típicos de tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto,</b>	<b>29</b>
<b>Figura 6 – Comportamentos típicos de tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto</b>	<b>30</b>
<b>Figura 7 – Definição do módulo elasticidade estático, (SHEHATA, 2005).</b>	<b>32</b>
<b>Figura 8– Representação esquemática do módulo de elasticidade secante (<math>E_{cs}</math>), (NBR 8522, 2008).</b>	<b>33</b>
<b>Figura 9 – Representação esquemática do módulo de elasticidade tangente inicial (<math>E_{ci}</math>),</b>	<b>34</b>
<b>Figura 10 – Parâmetros que influenciam o módulo de elasticidade do concreto,</b>	<b>35</b>
<b>Figura 11 – Relação a/c sobre o módulo de elasticidade.</b>	<b>36</b>
<b>Figura 12 – Relação a/c sobre o módulo de elasticidade.</b>	<b>37</b>
<b>Figura 13 – Influência do consumo de cimento versus módulo de elasticidade,</b>	<b>38</b>
<b>Figura 14 – Relação entre módulo de elasticidade e tempo, de concretos produzidos com adições químicas e minerais.</b>	<b>40</b>
<b>Figura 15 – Relação entre módulo de elasticidade e a massa específica do agregado.</b>	<b>44</b>
<b>Figura 16 – Relação entre módulo de elasticidade e a massa específica do agregado</b>	<b>44</b>

<b>Figura 17 – Relação entre módulo de elasticidade e o teor de agregados com abatimento constante (a), relação entre o módulo de elasticidade e teor de agregados com o fator a/c constante (b).</b>	<b>45</b>
<b>Figura 18 – Ordem de execução da parte experimental do trabalho.</b>	<b>46</b>
<b>Figura 19 – Início da deposição das amostras</b>	<b>47</b>
<b>Figura 20 – Homogeneização das amostras</b>	<b>48</b>
<b>Figura 21 – Triagem para eliminar contaminantes, (a) materiais plásticos, (b) madeira.</b>	<b>48</b>
<b>Figura 22 – Etapas do quarteamento. Agregado reciclado de concreto.</b>	<b>50</b>
<b>Figura 23 – Retirada dos agregados cuja dimensão fosse maior que #19,0 mm.</b>	<b>51</b>
<b>Figura 24 – Execução do ensaio do módulo de elasticidade.</b>	<b>61</b>
<b>Figura 25 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de Elasticidade – Metodologia A – Tensão <math>\sigma_a</math> fixa.</b>	<b>62</b>
<b>Figura 26 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos e limites.</b>	<b>72</b>
<b>Figura 27 – Abatimento dos concretos na 1ª moldagem e na réplica do experimento.</b>	<b>77</b>
<b>Figura 28 – Resistência à compressão dos concretos, 1ª amostragem e Réplica.</b>	<b>79</b>
<b>Figura 29 – Interação entre massa específica e resistência à compressão.</b>	<b>81</b>
<b>Figura 30 – Interação entre a relação a/c e a resistência à compressão.</b>	<b>82</b>
<b>Figura 31– Superfície de resposta da resistência à compressão em função da massa específica do agregado graúdo e da relação a/c.</b>	<b>86</b>
<b>Figura 32 – Módulo de Elasticidade: 1ª moldagem e réplica.</b>	<b>88</b>
<b>Figura 33 – Interação entre massa específica e o módulo de elasticidade.</b>	<b>89</b>
<b>Figura 34 – Interação entre a relação a/c e o módulo de elasticidade.</b>	<b>90</b>
<b>Figura 35– Superfície de resposta para o módulo de elasticidade.</b>	<b>94</b>

<b>Figura 36– Comportamento da resistência em função da relação a/c.</b>	<b>96</b>
<b>Figura 37– Comportamento da resistência em função da massa específica.</b>	<b>97</b>
<b>Figura 38 – Resistência à compressão para idades de 28 e 240 dias.</b>	<b>98</b>
<b>Figura 39 – Resistência à compressão em função da relação a/c para a idade de 240 dias.</b>	<b>99</b>
<b>Figura 40– Resistência à compressão em função da massa específica para a idade de 240 dias.</b>	<b>99</b>
<b>Figura 41 – Detalhes de corpos-de-prova rompidos no ensaio de resistência à compressão.</b>	<b>101</b>
<b>Figura 42 – Detalhes de corpos-de-prova rompidos no ensaio de resistência à compressão.</b>	<b>101</b>
<b>Figura 43– Módulo de elasticidade em função da massa específica para a idade de 240dias.</b>	<b>103</b>
<b>Figura 44– Módulo de elasticidade em função da relação a/c para a idade de 240 dias.</b>	<b>103</b>
<b>Figura 45– Gráfico da evolução do módulo de elasticidade ao longo do tempo.</b>	<b>105</b>
<b>Figura 46 – Módulo de elasticidade em função da massa específica para idade de 240 dias.</b>	<b>106</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Massas específicas de agregados naturais e agregados graúdos.</b>	<b>42</b>
<b>Tabela 2 – Propriedades granulométricas dos agregados AGC e AGR segundo a NBR NM 248 (2003).</b>	<b>52</b>
<b>Tabela 3– Propriedades dos agregados graúdos reciclados.</b>	<b>52</b>
<b>Tabela 4 – Absorção dos agregados graúdos reciclados em função do tempo.</b>	<b>53</b>
<b>Tabela 5– Características granulométricas dos AGN.</b>	<b>54</b>
<b>Tabela 5 – Propriedades dos AGN.</b>	<b>54</b>
<b>Tabela 7 – Absorção dos AGN em função do tempo.</b>	<b>55</b>
<b>Tabela 8 – Características granulométricas dos agregados miúdos naturais.</b>	<b>56</b>
<b>Tabela 9 - Propriedades do aditivo plastificante segundo informações do fabricante.</b>	<b>57</b>
<b>Tabela 10 - Cálculo do volume de agregado graúdo para o traço com teor de argamassa igual a 50%.</b>	<b>58</b>
<b>Tabela 11 – Composição dos concretos produzidos.</b>	<b>59</b>
<b>Tabela 12 – Traços obtidos da combinação dos fatores do experimento mais os traços de referência.</b>	<b>65</b>
<b>Tabela 13 – Quantidade de corpos-de-prova utilizados no experimento fatorial.</b>	<b>66</b>
<b>Tabela 14 - Modelo do planejamento do experimento fatorial, 2<sup>2</sup>.</b>	<b>66</b>
<b>Tabela 15 – Propriedades dos agregados graúdos.</b>	<b>73</b>
<b>Tabela 16 – Outras propriedades dos agregados graúdos.</b>	<b>75</b>
<b>Tabela 17 – Absorção dos agregados graúdos.</b>	<b>76</b>
<b>Tabela 18 – Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone.</b>	<b>77</b>

<b>Tabela 19 – Resultados de resistência à compressão, 1ª Moldagem, Réplica e Média.</b>	<b>78</b>
<b>Tabela 20– Resultados de um planejamento fatorial 2<sup>2</sup> para estudar o efeito da massa específica dos agregados graúdos reciclados e do fator a/c sobre a resistência à compressão dos concretos.</b>	<b>80</b>
<b>Tabela 21 – Variância dos ensaios individuais para resistência à compressão.</b>	<b>84</b>
<b>Tabela 22 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial 2<sup>2</sup> da tabela 4.6.</b>	<b>85</b>
<b>Tabela 23 – Resultados dos módulos de elasticidade tangentes iniciais (E<sub>ci</sub>): 1ª moldagem, réplica e média.</b>	<b>87</b>
<b>Tabela 24– Resultados de um planejamento fatorial 2<sup>2</sup> para estudar o efeito da massa específica dos agregados graúdos reciclados e do fator a/c sobre o módulo de elasticidade dos concretos.</b>	<b>89</b>
<b>Tabela 25– Variância dos ensaios individuais para o módulo de elasticidade.</b>	<b>92</b>
<b>Tabela 26 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial 2<sup>2</sup> da tabela 4.10.</b>	<b>93</b>
<b>Tabela 27 – Resistência à compressão para idade de 240 dias.</b>	<b>96</b>
<b>Tabela 28– Resistência à compressão para idades de 28 e 240 dias.</b>	<b>97</b>
<b>Tabela 29 – Observações quanto à ruptura dos agregados reciclados nos corpos de-prova do ensaio de resistência à compressão.</b>	<b>100</b>
<b>Tabela 30 - Módulo de elasticidade para idade de 240 dias.</b>	<b>102</b>
<b>Tabela 31 – Módulo de elasticidade aos 28 dias e 240 dias.</b>	<b>104</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

AGC	Agregado Graúdo de Concreto
AGR	Agregado Graúdo de Reciclado
AGN	Agregado graúdo natural
a/c	Relação água/cimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ELS-DEF	Estado limite de deformação excessivo
LEMA	Laboratório de Estruturas e Materiais
RCRA	Resource Conservation and Recovering
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
UFAL	Universidade Federal de Alagoas

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	<b>17</b>
<b>1.2.</b>	<b>Objetivos</b>	<b>17</b>
1.2.1.	Objetivo geral	17
1.2.2.	Objetivo específico	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Tipos e classificação dos resíduos</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Operações unitárias</b>	<b>18</b>
2.2.1	Cominuição	19
2.2.2	Separação por tamanho	21
2.2.3	Catação	21
<b>2.3.</b>	<b>Resistência à compressão</b>	<b>21</b>
2.3.1	Parâmetros que influenciam a resistência à compressão	22
2.3.1.1	Relação água/cimento (a/c)	22
2.3.1.2	Forma, textura e dimensões máximas dos agregados reciclados	23
2.3.1.3	Porosidade do agregado	24
<b>2.4</b>	<b>Módulo de Elasticidade</b>	<b>26</b>
2.4.1	Módulo de elasticidade estático	31
2.4.2	Parâmetros que influenciam no módulo de elasticidade	34
2.4.2.1	Relação a/c	35
2.4.2.2	Consumo de cimento	37
2.4.2.3	Aditivos químicos	39
2.4.2.4	Porosidade dos agregados graúdos	40
2.4.2.5	Teor de agregado	44
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>46</b>
<b>3.1.</b>	<b>Planejamento da parte experimental</b>	<b>46</b>
3.1.1.	Agregados reciclados	47
3.1.1.1.	Origem e coleta dos resíduos	47
3.1.2.	Beneficiamento dos resíduos	49
3.1.3.	Caracterização dos agregados graúdos reciclados	50
3.1.4.	Caracterização de outros materiais	53

<b>3.2</b>	<b>Produção de concretos</b>	<b>57</b>
3.2.1	Composição dos concretos	57
3.2.2	Preparo, moldagem e cura dos concretos	59
3.2.3	Ensaio realizados nos concretos	61
<b>3.3.</b>	<b>Planejamento fatorial</b>	<b>64</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>72</b>
<b>4.1.</b>	<b>Propriedades dos agregados graúdos</b>	<b>72</b>
<b>4.2.</b>	<b>Propriedades dos concretos no estado fresco</b>	<b>76</b>
4.2.1.	Consistência	76
<b>4.3.</b>	<b>Propriedade dos concretos no estado endurecido</b>	<b>78</b>
4.3.1.	Para idades de 28 dias	78
4.3.1.1	Resistência à compressão	78
4.3.1.2	Módulo de elasticidade	87
4.3.2.	Para idades de 240 dias	95
4.3.2.1.	Resistência à compressão	95
4.3.2.2.	Módulo de elasticidade	102
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>107</b>
<b>5.1</b>	<b>Análises dos resultados</b>	<b>107</b>
<b>5.2</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b>	<b>108</b>
	<b>REFERÊNCIA</b>	<b>109</b>

## 1 INTRODUÇÃO

---

Atualmente é visível a preocupação da sociedade por soluções racionais que melhorem a produtividade, reduzam os desperdícios e diminuam os custos nos mais diversos setores. A construção civil segue esta tendência mundial, pois ela é responsável por grande parte da demanda dos recursos naturais, para construção de obras relacionadas às mais diversas atividades, como habitação, transporte, saneamento entre outras. Estima-se que a geração de resíduos de construção e demolição (RCD) seja de 2 a 3 bilhões t/ano, no mundo; é cerca de 68,5 milhões t/ano no Brasil, chegando a ser até 2 vezes o volume de lixo sólido urbano (ÂNGULO, 2005). O concreto, por sua vez, é o segundo material mais consumido pela humanidade: cerca de 11 bilhões t/ano, perdendo apenas para a água (METHA; MONTEIRO, 2008). E, em uma realidade mais próxima, o município de Maceió produz atualmente cerca de 120 mil ton/ano de resíduos provenientes de construção, demolição e reforma (GOMES et al., 2005).

No Brasil, a atenção voltada aos resíduos é recente, diferentemente da Europa, Japão e Estados Unidos. Este último possui uma política específica para resíduos desde 1960, chamada de Resource Conservation and Recovering Act (RCRA) (JONH; AGOPYAN, 2000). Para ampliar o reaproveitamento do RCD no Brasil, entraram em vigor duas normas técnicas em 2004, que estabelecem critérios para o uso de agregados reciclados na execução de camadas de pavimentação NBR 15115 (2004) e para utilização em preparo de concreto sem função estrutural NBR 15116 (2004), criando novas possibilidades para o emprego desses materiais.

O uso de agregados reciclados de RCD na composição de concretos estruturais, tanto na forma de agregado miúdo ou graúdo, esbarra no fato de que suas propriedades apresentam uma grande variabilidade e que ainda não se conhece perfeitamente sua influência sobre as propriedades do concreto. Além disso, a própria quantificação destas propriedades constitui um problema inicial, já que os métodos normalizados para esta finalidade foram estabelecidos para agregados naturais. Por conseguinte, não existe uma norma brasileira que especifique os requisitos necessários à utilização desses agregados em concretos.

De acordo com Tenório (2007), a falta de um parâmetro que sirva de índice de qualidade para os agregados reciclados tem levado os pesquisadores a utilizá-los de formas diferentes, substituindo os agregados naturais (grãos e miúdos) – em todo ou em parte – pelos agregados reciclados, de modo que não afetem tanto as propriedades dos concretos. Outro aspecto que envolve os agregados reciclados é a forma de classificá-los, que pode ser, por exemplo, de acordo com presença percentual de cada fase: concreto, argamassa, cerâmica vermelha etc. Algumas dessas classificações são baseadas em critérios visuais, podendo ser falhas em razão de cada fase do RCD ter sua própria variabilidade.

Vieira e Dal Molin (2004) avaliaram a viabilidade de utilização técnica e econômica dos resíduos de construção e demolição, mediante sua aplicação na produção de agregados reciclados em concretos. As pesquisadoras realizaram uma comparação entre concretos produzidos com agregados convencionais e reciclados. Os resultados encontrados indicaram que os agregados reciclados podem melhorar algumas propriedades do concreto, como resistência à compressão e durabilidade, a qual foi medida através da estimativa da vida útil.

Pelisser et al., (2006) analisaram o comportamento de concretos fabricados com agregados reciclados de concretos produzidos com diferentes proporções deste agregado. A pesquisa teve como base verificar a influência de diferentes teores de substituição dos agregados reciclados e diferentes relações água/cimento (a/c) nas propriedades do concreto. Os resultados encontrados mostraram que os agregados de concreto apresentam um grande potencial para a utilização em concretos, porém, os autores enfatizam a necessidade de aumentar o conhecimento acerca das propriedades dos agregados reciclados para aumentar a sua utilização.

Na pesquisa de Mony e Lago (2006) foram utilizados resíduos de concreto para produzir dois tipos de agregados; um grão e outro miúdo. Para a produção dos concretos, foram utilizados diferentes teores de cada agregado (20%, 50% e 100%) em substituição aos agregados naturais. Os resultados foram comparados a concretos produzidos com agregados naturais. De posse dos resultados os pesquisadores construíram diagramas de dosagens os quais possibilitaram adoção de modelos matemáticos que os conduziram a uma análise criteriosa de diferentes classes de concreto com 20 MPa, 30 MPa e 40 MPa. Os resultados mostraram que do ponto de vista do volume total dos poros, da absorção de água por imersão e da resistividade dos concretos, a substituição de agregados grãos naturais por agregados

reciclados graúdos até a taxa de 50% em nada prejudicou o concreto. Porém, os autores enfatizam que é necessário um correto manuseio e um gerenciamento adequado para incrementar a produção de reciclados graúdos de concreto.

Souza et al., (2010) analisaram as propriedades de concretos no estado fresco e no estado endurecido substituído os agregados naturais, areia de rio e seixo, por agregados miúdos e graúdos produzidos com resíduos de construção e demolição da região de Belém – PA. Os pesquisadores utilizaram percentuais de substituição para os agregados na ordem de 25% a 75%. Os resultados mostraram viabilidade técnica de substituir parcialmente o seixo e areia de rio para a produção de concretos convencionais. Outro fato relevante para os autores é com relação ao seixo, a possibilidade de sua substituição ainda se torna mais importante visto que existe uma carência de agregados com qualidades em jazidas disponíveis para extração na região.

Entre os tipos de resíduos que podem ser utilizados como agregados graúdos estão os procedentes de RCD, os de resíduos de concreto ou a combinação de ambos. Varias pesquisas já demonstraram a viabilidade do uso destes materiais (LEVY, 2001; BUTTLER, 2003; ÂNGULO, 2005; ULSEN, 2006; LOVATO, 2007). Entretanto, apesar da indicação positiva do uso do agregado reciclado, é necessário determinar técnicas e critérios que melhor selecionem tais agregados para uso estrutural, entre as várias pesquisas realizadas, é possível observar uma variedade de técnicas existentes. Entre elas, podemos destacar as utilizadas por Carrijo 2005, Tenório 2007, Moreira 2010.

Com a finalidade de usar agregados reciclados em concretos para fins estruturais, surge a necessidade de estudar o efeito destes sobre as propriedades mecânicas do concreto. Segundo Fusco (2008), a resistência a compressão é a propriedade mais representativa da qualidade do concreto e a maioria dos projetos estruturais são baseados nela dentro desta linha de pesquisa, porém, existem outras propriedades importantes para o comportamento do concreto com agregado reciclado, por exemplo, a fluência e o módulo de elasticidade que ainda são pouco pesquisados. Esta última propriedade tem papel preponderante nas análises de deformações ocorridas nas estruturas de concreto. De acordo com a NBR 6118 (2003) as deformações ocorridas no estado-limite de deformações excessivas (ELS – DEF) representam o estado em que as deformações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal da construção.

## **1.1 Justificativa**

A relevância deste trabalho reside no fato que , é necessário adquirir maior conhecimento sobre a substituição dos agregados graúdos reciclados mistos ou composto apenas por um material sobre a propriedades mecânicas do concreto visando uma utilização estrutural.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O trabalho tem como objetivo geral avaliar as propriedades mecânicas do concreto resistência à compressão e o módulo de elasticidade estático, dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de resíduos classe “A”, nas idades de 28 dias e 240 dias para uso em elementos estruturais.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Comparar o comportamento das propriedades mecânicas da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dos concretos de referência (produzidos com agregados naturais) com os resultados da resistência à compressão e do módulos de elasticidade dos concretos produzidos com os resíduos classe A.
- Estudar os efeitos principais dos fatores (relação água/cimento e massa específica do agregado reciclado) e os efeitos das interações entre eles;
- Avaliar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos em idades avançadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Neste capítulo serão abordados, de forma resumida, entre outros assuntos, os tipos e as classificações dos resíduos e o processo de beneficiamento. Também uma introdução sobre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade e os parâmetros que os influenciam.

### 2.1 Tipos e classificação dos resíduos

Os resíduos gerados pelas atividades da construção civil recebem denominações diferentes em cada região do país: por exemplo, entulho, metralha ou caliça. Os mesmos recebem ainda várias definições e uma delas é dada pelo (CONAMA) através de sua resolução nº 307 de 2002, que apresenta a seguinte definição: resíduos da construção civil – são os provenientes de construção, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeira e compensados, forros, argamassas, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc.

O artigo 3º desta mesma resolução classifica os resíduos da construção civil quanto à sua origem, dividindo-os em quatro classes: A, B, C e D. O foco do presente trabalho está voltado para o resíduo Classe “A”, cuja definição é a seguinte – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- ❖ de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- ❖ de construção, demolição, reformas e reparos de edificações; componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimentos etc.), argamassa e concreto;
- ❖ no processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.).

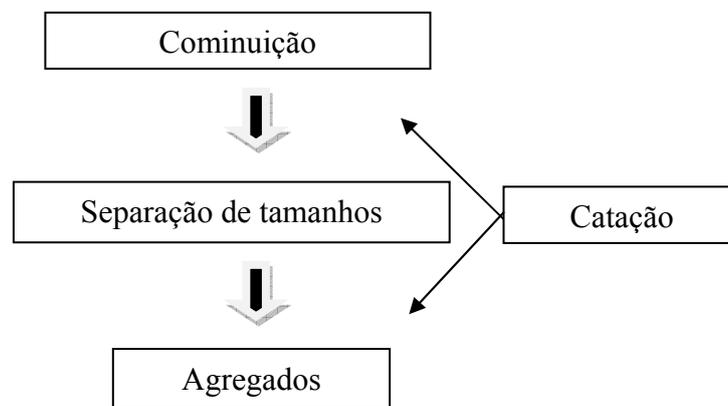
### 2.2 Operações unitárias

No processo de reciclagem da fração mineral Classe “A” do RCD como agregado, existe a necessidade de um beneficiamento do mesmo em virtude de ele não se encontrar num estado apropriado ao que é esperado, por exemplo, heterogeneidade de fases e de tamanhos.

A transformação do RCD e do concreto em agregado não é muito diferente do processo de obtenção dos agregados naturais e, portanto, os procedimentos e equipamentos utilizados na indústria de mineração podem ser diretamente usados, ou adaptados, se necessário, à reciclagem do resíduo de construção e demolição (LIMA, 1999).

A Figura 1 mostra as três operações unitárias necessárias para obter os agregados miúdos e graúdos, iniciando pela cominuição e seguindo para a separação por tamanho e entre elas ocorre a catação. Para as duas primeiras operações são necessários equipamentos específicos; já no caso da catação, esta pode ser realizada através de processo manual e visual.

**Figura 1 – Ordem das operações unitárias para obter os agregados.**

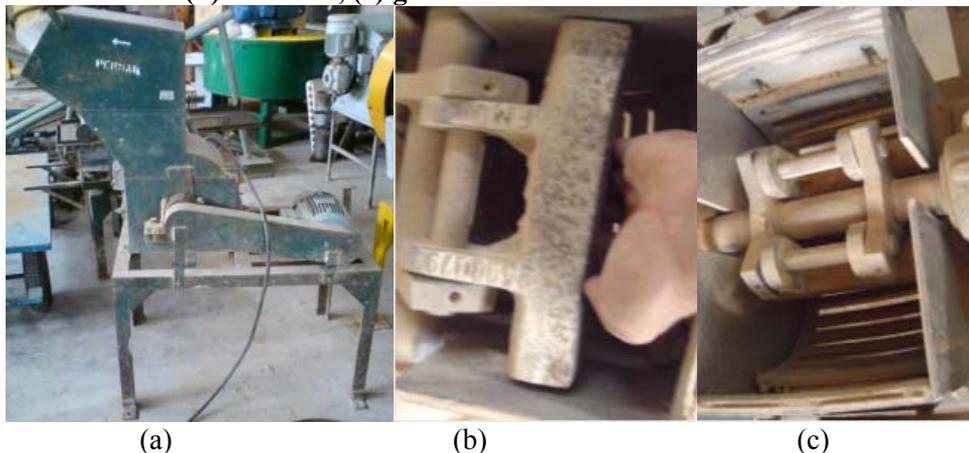


Fonte: Autor, 210.

### 2.2.1 Cominuição

É a operação de fragmentação que agrupa um conjunto de técnicas que tem por finalidade reduzir, por ação mecânica externa, e algumas vezes interna, um sólido de determinado tamanho em fragmentos de tamanho menor (FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ, 2004). Para esta etapa um equipamento bastante utilizado é moinho de martelos Figura 2.

**Figura .2 – Equipamento utilizado para cominuição, (a) moinho de Martelos, (b) martelos, (c) grade**



(a) Fonte: Autor, 2010.

A (Figura 2 (a)) mostra o moinho de martelos. Neste equipamento, o material é fragmentado de uma forma um tanto similar à britagem por impacto. Inicialmente, os resíduos chocam-se com os martelos maciços fixos ao rotor e com a superfície interna da câmara (Figura 2 (b)). Entretanto, no fundo da câmara há uma grade que funciona como uma peneira, só permitindo passar aqueles grãos que já foram reduzidos a um tamanho inferior à sua abertura (Figura 2 (c)) (LIMA, 1999; FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ, 2004). Nessa região, a fragmentação dos grãos ocorre por atrito e cisalhamento. Nos moinhos que permitam a retirada da grade inferior é possível transformar este equipamento num britador primário.

O moinho de martelos apresenta como pontos positivos:

- O equipamento possui uma grade que pode ser regulável para obter a granulometria desejada;
- O moinho de martelos é capaz de cominuir vários tipo de rocha.

Já como pontos negativos, é possível citar:

- Muita geração de ruído;
- Produz uma grande quantidade de partículas suspensas no ar;
- Produziu uma grande quantidade de agregados miúdos.

### 2.2.2 Separação por tamanhos

Separação por tamanho ou peneiramento é de acordo com Carrisco e Correia (2004) é a separação de um material em duas ou mais classes, estando estas limitadas uma superior e outra inferiormente. Uma das formas de fazer esta separação é utilizando um peneirador mecânico (Figura 3).

**Figura 3 – Peneirador Mecânico.**



Fonte: Autor, 2010.

### 2.2.3 Catação

O objetivo da catação é retirar a maior quantidade possível de contaminantes, deixando apenas os resíduos classe “A”. Durante todas as etapas serão feitas triagens retirando as impurezas encontradas, utilizando o processo manual.

## 2.3 Resistência à compressão

De acordo com Neville (1997), a resistência à compressão é uma das propriedades mais importantes, ainda que em outros casos particulares, outras características tais como: durabilidade e permeabilidade sejam de fato mais relevantes quando se trata de prever a vida útil de uma estrutura em determinado meio.

Sendo a resistência à compressão uma das propriedades mecânicas do concreto mais difundidas no meio técnico, se não for a mais conhecida. E devido à falta de conhecimento de outras propriedades do concreto como o módulo de elasticidade ela vem sendo utilizada isoladamente como referência para o acompanhamento das estruturas em concreto armado. Nos dias atuais quando a resistência à compressão alcança o valor determinado em projeto liberam-se vigas e lajes para desforma sem haver uma preocupação com o módulo de elasticidade, podendo ocorrer com isso deformações excessivas e flechas nas estruturas.

Todos os componentes dos quais o concreto é feito afetam de alguma forma o resultado da resistência à compressão e entre estes está o agregado graúdo, porém, segundo Metha e Monteiro (2008) o agregado normalmente não é um fator determinante na resistência do concreto porque, com exceção dos agregados leves, a partícula de agregado é muito mais resistente do que a matriz e a zona de transição na interface do concreto. Mas quando se trata de agregados graúdos reciclados estes passam a ter uma influencia maior no resultado da resistência à compressão.

### 2.3.1 Parâmetros que influenciam a resistência à compressão de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados

Para concretos usuais a resistência à compressão depende principalmente da relação água/cimento (a/c), outros fatores como: porosidade da matriz pasta de cimento, do agregado e a zona de transição entre matriz pasta de cimento e o agregado tem importante influencia sobre esta propriedade do concreto. Porém, para concretos produzidos com agregados reciclados além dos mesmos fatores citados para o concreto convencional outros contribuem para um ganho menor de resistência. Uma vez que, os agregados graúdos reciclados possuem menor massa específica, maior porosidade, maior absorção entre outras características.

#### 2.3.1.1 Relação água/cimento (a/c)

De acordo com Neville (1997) a resistência à compressão de um concreto a certa idade, curado em água e com uma temperatura estabelecida, depende de dois fatores o primeiro a relação a/c e o segundo o grau de adensamento. O autor ainda ressalta que a relação a/c determina a porosidade da pasta de cimento em qualquer estágio de hidratação.

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{1.5}}$$

equação 2.1

Sendo  $k_1$  e  $k_2$  constantes empíricas.

Ainda segundo Metha e Monteiro (2008) a medida que a relação a/c aumenta ocorre um enfraquecimento progressivo da matriz causado pelo aumento da porosidade com o aumento da relação a/c.

Leite (2001) observou que os concretos produzidos com agregados reciclados também obedecem a lei de Abrams, ou seja, quanto maior a relação a/c, menor é a resistência do concreto. Em sua pesquisa também pode ser comprovado que o grau de hidratação do concreto influencia os resultados da resistência à compressão do concreto reciclado, do mesmo modo que ocorre com o concreto convencional, porém em níveis diferentes.

Para Carrijo (2005) os resultados da resistência à compressão dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados diminui a medida que se reduziu a relação a/c, estando de acordo com o observado na literatura, pois para concretos de baixa relação a/c o agregado graúdo e o componente mais fraco limitando a resistência do concreto.

De acordo com Leite (2001), quando se utiliza agregados reciclados nas misturas de concreto, a relação a/c e o teor de agregado graúdo reciclado são os fatores de maior influência na determinação da resistência, ou seja, a porosidade da matriz, determinada pela relação a/c, e a porosidade do agregado são fatores de fundamental importância na resistência final dos concretos.

#### 2.3.1.2 Forma, textura e dimensões máximas dos agregados reciclados.

Metha e Monteiro (2008) prevêem que independentemente da relação a/c, a dimensão, forma e textura superficial e mineralógica das partículas de agregados influenciarão as características da zona de transição na interface e portanto, afetarão a resistência à compressão do concreto .

Segundo Ângulo (2000) a forma e a textura dos agregados reciclados são diferentes das dos agregados naturais, eles se apresentam de uma forma mais angular o que influi na trabalhabilidade do concreto no estado fresco.

Leite (2001) observou que o agregado reciclado usado em sua pesquisa foi menos lamelar que o agregado natural (2,3 e 2,6 respectivamente).

Já com relação ao aumento da dimensão máxima dos agregados graúdos Metha e Monteiro (2008) para uma mesma mineralogia pode ter dois efeitos opostos na resistência do concreto. Para um mesmo consumo de cimento e consistência, dosagens de concreto contendo partículas maiores de agregados requerem menos água de amassamento do que as que contem agregados menores. Por outro lado, agregados maiores tendem a formar uma zona de transição na interface mais fraca, contendo assim mais micro fissuras. O efeito resultante variará com relação a/c concreto e tipo de adensamento.

### 2.3.1.3 Porosidade do agregado.

Segundo Metha e Monteiro (2008) a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos agregados graúdos são propriedades inter-relacionadas que são muito influenciadas pela porosidade. Logo, se está propriedade influencia um dos constituintes do compósito, também influenciará o próprio compósito, Tenório (2007).

Um dos dados que demonstram que o agregado possui uma alta porosidade é absorção. Tenório (2007) apresentou dados sob absorção da seguinte forma: agregado graúdo natural 0,49%, um agregado graúdo reciclado que chamou de G1 com 8,41% e outro chamou de G2 com 5,37%. Sendo G1 menos denso ( $2,08 \text{ kg/dm}^3$ ) foi composta pelo próprio resíduo de RCD recolhido dentro da malha urbana do município de Maceió-AL, e o segundo G2 foram utilizadas regras de misturas para estabelecer uma massa específica melhorada atingindo um valor pré-definido para a massa específica, misturando-se agregados graúdos de concreto reciclado aos agregados graúdos de RCD, obtendo uma massa específica de  $2,25 \text{ kg/dm}^3$ .

É de conhecimento solidificado na tecnologia do concreto que uma maior absorção do agregado graúdo conduzirá a uma maior porosidade do concreto – basta ver os estudos da zona de transição- essa porosidade exigirá uma maior água de amassamento. No processo de cura do concreto essa água em excesso será eliminada deixando vazios.

Dentro deste panorama salienta-se o trabalho de Carrijo (2005). Esse pesquisador utilizou agregados que foram inicialmente divididos em pilhas cinzas e pilhas vermelhas. A separação dos agregados graúdos reciclados ocorreu por faixas de densidade. A massa específica foi o fator de diferenciação entre os agregados graúdos de RCD. Quatro faixas de massa específicas foram escolhidas para realizar um estudo das propriedades mecânicas do concreto; estas faixas variaram entre  $d < 1,9 \text{ g/cm}^3$  até  $d > 2,5 \text{ g/cm}^3$ . Para realizar esta

separação, foram escolhidos inicialmente três métodos: separação com cloreto de zinco (ZnCl); separação com bromofórmio (CHBr<sub>3</sub>); e a separação com o equipamento *Sink and float*. Cada um dos métodos apresentou vantagens e desvantagens; porém, o que apresentou melhores resultados foi o equipamento *Sink and float*.

Já Moreira (2010) também considerou a massa específica dos agregados como o fator de diferenciação entre os agregados graúdos de RCD. Os agregados graúdos utilizados nesta pesquisa foram provenientes de duas cidades diferentes. Para dividir os agregados graúdos em faixas de densidades, foi utilizado inicialmente o equipamento *Sink and float*. Os agregados tiveram densidades variando entre  $d < 1,9 \text{ g/cm}^3$  e  $d > 2,2 \text{ g/cm}^3$ . Para os agregados cuja massa específica foi maior que  $d > 2,2 \text{ g/cm}^3$ , outro tratamento foi realizado com o jigue. Após a separação os agregados, apresentaram as seguintes massas específicas para os agregados menos densos de cada cidade:  $1,95 \text{ g/cm}^3$  e  $2,06 \text{ g/cm}^3$ . Já para os agregados mais densos os resultados foram  $2,2 \text{ g/cm}^3$  e  $2,29 \text{ g/cm}^3$ . A pesquisa em questão utilizou a separação densitária e a implementou usando o jigue. A combinação dos processos, segundo a autora, foi benéfica para a massa específica dos agregados reciclados.

As pesquisas relatadas até aqui mostram algumas técnicas para a melhorar a massa específica dos agregados graúdos, entre elas a separação por meio denso, as equações de misturas, a separação por meio denso com aprimoramento utilizando o jigue. Destarte, todas as técnicas possuem vantagens e desvantagens em relação umas as outras. Outrossim, cada pesquisa apresenta sua peculiaridade, cabendo um estudo para avaliar a viabilidade da técnica a ser utilizada.

Entre as propriedades mecânicas dos concretos produzidos com agregados reciclados, que mais aparecem como foco de estudo, estão a resistência à compressão e o módulo de elasticidade (LEITE 2001; CARRIJO 2005, LOVATO 2007; TENÓRIO 2007; MOREIRA 2010). A maioria dos ensaios são realizados para a idade de 28 dias, com raras exceções a exemplo de Leite 2001, que avaliou apenas a resistência à compressão para idades mais avançadas de até 91 dias. Tenório (2007) analisou o módulo de elasticidade aos 28 dias e realizou um experimento fatorial para avaliar apenas resistência à compressão para a mesma idade. Nas pesquisas desenvolvidas até o presente momento, existe uma lacuna para ensaios de módulo de elasticidade em idades avançadas, pois uma avaliação do comportamento do concreto com agregados reciclados, visando o uso estrutural ao longo do tempo, poderia

mostrar se os agregados estão sujeitos a uma degradação, devido a sua própria porosidade, a presença de produtos químicos e outros agentes agressivos.

## 2.4 Módulo de Elasticidade

Os estudos realizados pelo matemático inglês Robert Hooke (1653-1703), direcionados à resistência dos materiais, culminaram em uma relação matemática que leva seu nome (BERR; JOHNSTON JÚNIOR, 1982). Suas pesquisas eram baseadas no comportamento linear das deformações sob carregamento nos materiais (HALLDAY; RESNICK; WALKER, 1996). Seus experimentos com materiais homogêneos levaram-no a concluir que existia uma relação entre tensão e deformação para pequenas deformações, que fornece diretamente o módulo de elasticidade (E) (equação 2.2).

$$\sigma = E\varepsilon$$

Equação 2.2

Podemos observar na equação acima que a constante de proporcionalidade ou o módulo de elasticidade (E) possui a mesma dimensão da Tensão (MPa), pois a deformação é adimensional. Normalmente é utilizada a unidade de “GPa” devido aos grandes valores obtidos pelos módulos.

O módulo de elasticidade determina o valor da rigidez de um material, ou seja, avalia sua resistência; quanto maior é o seu valor, maior é o esforço a ser feito para deformar um material. Hoje esse conhecimento é uma ferramenta imprescindível para análise de projetos estruturais relacionados com as deformações e os modos de vibrações causadas pelas cargas aplicadas às estruturas.

Segundo Metha e Monteiro (2008), em materiais homogêneos, o módulo de elasticidade é uma medida das forças de ligação interatômicas e não é afetado por alterações microestruturais. No caso dos aços, independentemente da matéria-prima, a estrutura básica do cristal de ferro é sempre a mesma: cúbica de corpo centrado a temperaturas inferiores a 723°C, com átomos de carbono, de impurezas e elementos de liga distribuídos na rede. Independente da composição, é sempre o cristal cúbico de ferro que se sujeita às deformações elásticas, ou seja, as deformações sempre vão depender das forças de ligação entre os átomos

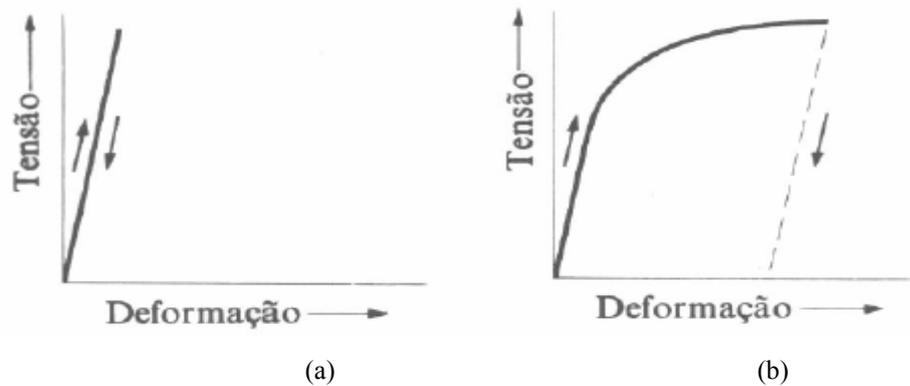
de ferro. Porém, isto não é verdade para materiais multifásicos heterogêneos como o concreto porque o cimento hidratado não tem sempre a mesma estrutura, pois é formado por cristais de diferentes espécies (AGUILAR et al., 2006).

O concreto, por sua vez, é um material compósito que possui um meio aglomerante (cimento) no qual são adicionados um material granular (agregados miúdos e graúdos) mais a água (METHA; MONTEIRO, 2008). Pela sua composição heterogênea, o concreto possui um módulo de elasticidade diferente de metais como o aço e o ferro, pois ele varia em função das matérias-primas que o compõem, o que tem relação direta com a resistência mecânica.

O estudo do módulo de elasticidade do concreto mostra-se bastante complexo porque o concreto é um material elástico dentro de certos limites (NEVILLE, 1997). Para entender melhor as deformações às quais o concreto está sujeito é necessário entender o que ocorre nos materiais como um todo, para isso recorre-se à engenharia dos materiais. De forma geral existem dois tipos de deformações: as elásticas e as plásticas. Na primeira, as deformações desaparecem quando a carga é removida; já na segunda, ocorre um deslocamento permanente dos átomos do material (VAN VLAK, 1970).

Quanto ao comportamento dos materiais serem elásticos ou plásticos, pode-se observar na Figura 4 a diferença entre eles. A figura à esquerda representa os materiais que possuem regime elástico, pois as deformações surgem e desaparecem com a aplicação ou retirada de tensões e permanece a linearidade do gráfico; já a figura à direita mostra o comportamento dos materiais que obedecem ao regime plástico. Durante o carregamento, o material permanece linear até determinado nível de carregamento; após este nível, o material começa a deformar-se e isto é visível na curvatura acentuada do gráfico para direita e uma vez cessada a aplicação das tensões o material deforma-se de forma irreversível, não retornando à sua forma original.

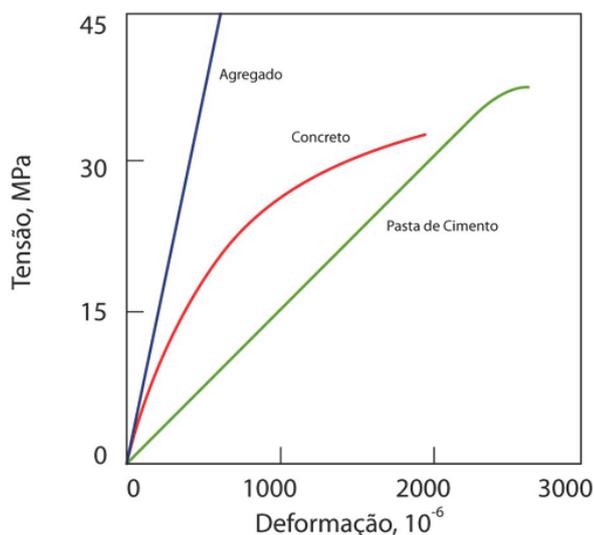
**Figura 4 – Relações tensão-deformação: regime elástico (a); regime plástico (b).**



Fonte: VAN VLAK, 1970.

Metha e Monteiro (2008), juntamente com Neville (1997) concordam em afirmar que a curvatura da relação tensão-deformação do concreto (Figura 5) deve-se à presença da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento. Essa zona de transição possui características que afetam o módulo de elasticidade do concreto, tais como a presença de espaços vazios, concentração de cristais de hidróxido de cálcio e as microfissuras. A zona de transição está sujeita ainda a porosidade controlada por fatores como a relação água/cimento, adições minerais, características de execução, distribuição granulométrica do agregado, interação química entre o agregado e a pasta de cimento e o grau de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

**Figura 5 – Comportamentos típicos de tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto,**

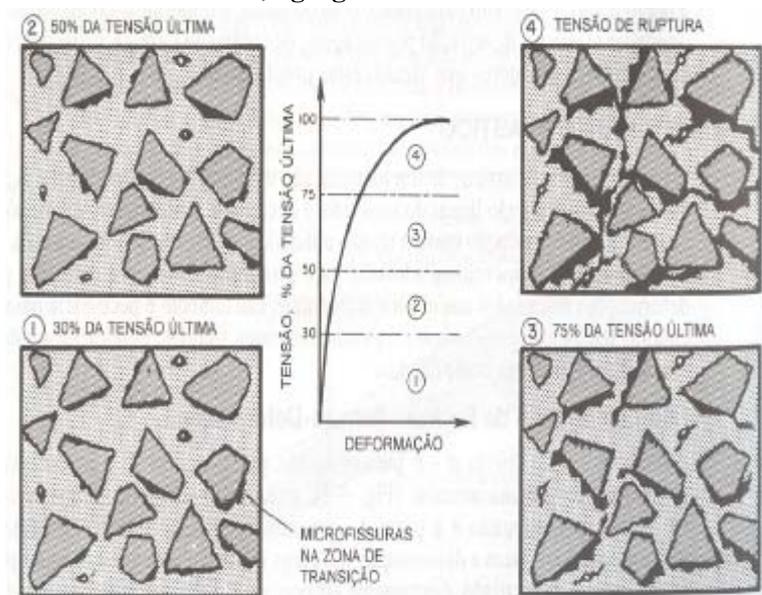


Fonte: METHA; MONTEIRO, 2008.

Como pode ser observado na Figura 5, o agregado e a pasta de cimento submetidos separadamente ao carregamento uniaxial apresentam comportamentos lineares, e é possível observar a importância dos agregados devido aos altos valores atingidos pelo seu módulo de elasticidade. Já o comportamento do concreto não permanece com as características lineares do agregado e da pasta de cimento e na medida em que o carregamento aumenta a curvatura fica mais acentuada.

Ainda com relação à curvatura do material composto, Neville (1997) afirma que com o aparecimento das microfissuras progressivas ocorre uma redução da área que resiste à carga aplicada, causando assim um aumento na tensão baseada na seção transversal da peça, causando a curvatura da Figura 5. A evolução da microfissuração interna do concreto sob uma tensão aplicada pode ser vista na Figura 6.

**Figura 6 – Comportamentos típicos de tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto**



Fonte: METHA; MONTEIRO, 2008.

Esse comportamento pode ser dividido em quatro partes (Figura 6). Inicialmente, é proporcional à tensão aplicada, apresentando comportamento elástico-linear quando submetidos até 30% da carga última; na segunda parte, aumentam a quantidade e o tamanho das microfissuras e a curva já se afasta sensivelmente de uma linha reta quando é submetido até 50% da carga última; na terceira parte, crescem as fissuras na matriz, e com o aumento da tensão até 75% da carga última o sistema se torna instável e também há um aumento da inclinação da curva. Na última parte, que ocorre entre 75% e 80% da carga final, inicia-se o processo de crescimento espontâneo das fissuras sob tensão constante e o material se deforma até romper (METHA; MONTEIRO, 2008).

Conforme Vasconcelos e Salvador e Giammusso (1998), o conceito de elasticidade não depende do comportamento linear, porém o termo elasticidade pressupõe que, uma vez cessada a solitação, a deformação desaparece a qualquer nível de carregamento. Além disso, pode ser observado que o diagrama tensão-deformação pode ser curvo (não linear), mas é descrito pela mesma curva tanto na aplicação da tensão crescente como na decrescente. Caso não exista resíduos ao fim do carregamento, o material será classificado como elástico. Caso ainda o diagrama seja retilíneo, o material será classificado como elástico linear. Para que o termo módulo de elasticidade seja usado corretamente, é necessário que as duas condições

acima sejam satisfeitas; porém, o que ocorre com o concreto é que estas condições são atendidas apenas para tensões de até 30% da carga última (Figura 6).

A NBR 8522 (2008) estabelece o valor máximo de 30% de  $f_c$  para o ensaio do módulo de elasticidade, valor este em que o concreto satisfaz as duas condições citadas acima, podendo ser assim denominado corretamente o ensaio como módulo de elasticidade.

#### 2.4.1 Módulo de Elasticidade Estático

O módulo de elasticidade pode ser classificado de acordo com o método adotado no ensaio realizado para sua determinação, podendo ser estático, dinâmico, à flexão e a tração. Nesta pesquisa será realizado apenas o módulo de elasticidade estático, o qual será descrito a seguir.

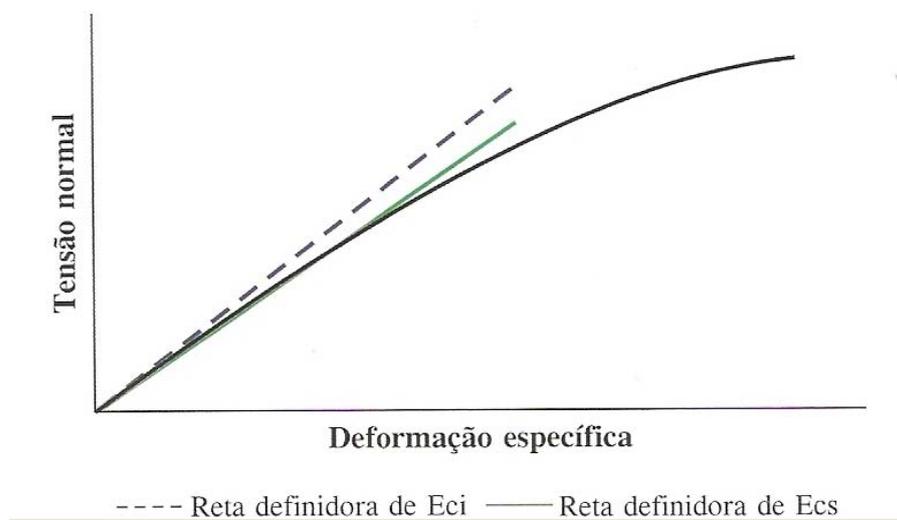
Módulo tangente – é fornecido através de uma linha traçada de forma tangente à curva de tensão-deformação em qualquer ponto da curva, ou seja, é o coeficiente angular da reta tangente a qualquer ponto da curva tensão-deformação de compressão. De acordo com Shehata (2005), é comum citar o módulo sem especificar o ponto da curvatura e quando isso ocorre está “subtendido” o ponto (0,0), dando origem ao módulo tangente inicial “ $E_{ci}$ ” (Figura 7).

Módulo secante – é obtido através da declividade de uma linha traçada da origem até um ponto da curva, que corresponde à tensão de 40% da carga de ruptura (METHA; MONTEIRO, 2008). Porém, Shehata (2005), afirma que nem sempre isso acontece, pois quando não é mencionada a tensão, infere-se que o módulo secante “ $E_{cs}$ ” seja relativo a uma tensão variando entre 40 a 50% da resistência à compressão (Figura 7).

Módulo Cordal – é obtido pela inclinação de uma linha pertencente a dois pontos da curva tensão-deformação. A diferença entre o módulo Cordal e o Secante é que ao invés de partir da origem, a linha é traçada de um ponto representando a deformação longitudinal de 50  $\mu\text{m}/\text{m}$  até o ponto correspondente a 40% da carga última, no intuito de corrigir uma leve concavidade voltada para cima que aparece no início da curva (METHA; MONTEIRO, 2008). Segundo Rodrigues e Figueiredo (2005), esta concavidade pode surgir de várias causas, tais como o processo de fechamento de microfissuras de retração pré-existentes, imperfeições nos corpos-de-prova, variabilidade das máquinas de ensaios e pelo processo de

acomodação do topo e da base dos corpos-de-prova da prensa que criam uma perturbação inicial no traçado dos gráficos. Ainda segundo Shehata (2005), como a menor tensão da reta relativa ao módulo cordal é próxima de zero, os módulos cordal e secante para uma dada tensão praticamente se confundem (Figura 7).

**Figura 7 – Definição do módulo elasticidade estático**



Fonte: SHEHATA, 2005.

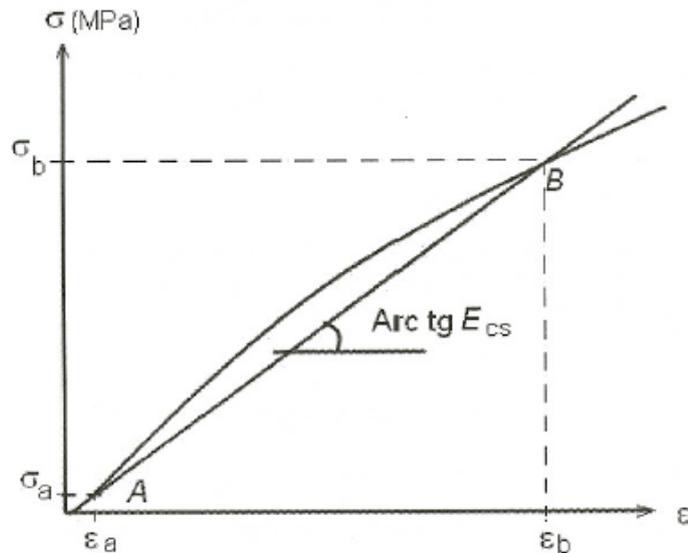
Devido a esta variedade de formas para se obter o módulo de elasticidade estático dos concretos, não existe um procedimento padrão para tal ensaio. As normas internacionais divergem quanto à velocidade de carregamento, na intensidade da carga aplicada, nos limites para a carga máxima e mínima, no número de pré-carregamento. Além destas diferenças citadas, ainda existem outras segundo Shehata (2005), como, por exemplo, mínimos e máximos do comprimento da base adotada para medição da variação de comprimento a partir da qual se calcula a deformação específica.

A norma brasileira que rege o ensaio do módulo de elasticidade estático do concreto é a ABNT NBR 8522 (2008). Essa norma apresenta duas formas para determinar tal propriedade do concreto: a primeira é através do módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$  - Figura 8), e a segunda através do módulo de elasticidade tangente inicial ( $E_{ci}$  - Figura 9).

A Figura 8 representa o valor numérico correspondente ao coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão-deformação específica, passando pelos pontos A e B, onde o

ponto A corresponde a 0,5 MPa e o ponto B à tensão considerada no ensaio. A NBR 6118(2003) apresenta uma aplicação para o módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) que é a avaliação do comportamento de um elemento estrutural ou seção transversal, adotando este mesmo módulo tanto a tração quanto a compressão.

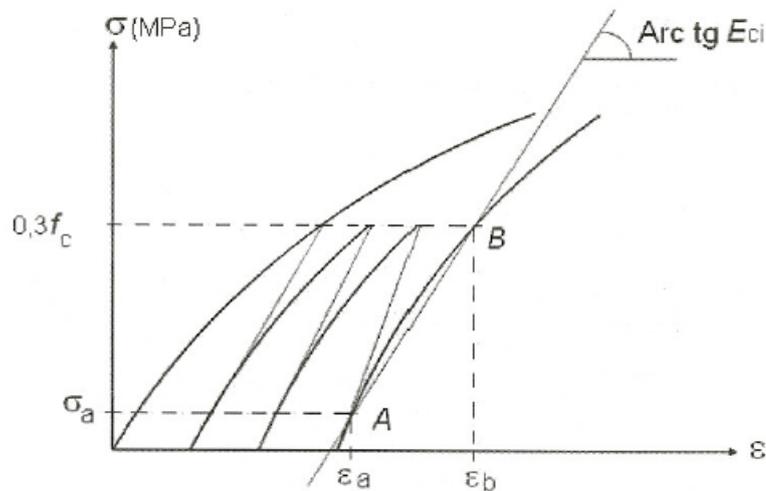
**Figura 8– Representação esquemática do módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ),**



Fonte: NBR 8522: 2008.

O módulo de elasticidade tangente inicial ( $E_{ci}$ ) é representado na Figura 9. A NBR 8522 (2008) o considera equivalente ao módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) ou cordal entre  $\sigma_a$  e 30% da tensão de ruptura ( $f_c$ ), obtido através do ensaio de resistência à compressão. De acordo com NBR 6118 (2003), o módulo de elasticidade tangente deve ser aplicado na avaliação do comportamento global da estrutura e para o cálculo das perdas de protensão.

**Figura 9 – Representação esquemática do módulo de elasticidade tangente inicial ( $E_{ci}$ ),**



Fonte: NBR 8522 : 2008.

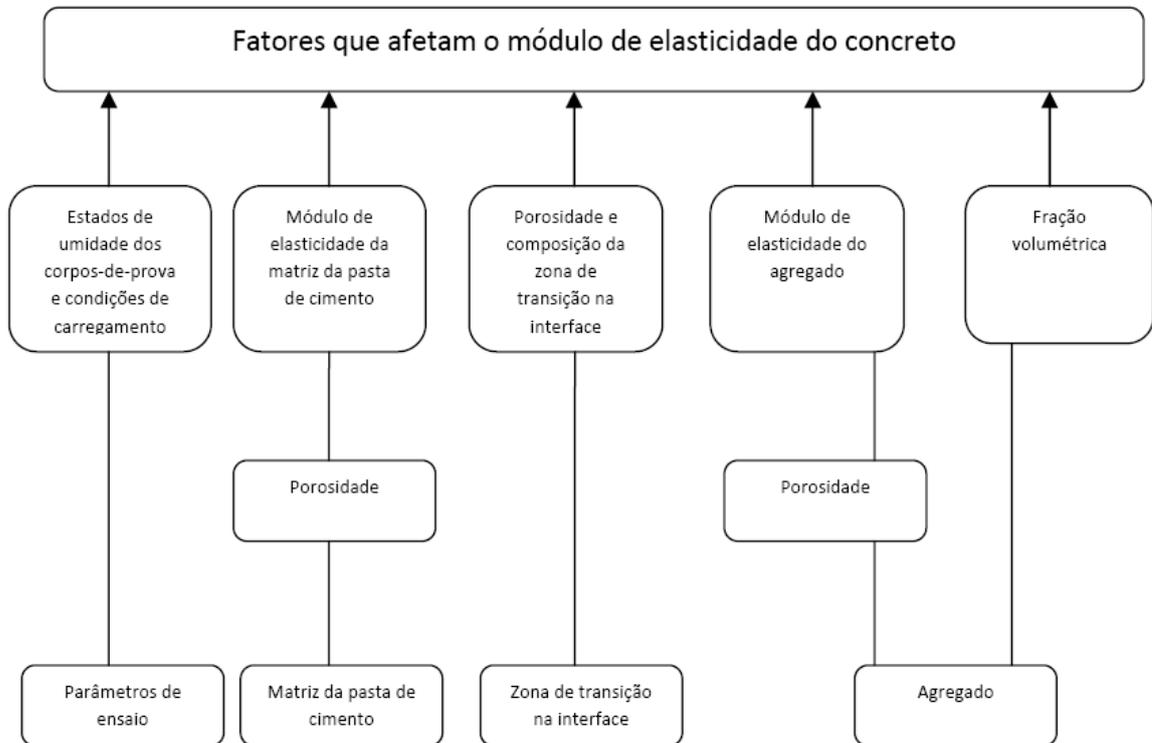
#### 2.4.2 Parâmetros que influenciam o Módulo de Elasticidade

Devido à grande heterogeneidade do concreto, suas propriedades – como resistência à compressão, resistência à tração, durabilidade, permeabilidade, entre outras – são sensíveis às quantidades e qualidade do agregado graúdo; à quantidade e ao tipo do cimento; à relação água/cimento; ao teor de ar incorporado; ao tempo de cura, ao adensamento, aos aditivos incorporados e adições minerais, entre outras. Em particular, Neville (1997) afirma que o módulo de elasticidade é diretamente afetado pela massa específica do agregado graúdo.

Como pode ser observado na Figura 10, o módulo de elasticidade é afetado de forma e intensidade diferente pelas características e proporções dos materiais que formam o concreto e está dividido em três níveis que aumentam a sua importância quando se aproximam do topo da figura. No primeiro nível, o mais externo, estão a matriz da pasta de cimento, os parâmetros de ensaios, agregado e zona de transição na interface, que determinam o comportamento elástico do compósito. No segundo nível está a porosidade; e no terceiro nível estão contidos o módulo de elasticidade da matriz da pasta de cimento, porosidade e composição na zona de transição na interface, fração volumétrica, módulo de elasticidade do agregado, e por fim, o estado de umidade dos corpos-de-prova e as condições de carregamento. De todas as propriedades citadas, a que mais influencia o módulo de elasticidade é a porosidade, visto que

ela é inversamente proporcional à densidade. Com isso, agregados mais densos propiciam valores mais altos para o módulo de elasticidade (METHA; MONTEIRO, 2008).

**Figura 10 – Parâmetros que influenciam o módulo de elasticidade do concreto**



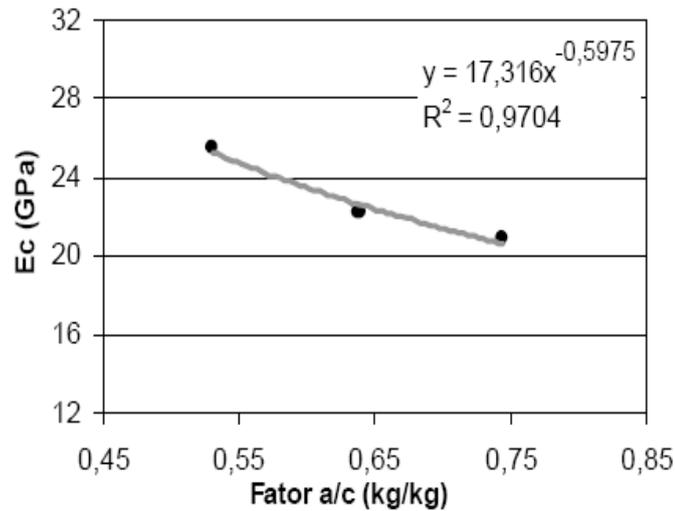
Fonte: METHA; MONTEIRO, 2008.

#### 2.4.2.1 Relação água/cimento

Metha e Monteiro (2008) relacionam o enfraquecimento da matriz da pasta de cimento ao aumento da porosidade com o aumento da relação a/c. Neville (1997) também concorda com os autores acima e ainda ressalta que a relação a/c juntamente com o grau de adensamento têm influência sobre o volume de vazios do concreto.

Melo Neto e Helene (2002) produziram concretos com agregados graúdos naturais de origem granítica. Eles analisaram a relação a/c entre outras propriedades do concreto. Seus resultados foram compatíveis com os da literatura. A Figura 11 demonstra este fato.

**Figura 11 – Relação a/c sobre o módulo de elasticidade.**

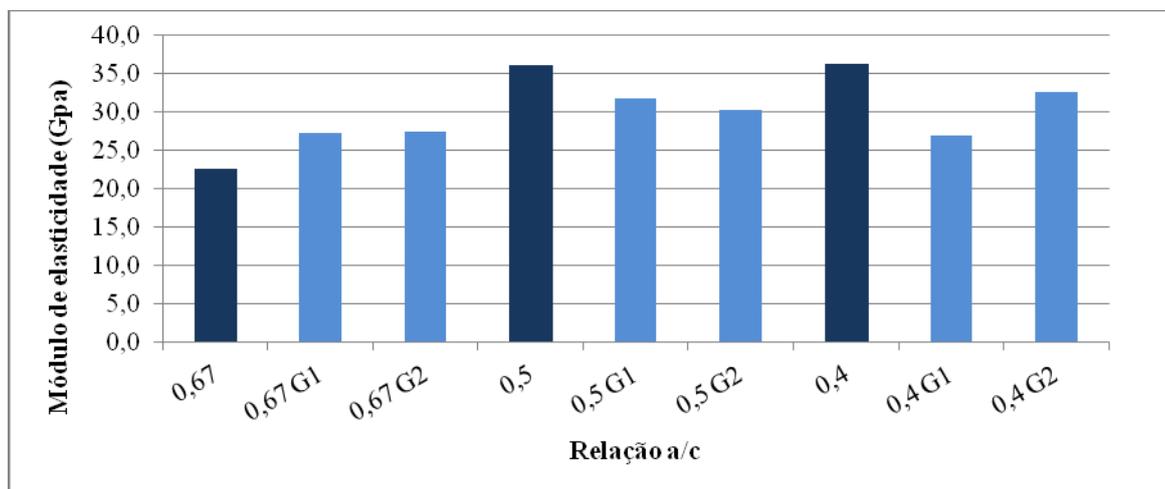


Fonte: MELO NETO; HELENE, 2002.

A Figura 11 demonstra que com o aumento da relação a/c há uma diminuição no valor do módulo de elasticidade; em contrapartida, diminuindo a relação a/c o valor do módulo de elasticidade aumenta. Este resultado mostra que existe uma influência da relação a/c sobre o módulo de elasticidade do concreto. Outros trabalhos, utilizando materiais não convencionais como resíduos de construção e demolição, também foram realizados para averiguar esta propriedade.

Tenório (2007) avaliou a influência da relação a/c sobre o módulo de elasticidade do concreto. Sua pesquisa relacionou três fatores a/c (0,67;0,5;0,4) com três tipos de agregados graúdos, sendo um natural de origem granítica para o concreto de referência e outros dois obtidos respectivamente do beneficiamento de resíduos de construção e demolição (G1) e de resíduos de concreto (G2), sendo o primeiro menos denso que o segundo. A Figura 12 mostra a influência da relação a/c no módulo de elasticidade.

**Figura 12 – Relação a/c sobre o módulo de elasticidade.**



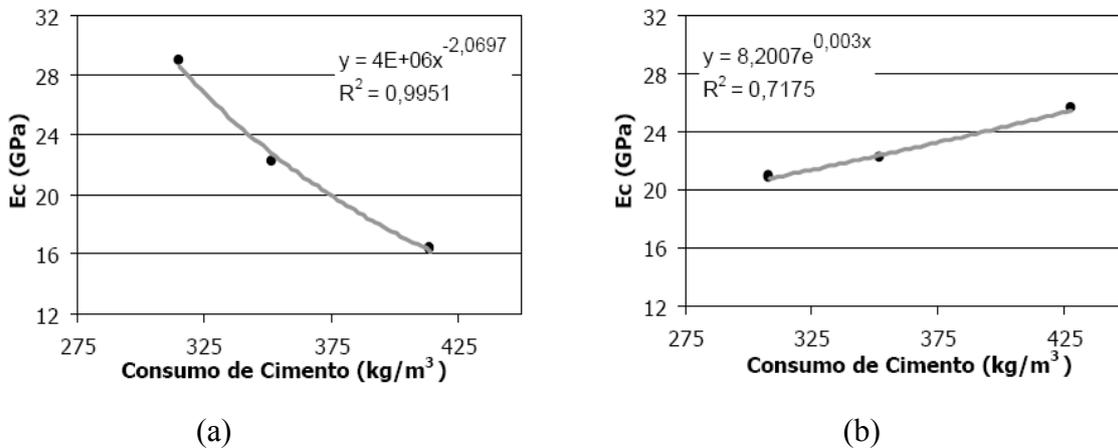
Fonte: TENÓRIO, 2007.

É visto na Figura 12 que os concretos produzidos com agregados naturais corresponderam aos valores encontrados na literatura, pois com a diminuição da relação a/c houve um acréscimo no módulo de elasticidade, resultado já constatado no trabalho de Melo Neto e Helene (2002). Já para as relações a/c de 0,5 e 0,4, os agregados graúdos de ambas as massas específicas tiveram um valor menor que o seu concreto de referência. Isso mostra que os alguns dos agregados reciclados não conseguem obter o mesmo desempenho dos naturais. Entretanto, para a relação a/c de 0,67 os concretos de ambas as massas específicas tiveram um melhor desempenho que o seu concreto de referência. Uma das possíveis causas desse comportamento, segundo Neville (1997), é que agregados com resistências e módulos de elasticidade moderados ou baixos podem ser bons para preservação da integridade do concreto.

#### 2.4.2.2 Consumo de Cimento

O módulo de elasticidade do concreto pode ser afetado pelo consumo de cimento de duas formas distintas. Inicialmente, mantendo-se constante a relação a/c e aumentando o consumo de cimento. Isto implica uma diminuição do módulo de elasticidade causada pela redução do teor de agregados que possuem maior valor para o módulo de elasticidade que a pasta de cimento (NEVILLE, 1997), fato este que pode ser observado na Figura 13a. A outra possibilidade ocorrerá quando houver a situação inversa, que é manter o abatimento constante e aumentar o consumo de cimento; isto causará uma diminuição no fator a/c, aumentando assim o módulo de elasticidade do concreto (Figura 13b).

**Figura 13 – Influência do consumo de cimento versus módulo de elasticidade**



Fonte: MELO NETO; HELENE, 2002.

O consumo de cimento apresentado nas Figuras 13a e 13b acima é referente à produção de concretos convencionais, ou seja, concretos produzidos com agregados graúdos naturais de origem granítica.

Este trabalho foi desenvolvido por Melo Neto e Helene (2002). Na Figura à esquerda (13a), o fator  $a/c$  foi mantido constante e é possível observar que com o aumento do consumo de cimento ocorreu uma diminuição do módulo de elasticidade. Para explicar este comportamento, os autores concordam com a opinião de Neville (1997), de que o agregado graúdo possui módulo de elasticidade maior que o da pasta de cimento. Já a Figura à direita (13b) foi realizada mantendo-se o abatimento constante e aumentando-se o consumo de cimento. Logo, é possível observar que o comportamento do gráfico mudou. Agora, o módulo de elasticidade aumentou com a elevação no consumo de cimento e, segundo os autores, a razão para este crescimento é a diminuição do fator  $a/c$ . Assim, comparando as duas situações, foi possível observar que o consumo de cimento pode afetar o módulo de elasticidade do concreto convencional. Logo, é de esperar que o mesmo ocorra com os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados.

### 2.4.2.3 Aditivos Químicos

Na opinião de Neville (1997), os aditivos superplastificantes melhoram a trabalhabilidade do concreto e isso pode ser aproveitado de duas maneiras: produzindo concreto com trabalhabilidade ou resistência muito altas.

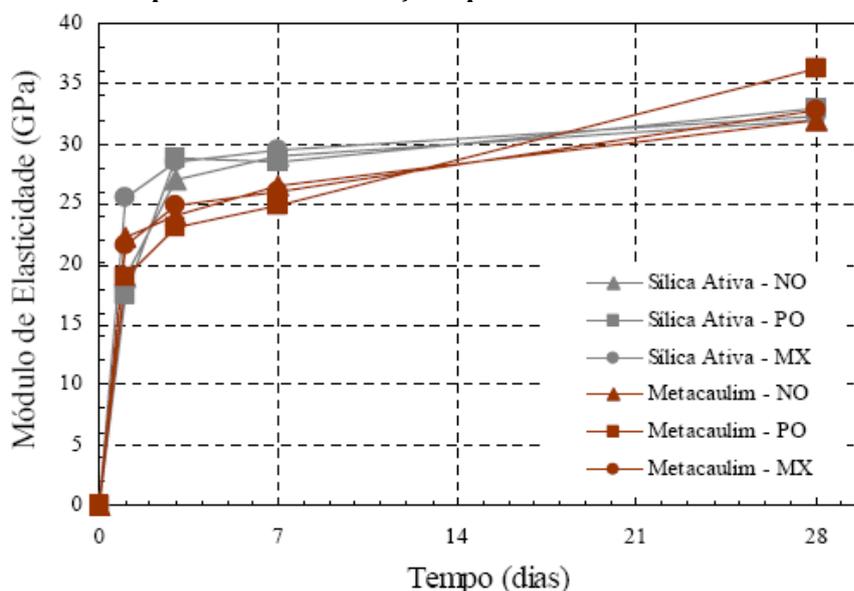
Para uma mesma relação a/c e o mesmo teor de água na mistura, o superplastificante causa um efeito dispersante, aumentando assim a trabalhabilidade do concreto (NEVILLE, 2007).

O segundo uso deste tipo de aditivo é a obtenção de concretos com trabalhabilidade normal, mas com uma resistência extremamente alta. Segundo Metha e Monteiro (2008), este ganho na resistência à compressão e à flexão é possível graças a uma redução na quantidade de água de amassamento que implica em uma redução na relação a/c.

Logo, aditivos que melhorem a propriedade mecânica da resistência do concreto também podem influenciar positivamente no módulo de elasticidade. Já aditivos do tipo incorporadores de ar terão efeito negativo dependendo da quantidade de ar incorporado (METHA; MONTEIRO, 2008), pois deixam o concreto mais poroso e isso causará uma diminuição da propriedade de resistência à compressão.

Veronez (2006) estudou o comportamento termomecânico de concretos de alto desempenho utilizando a combinação de adições químicas e adições minerais. O concreto foi produzido com agregados graúdos naturais. As adições químicas utilizadas para seu experimento foram superplastificantes de três bases diferentes: lignossulfonato, naftaleno, policarboxinato, e uma mistura de naftaleno com policarboxilato. Entre as propriedades no estado endurecido o autor avaliou o módulo de elasticidade aos 28 dias (Figura 14).

**Figura 14 – Relação entre módulo de elasticidade e tempo, de concretos produzidos com adições químicas e minerais.**



Fonte: VERONEZ, 2006.

A Figura 14 mostra o comportamento do módulo de elasticidade produzido com os diferentes tipos de superplastificantes. É possível notar que aos vinte e oito dias os concretos produzidos não apresentaram uma diferença significativa entre as variedades utilizadas. Veronez (2006) verificou ainda que o tipo de superplastificante não teve influência marcante nas propriedades físicas e mecânicas do concreto.

Os resultados obtidos por Veronez (2006) mostram que as propriedades dos concretos convencionais podem ou não ser beneficiadas pelas adições químicas; porém, quando tratamos de concretos produzidos com agregados reciclados, o uso de adições químicas podem ser benéficas devido à grande porosidade e absorção dos agregados graúdos reciclados, podendo assim melhorar, por exemplo, sua trabalhabilidade.

#### 2.4.2.4 Porosidade dos agregados graúdos

Dentre todos os fatores discutidos até aqui, o que pode influenciar o módulo de elasticidade do concreto de forma mais intensa é, segundo Metha e Monteiro (2008), a porosidade do agregado graúdo. Isso se deve ao fato de que a porosidade do agregado determina sua rigidez, o que, por sua vez, controla a capacidade de o agregado restringir a deformação da matriz.

Agregados densos possuem um alto módulo de elasticidade. Em geral, quanto maior a quantidade de agregados graúdos com alto módulo de elasticidade em uma mistura de concreto, maior será o módulo de elasticidade do concreto (METHA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Neville (1997), a propriedade mecânica módulo de elasticidade está relacionada ao tipo e à quantidade do agregado graúdo e ao fato de que o módulo de elasticidade do concreto é, geralmente, tanto maior quanto maior o módulo dos agregados que o constituem, mas também dependem de outros fatores, como, por exemplo, a proporção em volume do agregado no concreto.

Seguindo a linha de raciocínio dos pesquisadores Metha e Monteiro (2008) e Neville (1997), se um concreto for produzido com agregados de maior porosidade ou menor massa específica os módulos de elasticidade poderão não alcançar a mesma ordem de grandeza quando comparados aos módulos de elasticidades de concretos produzidos com agregados mais densos.

Para Metha e Monteiro (2008) existe uma relação inversa fundamental entre porosidade e resistência dos sólidos, que encontra no concreto um problema: a presença de microfissuras na zona de transição na interface entre o agregado graúdo e a matriz, o que torna o concreto um material complexo para previsões de resistência por relações exatas de resistência-porosidade.

De acordo com Prado (2006), a influência do agregado no módulo de elasticidade só pode ser percebida em idades mais avançadas, uma vez que em idades mais baixas a pasta exerce grande influência sobre o módulo e, à medida que a pasta vai ganhando resistência, os esforços vão sendo transferidos para os agregados que serão os maiores responsáveis pelo valor do módulo de elasticidade.

Vale salientar que todas as características citadas acima são referentes a concretos confeccionados com agregados graúdos naturais. Porém, quando são utilizados agregados graúdos reciclados em substituição aos naturais, as propriedades dos concretos feitos com este material podem ser afetadas de forma mais intensa, pois estes agregados possuem características peculiares.

Os agregados graúdos reciclados propícios para produção de concretos são constituídos em sua grande maioria por concreto, argamassa e cerâmica vermelha. Os agregados provenientes destes tipos de materiais possuem geralmente massa específica menores que os naturais (ZORDAN, 1997; BICCA, 2000; GONÇALVES, 2000; LEITE, 2001; ÂNGULO, 2005; CARRIJO, 2005; LOVATO, 2007; TENÓRIO, 2007; MOREIRA, 2010).

A Tabela 1 mostra um comparativo entre as massas específicas dos agregados graúdos naturais e dos agregados graúdos reciclados. Os agregados graúdos reciclados tiveram a massa específica próxima à do agregado natural Quartzito e Arenito, que são, entre os agregados naturais, os que possuem as menores massas específicas.

**Tabela 1 – Massas específicas de agregados naturais e agregados graúdos.**

Tipos de Rocha	Massa Específica
	(kg/m <sup>3</sup> )
<b>Agregados Naturais*</b>	
Granito	2600/2700
Basalto Compacto	2750/2950
Gnaisse	2550/2700
Calcário	2600/2800
Xisto	2300/2500
Quartzito	2550/2700
Arenito	2200/2400
<b>Agregados Reciclados</b>	
Pesquisadores	
Ângulo (2005)	2200/2300
Bicca (2000)	2166/2870
Carrijo (2005)	2177/2556
Gonçalves (2001)	2480
Leite (2001)	2510
Lovato (2007)	2450/2850
Moreira (2010)	2060/2200
Tenório (2007)	2080/2300
Zordan (1997)	1390

Nota: \*Os dados sobre os agregados naturais foram extraídos de MELO NETO; HELENE (2002).

Fonte: Autor, 2010.

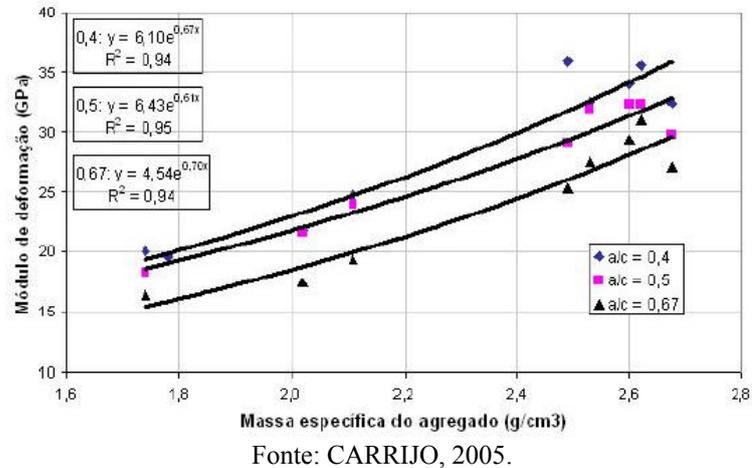
Para Neville (1997), a presença de poros internos nas partículas está relacionada com a massa específica do agregado. Os poros dos agregados variam muito em tamanho e mesmo os menores poros são maiores que os poros da partícula de cimento. Para Metha e Monteiro (2008), a porosidade dos agregados afeta tanto as características de dosagens do concreto quanto a massa específica, absorção de água, resistência, dureza, sanidade e o módulo de elasticidade.

De acordo com Barra (1997) apud Leite (2001), a maior heterogeneidade, a menor resistência da matriz (concreto original) e a maior porosidade são consideradas as principais diferenças entre o agregado reciclado de concreto e o agregado natural. Esta diferença pode ser ainda maior quando são utilizados agregados graúdos reciclados cuja composição é variada, como os utilizados nesta pesquisa.

Leite (2001) vê uma vantagem do agregado graúdo reciclado: devido à sua alta porosidade, ele pode proporcionar melhorias na zona de transição; assim, o seu comportamento no concreto frente às deformações pode ser bastante variado. A próxima figura mostra o efeito da massa específica sobre o módulo de elasticidade do concreto.

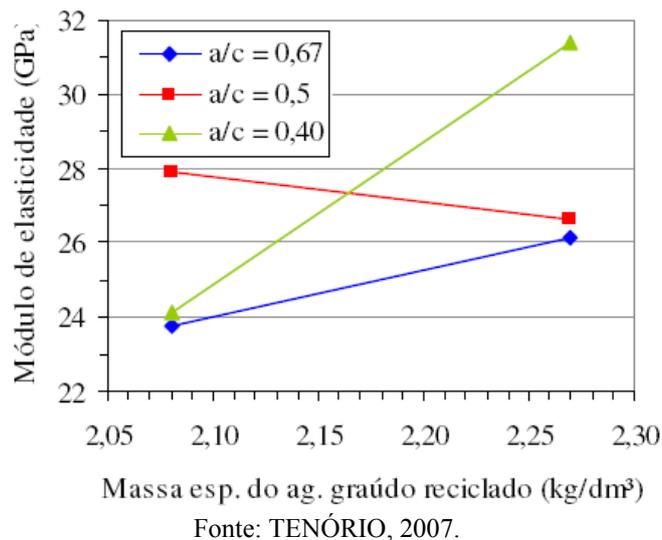
No trabalho desenvolvido por Carrijo (2005) (figura 2.16), a autora constatou que o aumento do módulo de elasticidade está diretamente relacionado ao aumento da massa específica dos agregados reciclados para as três relações a/c adotadas no trabalho e que a natureza mineralógico (agregado vermelho ou cinza) influenciou menos o resultado do módulo de elasticidade.

**Figura 15 – Relação entre módulo de elasticidade e a massa específica do agregado**



Os resultados obtidos por Tenório (2007), mostram o comportamento do módulo de elasticidade em função das massas específicas dos agregados graúdos reciclados (Figura 16). Para as relações 0,4 e 0,67, o módulo de elasticidade aumentou com o aumento da massa específica; porém, para a relação 0,5, o módulo de elasticidade diminuiu à medida que aumentou a massa específica do agregado. De acordo com o autor, uma possível causa para esse comportamento é a influência pela resistência da pasta, e não do agregado.

**Figura 16 – Relação entre módulo de elasticidade e a massa específica do agregado.**

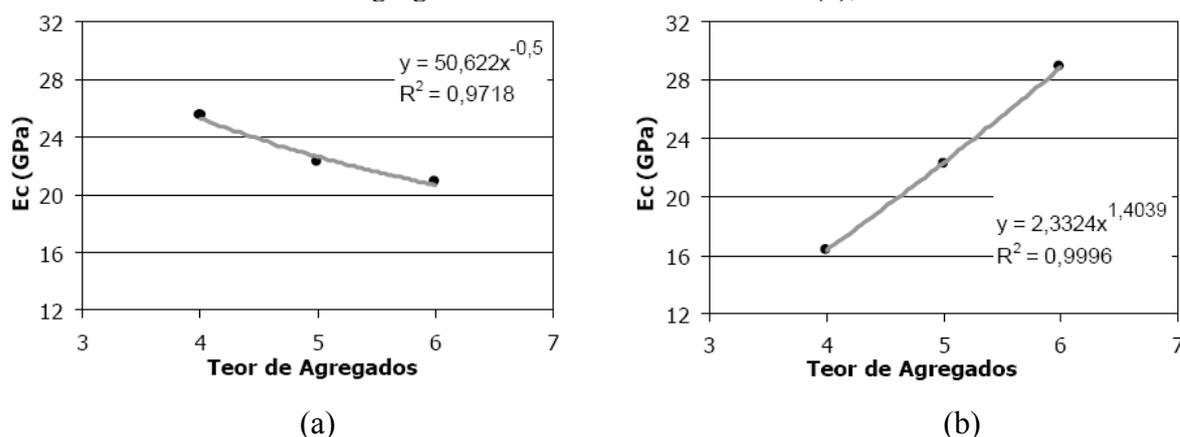


#### 2.4.2.5 Teor de agregado

De acordo com Neville (1997) concretos produzidos com agregados cuja massa específica esteja entre 2200 kg/m³ e 2600 kg/m³ são considerados concretos normais.

Concretos produzidos com agregados graúdos de menor massa específica podem apresentar vantagens como: menor peso próprio das estruturas, permitem construções em solos de menor capacidade de suporte, as fôrmas suportam pressões menores que as do concreto convencional e proporcionam melhor isolamento térmica. Contudo, concretos que possuem maior fração volumétrica apresentam um consumo de cimento maior que os concretos com agregados normais. Oliveira (2006), constatou que o módulo de elasticidade de concretos celulares produzidos com agregados reciclados de resíduos de concreto apresentou resultado abaixo do concreto convencional, pois, à medida que se aumentou o teor de agregado graúdo reciclado, aumentou também o consumo de cimento. Fato que comprova a afirmação de Neville 1997. A Figura 2.19 mostra a relação existente entre módulo de elasticidade e Teor de agregados.

**Figura 17 – Relação entre módulo de elasticidade e o teor de agregados com abatimento constante (a), relação entre o módulo de elasticidade e teor de agregados com o fator a/c constante (b),**



Fonte: MELO NETO; HELENE 2002.

MELO Neto e Helene (2002) analisaram a influência do teor de agregados no módulo de elasticidade em concretos convencionais (Figura 17a). Os autores constataram uma diminuição no módulo de elasticidade com o aumento do teor de agregados para os traços com abatimento constante. A explicação dos autores é que o aumento da quantidade de agregados tem seu efeito positivo prejudicado pelo aumento do fator a/c para manter um abatimento constante, o que resultará em uma pasta de cimento mais fraca, diminuindo assim o módulo de elasticidade. Porém, na situação inversa (Figura 17b), mantendo-se o fator a/c constante e aumentando-se o teor de agregados graúdos, ocorre um aumento do módulo em razão da maior quantidade de agregados graúdos, que possuem um módulo de elasticidade maior do que o da pasta.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

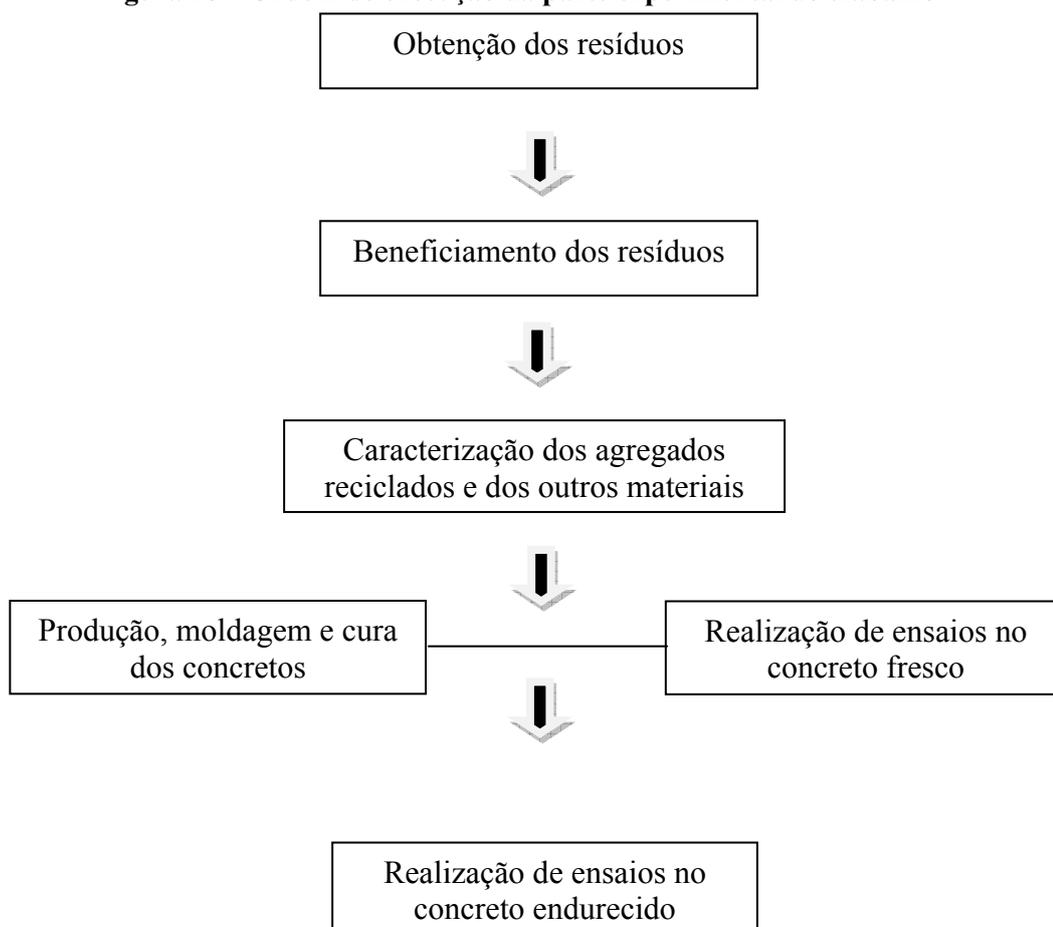
---

Neste capítulo é apresentado o planejamento da parte experimental, que engloba o beneficiamento dos resíduos, e sua caracterização; a caracterização dos outros materiais envolvidos na pesquisa; a produção dos concretos e, por fim, o planejamento fatorial para idade de 28 dias.

#### 3.1 Planejamento da parte experimental

À execução da parte experimental seguiu-se a sequência de etapas mostrada no diagrama da Figura 18.

**Figura 18 – Ordem de execução da parte experimental do trabalho**



Fonte: Autor, 2010.

### 3.1.1 Agregados Reciclad

#### 3.1.1.1 Origem e coleta dos resíduos

O resíduo de construção foi proveniente de um total de cinco canteiros de obra dentro do campus da UFAL. Essas obras tinham finalidades diferentes: construção, reforma e demolições. Os resíduos de construção originados das obras possuíam idades variadas e diferentes materiais.

Todo material coletado foi transportado para um mesmo local e foram dispostos de forma aleatória (Figura 19).

**Figura 19 – Início da deposição das amostras**



Fonte: Autor. Acervo Pessoal, 2010.

A Figura 19 mostra o início da deposição do material trazido das obras de construção, reforma e demolição; inicialmente cada amostra foi espalhada pelo solo com o auxílio da pá mecânica.

A homogeneização do resíduo foi obtida através de uma pá mecânica que revolia e misturava todo o material (Figura 20). Terminada a homogeneização dos resíduos, foram criados lotes e de cada um deles era recolhida uma parte para formar as amostras que foram levadas para o LEMA.

Um inconveniente foi observado ao se utilizar o equipamento mecânico deste porte: é possível observar que, ao mesmo tempo em que revirara os resíduos, a pá também escava um pouco o solo, trazendo uma quantidade a mais de terra; por isso, foi necessário fazer um

peneiramento para retirada desse material antes de ele ser armazenado, para poder dar continuidade ao processo de beneficiamento.

**Figura 20 – Homogeneização das amostras,**



Fonte: Autor. Acervo Pessoal, 2010.

A Figura 21 (a) e (b) mostra partes desses contaminantes que foram retirados: alumínio, borrachas, espumas, gesso, pedaços de ferro, madeira, papel, papelão, plásticos, PVC entre outros. Os contaminantes que ainda continuaram misturados foram sendo eliminados nas próximas fases do beneficiamento.

**Figura 21 – Triagem para eliminar contaminantes, (a) materiais plásticos, (b) madeira.**



(a)



(b)

Fonte: Autor. Acervo Pessoal, 2010.

Já os resíduos de concreto foram provenientes de corpos-de-prova de concreto moldados em várias idades e coletados entre os anos de 2007 a 2010 e tinham resistências de 18 MPa a 35 MPa, de acordo com as informações do laboratório. Esses foram originados de trabalhos de pesquisa e de amostras de concretos de várias obras, tanto do município de

Maceió quanto de outras cidades do estado de Alagoas. Estes resíduos encontravam-se armazenados no LEMA.

### 3.1.2 Beneficiamento dos resíduos

Para as etapas que fazem parte do beneficiamento, os equipamentos utilizados na pesquisa foram , quando possíveis, os mesmos utilizados na pesquisa de Tenório (2007), como, por exemplo, o moinho de martelos (Figura 2) e o peneirador mecânico (Figura 3). O motivo para tal adoção é comparar os resultados nas duas pesquisas utilizando os mesmos equipamentos, porém com resíduos diferentes e operadores dos equipamentos também diferentes.

O agregado obtido foi dividido em duas faixas granulométricas de acordo com a NBR 7211(2005): agregado miúdo foi aquele cujos grãos passam na peneira # 4,75mm e ficam retidos na peneira # 0,15mm; o agregado graúdo foi aquele cujos grãos passam pela peneira # 75 mm e ficam retidos na peneira # 4,75 mm.

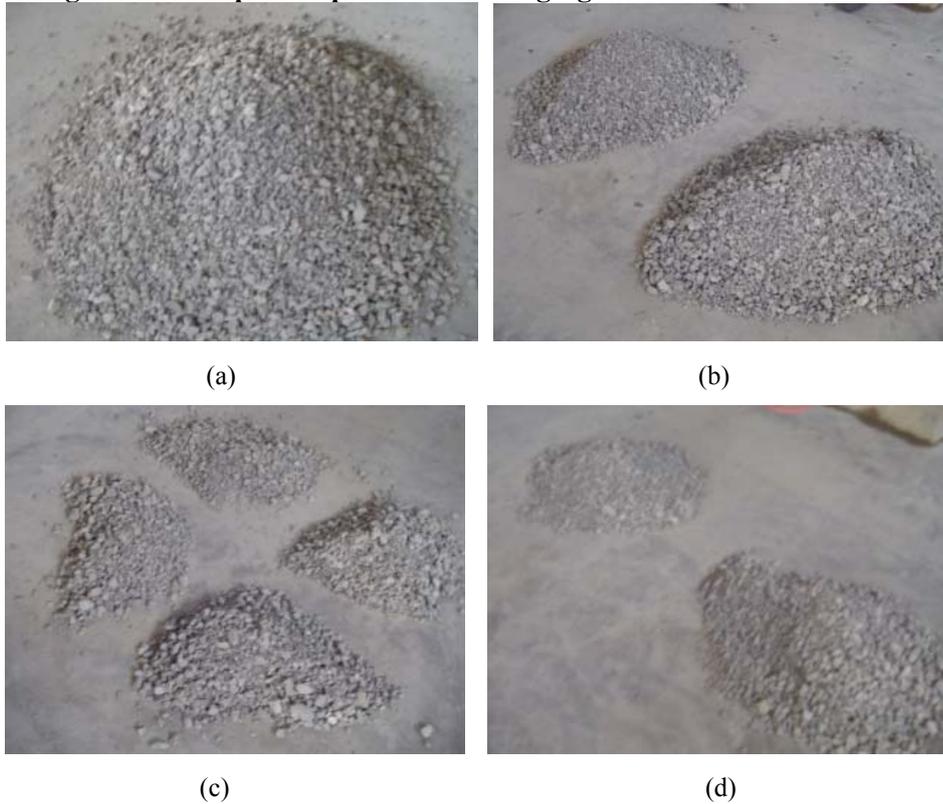
O agregado miúdo resultante desta etapa não foi utilizado para produção dos concretos referentes a esta pesquisa; foram armazenados para outros trabalhos que utilizassem agregados miúdos reciclados tanto de RCD como de concreto.

Ainda foi observado que a quantidade de agregado miúdo gerada foi da ordem de 2:1 em relação ao agregado graúdo. O que vem a confirmar que o moinho de martelo gera uma quantidade maior de finos (Lima, 1999, Tenório 2007).

#### ❖ **Quarteamento dos agregados graúdos reciclados**

Uma vez que o beneficiamento foi concluído, os agregados graúdos foram submetidos a um quarteamento de acordo com a NBR NM 27(2001) método “B”. Esse procedimento é importante para determinação de uma amostra representativa de um todo (Figura 22). Este procedimento foi realizado em ambos os agregados graúdos reciclados (100% RCD e 100% Concreto) e no agregado natural. Antes de iniciar o quarteamento todos os resíduos foram misturados e revirados inúmeras vezes a fim de melhorar a homogeneização dos agregados.

**Figura 22 – Etapas do quartejamento. Agregado reciclado de concreto.**



Fonte: Autor. Acervo Pessoal, 2010.

As figuras 22 a, b, c e d mostram as etapas preconizadas pela NBR NM 27 (2001) para realizar o quartejamento.

### 3.1.3 Caracterização dos agregados graúdos reciclados

Para que as dimensões máximas fossem próximas às dos agregados naturais utilizadas neste estudo (brita 1), as frações retidas na peneira # 25mm foram excluídas de ambos os resíduos antes da caracterização dos agregados (Figura 3.6).

**Figura 23 – Retirada dos agregados cuja dimensão fosse maior que #19,0 mm.**



Fonte: Autor. Acervo Pessoal, 2010.

A Tabela 2 traz informações sobre a granulometria dos agregados graúdos de concreto (AGC) e dos agregados graúdos de resíduos de construção demolição e reforma (AGR). A Tabela 3 possui outras informações pertinentes aos agregados graúdos reciclados, como absorção de água, massa específica aparente, entre outras; a Tabela 4 mostra a relação entre o tempo e a absorção total de água pelos agregados.

**Tabela 2 – Propriedades granulométricas dos agregados AGC e AGR segundo a NBR NM 248 (2003).**

Abertura da peneira	AGC			AGR		
	% da massa (média)		% da massa (média)			
	retida	acumulada	retida	acumulada		
25 mm	0	-	0	0	-	0
19 mm	12,64	12,64	-	2,99	2,99	-
12,5 mm	35,44	-	48,08	12,68	-	15,67
9,5 mm	18,64	66,72	-	13,31	28,98	-
6,3 mm	20,96	-	87,68	31,45	-	60,43
4,75 mm	10,16	97,84	-	24,53	84,96	-
2,36 mm	0	97,84	-	0	84,96	-
1,18 mm	0	97,84	-	0	84,96	-
0,6 mm	0	97,84	-	0	84,96	-
0,3 mm	0	97,84	-	0	84,96	-
0,15 mm	0	97,84	-	0	84,96	-
fundo	2,16	-		15,04	-	
total	100,0	666,4	--	100,0	541,7	--
Tamanho máximo (mm)	25			19		
Módulo de finura	6,66			5,42		
Zona granulométrica	Brita 1			Nenhuma		

Fonte Autor, 2010.

Para esta pesquisa também foram adotados dois tipos de agregados graúdos com massas específicas diferentes: AGC e AGR. A Tabela 3.2 mostra que os valores das massas específicas dos dois agregados utilizados neste trabalho foram muito próximos aos encontrados por Tenório (2007) sem a utilização de nenhuma técnica de melhoramento da massa específica como, por exemplo, as equações de mistura.

**Tabela 3 – Propriedades dos agregados graúdos reciclados.**

Propriedades		AGC	AGR	Norma
Absorção de Água (%)		5,21	8,85	NM 53 (2002)
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )		2,26	2,05	
Massa unitária no estado solto (kg/dm <sup>3</sup> )		1,23	1,1	NBR NM 45 (2006)
Massa unitária no estado compactado (kg/dm <sup>3</sup> )		1,28	1,13	
Índice de forma por fração granulométrica	# 19,5 mm	2,57	3,8	NBR 7809 (2008)
	# 12,5 mm	2,49	2,21	
	# 9,5 mm	2,43	2,1	
Índice de forma de todo o agregado		2,51	2,73	
(% material com D < 75 µm)		0,26	1,28	NBR NM 46 (2003)

Fonte: Autor, 2010.

A Tabela 4 mostra a relação entre o tempo e a absorção total de água pelos agregados produzidos no moinho de martelos.

**Tabela 4 – Absorção dos agregados graúdos reciclados em função do tempo.**

Tempo	% da absorção total	
	AGC	AGR
1min	96,71	94,44
2min	97,18	95,00
3min	97,59	95,00
4min	97,81	95,00
5min	97,96	95,56
6min	97,96	95,56
7min	98,27	95,56
8min	98,39	96,00
9min	98,42	96,00
10min	98,44	96,00
20min	98,88	96,00
30min	99,02	96,01
40min	99,13	96,01
50min	99,30	96,06
60min	99,35	96,06
120min	99,38	98,89
180min	99,40	98,89
240min	99,42	98,89
300min	99,44	99,90
1440 min	100,00	100,00

Fonte Autor, 2010

#### 3.1.4 Caracterização dos outros materiais

##### ❖ Agregado graúdo natural

Para a produção dos corpos-de-prova de referência foram utilizados como agregados graúdos britas de origem granítica vendidas comercialmente como brita 1 ( $D_{max} = 19mm$ ), provenientes da região. A Tabela 5 mostra a distribuição granulométrica e outras informações referentes aos agregados graúdos naturais (AGN); a Tabela 6 mostra os resultados de algumas propriedades dos agregados, como índice de forma, teor de material pulverulento, entre outras; e, por fim, a Tabela 7 mostra a absorção da água pelos agregados em função do tempo.

**Tabela 5 – Características granulométricas dos AGN.**

Abertura da peneira	AGN	
	% da massa (média)	
	retida	acumulada
25 mm	0	0
19 mm	0,26	-
12,5 mm	41,41	41,67
9,5 mm	38,51	-
6,3 mm	14,32	94,50
4,75 mm	0,98	-
2,36 mm	0	-
1,18 mm	0	-
0,6 mm	0	-
0,3 mm	0	-
0,15 mm	0	-
fundo	4,51	
total	100,0	--
Tamanho máximo (mm)	19	
Módulo de finura	6,53	
Zona granulométrica	Brita 1	

Fonte: Autor, 2010.

**Tabela 6 – Propriedades dos AGN.**

Propriedades		AGN	Norma
Absorção de Água (%)		0,66	NM 53 (2002)
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )		2,68	
Massa unitária no estado solto (kg/dm <sup>3</sup> )		1,32	NBR NM 45 (2006)
Massa unitária no estado compactado (kg/dm <sup>3</sup> )		1,37	
Índice de forma por fração	#12,5 mm	2,68	NBR 7809 (2008)
Granulométrica	# 9,5 mm	2,97	
Índice de forma de todo o agregado		2,81	
(% material com D < 75 µm)		0,47	NBR NM 46 (2003)

Fonte Autor, 2010

**Tabela 7 – Absorção dos AGN em função do tempo.**

Tempo	% da absorção total
	AGN
1min	99,81
2min	99,82
3min	99,84
4min	99,84
5min	99,85
6min	99,85
7min	99,85
8min	99,85
9min	99,85
10min	99,85
20min	99,86
30min	99,86
40min	99,87
50min	99,87
60min	99,87
120min	99,89
180min	99,89
240min	99,89
300min	99,91
1440 min	100

Fonte Autor, 2010.

#### ❖ **Agregado miúdos natural**

O agregado miúdo natural utilizado foi uma areia natural de rio, classificada como areia grossa – Agregado para Concreto, de acordo com a NBR 7211:2005 – cuja dimensão máxima característica é de 4,75 mm, utilizado somente este tipo de areia para a produção de todos os concretos desta pesquisa (Tabela 8).

**Tabela 8 – Características granulométricas dos agregados miúdos naturais.**

Abertura da peneira	% da massa (média)		
	retida	acumulada	
9,5 mm	0	0	-
6,3 mm	1,0	-	1,0
4,75 mm	0,0	1,0	-
2,36 mm	4,0	5,0	-
1,18 mm	12,0	17,0	-
0,6 mm	42,0	59,0	-
0,3 mm	33,0	92,0	-
0,15 mm	7,0	99,0	-
fundo	1,0	-	100,0
total	100,0	273,0	-
Tamanho máximo (mm)		4,75	
Módulo de finura		2,73	
Zona granulométrica		utilizável	

Fonte: Autor, 2010.

#### ❖ Cimento

O material aglomerante utilizado foi um cimento Portland, do tipo composto CP II-F 32, de uma marca vendida no mercado alagoano de cimentos. Todo o cimento utilizado pertenceu a um mesmo lote de fabricação. Segundo o fabricante, as características físicas e químicas do aglomerante estão de acordo com a NBR 11578: 1997 – Cimento Portland Composto.

#### ❖ Água

Na produção dos concretos foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento de água da Universidade Federal de Alagoas.

#### ❖ Aditivo

Foi utilizado um aditivo plastificante polifuncional usado na confecção dos concretos para promover uma melhor trabalhabilidade à mistura. Não houve nenhum critério para escolha deste plastificante, tão-somente o fato de se desejar um aditivo eficiente. A Tabela 9

mostra as características físicas e químicas do aditivo. O fabricante, porém, atribui algumas características ao produto:

- ✓ Possui componentes que atuam com dispersantes do material cimentício, propiciando assim grande redução de água sem alteração no tempo de pega do concreto;
- ✓ É compatível com todos os tipos de cimento Portland;
- ✓ Atende os requisitos das normas brasileiras NBR 11768 (tipo p).

**Tabela 9 - Propriedades do aditivo plastificante segundo informações do fabricante.**

Função	Aditivo plastificante polifuncional para concreto		
Base Química	Lignosulfano		
Aspecto	Líquido		
Cor	Castanho escuro		
Ação secundária	Redutor de água		
Solubilidade em água	Total		
Não contém cloreto de cálcio, intencionalmente adicionado, ou ingredientes a base de cloreto			
Teste	Método Basf	Especificação	Unidade
Aparência	TM 761B	Líquido castanho escuro	Visual
pH	TM 112B	7 -- 9	-
Densidade	TM 578B	1,155 a 1,195	g/cm <sup>3</sup>
Sólidos	TM 613B	34 -- 38	%

Fonte: Autor, 2010.

## 3.2 Produção dos Concretos

### 3.2.1 Composição dos concretos

A dosagem dos concretos utilizadas neste trabalho não seguiu nenhum método comumente usado para este fim. Inicialmente, foram definidos os consumos de cimento 400 kg/m<sup>3</sup> e 500 kg/m<sup>3</sup>. A quantidade de cada um dos outros componentes foi calculada tendo-se como objetivo a obtenção de 1m<sup>3</sup> de concreto. Foi usado como base o método dos volumes absolutos (NEVILLE, 1997), o qual admite que o volume do concreto adensado é igual à soma dos volumes dos seus componentes.

O próximo passo foi determinar a quantidade de água para as duas relações a/c, os valores escolhidos estão dentro da faixa de relações a/c abordadas na NBR 6118 (2003). Foi então fixada a quantidade de água em 20% de  $1\text{m}^3$  para todos os concretos, o que corresponde a  $200\text{ dm}^3$  ou  $200\text{ kg}$  de água, obtendo-se assim as relações 0,5 e 0,4 para os consumos de cimento  $400$  e  $500\text{ kg/dm}^3$ .

A proporção volumétrica do agregado graúdo foi obtida com o auxílio do método de dosagem do IPT. Para isso, foi necessária uma análise dos traços experimentais propostos por esse método de dosagem de concretos. Foi tomado como referência o traço unitário normal 1:5 (cimento: (agregado miúdo + agregado graúdo)). Independentemente de qualquer traço, podendo ser rico, normal ou pobre, o método em questão admite uma variação do teor de argamassa seca de 35 a 65%. Dessa forma, buscou-se averiguar qual seria o volume de agregado graúdo para o traço normal com um teor de argamassa igual a 50%. Para este cálculo foi determinada uma massa específica de  $3\text{kg/dm}^3$  para o cimento,  $2,61\text{kg/dm}^3$  para areia e  $2,68\text{ kg/dm}^3$  para a brita. Com os valores definidos, pode-se determinar o volume a partir da média entre os volumes de agregado graúdo dos traços com teor de argamassa iguais a 49% e 51%, considerando ainda uma relação a/c igual a 0,5 e o consumo de cimento igual a  $400\text{ kg/dm}^3$  (Tabela 10).

**Tabela 10 - Cálculo do volume de agregado graúdo para o traço com teor de argamassa igual a 50%.**

ARGAMASSAS	TRAÇO UNITÁRIO	CIMENTO	AREIA	BRITA	ÁGUA	VOLUME MÉDIO DOS
%	NORMAL	Massa dos materiais para $1\text{m}^3$ de concreto (kg)				AGREGADOS GRAÚDO (%)
		400	776	1224	200	
		Volume dos materiais p/ $1\text{m}^3$ de concreto ( $\text{dm}^3$ )				
49	1/ 1,94/ 3,06	133,33	297,32	456,72	200	
		% do volume (em relação a $1\text{m}^3$ )				
		12,26	27,3	<b>42,00</b>	18,39	
		Massa dos materiais para $1\text{m}^3$ de concreto (kg)				
		400	824	1176	200	
		Volume dos materiais p/ $1\text{m}^3$ de concreto ( $\text{dm}^3$ )				
51	1/ 2,06/ 2,94	133,33	315,71	438,81	200	
		% do volume (em relação a $1\text{m}^3$ )				
		12,26	29,02	<b>40,34</b>	18,38	
						41,17

Fonte: Autor, 2010.

O volume médio de agregado graúdo resultante dos cálculos apresentados na tabela 3.10 é de 41,17%; porém, o valor adotado foi de 40%. O motivo para usar este valor é tão-somente querer ajustar o estudo às quantidades de agregados graúdos reciclados disponíveis.

Uma vez definidos os volumes do cimento, da brita e da água, o volume do agregado miúdo é tão-somente o restante para que se complete o volume de  $1\text{m}^3$ . Para facilitar a comparação dos resultados finais, todos os traços foram produzidos com o mesmo volume de concreto. Assim, inicialmente foram definidos os traços de referência em volume, e só após isso foram calculadas as quantidades de cada material em massa.

A Tabela 11 apresenta a composição dos concretos em volume, massa e traço unitário respectivamente.

**Tabela 11 – Composição dos concretos produzidos.**

Traço	a/c	Materiais em volume ( $\text{dm}^3$ )				Materiais em massa (kg)				Traço unitário			Teor de argam. Seca
		águ a	ciment o	Ag. M	Ag. G	águ a	ciment o	Ag. M	Ag. G	ciment o	Ag. M	Ag. G	
50 Ref	0,5	200	133	267	400	200	400	696	1072	1	1,74	2,68	0,51
50 AGR	0,5	200	133	267	400	200	400	696	1000	1	1,74	2,5	0,52
50 AGC	0,5	200	133	267	400	200	400	696	1024	1	1,74	2,56	0,52
40 Ref	0,4	200	167	233	400	200	500	609	1072	1	1,22	2,14	0,51
40 AGR	0,4	200	167	233	400	200	500	609	1000	1	1,22	2,0	0,53
40 AGC	0,4	200	167	233	400	200	500	609	1024	1	1,22	2,05	0,52

Nota: Ag.M = Agregado Miúdo; Ag.G = Agregado Graúdo.

Fonte Autor, 2010.

### 3.2.2 Preparo, moldagem e cura dos concretos

Uma vez definidos os volumes do cimento, da brita e da água, o volume do agregado miúdo é tão-somente o restante para que se complete o volume de  $1\text{m}^3$ . Para facilitar a comparação dos resultados finais, todos os traços foram produzidos com o mesmo volume de concreto. Assim, inicialmente foram definidos os traços de referência em volume e só após isso foram calculadas as quantidades de cada material em massa.

Com o objetivo de padronizar a fabricação de todos os concretos, foram tomadas certas medidas realizadas no trabalho de Tenório (2007), entre elas a pré-molhagem, visto que a própria literatura relata a alta absorção dos agregados reciclados:

- a) Efetuar a pré-molhagem dos agregados reciclados graúdos. Antes de iniciar a mistura, molhou-se o agregado com uma quantidade de água igual a 70% do valor inicial de sua absorção total. O valor de 70% para os agregados graúdos foi determinado a partir de suas curvas de absorção em função do tempo (Tabela 4), e refere-se à absorção média para o tempo de 1 minuto;
- b) Usar um aditivo plastificante para que a mistura se tornasse plástica e trabalhável de forma a não prejudicar a moldagem dos corpos-de-prova.
- c) O procedimento utilizado para preparação do concreto foi:
  - 1) Concreto de referência: mistura dos agregados graúdos e miúdos mais um pouco da água do traço, por 4 minutos, em betoneira. Concretos reciclados: mistura do agregado graúdo + água referente à parte de sua absorção, por 1 minuto, seguida da colocação do agregado miúdo e mistura; então, de todos os agregados por mais 3 minutos;
  - 2) Colocação do cimento + parte da água do traço e mistura por 2 minutos adicionando o restante da água ao longo desse tempo;
  - 3) Parada a betoneira era verificada a consistência do concreto visualmente revolvendo-se a mistura. Se o concreto não apresentasse aspecto plástico e trabalhável, adicionava-se um pouco de aditivo e procedia-se à mistura por 1,5 minutos, no mínimo. A quantidade de aditivo definida inicialmente foi de 0,5% do consumo de cimento, o que significa 60g para o fator 0,5g e 75g para o fator 0,4. Essas quantidades foram divididas em duas partes iguais, inicialmente colocando-se 50% do plastificante e misturando durante 1 minuto. Caso ainda o concreto não se apresentasse trabalhável, seriam adicionados os 50% restantes do plastificante. Se porventura ainda houvesse a necessidade, mais plastificante seria colocado;
  - 4) A medição da consistência do concreto através do abatimento do tronco de cone.

Uma vez obtido o concreto, foi realizada a moldagem dos corpos-de-prova, conforme a NBR 5738 (2004), e o adensamento ocorreu por meio de um vibrador de imersão. Os corpos-de-prova permaneceram nos moldes durante as primeiras 24 horas. Alcançado este tempo, os mesmos foram desformados, identificados e imersos no tanque de cura onde ficaram até o dia dos ensaios. A temperatura durante o período de cura não foi medida.

### 3.2.3 Ensaios realizados nos concretos

#### ❖ Ensaios no estado fresco

No estado fresco foram realizados os ensaios de medição da consistência do concreto através do abatimento do tronco de cone de acordo com NBR NM 67 (1998), tendo dessa forma um parâmetro de medida da trabalhabilidade e a determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico NBR 9833 (2008).

#### ❖ Ensaios no estado endurecido

A resistência à compressão axial foi realizada de acordo com a NBR 5739 (2007) para cada idade, aos 28 dias e 240 dias.

O módulo de elasticidade medido tanto aos 28 dias quanto aos 240 dias foi o tangente inicial ( $E_{ci}$ ). Os procedimentos utilizados estão de acordo com a NBR 8522 (2008).

A Figura 24 mostra a preparação do corpo-de-prova para realizar um ensaio do módulo de elasticidade: posicionamento Strain gage nas laterais; posicionamento do corpo-de-prova no centro da prensa; ajustamento da prensa para que ela se adéque ao corpo-de-prova.

**Figura 24 – Execução do ensaio do módulo de elasticidade.**

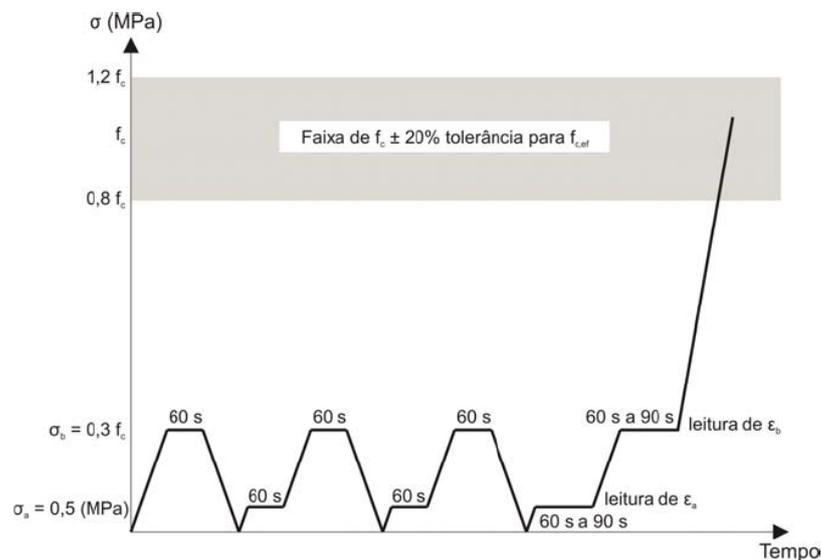


Fonte: Autor. Acervo Pessoal, 2010.

Para realização desses ensaios, foi usado um equipamento digital que registrava as leituras dos carregamentos conferidos pela prensa por meio de uma célula de carga e lendo as respectivas deformações através de extensômetros colocados nas laterais do corpo-de-prova (Figura 25).

Todos os procedimentos realizados para a execução do módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente à origem ou inicial seguiram as recomendações da NRB 8522 (2008), sendo adotada a metodologia A – tensão  $\sigma_a$  fixa (Figura 25).

**Figura 25 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de Elasticidade – Metodologia A – Tensão  $\sigma_a$  fixa.**



Fonte: NBR 8522 : 2008.

Para encontrar o valor de  $f_c$  foi utilizada a média dos valores obtidos no ensaio de resistência à compressão axial.

Todas as fases do carregamento foram conduzidas manualmente pelo operador da prensa. É possível observar na Figura 3.8 que os valores de  $\epsilon_a$  e  $\epsilon_b$  foram determinados no fim dos carregamentos e seus valores foram anotados para determinar o módulo de elasticidade do concreto ( $E_c$ ) em GPa, usando a equação 3.1.

$$E_{ct} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,3\sigma_a}{\epsilon_b - \epsilon_a} 10^{-3}$$

Equação 3.1

Sabendo que:

- ✓  $\sigma_b$  é a tensão maior, dada em MPa; ( $\sigma_b = 0,3 f_c$ );
- ✓ 0,5 é a tensão básica, dada em MPa, que corresponderia a  $\sigma_a = 0,5$  MPa;
- ✓  $\varepsilon_b$  corresponde a deformação específica média, dos corpos-de-prova sob a tensão maior;
- ✓  $\varepsilon_a$  corresponde a deformação específica média dos corpos-de-prova sob a tensão básica (0,5 MPa).

As deformações específicas “ $\varepsilon$ ” foram calculadas a partir da equação abaixo.

$$\varepsilon = \frac{\text{valor da deformação registrado no equipamento}}{\text{valor da base do extensômetro}} \quad \text{Equação 3.2}$$

De acordo com o fabricante do equipamento digital utilizado para realizar as leituras das cargas e deformações para o ensaio do módulo de elasticidade, para corpos-de-prova cuja dimensão seja 10 x 20 cm a base do extensômetro é de 100mm.

Uma vez que os carregamentos foram concluídos e as leituras de  $\varepsilon_a$  e  $\varepsilon_b$  efetuadas, os instrumentos de leitura foram retidos, e cada um dos corpos-de-prova foram carregados na mesma taxa de velocidade utilizadas durante as etapas de carregamento, até o rompimento dos mesmos, obtendo assim a resistência efetiva ( $f_{c,ef}$ ).

### 3.3 Planejamento fatorial

Nesta etapa foi desenvolvido um planejamento fatorial para análise dos concretos ensaiados na idade de 28 dias. As propriedades estudadas foram a resistência à compressão e o módulo de elasticidade.

Uma vez que o foco do trabalho é estudar o módulo de elasticidade estático de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados, adotou-se como variável de resposta (variável dependente) o módulo de elasticidade, e como variáveis independentes a relação água/cimento e a massa específica dos agregados reciclados.

Além do objetivo principal deste trabalho, foram ainda analisadas as influências das mesmas variáveis independentes na resistência à compressão.

O planejamento fatorial permite estudar o efeito dos principais fatores e os efeitos de suas interações; isso é de suma importância nos estágios iniciais de um trabalho experimental, quando muitos fatores são prováveis de ser investigados (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2003).

Para experimentos fatoriais quantitativos da série  $2^k$  ou qualquer outra forma semelhante, teremos a base (2) representando o número de níveis de fator principal e o (k) representando o número de efeitos principais (FERREIRA, 2000).

As variáveis de entrada do experimento, também chamadas de efeito principal (k), foram os seguintes parâmetros relativos à composição dos concretos: relação água/cimento e massa específica do agregado graúdo (2 efeitos), e cada efeito principal possui dois níveis, ou seja, a base corresponde a 2:

- a) Para a relação água/cimento foram adotados 2 valores – ou níveis, no caso do experimento fatorial – 0,50 e 0,40, com o intuito de contemplar a faixa de relações a/c e de resistências abordadas na NBR 6118 (2004) para concretos estruturais.
- b) A determinação para o parâmetro relativo à massa específica do agregado graúdo reciclado de RCD se deu de acordo com as amostras obtidas divididas em 2 níveis (valores) da seguinte forma: o primeiro nível utilizando 100% AGR, o segundo nível utilizando 100% AGC.

Parâmetros que foram mantidos fixos durante o experimento:

- a) Idade do concreto para a realização dos ensaios de módulo de elasticidade: 28 dias;
- b) Tipo do agregado miúdo: agregado 100% natural (areia natural de rio);
- c) Pré-molhagem dos agregados reciclados com o intuito de evitar que os mesmos absorvessem parte da água da mistura;
- d) Tipo de cura: o método de cura adotado para todos os concretos foi a imersão total dos corpos-de-prova em água.

Assim, para que o planejamento fatorial fosse realizado de forma completa foi necessária a produção de 4 traços de concreto com os agregados reciclados (100% de RCD e

100% de concreto), mais a replica de cada um e também foram produzidos 2 concretos de referência, um para cada relação a/c, totalizando assim 6 traços de concretos (Tabela 12).

A Tabela 12 mostra: na 1ª coluna a relação entre o consumo de cimento (Cc) e a relação a/c; na 2ª coluna o agregado graúdo utilizado e na 3ª coluna o nome do traço do concreto.

**Tabela 12 – Traços obtidos da combinação dos fatores do experimento mais os traços de referência.**

Cc x a/c	Agregado graúdo	Nome do traço
400 - 0,5	100% AGR	40 AGR
	100% AGC	40 AGC
500 - 0,4	100% AGR	50 AGR
	100% AGC	50 AGC
Concreto de Referência		
400 - 0,5	AGN	40 Ref
500 - 0,4	AGN	50 Ref

Nota: Nome do traço, os dois números iniciais referem-se à relação a/c; as três letras referem-se ao tipo do agregado usado, AGR= Agregado Graúdo Reciclado, AGC= Agregado Graúdo de Concreto.

Fonte Autor, 2010.

Para cada concreto produzido foram moldados 03 corpos-de-prova, sendo dois para a resistência à compressão e um para o módulo de elasticidade, a Tabela 13 mostra a quantidade total de corpos-de-prova. O motivo para usar uma quantidade reduzida de amostras é poupar o material para produzir os corpos de prova de idades avançadas. Além disso, o resultado do experimento fatorial tem como objetivo comparar os resultados encontrados por Tenório (2007).

**Tabela 13 – Quantidade de corpos-de-prova utilizados no experimento fatorial.**

Agregado graúdo	Quantidade de	
	corpos-de-prova	
	1ª moldagem	Réplica
100% AGR	3	3
100% AGC	3	3
100% AGR	3	3
100% AGC	3	3
Concreto de Referência		
50 Ref	3	
40 Ref	3	
Quantidade	30 corpos-de-prova	

Fonte; Autor, 2010.

Para fazer o planejamento fatorial devem-se realizar os ensaios e registrar os valores das respostas (Resistência à compressão e o Módulo de elasticidade) nas quatro combinações possíveis dos níveis determinados (Tabela 14).

**Tabela 14 – Modelo do planejamento do experimento fatorial, 2<sup>2</sup>.**

Fator	Níveis
Relação a/c	0,5 (-); 0,4 (+)
Massa específica dos agregados (g/cm <sup>3</sup> )	2,04 (-); 2,26 (+)

Fonte Autor, 2010.

Fazendo a combinação entre os níveis escolhidos teremos: (2,04; 0,5), (2,04; 0,4), (2,26; 0,5) e (2,26; 0,4). A lista dessas combinações é chamada de matriz do planejamento, que é apresentada também com valores obtidos para as variáveis dependentes. Já o cálculo para a estimativa do erro experimental do experimento fatorial será realizado com base em apenas uma só réplica. Isto significa que para a resistência à compressão e para o módulo de elasticidade do concreto todos os traços foram moldados duas vezes (1ª moldagem mais a réplica).

Com os resultados obtidos para as variáveis dependentes é possível calcular o efeito principal: massa específica (D) e relação a/c (C) e o efeito da interação entre os dois fatores (DC).

O efeito principal da massa específica é por definição a média dos efeitos da massa específica. Usando a letra D que representará esse efeito, e  $\bar{y}_i$  representando a resposta média observada no i-ésimo ensaio. Assim, podemos escrever:

$$D = \frac{(y_2 + y_4)}{2} - \frac{(y_1 + y_3)}{2} \quad \text{Equação 3.3}$$

O primeiro termo do numerador da equação 3.3 pertence ao nível (+) do experimento fatorial e o segundo pertence ao nível (-) do experimento. O efeito principal D é a diferença entre a resposta média do nível superior e a resposta média do nível inferior desse fator. Segundo Barros Neto, Scarminio e Bruns (2003), a equação pode ser representada por:

$$D = \bar{y}_+ - \bar{y}_- \quad \text{Equação 3.4}$$

A expressão acima 3.4 é válida para qualquer efeito principal num planejamento fatorial completo de dois níveis e pode ser considerada como uma definição alternativa de efeito principal.

O efeito principal da relação a/c é por definição a média dos efeitos da relação a/c. Usando a letra C para representar esse efeito e  $\bar{y}_i$  representando a resposta média observada no i-ésimo ensaio, utilizando a expressão, podemos escrever:

$$C = \frac{(y_2 - y_4)}{2} - \frac{(y_1 - y_3)}{2} \quad \text{Equação 3.5}$$

O efeito de interação é a metade da diferença entre os dois fatores. A simbologia utilizada para representar esse fator pode ser uma das seguintes formas: DxC ou DC (equação 3.6).

$$DC = \frac{(\bar{y}_1 - \bar{y}_2)}{2} - \frac{(\bar{y}_2 - \bar{y}_1)}{2} = \frac{(\bar{y}_1 + \bar{y}_2)}{2} - \frac{(\bar{y}_2 + \bar{y}_1)}{2} \quad \text{Equação 3.6}$$

De acordo com Barros Neto, Scarminio e Bruns (2003), D e C são efeitos e cada efeito é a diferença de duas médias. Metade das observações contribui para uma das médias, e a metade restante aparece na outra média, sendo essa uma importante característica dos planejamentos fatoriais de dois níveis.

Como mencionado anteriormente todos os ensaios foram realizados em duplicata para que fosse possível ter uma maneira de estimar o erro experimental e a partir daí avaliar a significância estatística dos efeitos.

Segundo Barros Neto, Scarminio e Bruns (2003), como cada ensaio foi realizado apenas duas vezes, só é possível obter uma estimativa de variância com apenas um grau de liberdade. Para obter uma estimativa conjunta com 4 graus de liberdade, é necessário calcular a média de todas as estimativas ponderadas pelos seus respectivos graus de liberdade (equação 3.7). Ainda segundo autor, quando o número de repetições é o mesmo em todos os ensaios, a estimativa da variância experimental é simplesmente a média aritmética das variâncias observadas nos ensaios individuais.

$$s^2 = \frac{v_1 s_1^2 + v_2 s_2^2 + \dots + v_m s_m^2}{v_1 + v_2 + \dots + v_m} \quad \text{Equação 3.7}$$

Sabendo que,  $v_i = n_i - 1$  é o número de graus de liberdade de  $s_i^2$ , a estimativa da variância do i-ésimo ensaio.

Utilizando os valores variâncias de cada resultado das combinações, é possível determinar a variância experimental dos ensaios  $s^2$ .

Com o valor da variância é possível determinar o desvio padrão associado tanto aos ensaios da resistência à compressão quanto do módulo de elasticidade respectivamente.

Tirando a raiz quadrada desse valor, obtém-se a estimativa, com quatro graus de liberdade (equação 3.8).

$$s = \sqrt{s^2} \quad \text{Equação 3.8}$$

Uma vez que o erro padrão de um efeito é a raiz quadrada da metade da variância experimental, deve ser usada a metade, porque os efeitos são calculados com os valores médios de duas determinações (equação 3.9).

$$s(\text{efeito}) = \sqrt{\frac{s^2}{2}} \quad \text{Equação 3.9}$$

Com o erro padrão de um efeito, pode-se construir intervalos de confiança para os valores dos efeitos usando a distribuição de Student:

$$\bar{\eta} - t_v \times s(\text{efeito}) < \eta < \bar{\eta} + t_v \times s(\text{efeito}) \quad \text{Equação 3.10}$$

Para construir o intervalo de confiança é necessário conhecer o valor " $t_v$ " que depende dos graus de liberdade e do nível de confiança, para o estudo em questão o número de graus de liberdade é 4, e o nível é de confiança de 95%. Utilizando qualquer tabela que apresente os valores da probabilidade da distribuição  $t$  com  $v$  graus de liberdade bicaudal o valor de  $t_v = 2,776$ .

Para decidir quais dos efeitos calculados são significativamente diferentes de zero, e, portanto, possuidores de méritos para interpretação, a equação de Student considera estatisticamente significativo, com 95% de confiança, um efeito cujo valor absoluto for superior a:

$$t_v \times s(\text{efeito}) = 2,776 \times s(\text{efeito})$$

Aplicando este critério aos valores dos efeitos D, C e ao efeito de interação DC, é possível avaliar quais deles produziram efeito significativo nos resultados nos ensaios da resistência à compressão e do módulo de elasticidade. O próximo passo será fazer uma análise de regressão.

A análise de regressão avalia o relacionamento entre uma variável chamada dependente e outras variáveis chamadas independentes. Para este estudo em particular, as variáveis dependente foram a resistência à compressão e módulo de elasticidade, e as independentes foram a massa específica dos agregados graúdos reciclados e a relação a/c. Este relacionamento é representado por um modelo matemático. Para a construção desse modelo, foram utilizados os valores médios tanto da resistência à compressão como do módulo de elasticidade.

Segundo Barros Neto, Scarminio e Bruns (2003), o modelo estatístico usado para descrever as respostas de um planejamento fatorial é formulado em termos dos efeitos por unidade de variação dos fatores. Para o planejamento fatorial em questão ( $2^2$ ), a resposta observada no nível  $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$  é considerada como uma variável aleatória  $y(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ . Essa variável se distribui em torno de certa média populacional  $\eta(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ , com uma certa variância populacional  $\sigma^2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$  que pode ser escrita como:

$$y(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \eta(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \varepsilon(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \quad \text{Equação 3.11}$$

Sabendo que  $\varepsilon(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$  representa o erro aleatório com que as respostas flutuam em torno da média populacional definida pelos valores de  $\mathbf{x}_1$  e  $\mathbf{x}_2$ .

Um planejamento fatorial  $2^2$  pode ser representado de forma adequada pela expressão 3.12.

$$\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad \text{Equação 3.12}$$

Sabendo que:

- $\beta_0$  é o valor populacional da média de todas as respostas do planejamento;
- $\beta_1, \beta_2, \beta_{12}$  são os valores populacionais dos efeitos principais e do efeito de interação, por unidade de  $x_1$  e  $x_2$ .

Substituindo-se a expressão 3.12 na equação 3.11 é possível ter uma observação individual feita num ensaio.

$$y(x_1, x_2) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \epsilon(x_1, x_2) \quad \text{Equação 3.13}$$

Onde:

- $\epsilon(x_1, x_2)$  é o erro aleatório associado à resposta  $y(x_1, x_2)$ .

Assim, um modelo estatístico que pode representa um planejamento fatorial  $2^2$  em função da variação dos fatores massa específica e relação a/c, e tendo com resposta a variável  $y$ , representando a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, é dado pela equação 3.12.

$$\hat{y}(x_1, x_2) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + \epsilon(x_1, x_2) \quad \text{Equação 3.14}$$

Onde:  $\hat{y}(x_1, x_2)$  representa o valor da resistência à compressão e do módulo da equação aproximada e;  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_{12}$ , representam os estimadores.

Utilizando o programa gratuito disponível na internet “DataFit” versão 9.059, foram testados vários modelos que apresentaram diferentes valores para os coeficientes de correlação inicial ( $R^2$ ) e coeficientes de correlação ajustada ( $Ra^2$ ). Sabendo que um coeficiente de correlação relaciona a curva ajustada com os dados determinados pelo experimento, e que quanto mais próximo de 100% for este valor melhor será o ajuste.

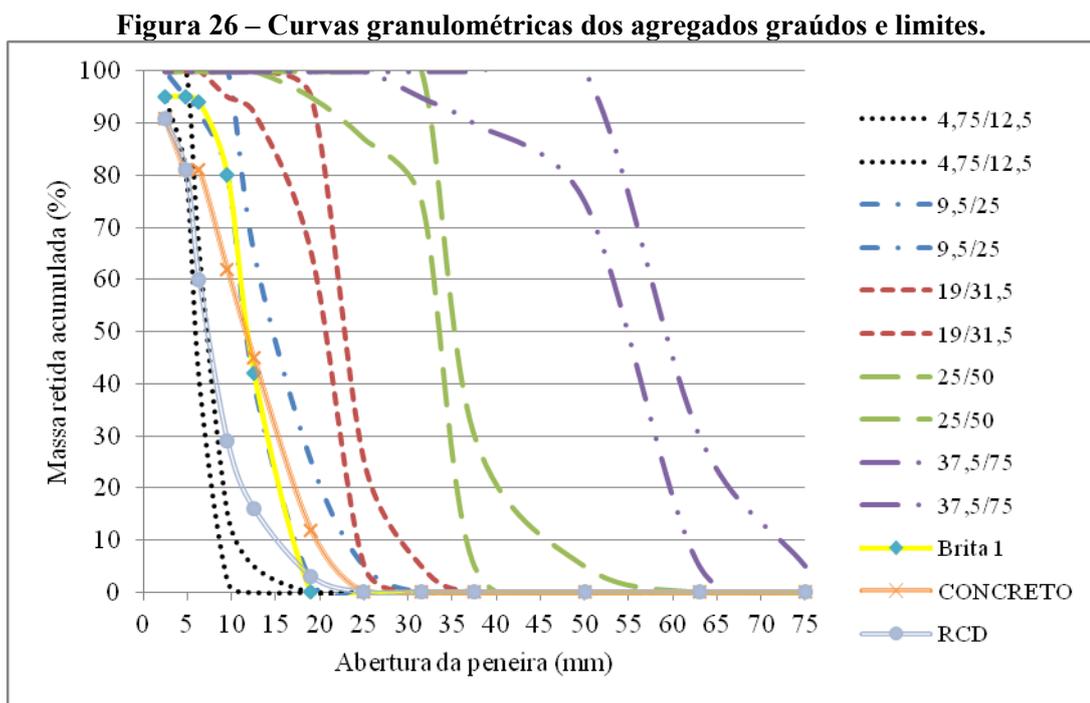
Com o mesmo programa ainda é possível gerar as superfícies de resposta, que relaciona as propriedades de interesse (resistência à compressão, módulo de elasticidade) chamadas de resposta, com as variáveis que influenciam a resposta (massa específica e a relação a/c) que são os fatores.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para as propriedades dos agregados reciclados e naturais, comparando-os entre si. Dando continuidade, são apresentados, debatidos e comparados os ensaios feitos com o concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido para as idades de 28 dias e 240 dias.

### 4.1 Propriedades dos agregados graúdos

A Figura 26 compara de maneira gráfica as distribuições granulométricas entre os agregados graúdos naturais (Brita 1), de concreto e RCD. Já a tabela 4.1 mostra propriedades particulares referentes à granulometria dos agregados graúdos.



Fonte: Autor, 2010.

É possível observar, com as informações da Figura 26 e da Tabela 15, que os agregados graúdos reciclados possuem certa semelhança e que ambos não se encaixam em nenhuma zona granulométrica especificada pela NBR 7211 (2005), diferentemente dos agregados graúdos de origem natural que se enquadram na zona 9,5/25 (Brita 1).

Em relação ao módulo de finura, Leite (2001) afirma que quanto maior o módulo de finura dos agregados, maior é o tamanho de suas partículas, o que diminui a superfície

específica dos agregados e, por consequência, a necessidade de pasta para lubrificação dos grãos. Com o resultado obtido para o módulo de finura, é possível observar que o AGC possui maior valor que o do agregado natural; porém, a diferença entre eles foi muito pequena. Já o AGR foi o que apresentou o menor valor.

Outra dado importante explícito na Tabela 15 é a quantidade de material miúdo reciclado retida no fundo da abertura da peneira. A quantidade de miúdos de RCD foi aproximadamente 7 vezes maior que a quantidade de miúdos de concreto; isto mostra a fragilidade do material proveniente de RCD quando submetido ao equipamento de cominuição.

**Tabela 15 – Propriedades dos agregados graúdos.**

Abertura da peneira	AGN			AGC			AGR		
	% da massa (média)			% da massa (média)			% da massa (média)		
	retida	acumulada		retida	acumulada		retida	acumulada	
25 mm	0	-	0	0	-	0	0	-	0
19 mm	0,26	0,26	-	12,64	12,64	-	2,99	2,99	-
12,5 mm	41,41	-	41,67	35,44	-	48,08	12,68	-	15,67
9,5 mm	38,51	80,18	-	18,64	66,72	-	13,31	28,98	-
6,3 mm	14,32	-	94,50	20,96	-	87,68	31,45	-	60,43
4,75 mm	0,98	95,48	-	10,16	97,84	-	24,53	84,96	-
2,36 mm	0	95,48	-	0	97,84	-	0	84,96	-
1,18 mm	0	95,48	-	0	97,84	-	0	84,96	-
0,6 mm	0	95,48	-	0	97,84	-	0	84,96	-
0,3 mm	0	95,48	-	0	97,84	-	0	84,96	-
0,15 mm	0	95,48	-	0	97,84	-	0	84,96	-
fundo	4,51	-		2,16	-		15,04	-	
total	100,0	653,3	--	100,0	666,4	--	100,0	541,7	--
Tamanho máximo (mm)	19			25			19		
Módulo de finura	6,53			6,66			5,42		
Zona granulométrica	Brita 1			Nenhuma			Nenhuma		

Fonte Autor, 2010.

A Tabela 16 traz outras informações pertinentes às propriedades dos agregados graúdos. Em relação à absorção de água, os agregados reciclados tiveram valores muito superiores aos do agregado natural. Comparando os agregados entre si, o AGR teve maior

absorção que o AGC, indicando ser o material mais poroso e menos denso entre os três agregados. Isto se refletiu na massa específica.

Para a massa específica, pode-se observar (Tabela 16) que ela teve comportamento inverso ao da absorção, ou seja, quanto menor foi a absorção, maior o valor da mesma. As massas específicas dos agregados variaram entre 2,26 g/cm<sup>3</sup> a 2,04 g/cm<sup>3</sup>, ficando abaixo dos agregados convencionais utilizados na confecção de concreto, que variam em torno de 2,5 g/cm<sup>3</sup>. Os valores para massa específica encontrados nesta pesquisa estão de acordo com os valores encontrados por Carrijo (2005), Tenório (2007) e Moreira (2010).

O índice de forma é a relação entre a maior dimensão e a menor dimensão do agregado graúdo. Seu valor, em termos médios, expõe o quanto um agregado pode estar próximo de um poliedro regular ( $IF \approx 1$ ); esta é uma forma de quantificar a forma dos agregados graúdos. Entre os fatores que podem influenciar na forma do agregado, pode-se citar a origem do material e o equipamento utilizado no processo de beneficiamento. O primeiro fator pode ter uma influência significativa quando o material possui certa tendência a uma determinada forma ou direção preferencial. Por exemplo, telhas cerâmicas ou tijolos furados, pois possuem uma dimensão predominantemente mais alongada ou lamelar em relação à outra. Já o equipamento utilizado nesta pesquisa - moinho de martelos - influencia consideravelmente na forma do agregado graúdo.

Os dados contidos na Tabela 16 mostram que os índices de forma dos agregados AGR e AGC apresentaram uma forma menos lamelar que o agregado graúdo natural (brita 1), o que, segundo LEITE (2001), pode ser um fato positivo para os agregados reciclados, pois a forma das partículas exerce grande influência sobre a trabalhabilidade da mistura de concretos. Analisando os resultados das frações da peneira # 9,5 mm, o índice de forma dos AGR foi bem mais lamelar do que os outros agregados. Uma possível causa para isto é a grande quantidade de cerâmica vermelha que compõe o agregado. Vale ressaltar que nesta pesquisa não foi realizada a classificação dos agregados de acordo com a NBR 15116 (2004) e sim um critério visual.

Os materiais pulverulentos influenciam as propriedades de concretos e argamassas no estado fresco e endurecido, pois aumentam a superfície específica da mistura, exigindo assim mais água de amassamento e isso se torna um fator agravante ao se utilizar agregados

reciclados. Os resultados contidos na Tabela 16 mostram que, entre todos os agregados, o AGC teve os menores teores de materiais finos, superando inclusive os naturais. Já o AGR teve os maiores valores, confirmando assim a sua fragilidade quando submetidos ao processo de trituração.

**Tabela 16 – Outras propriedades dos agregados graúdos.**

Propriedades		AGN	AGC	AGR	Norma
Absorção de Água (%)		0,66	5,21	8,85	NM 53 (2002)
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )		2,68	2,26	2,05	
Massa unitária no estado solto (kg/dm <sup>3</sup> )		1,32	1,23	1,1	NBR NM 45 (2006)
Massa unitária no estado compactado (kg/dm <sup>3</sup> )					
Índice de forma por fração granulométrica	# 19,5 mm	-	2,57	3,8	NBR 7809 (1983)
	#12,5 mm	2,68	2,49	2,21	
	# 9,5 mm	2,97	2,43	2,1	
Índice de forma de todo o agregado		2,81	2,51	2,73	
(%) material com D < 75 µm		0,47	0,26	1,28	NBR NM 46 (2003)

Fonte Autor, 2010.

O ensaio de absorção dos agregados graúdos foi realizado de acordo com a NBR NM 53 (2003), porém com a diferença de que, ao invés de medir somente a absorção total após 24 horas, também foram medidas as massas dos agregados submersos ao longo das primeiras 5 horas de ensaio proposta por Leite (2001). A Tabela 17 mostra que no decorrer do primeiro minuto os três agregados já absorveram mais de 90% e que aos dez minutos esse valor já se aproximava do valor total. Outros estudos mostram valores diferentes para a absorção no decorrer dos dez primeiros minutos: Leite (2001) observou um valor de 50%; Carrijo (2005) obteve uma variação entre 70% e 86%; Tenório (2007) chegou a 88%. Todos esses resultados mostram que a absorção possui características particulares para cada tipo e composição de agregado reciclado.

**Tabela 17 – Absorção dos agregados graúdos.**

Tempo	% da absorção		
	AGN	AGC	AGR
1min	99,81	96,71	94,44
10min	99,85	98,44	96,0

Fonte Autor, 2010.

## 4.2. Propriedades dos concretos no estado fresco

No estado fresco, foi verificada a trabalhabilidade pelo ensaio de abatimento do tronco de cone em todos os concretos pesquisados neste trabalho.

### 4.2.1. Consistência

Como já foi relatado no item 3.3.2, uma quantidade de aditivo foi adicionada até que os concretos reciclados apresentassem uma consistência visualmente plástica, onde os mesmos possuíssem uma boa trabalhabilidade e que não causassem prejuízos ao processo de moldagem dos corpos-de-prova. Neste trabalho não foi fixado um valor de referência para o abatimento, uma vez que o foco do trabalho foram as propriedades mecânicas do concreto no módulo de elasticidade e resistência à compressão. Mesmo assim, alguns comentários serão feitos referentes a essa propriedade.

A Tabela 18 mostra a porcentagem inicial de plastificante para cada traço, a quantidade de plastificante usada em cada concreto e os seus respectivos abatimentos. Já a [Figura 24](#) faz uma comparação gráfica dos abatimentos nas duas moldagens.

As colunas 3 e 4 da Tabela 18 mostram as quantidades de aditivo usadas em cada concreto. Tanto durante a 1ª moldagem quanto na réplica do experimento fatorial, a consistência foi medida manualmente. Uma possível situação que pode ter ocorrido durante a verificação é que mesmo o concreto estando em uma condição plástica, poderia ele na realidade estar abaixo deste ponto ou acima dele, como por exemplo ocorreu com o concreto

“50 AGC”, que na 1ª moldagem teve um abatimento de 25 mm utilizando 100% de aditivo. Colocando-se mais 15g num total de 75g, o abatimento subiu para 160 mm.

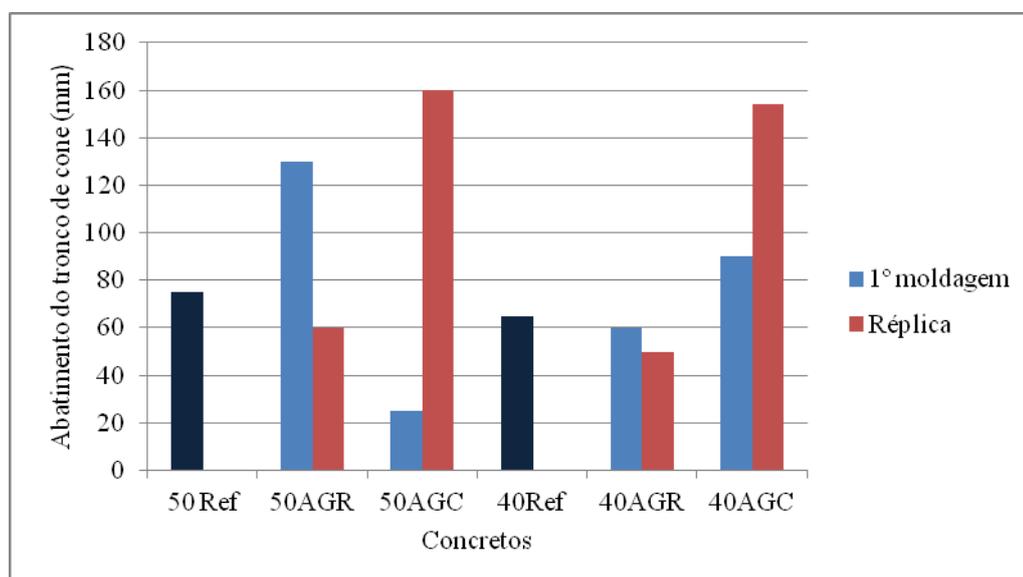
**Tabela 18 – Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone.**

Concretos	%	Quantidade de aditivo		Abatimento (mm)	
		em relação. à massa do cimento.	1ª moldagem (g)	Réplica (g)	1ª moldagem
50 Ref	-	-	-	75	-
50 AGR	0,5	60	60	130	60
50 AGC	0,5	60	90	25	160
40 Ref	-	-	-	65	-
40 AGR	0,5	75	75	60	50
40 AGC	0,5	37,5	75	90	154

Fonte: Autor, 2010.

As características particulares dos AGC e do AGR podem ter influenciado o abatimento do concreto. É possível ver na Tabela 18 e na Figura 27 que os agregados graúdos provenientes de RCD tiveram um abatimento menor que os provenientes de concreto. Alguns fatores podem ter contribuído para este comportamento. Entre eles está a maior absorção do AGR em relação ao de concreto e a grande quantidade de material pulverulento nos AGR, que foi a maior entre todos os agregados (Tabela 16).

**Figura 27 – Abatimento dos concretos na 1ª moldagem e na réplica do experimento.**



Fonte: Autor, 2010.

Os dados contidos na Figura 27 mostram que todos os concretos, mesmos aqueles sem plastificantes como os de referência, apresentaram-se trabalháveis e moldáveis. Os abatimentos oscilaram tanto na 1ª moldagem quanto na réplica, e não apresentaram tendência para um valor médio. Outro fato que pode ser percebido é que não houve tendência de repetição dos valores dos abatimentos na réplica. Ora os valores foram menores ora foram maiores do que seus respectivos concretos na 1ª moldagem. Este comportamento já foi observado por outros pesquisadores como Leite (2001), Carrijo (2005) e Tenório (2007), que concordam que a medição da trabalhabilidade pelo abatimento do tronco de cone não é um método apropriado para estimar a consistência de concretos reciclados.

### 4.3 Propriedades dos concretos no estado endurecido

No estado endurecido, foram realizados os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, aos 28 dias e aos 240 dias.

#### 4.3.1 Para a idade de 28 dias

##### 4.3.1.1 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos concretos são apresentados na Tabela 19. A Tabela apresenta os resultados da 1ª moldagem e da réplica, assim como da média das duas moldagens.

**Tabela 19 – Resultados de resistência à compressão, 1ª Moldagem, Réplica e Média.**

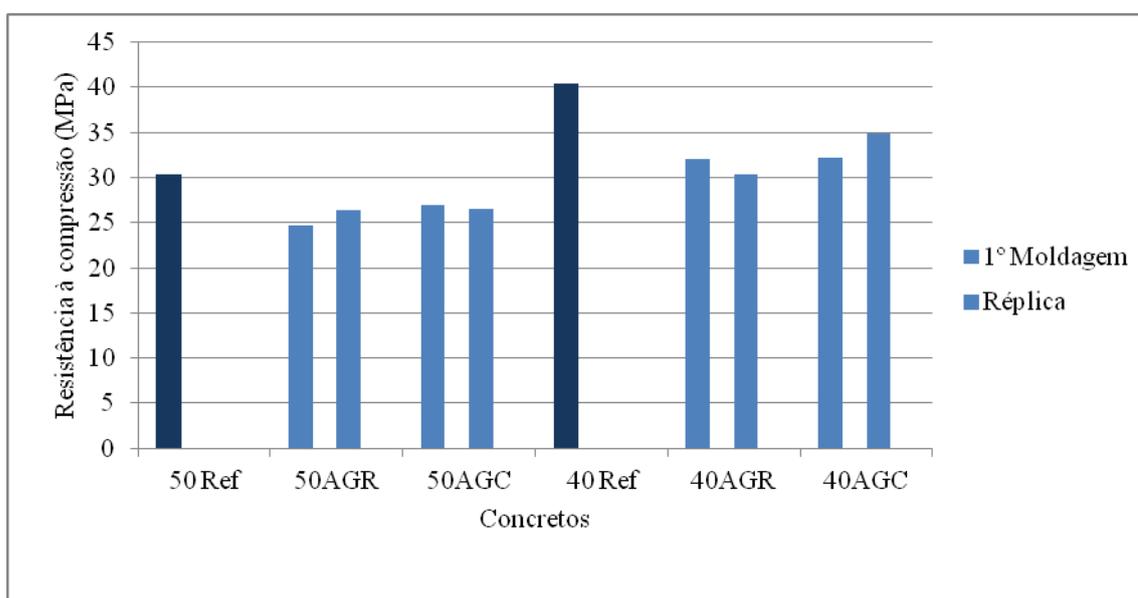
Concreto	$f_c$ (MPa)	$f_c$ (MPa)	$f_c$ (MPa)
	1ª Moldagem	Réplica	Média
50 Ref	30,4	-	-
50 AGR	24,7	26,4	25,6
50 AGC	26,9	26,2	26,7
40 Ref	40,5	-	-
40 AGR	32,1	30,4	31,3
40 AGC	32,3	34,9	33,6

Fonte; Autor, 2010.

De acordo com os resultados obtidos na tabela 4.5 para as duas moldagens, é possível observar que os concretos produzidos com relação a/c igual a 0,5 tiveram a resistência à

compressão menor que os concretos produzidos com relação a/c igual a 0,4. De posse desses dados, é possível perceber que os concretos obedeceram à *Lei de Abrams*. Desta feita, à medida que se diminuiu a relação a/c, a resistência aumentou para ambos os tipos de agregados. Outro detalhe que chama a atenção é que todos os concretos, independentemente do tipo do agregado ou da relação a/c, estão acima das resistências mínimas para concretos estruturais, cuja menor classe, de acordo com a NBR 6118 (2003) para este fim, é C20.

**Figura 28 – Resistência à compressão dos concretos, 1ª amostragem e Réplica.**



Fonte: autor, 2010.

A Figura 28 apresenta os resultados da Tabela 19 em forma de gráfico. Neste é possível observar que as resistências, principalmente as do concreto cuja relação a/c foi igual a 0,4, foram altas, mesmo sendo inferiores às do concreto de referência. Dos resultados obtidos para os concretos com agregados reciclados, os valores que mais se aproximaram do seu concreto de referência foram os que possuíam relação a/c igual a 0,5. Nenhum dos concretos produzidos utilizando agregados reciclados superou o seu concreto de referência; isto também ocorreu no trabalho desenvolvido por Carrijo (2005). Porém, nos trabalhos realizados por Leite (2001), os concretos que possuíam alta relação a/c (0,8) tiveram melhores resultados que seus concretos de referência. No trabalho de Tenório (2007), os concretos que alcançaram resultados melhores que seus concretos de referência foram os de menor relação a/c (0,67), alguns deles superando os seus concretos de referência.

Entre todos os concretos produzidos com agregados reciclados, os que apresentaram melhor média nas duas moldagens em comparação ao seu concreto de referência foram os concretos 50 AGC e 50 AGC-Réplica. Sua resistência média chegou a 87,8% do valor de seu concreto de referência com agregados naturais. Os concretos com relação  $a/c = 0,5$  foram menos sensíveis aos efeitos negativos da porosidade dos agregados reciclados.

### ❖ Planejamento fatorial $2^2$

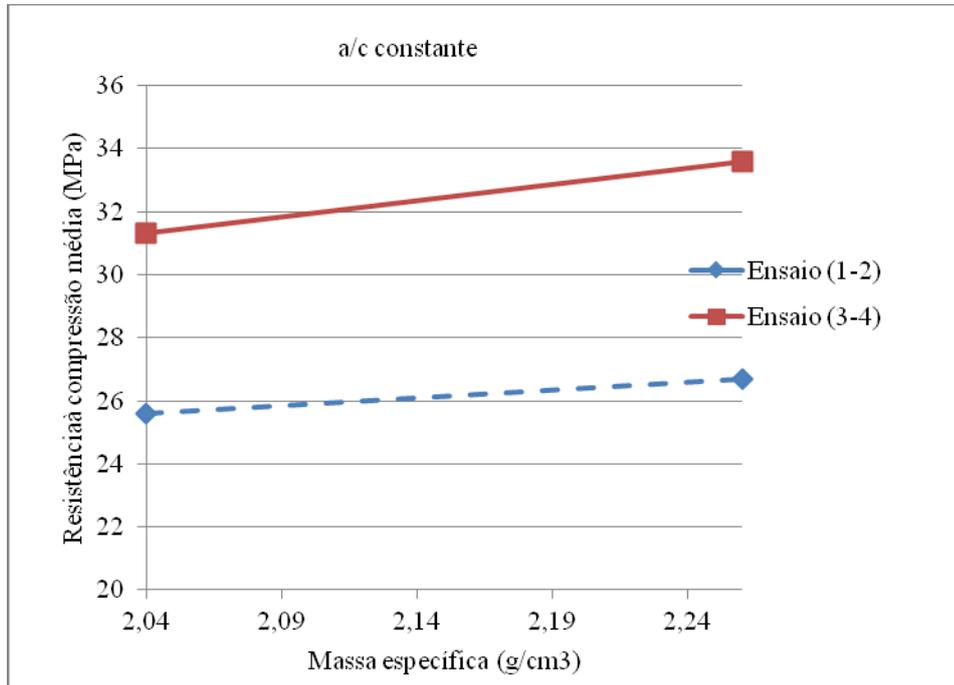
Para análise do planejamento fatorial definido no item 3.2, cujos fatores e níveis foram determinados conforme Tabela 14, é necessário compor as combinações entre os mesmos, isto é, (2,04; 0,5), (2,04; 0,4), (2,26; 0,5) e (2,26; 0,4). O resultado dessas combinações pode ser visto na Tabela 20.

**Tabela 20– Resultados de um planejamento fatorial  $2^2$  para estudar o efeito da massa específica dos agregados graúdos reciclados e do fator  $a/c$  sobre a resistência à compressão dos concretos.**

Ensaio	Massa específica g/cm <sup>3</sup>	a/c	f <sub>c</sub> (Mpa)		Média (MPa)
			1ª	Réplica	
1	2,04	0,5	24,7	26,4	25,6
2	2,26	0,5	26,9	26,7	26,7
3	2,04	0,4	32,1	30,4	31,3
4	2,26	0,4	32,3	34,9	33,6

Fonte: Autor, 2010.

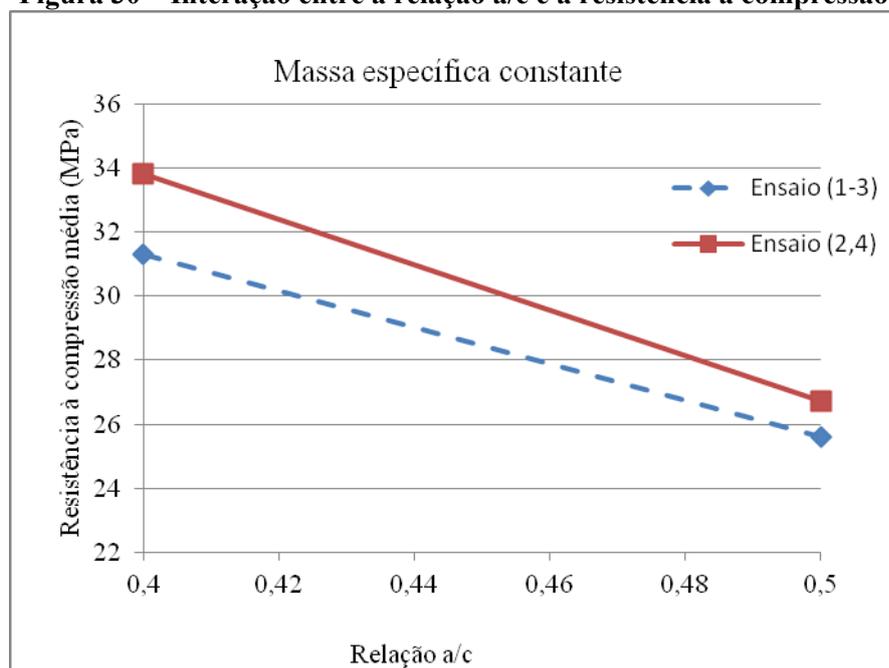
**Figura 29 – Interação entre massa específica e resistência à compressão.**



Fonte: Autor, 2010.

A Figura 29 é baseada nos valores da tabela 4.6 e na interação entre os ensaios 1-2 e 3-4; para cada ensaio, uma das relações a/c foi mantida constante. Inicialmente, foi realizado o ensaio 1-2 para medir a resistência à compressão, mantendo-se a relação a/c constante e igual a 0,5; variando a massa específica de 2,04 g/cm<sup>3</sup> para 2,26 g/cm<sup>3</sup>, o valor da resistência aumentou em 1,1 MPa ou, em termos de porcentagem, 4%. Já para o ensaio 3-4, o concreto foi feito mantendo-se a relação a/c constante e igual a 0,4; aumentando a massa específica de 2,04 g/cm<sup>3</sup> para 2,26 g/cm<sup>3</sup> houve um aumento na resistência de 2,3 MPa ou em porcentagem + 6,8%. Os dois resultados mostram que o valor da resistência à compressão varia de acordo com a massa específica dos agregados graúdos, que, por sua vez, dependem do nível em que a relação a/c está.

**Figura 30 – Interação entre a relação a/c e a resistência à compressão.**



Fonte: Autor, 2010.

Para os ensaios 1-3 e 2-4, foi mantida constante uma das massas específicas de cada vez e fez-se variar as relações a/c de 0,4 para 0,5. Para o ensaio 1-3, foi mantida a massa específica constante e igual a  $2,04\text{g/cm}^3$ ; a relação a/c aumentou de 0,4 para 0,5. É possível observar na Figura 31 que ocorreu uma diminuição da resistência à compressão de 5,7 MPa ou aproximadamente -18%. Dando continuidade para a última interação, ensaio 2-4, restando apenas um nível a ficar constante – a massa específica igual a  $2,26\text{g/cm}^3$  – o resultado mostra que houve uma diminuição de 6,9 MPa ou o equivalente a -20,5%, quando a relação a/c aumento de 0,4 para 0,5.

Com esta análise foi possível observar que o efeito de uma variável depende do nível de outra, como ocorreu entre a massa específica e a relação a/c, o que, segundo Barros Neto (et al., 2003), indica que quando duas variáveis interagem é possível calcular o efeito da interação entre elas.

Portanto, como existiu uma interação entre a massa específica e a relação a/c é possível calcular os efeitos entre elas de acordo com as equações apresentadas no estudo do planejamento fatorial.

### ❖ Cálculo dos efeitos

Com os resultados obtidos da Tabela 20 e das Figuras 30 e 31, pode-se perceber que tanto a variação da massa específica dos agregados graúdos reciclados quanto da relação a/c tiveram algum tipo de influência na resistência à compressão dos concretos em questão.

Para calcular o efeito principal da massa específica (D) será utilizada a eq. 3.3

$$D = \frac{(26,7 + 33,6) - (25,6 + 31,3)}{2}$$

$$D = 1,7 \text{ MPa}$$

O valor D=1,7 MPa indica que a resistência à compressão sobe 1,7 MPa, em média, quando a massa específica aumenta de 2,04g/cm<sup>3</sup> para 2,26 g/cm<sup>3</sup>.

O efeito principal da relação a/c (C) determinado pela eq. 3.5 é igual a:

$$C = \frac{(33,6 + 31,3) - (25,6 + 26,7)}{2}$$

$$C = 6,3 \text{ MPa}$$

O valor C=6,3 MPa indica que a resistência à compressão sobe 6,3 MPa, em média, quando a a relação a/c diminui de 0,5 para 0,4 a resistência aumenta em média 6,3 MPa .

Caso não houvesse interação, o efeito da massa específica do agregado reciclado seria o mesmo para qualquer relação a/c, porém, não foi o que ocorreu, sendo, portanto, possível determinar a diferença entre os dois efeitos (DC) como uma média da interação entre os mesmo.

Para determinação da diferença DC é utilizada a equação 3.6.

$$DC = \frac{(33,6 - 31,3) - (25,6 - 26,7)}{2}$$

$$DC = 0,5 \text{ MPa}$$

O valor  $DC=0,6$  MPa indica a interação que os dois efeitos tiveram simultaneamente sobre a resistência à compressão.

A análise do significado das grandezas D, C e DC serão consideradas após o cálculo do erro e da verificação dos intervalos de confiança usando a distribuição de Student.

#### ❖ Estimativa do erro experimental

A Tabela 21 mostra os resultados da variância 1ª moldagem e réplica de todos os ensaios de resistência à compressão.

**Tabela 21 – Variância dos ensaios individuais para resistência à compressão.**

(MPa)	ensaio 1	ensaio 2	ensaio 3	ensaio 4
1ª moldagem	24,7	26,9	32,1	32,3
Réplica	26,4	26,2	30,4	34,9
Variância	1,44	0,2	1,45	3,38

Fonte: Autor, 2010

Para determinar a variância experimental dos ensaios com 4 de liberdade é utilizada a eq. 3.7:

$$s^2 = \frac{(2-1) \times 1,44 + (2-1) \times 0,2 + (2-1) \times 1,45 + (2-1) \times 3,38}{(2-1) + (2-1) + (2-1) + (2-1)}$$

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{1,62} = 1,27 \text{ MPa}$$

Já o erro padrão foi calculado com a eq 3.9.

$$s(s_{\text{feito}}) = \sqrt{\frac{s^2}{2}} = \sqrt{\frac{1,62}{2}} = 0,9 \text{ MPa}$$

A Tabela 22 contém os resultados da análise dos dados da Tabela 20, incluindo a resistência a compressão média global, que também é uma combinação linear de todas as observações.

**Tabela 22 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial 2<sup>2</sup> da tabela 4.6.**

Média global	29,3 ± 0,45 MPa
<b>Efeitos principais</b>	-
D	1,7 ± 0,90 MPa
C	6,3 ± 0,90 MPa
<b>Efeitos de interação</b>	-
DC	0,6 ± 0,9 MPa

Fonte: Autor, 2010,

Sabendo do valor do erro padrão de um efeito, pode-se construir intervalos de confiança para os valores dos efeitos usando a distribuição de Student equação 3.10:

Para decidir quais dos efeitos calculados são significativamente diferentes de zero, e, portanto, possuidores de méritos para interpretação, a equação de Student considera estatisticamente significativo, com 95% de confiança, um efeito cujo valor absoluto for superior a:

$$t_{\alpha} \times s(\text{afalto}) = 2,776 \times 0,9 = 2,49 \text{ MPa}$$

Aplicando este critério aos valores da tabela 4.8 com os efeitos, apenas a relação a/c produziu efeito significativo nos resultados no ensaio da resistência à compressão. Enquanto que os efeitos da massa específica dos agregados graúdos e o efeito da interação entre ambos os fatores não puderam ser considerados significativos, logo foram desprezados.

#### ❖ Modelo estatístico

Vários modelos foram testados e o que apresentou melhores resultados foi o da equação 4.1, O modelo apresentou um erro padrão estimado de 0,5 MPa, coeficiente de correlação inicial  $R^2 = 99,4\%$  e coeficiente de correlação ajustado  $Ra^2 = 98,3\%$ .

$$b_0 = 7,12; b_1 = 1,33; b_2 = -0,98; b_{12} = 0;$$

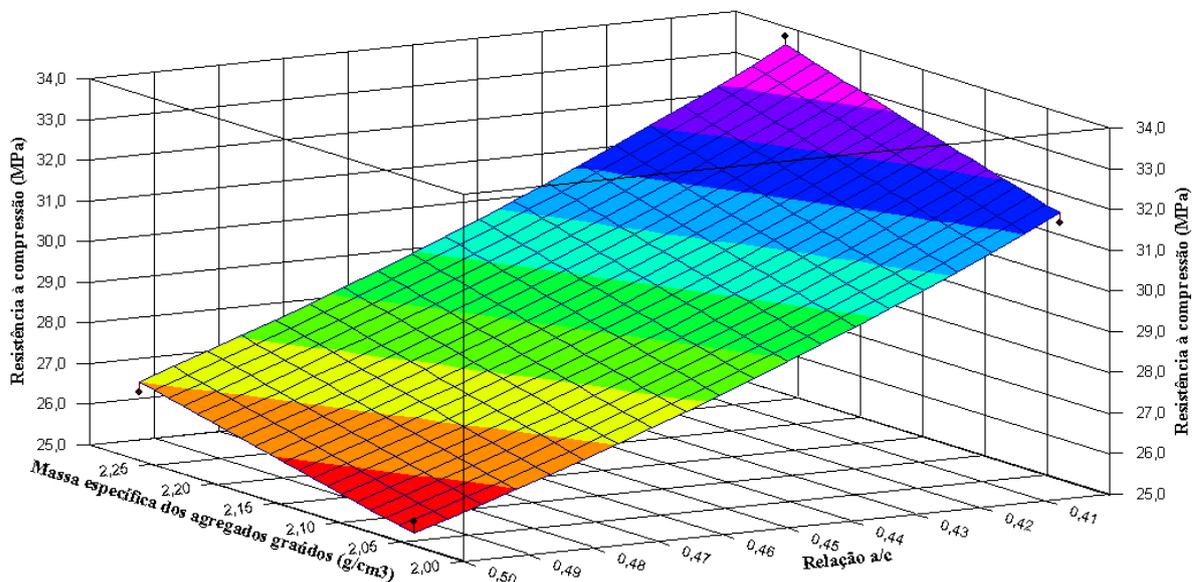
$$y(x_1, x_2) = 7,12 x 1,33^{x_1 x_2^{-0,98}}$$

Equação 4.1

### ❖ Superfície de resposta

Para gerar a superfície de resposta, utilizou-se o mesmo programa “DataFit” versão 9.059. A superfície de resposta adotada para o modelo foi o da equação 4.1.

**Figura 31 – Superfície de resposta da resistência à compressão em função da massa específica do agregado graúdo e da relação a/c.**



Fonte: Autor, 2010.

É possível observar na superfície de resposta para o modelo adotado (Figura 31) que a resistência à compressão teve seu pior resultado quando a massa específica foi a menor juntamente com a maior relação a/c. O resultado da resistência à compressão por sua vez, teve sua maior inclinação à medida que a relação a/c diminuiu, e isto ocorreu para os dois níveis de massa específica, tendo a resistência alcançado o maior valor quando a massa específica foi a maior juntamente com menor relação a/c. Outro detalhe que pode ser visualizado na superfície de resposta é a pequena dispersão dos pontos, destacados nas extremidades do plano, demonstrando a existência de poucos resíduos em relação aos pontos determinados durante a experimentação, estando de acordo com o alto valor do coeficiente de correlação ajustado ( $R_a^2$ ).

#### 4.3.1.2 Módulo de Elasticidade

Os resultados dos ensaios do módulo de elasticidade são apresentados na Tabela 23. Todos os procedimentos para o ensaios foram realizados aos 28 dias de acordo com NBR 8522 (2008).

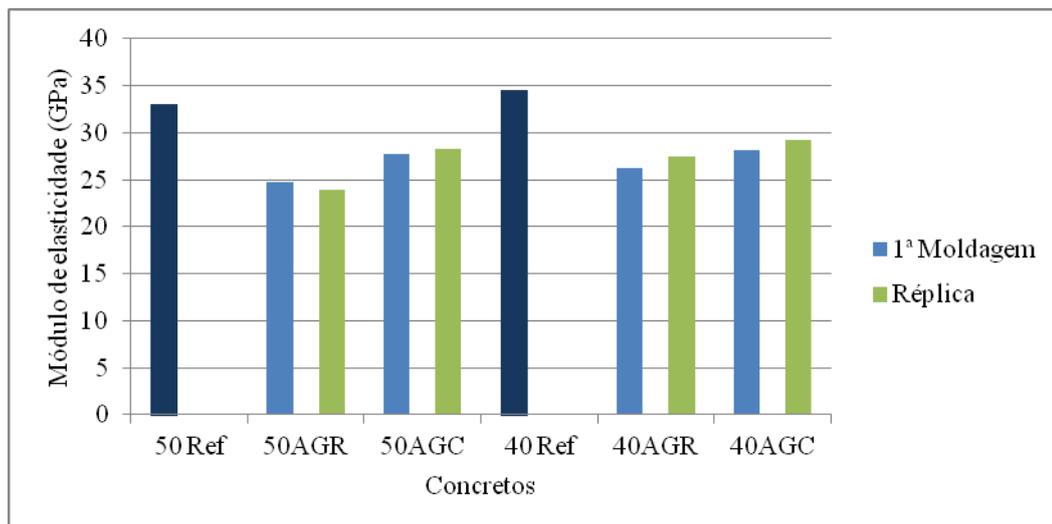
Com os dados obtidos através dos ensaios experimentais e expressos na Tabela 23 para a 1ª moldagem mais a réplica, pode ser constatado que os concretos com relação a/c igual a 0,5 tiveram o módulo de elasticidade médio em torno de 26 GPa e os concretos produzidos com relação a/c igual a 0,4 tiveram 27 GPa. Esta última média alcançou o valor mais próximo ao seu concreto de referência.

**Tabela 23 – Resultados dos módulos de elasticidade tangentes iniciais ( $E_{ci}$ ): 1ª moldagem, réplica e média.**

Concreto	Eci (GPa)	Eci (GPa)	Eci (GPa)
	1ª Moldagem	Réplica	Média
50 Ref	33,0	-	-
50 AGC	24,7	23,9	24,3
50 AGR	27,8	28,3	28,1
40 Ref	34,5	-	-
40 AGC	26,2	27,5	26,8
40 AGR	28,2	29,2	28,7

Fonte: Autor, 2010.

**Figura 32 – Módulo de Elasticidade: 1ª moldagem e réplica.**



Fonte: Autor, 2010.

Como ocorreu com a resistência à compressão, para ambas as relações a/c e ambos os tipos de agregados reciclados, os resultados encontrados para o módulo de elasticidade nesta idade, não conseguiram atingir valores melhores que seus concretos de referência (Figura 32). Trata-se de um indício de que os agregados reciclados afetam de alguma forma as propriedades do concreto, uma vez que os resultados mostram menores valores para o módulo. Isto significa que os mesmos são mais deformáveis que os concretos produzidos com agregados convencionais. Carrijo (2005) também verificou em seu trabalho que nenhum dos concretos produzidos com agregados reciclados superou os concretos de referência. Entre os resultados encontrados por Tenório (2007), os concretos de relação a/c igual 0,67 tiveram um efeito benéfico sobre o módulo de elasticidade. Apresentando módulos maiores que seus concretos de referência, estes resultados mostram a relação existente entre resistência à compressão e módulo de elasticidade, já que os mesmos concretos apresentaram resistência à compressão maior que seus concretos de referência para esta mesma relação.

Entre todos os resultados das médias de resistência à compressão, os que tiveram melhor resultado em relação ao seu concreto de referência foram os concretos de relação a/c igual a 0,5 e os agregados de concretos (Figura 32), e o mesmo aconteceu para o módulo de elasticidade. A média do módulo chegou a 85,2% do seu concreto de referência, mostrando assim que existe uma coerência entre o valor obtido para a resistência à compressão e o valor encontrado para o módulo.

### ❖ Planejamento fatorial 2<sup>2</sup>

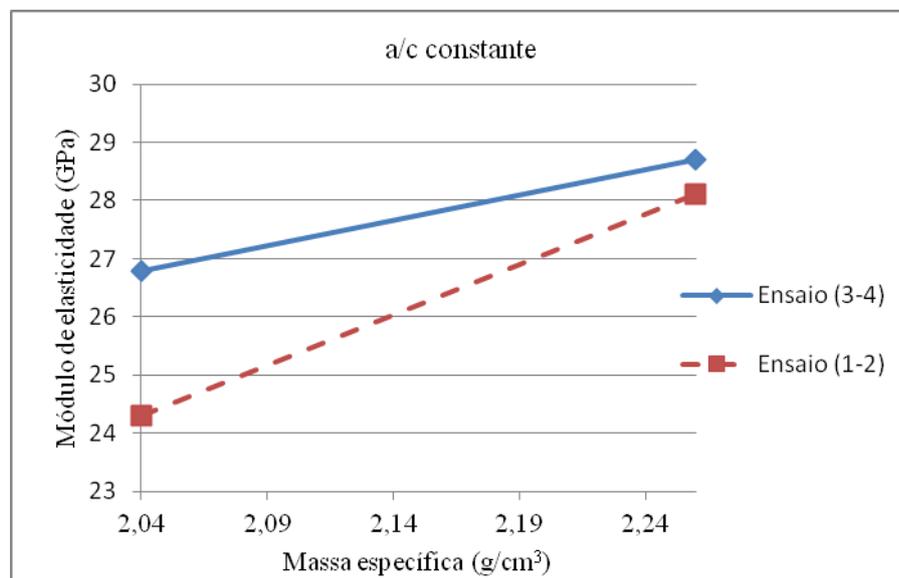
O planejamento fatorial 2<sup>2</sup> para ensaio do módulo de elasticidade segue o mesmo planejamento realizado para o ensaio da resistência à compressão, sendo necessário inicialmente definir quais seriam os fatores (massa específica (g/cm<sup>3</sup>) x relação a/c) e seus níveis (2,04 / 2,26 ; 0,5 / 0,4), estes foram apresentados na Tabela 14. Dessa forma, as combinações para o módulo de elasticidade estão sendo apresentadas na Tabela 24.

**Tabela 24– Resultados de um planejamento fatorial 2<sup>2</sup> para estudar o efeito da massa específica dos agregados graúdos reciclados e do fator a/c sobre o módulo de elasticidade dos concretos.**

Ensaio	Massa específica g/cm <sup>3</sup>	a/c	Eci (Gpa)		Média
			1 <sup>a</sup>	Réplica	
1	2,04	0,5	24,7	23,9	24,3
2	2,26	0,5	27,8	28,3	28,1
3	2,04	0,4	26,2	27,5	26,8
4	2,26	0,4	28,8	29,2	28,7

Fonte: Autor, 2010

**Figura 33 – Interação entre massa específica e o módulo de elasticidade**

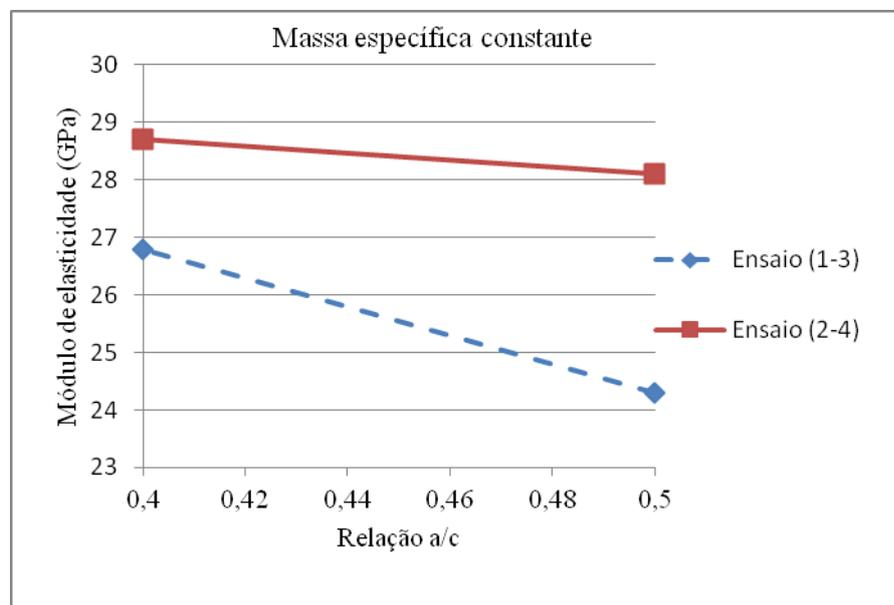


Fonte: Autor, 2010.

A Figura 33 é baseada nos valores da tabela 4.8 e na interação entre os ensaios 1-2 e 3-4. Para cada ensaio, uma das relações a/c foi mantida constante. Inicialmente foi realizado o ensaio 1-2 para medir o módulo de elasticidade dos concretos produzidos com os agregados

grãos reciclados, mantendo-se a relação a/c constante e igual a 0,5 e variando a massa específica de 2,04 g/cm<sup>3</sup> para 2,26 g/cm<sup>3</sup>. O valor do módulo de elasticidade médio aumentou em 3,8 GPa ou, em termos de porcentagem, 13%. Já para o ensaio 3-4, o concreto foi feito mantendo-se a relação a/c constante e igual a 0,4; aumentando a massa específica de 2,04 g/cm<sup>3</sup> para 2,26 g/cm<sup>3</sup> havendo um aumento no módulo de elasticidade médio de 1,9 GPa ou, em porcentagem, + 6,6%. Os resultados dos dois ensaios mostram que o valor do módulo de elasticidade varia de acordo com a massa específica dos agregados grãos, que, por sua vez, dependem do nível em que a relação a/c está.

**Figura 34 – Interação entre a relação a/c e o módulo de elasticidade**



Fonte: Autor, 2010.

A Figura 34 mostra a interação entre a relação a/c e o módulo de elasticidade. Para os ensaios 1-3 e 2-4 foi mantida constante uma das massas específicas de cada vez e fez-se variar as relações a/c de 0,4 para 0,5. Para o ensaio 1-3 foi mantida a massa específica do agregado grão reciclado constante e igual a 2,04g/cm<sup>3</sup>. Já relação a/c aumentou de 0,4 para 0,5 onde houve uma diminuição de 2,5 GPa, ou de aproximadamente 9,3%. Dando continuidade para realizar a última interação, ensaio 2-4, restando apenas um nível a ficar constante, a massa específica igual a 2,26 g/cm<sup>3</sup>, o resultado mostra que houve um pequeno aumento de 0,6 GPa.

Analisando os resultados acima é possível observar que o efeito de uma variável depende do nível de outra como ocorreu entre a massa específica e a relação a/c. Mesmo que

esse resultado seja muito pequeno, isto indica que quando duas variáveis interagem é possível calcular o efeito da interação entre ela (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2003).

#### ❖ Cálculo dos efeitos

Com os resultados obtidos da Tabela 25 e das ilustrações 30 e 31, pode-se perceber que tanto a variação da massa específica dos agregados graúdos reciclados quanto da relação a/c tiveram algum tipo de influência no módulo de elasticidade dos concretos em questão.

Para calcular o efeito **principal da massa específica** sobre o módulo de elasticidade será utilizada a equação 3.3. Usando a letra D para representar esse efeito, e  $\bar{y}_i$  representando a resposta média observada no i-ésimo ensaio, assim podemos escrever.

$$D = \frac{(28,1 + 28,7) - (24,3 + 26,8)}{2}$$

$$D = 2,85 \text{ GPa}$$

O valor da equação D (efeito principal da massa específica), indica um efeito positivo sobre o módulo de elasticidade que aumenta 2,85 GPa, em média, quando a massa específica aumenta de 2,04g/cm<sup>3</sup> para 2,26 g/cm<sup>3</sup>.

O cálculo do efeito **principal da relação a/c** sobre o módulo de elasticidade será realizado utilizando a equação 3.5. Usando a letra C para representar esse efeito, e  $\bar{y}_i$  representando a resposta média observada no i-ésimo ensaio.

$$C = \frac{(28,7 + 26,8) - (24,3 + 28,1)}{2}$$

$$C = 1,55 \text{ GPa}$$

Pode-se observar que o efeito principal da relação a/c é positivo, ou seja, quando a relação a/c aumenta de 0,4 para 0,5 o módulo de elasticidade aumenta em média 1,55 GPa.

Caso não houvesse interação, o efeito da massa específica do agregado reciclado deveria ser o mesmo para a relação a/c, porém, a situação não é esta. É possível tomar a diferença entre as duas como uma média da interação entre os fatores D e C.

Já o **efeito de interação** entre ambos os efeitos sobre o módulo de elasticidade será calculado de acordo com a equação 3.6

$$DC = \frac{(28,7 - 26,8) - (28,1 - 24,3)}{2}$$

$$DC = -0,95 \text{ GPa}$$

#### ❖ Estimativa do erro experimental

A Tabela 25 mostra os resultados da variância 1ª moldagem e réplica de todos os ensaios do módulo de elasticidade.

**Tabela 25– Variância dos ensaios individuais para o módulo de elasticidade.**

(GPa)	ensaio 1	ensaio 2	ensaio 3	ensaio 4
1ª moldagem	24,7	27,8	26,2	28,8
Réplica	23,9	28,3	27,5	29,2
Variância	0,32	0,1	0,84	0,08

Fonte: Autor, 2010

Os ensaios da Tabela 24 foram realizados em duplicata para que fosse possível ter uma maneira de estimar o erro experimental, e a partir daí avaliar a significância estatística dos efeitos. Para isso, era necessário que as duplicatas fossem repetições autênticas, isto é a realização pela segunda vez, de todas as etapas, desde, a limpeza dos corpos de prova até os ensaios de resistência à compressão.

Utilizando os valores variâncias de cada resultado das combinações, é possível determinar a variância experimental dos ensaios equação 4.5.

$$s^2 = \frac{(2 - 1) \times 0,32 + (2 - 1) \times 0,1 + (2 - 1) \times 0,84 + (2 - 1) \times 0,08}{(2 - 1) + (2 - 1) + (2 - 1) + (2 - 1)}$$

$$s^2 = 0,34 \text{ GPa}$$

Com o valor da variância é possível determinar o desvio padrão associado às observações, tirando a raiz quadrada desse valor, obtém – se a estimativa, com quatro graus de liberdade, equação 3.6.

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{0,34} = 0,58 \text{ GPa}$$

Uma vez que o erro padrão de um efeito é a raiz quadrada da metade da variância experimental, deve ser usada a metade, porque os efeitos são calculados com os valores médios de duas determinações (equação 3.9).

$$s(\text{efeito}) = \sqrt{\frac{s^2}{2}} = \sqrt{\frac{0,34}{2}} = 0,41 \text{ GPa}$$

A Tabela 26 contém os resultados da análise dos dados da tabela 22, incluindo a resistência a compressão média global, que também é uma combinação linear de todas as observações.

**Tabela 26 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial 2<sup>2</sup> da tabela 4.10.**

Média global	26,9 ± 0,21 GPa
<b>Efeitos principais</b>	-
D	2,85 ± 0,41 GPa
C	1,55 ± 0,41 GPa
<b>Efeitos de interação</b>	-
DC	-0,95 ± 0,41 GPa

Fonte: Autor, 2010.

Com o erro padrão de um efeito pode-se construir intervalos de confiança para os valores dos efeitos, usando a distribuição de Student (equação 3.10):

Para decidir quais, dos efeitos calculados, são significativamente diferente de zero, e portanto possuidores de méritos para interpretação. A equação de Student considera estatisticamente significativo, com 95% de confiança, um efeito cujo valor absoluto for superior a:

$$t_{\alpha} \times s(\text{efeito}) = 2,776 \times 0,41 = 1,14 \text{ GPa}$$

Aplicando este critério aos valores da Tabela 26 com os efeitos. Apenas a massa específica produziu efeito significativo nos resultados no ensaio do módulo de elasticidade. Enquanto que os efeitos da relação a/c dos agregados graúdos e o efeito da interação entre ambos os fatores não puderam ser considerados significativos, logo foram desprezados. Um detalhe sobre a interação entre ambos os efeitos é que o resultado foi zero para este efeito.

#### ❖ Modelo estatístico

Entre os vários modelos que foram testados e o que apresentou melhores resultados foi o da equação 4.2, O modelo apresentou um erro padrão estimado de 0,94 GPa, coeficiente de correlação inicial  $R^2 = 92,1\%$  e coeficiente de correlação ajustado  $Ra^2 = 76,3\%$ .

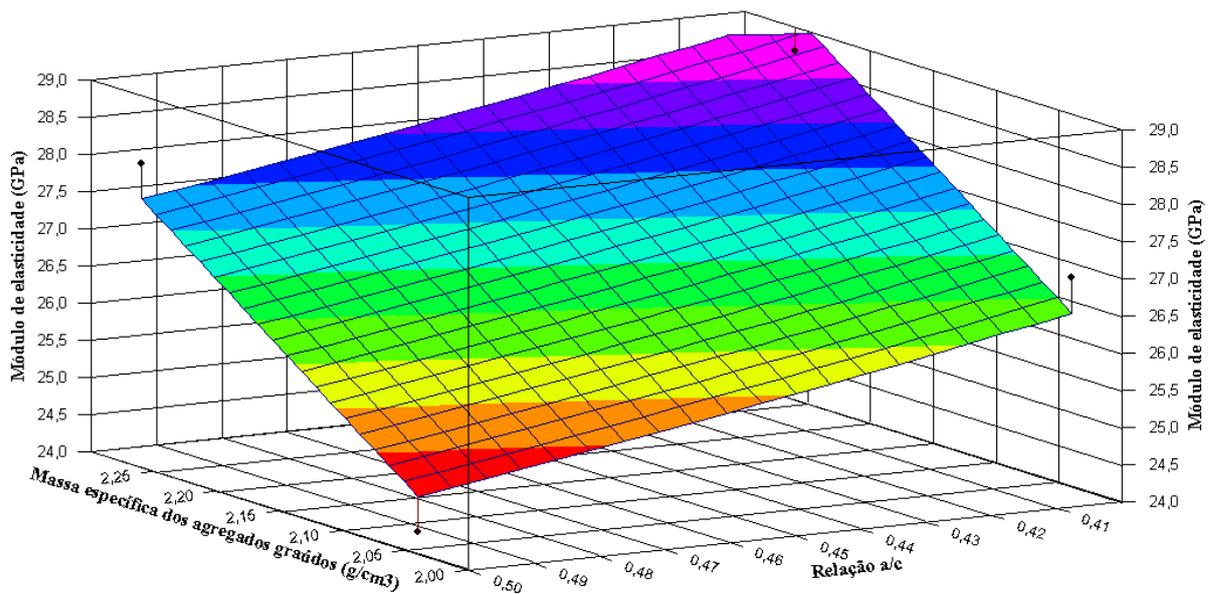
Com a utilização do programa chegou-se aos seguintes parâmetros amostrais:

$$b_0 = -6,46; b_1 = 12,95; b_2 = -6,94; b_{12} = 0;$$

$$y(x_1, x_2) = -6,46 + 12,95x_1 - 6,94 \ln(x_2) \quad \text{Equação 4.2}$$

### ❖ Superfície de resposta

Figura 35– Superfície de resposta para o módulo de elasticidade



Fonte: Autor, 2010.

É possível observar a influência da massa específica sobre o módulo de elasticidade na superfície de resposta Figura 35. O resultado de menor valor para o módulo de elasticidade ocorreu para a combinação entre a massa específica do AGR que é a menor com o maior fator a/c 0,5. Os maiores valores para o módulo foram registrados para as combinações que possuíam a maior massa específica, o aumento da inclinação da superfície mostra o crescimento do módulo de elasticidade quando houve diminuição na relação a/c, chegando até o maior valor para a combinação que ocorreu com a massa específica do agregado de concreto

com a menor relação a/c. Também é possível observar uma pequena dispersão dos pontos que aparecem nas extremidades da superfície.

#### 4.3.2. Para idade de 240 dias

No estado endurecido, aos 240 dias de idade, foram realizados os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

##### 4.3.2.1 Resistência à compressão

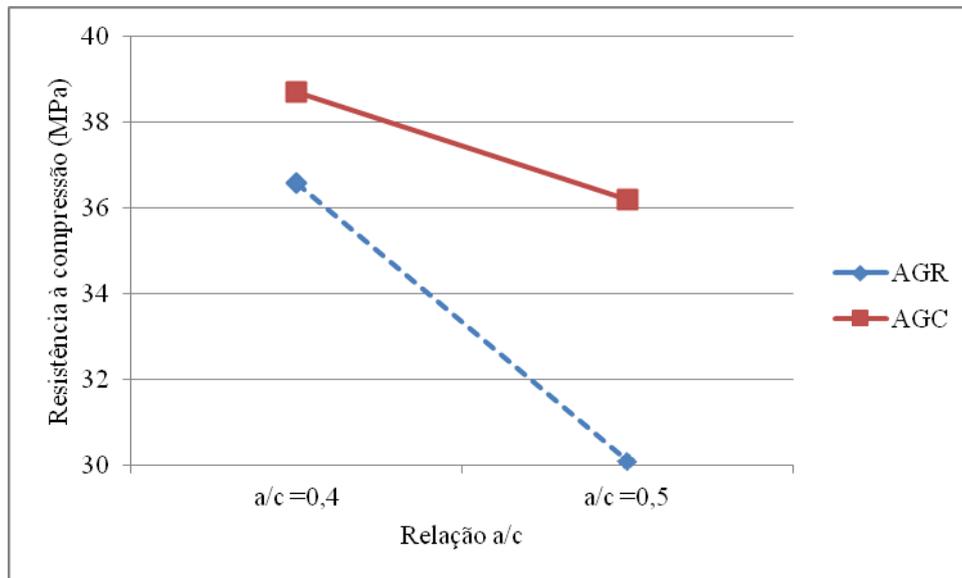
A Tabela 27 mostra os valores da resistência à compressão para os concretos com idades de 240 dias.

**Tabela 27– Resistência à compressão para idade de 240 dias.**

Concretos	$f_c$ (MPa)		
	1° CP	2° CP	Média
50 Ref	33,2	30,9	32,1
50 AGR	28,4	31,8	30,1
50 AGC	35,9	36,4	36,2
40 Ref	42,0	47,8	44,9
40 AGR	36,0	37,7	36,6
40 AGC	40,0	37,4	38,7

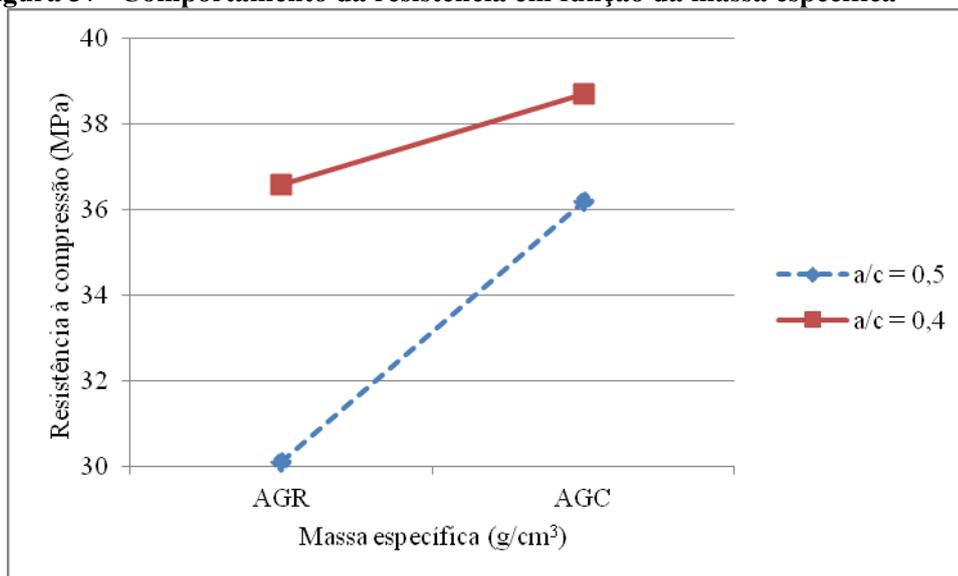
Fonte: Autor, 2010.

Os concretos produzidos com relação a/c igual a 0,5 tiveram a resistência à compressão média de próximas ou superiores ao concreto de referência. Já os concretos feitos com relação a/c igual a 0,4 tiveram valores menores que o seu concreto de referência. O melhor desempenho entre os concretos produzidos com agregados reciclados, quando comparados ao seu concreto de referência, foi obtido para relação a/c igual a 0,5. Uma possível causa para este ganho pode estar no fato da argamassa ser mais porosa e com isso permitir uma melhor aderência entre a argamassa e os agregados.

**Figura 36– Comportamento da resistência em função da relação a/c.**

Fonte: Autor, 2010.

A Figura 36 mostra a influência da relação a/c sobre a resistência à compressão mantendo fixa a massa específica dos concretos. Para ambos os concretos produzidos com agregados reciclados, o aumento da relação a/c causou uma diminuição na resistência à compressão. Esse comportamento segue o mesmo padrão para a idade de 28 dias analisada no experimento fatorial. Para o concreto feito com AGR, houve uma diminuição de aproximadamente 17% no valor da resistência. Já para os concretos produzidos com AGC, a redução da resistência foi bem menor: apenas 6,4%. Isso mostra que os concretos produzidos com agregados mais densos foram menos suscetíveis ao aumento da relação a/c.

**Figura 37– Comportamento da resistência em função da massa específica**

Fonte: Autor, 2010.

A Figura 37 mostra o comportamento dos concretos quando ocorre aumento na massa específica. Para a relação a/c igual a 0,5, o aumento foi de 6,1 MPa ou 20,3%; para a relação a/c igual a 0,4, foi de 2,1 MPa ou 5,7%. Através dos resultados, é possível perceber que os concretos produzidos com a menor relação a/c foram menos sensíveis à variação da massa específica. Já os concretos produzidos com maior relação a/c tiveram um ganho superior na resistência à compressão. Entre as possíveis causas para esta melhora pode estar o fato de que com o aumento da relação a/c a pasta fica mais porosa. Junte-se a isso a própria rugosidade dos agregados graúdos reciclados e a maior porosidade dos AGR com a argamassa aderida ao AGC. A soma desses fatores pode trazer benefícios para a resistência à compressão.

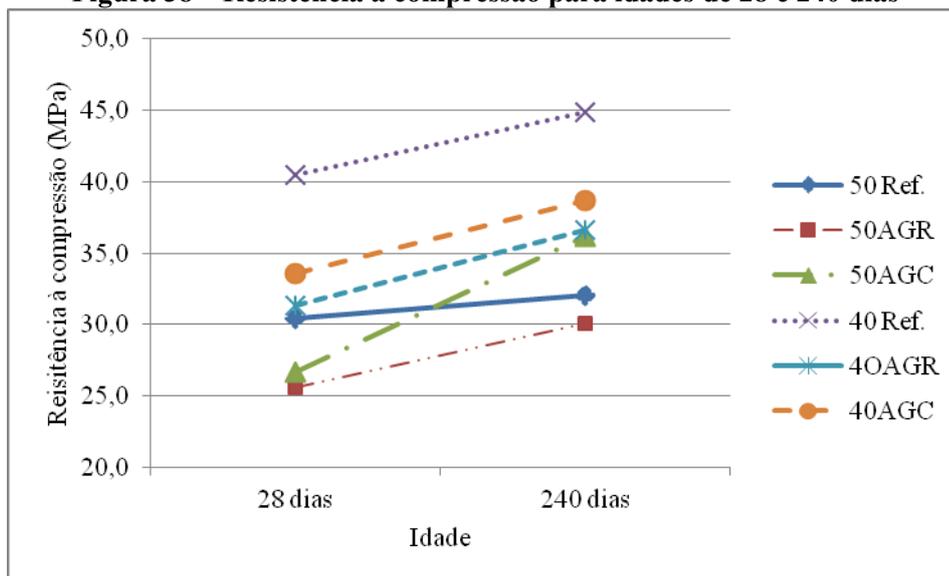
**Tabela 28– Resistência à compressão para idades de 28 e 240 dias.**

Concretos	$f_c$ (MPa)	
	28dias	240 dias
50 Ref	30,4	32,1
50AGR	25,6	30,1
50AGC	26,7	36,2
40 Ref	40,5	44,9
40AGR	31,3	36,6
40AGC	33,6	38,7

Fonte: Autor, 2010.

Os resultados contidos na Figura 37 mostram que a resistência à compressão dos concretos reciclados foram maiores para aqueles concretos produzidos com agregados graúdos de maior massa específica, ou seja, os que possuem menor porosidade e conseqüentemente maior resistência (agregados graúdos de concreto). Este comportamento também ocorreu nas pesquisas de Carrijo (2005) e Tenório (2007).

**Figura 38 – Resistência à compressão para idades de 28 e 240 dias**



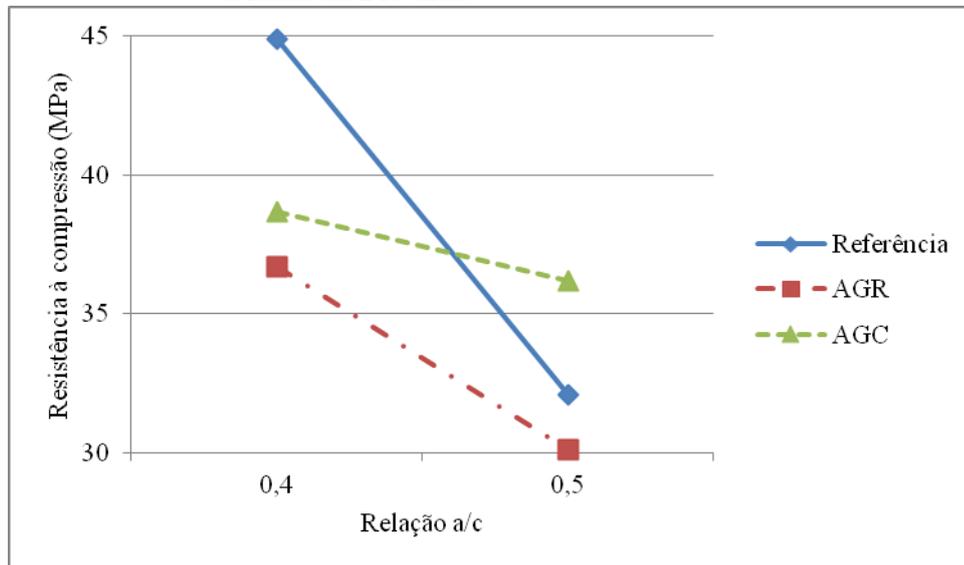
Fonte: Autor, 2010..

Dentre os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados, o que teve a maior inclinação da reta foi o concreto 50 AGC (Figura 38). Uma explicação plausível para este comportamento é que o concreto em questão possui o agregado graúdo mais denso, ou seja, menos poroso, e a argamassa aderida aos agregados pode ter melhorado as características da zona de transição. A junção desses fatores propiciou um ganho de resistência maior que seu concreto de referência. É possível ainda verificar a influência negativa que a relação a/c exerce sobre a resistência à compressão quando comparados os concretos 40 AGC e 50 AGC. A única diferença entre estes concretos está na relação a/c, que aumentou de 0,4 para 0,5. Com isso, o ganho de resistência foi significativamente menor; a diferença pode estar na pasta de cimento que ficou mais porosa.

Através da Figura 39 é possível observar que a resistência à compressão do concreto diminuiu, à medida que a relação a/c aumentou, comprovando mais uma vez que a resistência à compressão é inversamente proporcional à relação a/c, fato este bastante conhecido no meio

científico. Uma possível causa para a redução da resistência é o enfraquecimento contínuo da matriz de concreto devido ao aumento da porosidade.

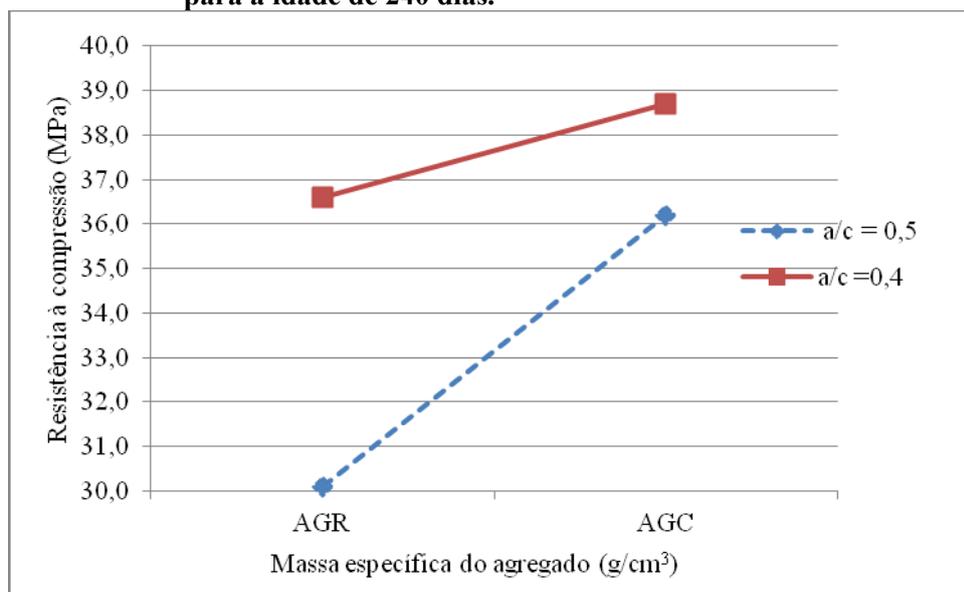
**Figura 39 – Resistência à compressão em função da relação a/c para a idade de 240 dias.**



Fonte: Autor, 2010.

Na Figura 40 é apresentado o comportamento da resistência à compressão dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados em função da massa específica.

**Figura 40– Resistência à compressão em função da massa específica para a idade de 240 dias.**



Fonte: Autor, 2010

Na Figura 39, percebe-se que os concretos cuja relação a/c foi igual a 0,4 a substituição do AGR pelo AGC proporcionou um aumento de aproximadamente 5,7% na resistência à compressão. No caso da relação a/c igual a 0,5, a mesma troca proporcionou um aumento de aproximadamente 20%.

A substituição dos agregados de menor massa específica pelos de maior foi mais sensível para os concretos de menor relação a/c (Figura 40). As inclinações dos segmentos de reta demonstram este comportamento. De acordo com Tenório (2007), as relações a/c baixas tendem a ser mais influenciadas pela alteração da massa específica/porosidade do agregado graúdo, demonstrando que a baixas relações a/c é o agregado que passa a ser a fase limitante da resistência.

A Tabela 26 descreve o comportamento da ruptura dos agregados reciclados após os ensaios de resistência à compressão. Todos os concretos foram rompidos completamente. Os corpos-de-prova possuíam a idade de 240 dias. Entre todos os corpos-de-prova rompidos no ensaio de resistência à compressão apenas um dos corpos-de-prova teve a ruptura do tipo cônica e cisalhada (40AGC); os demais apresentaram ruptura do tipo cônica e bipartida e cônica com mais de uma partição.

**Tabela 29 – Observações quanto à ruptura dos agregados reciclados nos corpos-de-prova do ensaio de resistência à compressão.**

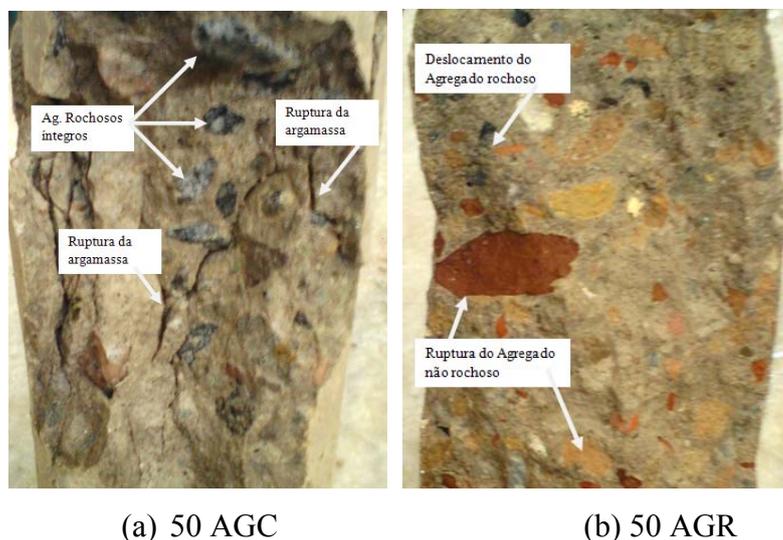
Concretos	Agregados reciclados
50AGR	Rochas deslocadas, rochas rompidas e não rochosos rompidos
50AGC	Rochas deslocadas e rochas rompidas
40AGR	Rochas rompidas e deslocamentos dos não rochosos
40AGC	Rochas rompidas e deslocamentos de rochas

**Fonte: Autor, 2010.**

As informações contidas na Tabela 30 mostram uma diferença na ruptura dos corpos-de-prova quando a relação a/c é alterada. Para os concretos com relação a/c igual a 0,5 e que possuíam agregados de concreto, Figura 41 (a), a ruptura ocorreu predominantemente na argamassa e os agregados permaneceram íntegros em sua maioria e outros foram deslocados, o que mostra que a pasta foi menos resistente que os agregados. Já para os concretos que possuíam agregados de RCD, Figura 40 (b), a ruptura ocorreu predominantemente nos

agregados não rochosos (cerâmicas e argamassas) que possuem menor resistência ou mesmo próxima a resistência da pasta.

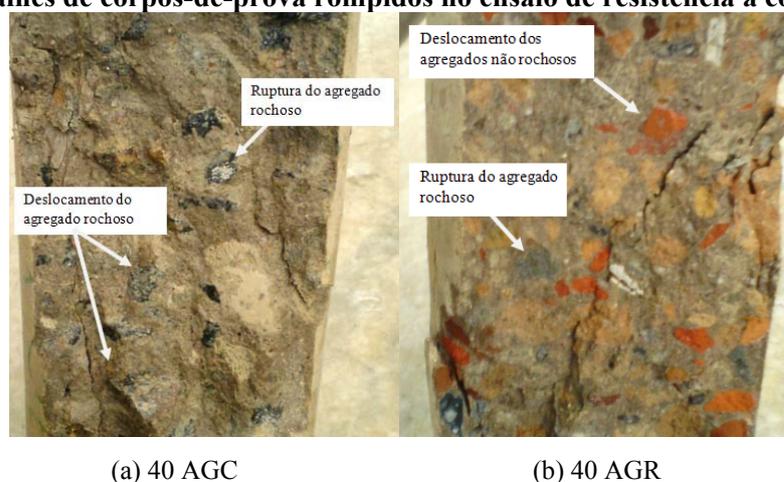
**Figura 41 – Detalhes de corpos-de-prova rompidos no ensaio de resistência à compressão**



Fonte: Autor. Acervo Pessoal, 2010.

Para a relação a/c igual a 0,4, nos concretos que possuíam agregados de concreto (Figura 42a) houve ruptura dos agregados rochosos e deslocamentos dos mesmos. Para os concretos com agregados de RCD (Figura 42b), houve deslocamentos e rupturas dos agregados não rochosos e também rupturas dos agregados rochosos. Isso mostra que a pasta apresentou uma maior resistência.

**Figura 42 – Detalhes de corpos-de-prova rompidos no ensaio de resistência à compressão**



Fonte: Autor. Acervo Pessoal, 2010.

#### 4.3.2.2 Módulo de elasticidade

A Tabela 30 mostra os valores dos ensaios do módulo de elasticidade para a idade de 240 dias. Como é possível observar, para os concretos de referência apenas um corpo-de-prova foi ensaiado a fim de que o mesmo servisse apenas como referência para os demais.

Entre todos os concretos preparados com agregados reciclados, o que apresentou melhor resultado para o módulo de elasticidade quando comparado ao seu concreto de referência foi o 40AGC, chegando a atingir 79,1% do valor do módulo de seu concreto de referência. Entre as características deste concreto está o baixo fator  $a/c = 0,4$  e o fato de ser composto por agregados graúdos de concreto que possuem muitas vezes argamassas aderidas aos mesmos. Essa argamassa pode propiciar uma melhor aderência devido a sua porosidade.

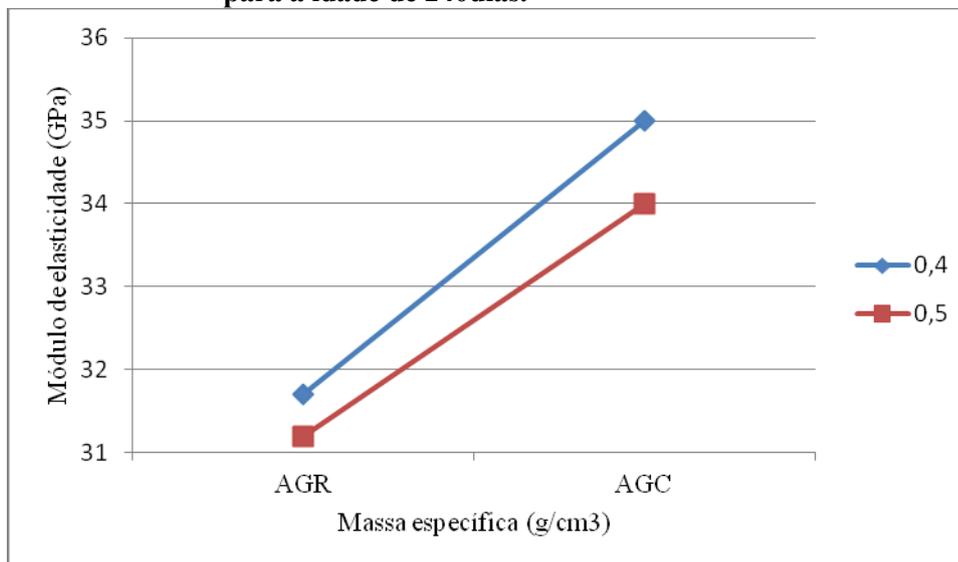
**Tabela 30 – Módulo de elasticidade para idade de 240 dias.**

Concretos	Eci (GPa)			
	CP1	CP2	CP3	Média
50 Ref	43,4	-	-	43,4
50AGR	33,3	31,3	28,9	31,2
50AGC	32,9	35,0	34,2	34,0
40 Ref	44,4	-	-	44,4
40AGR	29,6	32,8	32,8	31,7
40AGC	32,8	34,8	37,6	35,1

Fonte: Autor, 2010,

Analisando os valores do módulo de elasticidade através da Figura 438, inicialmente para relação  $a/c$  igual a 0,5 e variando a massa específica do AGR para AGC, o valor do módulo de elasticidade aumentou em 2,8 GPa, ou 8,9%. Fazendo a mesma análise para o fator  $a/c = 0,4$ , o aumento no módulo foi de 3,4 GPa, o que equivale a 10,7%. Mesmo para idades avançadas, é possível perceber o efeito positivo que a massa específica continua exercendo sobre o módulo de elasticidade mesmo em idades avançadas.

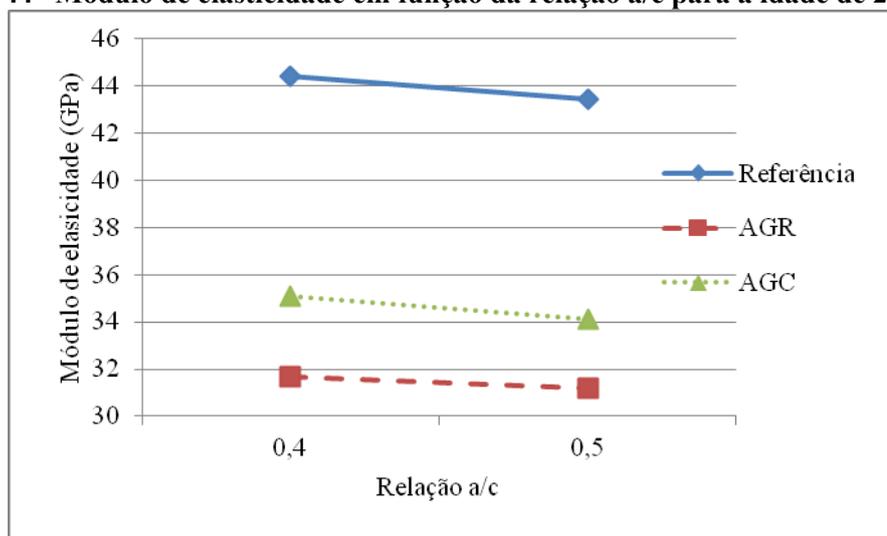
**Figura 43 – Módulo de elasticidade em função da massa específica para a idade de 240 dias.**



Fonte: autor, 2010.

Na Figura 44 apresenta-se o comportamento do módulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados para cada uma das relações a/c.

**Figura 44– Módulo de elasticidade em função da relação a/c para a idade de 240 dias**



Fonte: Autor, 2010.

Analisando a influência da relação a/c no comportamento do módulo de elasticidade para a idade de 240 dias (Figura 44), é possível constatar o efeito negativo que a relação a/c

exerce sobre o módulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados quando se aumenta essa relação.

Aumentando-se a relação a/c, ocorreu um decréscimo no valor do módulo de elasticidade tanto para os concretos produzidos com agregados reciclados como para os concretos produzidos com agregados naturais. Para Leite (2001), este comportamento ocorre porque quanto maior for a relação a/c menor será a quantidade de cimento nas misturas para se combinar com a água existente. Dessa forma, aumenta-se a porosidade do concreto e, conseqüentemente, diminui o módulo de elasticidade.

Pelos segmentos de retas obtidos nas duas últimas Figuras 43 e 44, é possível perceber que a massa específica teve uma maior influência sobre o módulo de elasticidade que a relação a/c. Nos dois casos, os resultados das propriedades estão de acordo com o experimento fatorial para a idade de 28 dias.

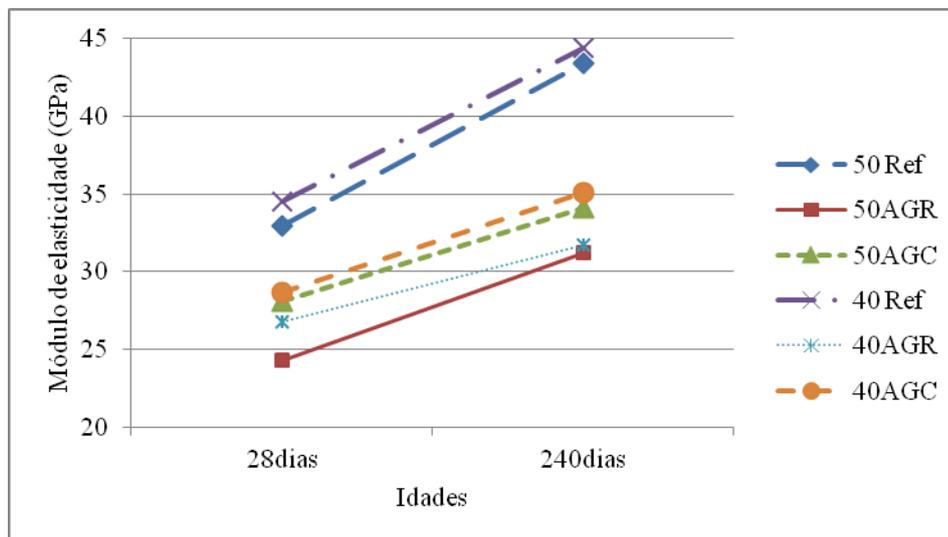
Na Tabela 31 são apresentados os valores para o módulo de elasticidade tangente ( $E_{ci}$ ) para as idades de 28 dias e 240 dias. Os resultados que seguem na tabela foram compostos da seguinte maneira: 2ª coluna, a média entre a 1ª moldagem e a replica; 3ª coluna, resultado dos ensaios para idades avançadas. Estes valores são comparados graficamente na Figura 40.

**Tabela 31 – Módulo de elasticidade aos 28 dias e 240 dias.**

Módulo de elasticidade (GPa)		
Concretos	28dias	240dias
50 Ref	33,0	43,4
50 AGR	24,3	31,2
50 AGC	28,1	34,0
40 Ref	34,5	44,4
40 AGR	26,8	31,7
40 AGC	28,7	35,1

Fonte: Autor, 2010.

**Figura 45– Gráfico da evolução do módulo de elasticidade ao longo do tempo.**



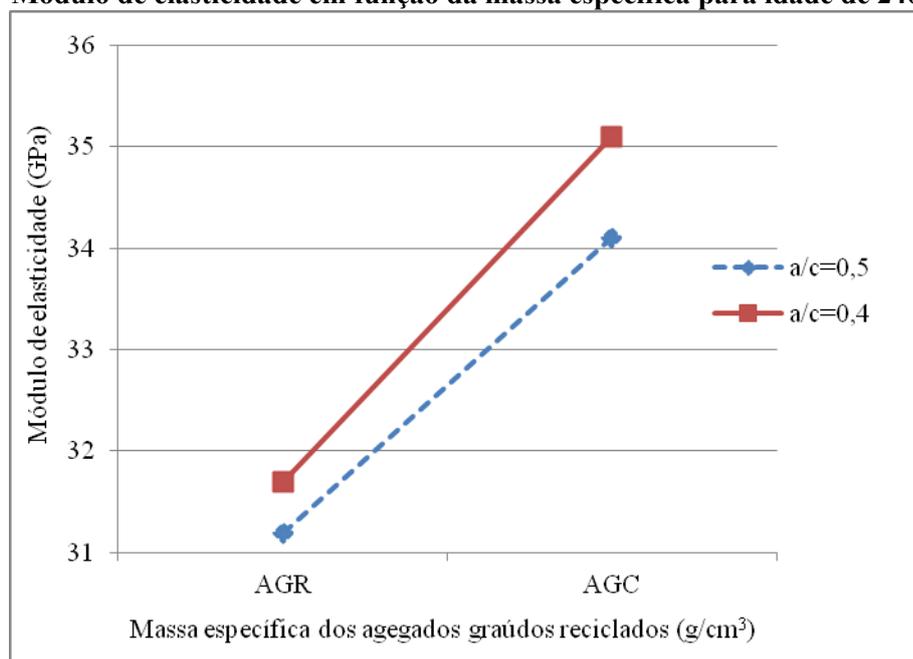
Fonte: Autor, 2010,

Através dos valores da Tabela 31 e por meio do gráfico (Figura 45), é possível observar que os AGR exercem uma influência negativa sobre o módulo de elasticidade, diferentemente de alguns resultados da resistência à compressão. Todas as inclinações das retas dos concretos produzidos com AGR foram menores que as dos seus concretos de referência, indicando assim um crescimento menor do módulo de elasticidade.

Além disso, outras características podem ser notadas. Primeiro, o módulo de elasticidade aumentou com a idade, independentemente de qual agregado graúdo foi utilizado; segundo, o módulo teve maiores valores para os concretos produzidos com agregados de maior massa específica e, terceiro, o módulo de elasticidade apresentou resultados mais altos para os concretos produzidos com a menor relação a/c. De acordo com as afirmações acima, mesmo utilizando agregados graúdos reciclados os resultados foram coerentes se comparados a concretos confeccionados com agregados graúdos naturais.

Na Figura 45, é mostrado o comportamento do módulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados para cada uma das relações a/c em função da massa específica do agregado graúdo reciclado.

**Figura 46 – Módulo de elasticidade em função da massa específica para idade de 240 dias**



Fonte: Autor, 2010.

Analisando a influência da massa específica no comportamento do módulo de elasticidade para a idade de 240 dias (Figura 46), é possível constatar o efeito benéfico que a massa específica exerce sobre o módulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados, o que vem a confirmar o experimento fatorial.

À medida que houve um aumento da massa específica dos agregados reciclados de  $2,04 \text{ g/cm}^3$  para  $2,26 \text{ g/cm}^3$ , houve um ganho no valor do módulo de elasticidade, já que os agregados de menor massa específica possuem como característica inerente uma maior porosidade. Além disso, muitas vezes os agregados possuem argamassas aderidas, aumentando ainda mais o efeito negativo.

Outra característica que pode ser observada na Figura 46, é o comportamento semelhante entre os dois segmentos de reta, onde cada um representa uma relação a/c. No entanto, pode-se perceber que o aumento no valor do módulo de elasticidade foi mais sensível à massa específica do que à relação a/c dos concretos. Estes resultados estão de acordo com os trabalhos de Carrijo (2001) e Tenório (2007).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

Este trabalho teve como foco analisar o módulo de elasticidade tanto na idade de 28 dias através um planejamento fatorial  $2^2$  e também avaliar esta propriedade na idade de 240 dias. Foram utilizados dois tipos de agregados graúdos reciclados e duas relações a/c, este trabalhou contemplou também uma análise da resistência à compressão mesmo esta propriedade não fazendo parte da análise principal.

### 5.1. Análise dos resultados

A partir dos resultados obtidos através tanto da parte experimental quanto do planejamento fatorial, foi possível obter as seguintes conclusões:

O planejamento fatorial  $2^2$  para a idade de 28 dias – tendo como variável dependente o módulo de elasticidade e variáveis independentes a massa específica e a relação a/c – permitiu observar que apenas a massa específica dos agregados graúdos reciclados exerceu influência sobre esta propriedade mecânica do concreto. Ainda foi possível determinar um modelo estatístico que analisa o efeito conjunto entre as duas variáveis independentes sobre o módulo de elasticidade. Por outro lado, tendo como variável dependente a resistência à compressão e variáveis independentes a massa específica e a relação a/c, o planejamento fatorial  $2^2$  para a mesma idade identificou que somente a relação a/c influenciou de maneira significativa a resistência à compressão. Do mesmo modo foi possível determinar um modelo estatístico que avalia-se o efeito conjunto entre as variáveis independentes sobre a resistência à compressão.

Neste estudo em particular, a propriedade mecânica do concreto módulo de elasticidade revelou-se sensível à massa específica dos agregados graúdos. Porém, a avaliação que pode ser realizada para os concretos de idade avançada é positiva, pois os agregados graúdos não comprometeram os resultados. Já a resistência à compressão mostrou-se mais sensível à relação a/c, e os resultados para a idade de 240 dias mostram que os concretos produzidos com agregados graúdos foram tão bons quanto os de referência. Dessa forma, os resultados mostram a possibilidade de utilizar os agregados graúdos em concretos estruturais.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Em uma única pesquisa é difícil avaliar todas as variáveis que influenciam o módulo de elasticidade, principalmente porque essa propriedade mecânica do concreto é muito sensível a vários fatores. Outros trabalhos podem contribuir para o aprofundamento nesse assunto. Assim, apresentam-se sugestões para trabalhos futuros:

- ✓ Avaliar o módulo de elasticidade para diferentes teores de substituição parcial dos agregados graúdos;
- ✓ Estudar o módulo de elasticidade de concretos produzidos com agregados graúdos utilizando resíduos de origens diferentes, como construção, reforma, demolição e resíduos provenientes apenas de concreto;
- ✓ Investigar o comportamento do módulo de elasticidade, a partir de concretos produzidos com agregados graúdos cominuídos em equipamentos diferentes e verificar o experimento através do planejamento fatorial.

## REFERÊNCIAS

---

ÂNGULO, S. C. **Características de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Disponível em <<http://www.teses.usp.br>>. Acesso em: 2010.

AGUILAR, M. T. P. et al. Análise da capacidade de deformação do concreto: módulo de young x módulo de deformação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: agregado, redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2000.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: Agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46**: Agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53**: Agregado graúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente e a absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67**: Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Modelagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 7809**: Agregado graúdo: determinação do índice de forma pelo método do paquímetro: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**: Concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco: determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578**: Cimento Portland composto: especificações. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768**: Aditivo para concreto de cimento Portland: especificações. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: execução de camadas em pavimentação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 15116**, Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concretos sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. Campinas: Editora UNICAMP, 2003.

BERR, F. P.; JOHNSTON JUNIOR, E. R. **Resistência dos materiais**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

BICCA, I. da S. **Estudo da viabilidade de utilização do rejeito cerâmico, como agregado graúdo, na produção de concreto com características estruturais**. 2000. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto**: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. 2003. 199f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.

CARRISCO, R. C. C.; CORREIA, J. C. G. **Classificação e peneiramento**. In: LUZ, A. B. da. et al. M de, **Tratamento de minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. Cap. 5.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº. 307, de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, nº 136, 17 jul. 2002. Seção 1, p. 95-96.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In; ISAIA, G. (Org.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. v.1, p. 1-31.

DUART, M. A. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz sem beneficiamento**. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

FERREIRA, P. V. **Estatística experimental aplicada à agronomia**. 3. ed. Maceió: EDUFAL, 2000.

FIGUEIRA, H. V. de O.; ALMEIDA, S. L. M de; LUZ, A. B. da. Comunicação. In: LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M de. **Tratamento de minérios**. 4. ed. rev. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutural**: tópicos aplicados. São Paulo: PINI, 2008.

GOMES, P. C. C. et al. **Projeto desentulho para a cidade de Maceió**. Maceió: SEBRAE, FUNDEPES, UFAL, 2005. Relatório Técnico.

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

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física, cinemática, dinâmica e estática**. 4. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1996. v.1.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos de construção**. 2000. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br>. Acesso em: 11 abr. 2009.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. São Paulo, 2001. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LIMA, J. A. R. de. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduos da construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 240 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1999.

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

MELO NETO, A. A. de; HELENE, P. R. do L. Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., Belo Horizonte, 2002. **Anais...** Belo Horizonte: IBRACON, 2002. CD-ROM.

METHA; P. K.; MONTEIRO; P. J. M. **Concreto, microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON, 2008. p. 674.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N. F. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

MONY, L. S.; LAGO, H. P. R. Utilização de agregados de concreto para produção de novos concretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48., Rio de Janeiro, RJ, 2006. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006. CD-ROM.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

OLIVEIRA, M. J. E. de. Agregado reciclado empregado na produção de concreto modificado com aditivo. **Exacta**, São Paulo, v. 4, n. especial, p. 15-24, 25 de nov. 2006.

PELISSER, F.; TAVARES; G. J.; SILVA, D. dos S. da. Análise do comportamento de concretos, fabricados com agregados reciclados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48., Rio de Janeiro, RJ, 2006. **Anais...** Rio de Janeiro, IBRACON, 2006. CD-ROM.

PRADO, L. de A. **Módulo de deformação estático do concreto de baixa e alta relação A/C pelo método ultra – sônico.** Dissertação. 2006. 226 f. (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2006.

RODRIGUES, G. S. S.; FIGUEIREDO, E. J. P. Módulo de deformação do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., Olinda, 2005. **Anais...** Olinda,: IBRACON, 2010. CD-ROM.

SOUZA, P. S. L.; MARIZ; R. N.; SANTIAGO, T. da S. Análise das propriedades de concreto com agregado produzidos com resíduos de construção e demolição da região de Belém. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., Fortaleza, 2010. **Anais...** Fortaleza: IBRACON, 2010. CD-ROM.

SHEHATA, L. D. **Deformações instantâneas do concreto.** São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção demolição visando aplicações estrutu-rais.** 2007. 138 f. (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

ULSEN, C. **Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição.** 2006. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2006.

VASCONCELOS, A. C.; SALVADOR, E. G. **O misterioso módulo de elasticidade.** Disponível em: <<http://www.tqs.com.br>> Acesso em: 10 jun. 2010.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**, 13. ed. E. Blücher, 1970. p. 427.

VERONEZ, M. **Estudo da influência do tipo de aditivo superplastificante e de adição mineral no comportamento termo-mecânico dos concretos de alto desempenho**. 2006. 214 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

VIEIRA; G. L.; DAL MOLIN; D. C. C. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 4. p. 47-63, out./dez. 2004.

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